

# **Studien zum Physik- und Chemieselernen**

**M. Hopf, H. Niedderer, M. Ropohl, E. Sumfleth [Hrsg.]**

**335**

Christina Toschka

## **Lernen mit Modellexperimenten**

Empirische Untersuchung der Wahrnehmung  
und des Denkens in Analogien  
beim Umgang mit Modellexperimenten



λογος

# Studien zum Physik- und Chemielernen

Herausgegeben von Martin Hopf, Hans Niedderer, Mathias Ropohl und Elke Sumfleth

Diese Reihe im Logos Verlag Berlin lädt Forscherinnen und Forscher ein, ihre neuen wissenschaftlichen Studien zum Physik- und Chemielernen im Kontext einer Vielzahl von bereits erschienenen Arbeiten zu quantitativen und qualitativen empirischen Untersuchungen sowie evaluativ begleiteten Konzeptionsentwicklungen zu veröffentlichen. Die in den bisherigen Studien erfassten Themen und Inhalte spiegeln das breite Spektrum der Einflussfaktoren wider, die in den Lehr- und Lernprozessen in Schule und Hochschule wirksam sind.

Die Herausgeber hoffen, mit der Förderung von Publikationen, die sich mit dem Physik- und Chemielernen befassen, einen Beitrag zur weiteren Stabilisierung der physik- und chemiedidaktischen Forschung und zur Verbesserung eines an den Ergebnissen fachdidaktischer Forschung orientierten Unterrichts in den beiden Fächern zu leisten.

Martin Hopf, Hans Niedderer, Mathias Ropohl und Elke Sumfleth

*Studien zum Physik- und Chemielernen*

Band 335



Christina Toschka

## **Lernen mit Modellexperimenten**

Empirische Untersuchung der Wahrnehmung  
und des Denkens in Analogien  
beim Umgang mit Modellexperimenten

Logos Verlag Berlin



*Studien zum Physik- und Chemielernen*

Martin Hopf, Hans Niedderer, Mathias Ropohl und Elke Sumfleth [Hrsg.]

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.



© Copyright Logos Verlag Berlin GmbH 2022

Alle Rechte vorbehalten.

ISBN 978-3-8325-5495-8

ISSN 1614-8967

Logos Verlag Berlin GmbH  
Georg-Knorr-Str. 4, Geb. 10  
D-12681 Berlin

Tel.: +49 (0)30 / 42 85 10 90  
Fax: +49 (0)30 / 42 85 10 92  
<https://www.logos-verlag.de>

Jede Wahrnehmung der Wahrheit ist die Entdeckung einer Analogie.

*Henry David Thoreau*

(1817 – 1862)



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b><i>Einleitung</i></b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b><i>Grundlagen und Stand der Forschung</i></b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Analogien</b>	<b>3</b>
2.1.1	Definition des Begriffes Analogie	3
2.1.2	Denken in Analogien	7
2.1.3	Empirische Studien zum Umgang mit Analogien im Lehr-Lern-Kontext	11
<b>2.2</b>	<b>Modellexperimente</b>	<b>16</b>
2.2.1	Definition der Begriffe Modell, Original und Modellexperiment	16
2.2.2	Charakteristika von Modellexperimenten	21
2.2.3	Staubexplosion	22
<b>2.3</b>	<b>Synthese von Modellexperiment und Denken in Analogien am Beispiel Staubexplosion</b>	<b>28</b>
2.3.1	Modellexperiment	28
2.3.2	Charakterisierung	28
2.3.3	Denken in Analogien beim Umgang mit Modellexperimenten im Lehr-Lern-Kontext	31
2.3.4	Empirische Studien zum Lernen mit Modellexperimenten und deren Zusammenhang mit dem Denken in Analogien	33
<b>2.4</b>	<b>Visuelle Wahrnehmung</b>	<b>35</b>
2.4.1	Wahrnehmungsprozess	35
2.4.2	Stimulus als Grundlage der Wahrnehmung	37
2.4.3	Aufmerksamkeitssteuernde Faktoren	37
2.4.4	Gedächtnis	39
2.4.5	Unterstützung der Wahrnehmung im Lehr-Lern-Kontext	40
<b>3</b>	<b><i>Zielsetzung der Arbeit und Forschungsfragen</i></b>	<b>45</b>
<b>4</b>	<b><i>Methodisches Vorgehen</i></b>	<b>53</b>
<b>4.1</b>	<b>Das Forschungsdesign</b>	<b>53</b>
<b>4.2</b>	<b>Intervention</b>	<b>53</b>
<b>4.3</b>	<b>Erhebungsmethoden und -instrumente</b>	<b>57</b>
4.3.1	Fragebogen zur Erhebung des Vorwissens zum Themengebiet Verbrennungen und Explosionen	59
4.3.2	Eye-Tracking zur Erhebung von objektiven Wahrnehmungsdaten	63
4.3.3	Fragebögen zur Erhebung der Verarbeitung aufgenommener Informationen	76

4.3.4	Lautes Denken zur Erhebung des Denkens in Analogien	81
4.3.5	Kontrollvariablen	115
<b>4.4</b>	<b>Stichproben</b>	<b>116</b>
<b>4.5</b>	<b>Zusammenfassung der Datenauswertungsmethoden und weiterführende Analysen in SPSS</b>	<b>119</b>
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>121</b>
<b>5.1</b>	<b>Vorwissen</b>	<b>121</b>
5.1.1	Vergleich des spezifischen Vorwissens der Probandengruppen zur Charakterisierung des Leistungsspektrums	126
<b>5.2</b>	<b>Wahrnehmung des Modellexperiments</b>	<b>129</b>
5.2.1	Zusammenhang zwischen Informationsaufnahme und -verarbeitung	147
5.2.2	Ergebnis der Informationsverarbeitung differenziert nach Probandengruppen	149
<b>5.3</b>	<b>Denken in Analogien</b>	<b>152</b>
5.3.1	Mapping von Schüler*innen beim Umgang mit Modellexperimenten	152
5.3.2	Beschreibung des Originals als Ergebnis des Mappingprozesses (Ergebnis Mapping)	176
5.3.3	Anwendung von Erkenntnissen aus dem Mapping auf ein neues Original	180
<b>5.4</b>	<b>Wahrnehmung und Denkmuster beim Mapping</b>	<b>195</b>
<b>5.5</b>	<b>Wissenszuwachs</b>	<b>199</b>
<b>6</b>	<b>Diskussion der vorliegenden Studie</b>	<b>205</b>
<b>6.1</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>205</b>
<b>6.2</b>	<b>Diskussion des Erhebungsdesigns und der Erhebungsmethodik</b>	<b>228</b>
<b>7</b>	<b>Schulische Implikationen</b>	<b>235</b>
<b>7.1</b>	<b>Wahrnehmung</b>	<b>235</b>
<b>7.2</b>	<b>Denken in Analogien</b>	<b>236</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>241</b>
<b>8.1</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>241</b>
<b>8.2</b>	<b>Ausblick</b>	<b>251</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>257</b>
<b>10</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>277</b>

11	<i>Tabellenverzeichnis</i>	283
12	<i>Anhang</i>	287
12.1	Versuchsskripte des Schülerlaborprojektes <i>Feuer(löschen) im Schülerlabor</i>	287
12.2	Verlaufspläne der Vorerhebung und Intervention	298
12.3	Fragebogen zum Vorwissen	302
12.4	Musterlösung Vorwissensfragebogen	307
12.5	Leitfaden zur Instruktion vor der Präsentation des Videos beim Eye-Tracker	314
12.6	Vorversuch zum Modellexperiment <i>Staubexplosion</i>	315
12.7	Eye-Tracking Protokoll	316
12.8	Beobachtungs- und Verständnisfragebogen zur Wahrnehmung des Modellexperiments	318
12.9	Beispielhafte .txt-Ausgabedatei des Eye-Tracking Systems	323
12.10	Einführung der Methode <i>Lautes Denken</i>	326
12.11	Leitfaden für den Analogiedenkenprozess	328
12.12	Kategoriensysteme <i>Denken in Analogien</i>	329
12.13	Ergebnisse zum Vergleich der Stichprobengruppen <i>Video</i> und <i>Schüler*innenexperiment</i>	344
12.14	Ergebnisse weiterer Augenparameter	348
12.15	Ergebnisse zur Informationsverarbeitung	350
12.16	Analogie-Denkgraphen Mapping	354
12.17	Analogie-Denkgraphen Anwendung	403
12.18	Zusammenhänge zwischen den Bedingungen während der Anwendung	436
	<i>Danksagung</i>	437



## **Abkürzungsverzeichnis**

<b>AOI</b>	areas of interest
<b>bzgl.</b>	bezüglich
<b>CU</b>	Chemieunterricht
<b>d.h.</b>	das heißt
<b>ebd.</b>	ebenda
<b>LC-HA</b>	Low-Cost-Hartmann Apparatur
<b>M</b>	Modellexperiment
<b>ms</b>	Millisekunde/n
<b>MSW</b>	Ministerium für Schule und Weiterbildung
<b>MSB</b>	Ministerium für Schule und Bildung
<b>NRW</b>	Nordrhein-Westfalen
<b>O</b>	Original
<b>O<sub>1</sub></b>	Original 1 – Mehlstaubexplosion in der Bremer Rolandmühle
<b>O<sub>2</sub></b>	Original 2 – Aluminiumstaubexplosion
<b>s</b>	Sekunde/n
<b>SE-Gruppe</b>	Schüler*innenexperiment-Gruppe
<b>u.a.</b>	unter anderem
<b>V-Gruppe</b>	Video-Gruppe
<b>vs.</b>	versus
<b>z.B.</b>	zum Beispiel



## I Einleitung

Im Chemieunterricht können Analogien (Ähnlichkeiten) den Lernenden helfen, Erkenntnisse über chemische Sachverhalte und Prozesse (Originale), die in der Natur oder Industrie vorkommen, zu gewinnen. Häufig sind diese Originale aufgrund bestimmter Gründe für Lernende unanschaulich, zu abstrakt oder nicht direkt zugänglich. Zusätzlich können die originalen Prozesse auch aufgrund ihrer Komplexität, ihres räumlichen Ausmaßes sowie spezifischer sicherheitsrelevanter Eigenschaften nur schwer als Experimente im Labor unter realen Bedingungen durchgeführt werden. Daher werden insbesondere für solche schwer zugänglichen Originale (allgemein: Bereiche) häufig Analogien zu anderen Bereichen, welche weniger komplex sind und den Lernenden vertrauter oder sogar bereits bekannt sind, hergestellt (vgl. Duit, Roth, Komorek & Wilbers, 2001).

Diese Bereiche werden im Chemieunterricht u.a. durch materielle Modelle, Gedankenmodelle, Analogiegeschichten, Simulationen und Modellexperimente repräsentiert. Modellexperimente sind dabei besonders interessant, da sie durch das Experiment als zentrales Medium im Chemieunterricht eine enge Brücke zu einem originalen chemischen Prozess bilden. Gleichzeitig weisen Modellexperimente schon aufgrund ihrer Genese Ähnlichkeiten zu einem Original auf. Damit bei der Verwendung von Modellexperimenten im Chemieunterricht Erkenntnisse von Lernenden über ein Original effektiv gewonnen werden können, müssen Lernende in Analogien denken. Das bedeutet, sie müssen Analogien erkennen, bilden und diese auch nutzen.

Um Analogien zwischen einem Modellexperiment und einem Original zu bilden, müssen die Lernenden zunächst alle relevanten Elemente und Prozesse des Modell-experiments wahrnehmen. So hat die Wahrnehmung des Modellexperiments neben dem Wissen, das die Lernenden zu einem Thema mitbringen, und den rudimentären, bekannten Informationen zu dem Original, einen signifikanten Einfluss auf die Lernwirksamkeit einer Analogie (vgl. Mayer, 1996). Die visuelle Wahrnehmung steht nach Arnheim (1972) in einem direkten Zusammenhang mit dem Lernprozess. Konkret bedeutet das, dass die Schüler\*innen die Informationen zunächst erkennen und aufnehmen müssen, um sie dann anschließend zu verarbeiten, mental zu repräsentieren, zu speichern und in unterschiedlichen Situationen anzuwenden (vgl. Wild & Möller, 2014; Wirth, 2018).

Inwiefern die Lernenden die für den Lernprozess relevanten Elemente beim Be-trachten eines Modellexperiments wahrnehmen, ist bisher noch nicht wissenschaftlich analysiert worden. In der chemiedidaktischen Forschung gibt es bisher wenige

Erkenntnisse zum Prozess der Wahrnehmung von chemischen Inhalten, die sich hauptsächlich auf statische Reize beschränken. Über die Wahrnehmung dynamischer Prozesse, z.B. von Modellexperimenten, gibt es bislang nur vereinzelt Erkenntnisse. Da die Wahrnehmung der relevanten Elemente des Modellexperiments nach Arnheim (1972) eine notwendige Voraussetzung für das Generieren und Nutzen von Analogien bildet, stellt sich die Frage, ob die wahrgenommenen Elemente einen Einfluss auf das Erkennen von Analogien zwischen einem Original und einem Modellexperiment und damit auf das Vorgehen beim Denken in Analogien haben.

Insbesondere im Bereich der Modellexperimente im Chemieunterricht sind die Forschungsergebnisse, die sich mit dem konkreten Prozess der Wahrnehmung und dem Denken in Analogien bei Schüler\*innen beschäftigen, sehr limitiert und beschränken sich meistens auf die Überprüfung des Lernerfolgs durch den Einsatz eines Modellexperiments. Diesem Desiderat soll die vorliegende Arbeit begegnen. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, Erkenntnisse über die Wahrnehmung, den genauen zeitlichen Ablauf des Prozesses des Denkens in Analogien, den Zusammenhang zwischen Wahrnehmung und Denken in Analogien sowie den Lernerfolg beim Umgang mit Modellexperimenten zu gewinnen.

Um dies in der vorliegenden Studie zu untersuchen, werden etablierte Methodiken der Psychologie, wie Eye-Tracking und Lautes Denken, die auch immer mehr Eingang in die fachdidaktische Forschung erhalten, genutzt. Dazu wurden diese empirischen Forschungsmethoden an die Lernumgebung angepasst. Gleichzeitig wurde ein konkretes, den dynamischen Anforderungen entsprechendes Modellexperiment ausgewählt: das Modellexperiment zur Staubexplosion in der Low Cost-Hartmann Apparatur.

## 2 Grundlagen und Stand der Forschung

### 2.1 Analogien

Analogien dienen als Instrument für wissenschaftliches Denken (vgl. Glynn, Duit & Thiele, 1995, S. 248). Sie werden verwendet, um unbekannte Sachverhalte und Prozesse zu erklären, zu erkunden oder Erkenntnisse über diese Sachverhalte und Prozesse zu gewinnen (vgl. Hesse, 1966; Hoffman, 1980; Glynn et al., 1995). Dabei wird auf vertraute Erfahrungen, Bilder und Vorstellungen zurückgegriffen, Hypothesen gebildet und Vorstellungen übertragen (vgl. Klinger, 1987, S. 23f. am Beispiel Voltas sieht er typische Analogiedenkprozesse von Physikern).

#### 2.1.1 Definition des Begriffes Analogie

In der Wissenschaft allgemein bezeichnet der Begriff Analogie (lat. *analogia*: gleiches Verhältnis zwischen zwei oder mehreren Dingen) die Übereinstimmung in den Verhältnissen beziehungsweise ein messbares vergleichbares Aufeinanderbezogensein (vgl. Sandkühler, 1990, S. 51). Besonders die Wissenschaftsdisziplinen *Kognitionspsychologie* und *einige Fachdidaktiken* haben sich mit diesen Analogien beschäftigt. In der Kognitionspsychologie wird eine Analogie definiert als eine Ähnlichkeit hinsichtlich spezifischer Merkmale zwischen zwei zueinander in Beziehung stehenden Bereichen (vgl. Beller & Bender, 2010, S. 121). Bauer und Richter (1986) verstehen in der Fachdidaktik unter einer Analogie eine Übereinstimmung unterschiedlichen Grades bezüglich der Eigenschaften und Beziehungen zwischen zwei Bereichen. Diese Bereiche werden als *Analogiebereich*<sup>1</sup> und *Zielbereich*<sup>2</sup> bezeichnet (vgl. Abbildung 1). Dabei wird der bekannte, vertraute Analogiebereich genutzt, um Wissen über einen unbekannten, zu erschließenden Zielbereich zu generieren (vgl. Schwedes, 1996b, S. 277).

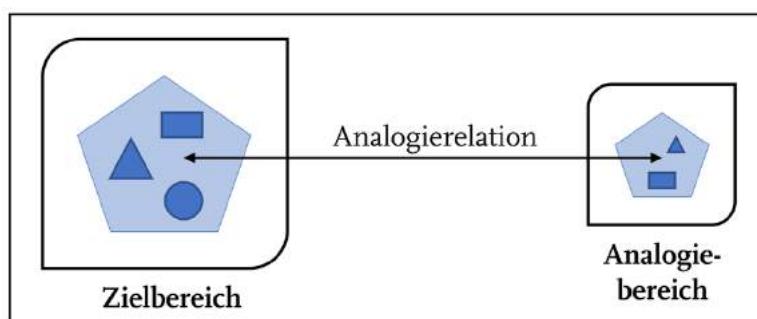


Abbildung 1: Analogierelation zwischen Analogie- und Zielbereich.

<sup>1</sup> Auch Quellsituation (Belle & Bender, 2010, S. 121), Basisbereich (Gentner, 1989), Basisanalogon (Vosniadou & Ortony, 1989) genannt.

<sup>2</sup> Auch Zielsituation genannt (Belle & Bender, 2010, S. 121).

Wie diese Bereiche jedoch konkret gestaltet sind, ist in der Analogie-Literatur häufig nicht einheitlich definiert. So sind die Bereiche bei Bauer und Richter (1986) nicht eingeschränkt. Lediglich werden sie als materielle und ideelle Objekte oder Prozesse gesehen. Analogie- und Zielbereich können dabei im selben Themengebiet liegen aber auch in unterschiedlichen. Duit & Glynn (1992) geben konkrete Beispiele für einen Analogiebereich. So kann als Analogiebereich z.B. einerseits ein konkret aufgebautes (materielles) Wassерmodell fungieren. Andererseits können jedoch auch Abstrakta wie Begriffsnetze verwendet werden. Als Zielbereiche lassen sich u.a. *materielle* (Wassermodell – vgl. Duit & Glynn, 1992; Modell einer Nervenzelle – vgl. Högermann & Kricke, 2013), *literarische* (Holzapfelkrieg bezogen auf das chemische Gleichgewicht – vgl. Dickerson & Geis, 1981), *mentale* (Aufbau des Sonnensystems als Beispiel für den Atomaufbau – vgl. Falkenhainer, Forbus & Gentner, 1989), *digitale* (Simulationsmodell zur Synthese von Natriumchlorid – vgl. www.chemie-interaktiv.net/html5\_flash/nacl\_synthese\_5.html), *funktionale* (Funktionsmodell zur Massenspektrometrie oder zur Volumenkontraktion – vgl. Sommer et al., 2017) und *experimentelle* (Modellexperiment zur Staubexplosion – vgl. ebd.) Analogiebereiche finden. In all diesen Fällen handelt es sich jedoch um klar abgrenzbare Mengen von konkreten Merkmalen, die gegenständlich oder abstrakt sind (vgl. Beller & Bender, 2010, S. 121; Wilbers, 2000, S. 85; Duit & Glynn, 1992).

Die Vorstellung der Menge wird in der Structure-Mapping Theorie (SMT) von Gentner (1983) konkreter. So stellen die Bereiche Netzwerke dar, die „in Form von Prädikaten dargestellt [werden], die Objekte, Attribute und die Beziehungen, die zwischen ihnen bestehen, erfassen“ (Kurtz, Miao, & Gentner, 2001, S. 418f). Darauf soll im Folgenden näher eingegangen werden:

Ein *Objekt*<sup>3</sup> beschreibt einen Gegenstand, auf den sich jemand bezieht und auf den das Denken oder Handeln ausgerichtet ist (vgl. Dudenverlag, 2021b). Der Begriff *Attribut* kommt aus dem Lateinischen und bedeutet *attribuere*: zuteilen (vgl. Mittelstraß, 2016, S. 286). Es bezeichnet eine Charakteristik, eine auffällige Eigenschaft eines Gegenstandes, „die er seiner Natur nach wesentlich haben muss“ (Mittelstraß, 2016, S. 286). Somit wird einem Objekt eine Eigenschaft zugeschrieben, d.h. ein Objekt wird mit einer Eigenschaft direkt verknüpft (vgl. Dudenverlag, 2021a; Paatz, 2002, S. 13). Bei den Attributen kann auf Basis der Analogiedenkforschung zwischen zwei verschiedenen Arten unterschieden werden, den *oberflächlichen* und *strukturellen Attributen*. *Oberflächliche Attribute* sind „Eigenschaften, die üblicherweise nicht für das Verständnis eines Sachverhaltes wesentlich sind“ (Bösel, 2016,

---

<sup>3</sup> Der Begriff Objekt ist seit dem 18. Jahrhundert in der Philosophie durch den Begriff Gegenstand ersetzt (Mittelstraß, 2016, S. 3ff.).

S. 99). Kircher (1989) nennt konkrete Eigenschaftsbereiche, bei denen es sich um oberflächliche Attribute handeln kann. Die oberflächlichen Attribute können sich auf das äußere Erscheinungsbild (Form, Farbe) sowie die wörtlichen Oberflächen-eigenschaften (viereckig, rund) oder Objekteigenschaften (hart/weich, klebrig) beziehen. *Strukturelle Attribute* sind dagegen Eigenschaften, die für das Verständnis eines Sachverhaltes relevant sind (vgl. Kircher, 1995). Sie beschreiben die Funktion und die Struktur des Analogie- und Zielbereiches. Der Begriff *Relation* (Beziehung) bezeichnet eine „Kategorie zur Bezeichnung beliebiger Beziehungen, die zwischen gegebenen Objekten auf Grund bestimmter Eigenschaften dieser Objekte bestehen bzw. hergestellt werden können“ (Sandkühler, 1990, 95). Neben den strukturellen Attributen sind auch die Relationen für das Verständnis eines zugrundeliegenden fachlichen Konzeptes besonders relevant (vgl. Beller & Bender, 2010; Forbus, Gentner & Law, 1994; Kircher, 1995; Wilbers, 2000).

Da die Objekte, Attribute und Relationen das Netzwerk eines jeden Bereiches aufspannen, können Analogie- und Zielbereich Ähnlichkeiten auf der Objekt ebene, Attributebene oder Relationsebene aufweisen (vgl. Gentner, 1989). Diese Ebenen können unter dem Begriff *Analogiearten* zusammengefasst und die einzelnen analogen Merkmale mit diesen Analogiearten kategorisiert werden. Die Menge aller Merkmale, die sich zwischen Analogie- und Zielbereich entsprechen, wird als *Analogierelation*<sup>4</sup> (kurz: Analogie) bezeichnet (vgl. Beller & Bender, 2010, S. 121). Je nach Art der Merkmale, die eine Analogierelation zwischen Analogie- und Zielbereich aufspannen, wird in der Literatur von verschiedenen Autoren jeweils zwischen einfachen und tiefergehenden Analogien unterschieden, die von den Autoren jeweils unterschiedlich bezeichnet werden (Übersichtsdarstellung in Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht der Bezeichnungen für einfachen und tiefer gehenden Analogien.

Einfache Analogie	Tiefergehende Analogie	Autoren
Mere appearance match (übersetzt: rein äußerlicher Vergleich)	Literal similarity (übersetzt: wörtliche Ähnlichkeit)	Gentner (1989); Falkenhainer, Forbus & Gentner (1989)
Simple Analogien	Strukturelle Analogien	Holyoak & Koh (1987)
Analogie im weiteren Sinn	Analogie im engeren Sinn	Duit & Glynn (1992)
Phänotypische Analogie	Genotypische Analogie	Spreckelsen (1997)
Oberflächenanalogie	Strukturelle Analogie	Kircher (1989)

<sup>4</sup> Auch Ähnlichkeitsbeziehung genannt.

Gentner (1989) unterscheidet zwischen mere-appearance match und literal similarity. Bei mere-appearance matches werden in erster Linie äußerliche Eigenschaften abgebildet. Im Gegensatz dazu sehen sich bei einer literal similarity Analogie- und Zielbereich nicht nur ähnlich, sondern verhalten sich auch ähnlich. Sie treten typischerweise bei domäneninternen Vergleichen auf. Holyoak und Koh (1987) unterscheiden zwischen simplen Analogien und strukturellen Analogien. Dabei bezeichnen die simplen Analogien nicht nur Attribute, sondern auch die Relationen, die keinen kausalen Zusammenhang zwischen verschiedenen Merkmalen des Analogie- und Zielbereiches herstellen. Als strukturelle Analogien werden bei Holyoak und Koh (1987) Ähnlichkeiten genannt, die eine kausale Beziehung zwischen Merkmalen der Analogiebereiche knüpfen. Auch Kircher (1989) unterscheidet zwischen der Oberflächenanalogie und der strukturellen Analogie. Bei der Oberflächenanalogie gibt es Ähnlichkeiten im äußeren Erscheinungsbild (Form, Farbe) sowie den wörtlichen Oberflächeneigenschaften (viereckig, rund) oder Objekteigenschaften (hart/weich, klebrig). Strukturelle Analogien sind dagegen Ähnlichkeiten in Funktion und Struktur des Analogie- und Zielbereiches. Bei Duit und Glynn (1992) wird die Art der Ähnlichkeit nicht konkret gefasst. Jedoch wird bei ihnen zwischen Analogien im engeren und im weiteren Sinne unterschieden. Bei Analogien im engeren Sinn gibt es eine „Übereinstimmung von Teilen der Struktur“ (Duit & Glynn, 1992, S. 225). Analogien im weiteren Sinne weisen abgrenzend von diesen Strukturen noch oberflächengleiche Strukturen, Ähnlichkeiten von Objekten und deren Eigenschaften auf. In dieser Definition von Duit und Glynn (1992) wird allerdings nicht klar, was der Begriff *Struktur* konkret bedeutet. Spreckelsen (1997) unterscheidet die phänotypische und die genotypische Analogie. Bei der phänotypischen Analogie wird die äußere Erscheinungsform eines neuen, noch unbekannten Bereiches mit bereits bekannten Alltagserfahrungen verglichen. Dabei ähneln sich zwei Bereiche u.a. in der Oberfläche und im Aussehen. Gleichzeitig fehlen tiefere strukturelle Ähnlichkeiten. Hingegen ist bei der genotypischen Analogie nicht das äußere Erscheinungsbild beim Vergleich entscheidend. Sondern es geht eher um den Vergleich der Funktionsweise und des Wirkmechanismus. Dabei werden sprachliche Wendungen wie *so, wie, so ähnlich wie* genutzt. Diese tiefergehenden Analogien (literal similarity, strukturelle Analogien, genotypische Analogien) haben zwar die größere erklärende Potenz, werden von Lernenden aber nicht immer verstanden, da der Zusammenhang zwischen den zwei analogen Bereichen für Lernende häufig nicht deutlich genug ist (vgl. Kircher, 1989).

Diese Vielzahl an Begrifflichkeiten zeigt, dass für eine zielgerichtete Interpretation von Studienergebnissen in der Analogieforschung wichtig ist, darauf zu achten, welche Analogiedefinition der jeweiligen Studie zugrunde liegt. Zudem ergibt sich

daraus die Relevanz, dass die der vorliegenden Arbeit zugrunde gelegten Begrifflichkeiten und Definitionen konkret definiert werden müssen, um die Ergebnisse korrekt interpretieren zu können. Daher wird der vorliegenden Arbeit die folgende Definition zugrunde gelegt. Eine **Analogie** ist eine Ähnlichkeitsrelation zwischen zwei Bereichen, dem Analogie- und dem Zielbereich. Die **Bereiche** sind Netzwerke, die abstrakt durch Analogiearten (Objekte, oberflächliche und strukturelle Attribute sowie Relationen) charakterisiert werden können. Die Bereiche müssen sich in ihrer relationalen Struktur ähneln. Alle Ähnlichkeiten, die zwischen den beiden Bereichen vorliegen, werden in der **Analogierelation** zusammengefasst.

### 2.1.2 Denken in Analogien

Beim Betrachten der vorgestellten Definitionsansätze aus der Kognitionsforschung und der Fachdidaktik fällt auf, dass eine Analogie rein statisch und objektbezogen definiert ist (vgl. u.a. Bauer & Richter, 1986; Duit & Glynn, 1992). Das Subjekt scheint bei ihnen eine eher untergeordnete Rolle einzunehmen. Im Gegensatz dazu wird bei Kircher (1989) sowie bei Spreckelsen (1995; 1997) die Relevanz eines analogiebildenden Subjektes hervorgehoben. Sie sehen Analogien als Ergebnis eines konstruktivistisch eigenaktiven Denkprozesses, den ein Subjekt durchführt, wenn es einen Analogiebereich mit einem Zielbereich vergleicht. In der Kognitionspsychologie wurden Modelle für diesen Denkprozess, dem Vergleich zwischen Analogie- und Zielbereich, entwickelt. Er wird als *Analogiedenkprozess*<sup>5</sup> bezeichnet und gliedert sich in mindestens drei Teilprozesse (vgl. Abbildung 2, Vosniadou & Ortony, 1989).

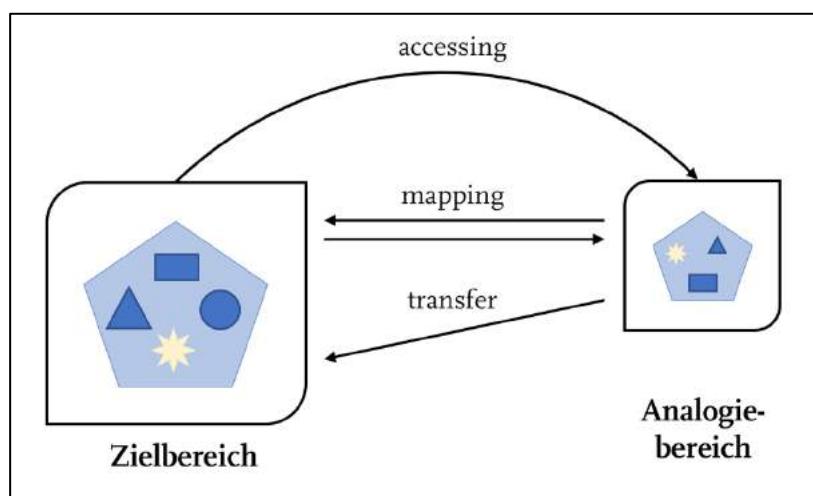


Abbildung 2: Analogiedenkprozess mit ausgehend vom Analogiebereich auf den Zielbereich transferierten neuen Erkenntnissen (symbolisch dargestellt als Sonne) (verändert nach Kalogerakis, 2010).

<sup>5</sup> Auch Analoges Denken genannt.

Zunächst wird auf der Basis eines rudimentären mentalen Modells des Zielbereiches während des *Accessings* im Langzeitgedächtnis ein Analogiebereich<sup>6</sup> abgerufen, der zu dem gegebenen Zielbereich analog oder ähnlich ist (vgl. Falkenhainer et al., 1989). Der Zugang zu diesem Analogiebereich wird hauptsächlich durch Übereinstimmungen in den oberflächlichen Attributen zwischen Ziel- und Analogiebereich vermittelt (vgl. Holyoak & Koh, 1987; Gentner, Ratterman & Forbus, 1993; Wilbers, 2000, S. 102). Im Lehr-Lern-Kontext wird das Accessing häufig nicht von Lernenden selbstständig durchgeführt, sondern der Analogiebereich während des Accessings durch Dritte (u.a. Lehrer\*innen oder Dozent\*innen) abgerufen und den Lernenden vorgegeben.

Liegen Analogie- und Zielbereich vor, werden die Merkmale des Analogiebereiches mit den Merkmalen des Zielbereiches verglichen (*Mapping*) und zusätzliches Wissen, das auf Ähnlichkeiten in der Struktur der Netzwerke der beiden Bereiche basiert, aus dem Analogiebereich auf den Zielbereich übertragen (*Transfer*). Der Teilprozess *Mapping* bildet den Kern des Analogiedenkprozesses. Es ist der erste Teilprozess, den Lernende im Lehr-Lern-Kontext bei vorgegebenem Analogie- und Zielbereich selbstständig durchführen müssen (vgl. Kircher, 1989). Konkret werden während des Mappings Ähnlichkeiten zwischen dem Analogie- und Zielbereich gesucht. Dabei wird ein gegebener Analogiebereich häufig im Lichte des Zielbereiches gesehen (und umgekehrt) (vgl. Wilbers, 2000, S. 118). Diesen Zusammenhang zeigte Wilbers (2000) am Beispiel einer Analogie zum deterministischen Chaos. Somit können beide Bereiche „als potenzielle Quellen und Empfänger von Informationen“ dienen, besonders, wenn neben dem Zielbereich auch der Analogiebereich nur teilweise verstanden ist (Kurtz et al., 2001, S. 418). Sie wirken also im *Mapping*-Teilprozess symmetrisch. So kann das Identifizieren von Ähnlichkeiten richtungsunabhängig vergleichend sowie von dem Analogie- zum Zielbereich und umgekehrt erfolgen. Kurtz et al. (2001, S. 418) vermuten, dass „der Vergleich zwischen zwei teilweise verstandenen Situationen<sup>7</sup> dazu führen kann, dass parallele Strukturen wahrgenommen werden und ein tieferes Verständnis beider Situationen entwickelt wird“. Die Ähnlichkeitssuche, ausgehend vom Analogie- und/oder Zielbereich, folgt dem Prinzip vom *Einfachen zum Komplexen*.

Bevor das *Mapping* jedoch zielgerichtet durchgeführt werden kann, müssen Analogie- und Zielbereich erst einmal erfasst und ein mentales Modell der Bereiche in der Vorstellung der Lernenden entwickelt werden (vgl. Gentner, 1983). Die Relevanz, ein mentales Modell des Analogie- und des Zielbereiches vor dem Vergleich

---

<sup>6</sup> Auch Basisanalogon genannt (Vosniadou & Ortony, 1989).

<sup>7</sup> Hier Bereiche genannt.

von Analogie- und Zielbereich ausgebildet zu haben, ist im sogenannten Teaching-With-Analogies Modell (TWA-Modell) enthalten (vgl. Duit, 1991).

Das TWA-Modell dient als Handreichung für Lehrende, um Analogien im Lehr-Lern-Kontext gewinnbringend einzusetzen, da in Studien aufgefallen ist, dass didaktische Analogien nicht immer lernförderlich sind (vgl. Kircher, 1995). Um diesem Problem entgegenzuwirken, wird in dem TWA-Modell vor der Identifikation und Übertragung relevanter ähnlicher Merkmale (analog: Mapping und Transfer) die Einführung des Zielbereichskonzeptes und das stichwortartige Abrufen und Beschreiben des Analogiebereichskonzeptes vorgeschlagen. Damit der Analogiebereich verstanden werden kann, muss er mindestens ausführlich eingeführt werden. Jedoch ist ein Verständnis des Analogiebereichs trotzdem nicht immer gewährleistet. Dabei wird eine häufige Ursache für das Scheitern didaktischer Analogien in der mangelnden Vertrautheit der Schüler\*innen mit dem Analogiebereich gesehen (vgl. Kircher, 1995).

Nachdem alle Ähnlichkeiten zwischen dem Analogie- und Zielbereich ermittelt und in der Analogierelation zusammengefasst wurden, können im Teilprozess *Generalization* die erkannten Beziehungen und Zusammenhänge in allgemeine Regeln, Konzepte und Schemata generalisiert werden. Auch dieser Prozess ist, wie der Teilprozess *Mapping*, hauptsächlich von strukturellen Ähnlichkeiten geleitet (vgl. Holyoak & Koh, 1987; Gentner, Ratterman & Forbus, 1993; Wilbers, 2000, S. 102).

In den Anfängen der Analogieforschung wurde angenommen, dass die Fähigkeit in Analogien zu denken eine sehr elaborierte Fähigkeit sei, die nicht jeder Mensch von Geburt an mit sich bringt und die erst ab einem Alter von 11-12 Jahren möglich sei (Zusammenfassung verschiedener Studien bei Schwedes (1996a, S. 194-195)). Jedoch konnten Studien u.a. von Brown (1989) zeigen, dass der Mechanismus, der das Denken in Analogien ermöglicht, schon bei sehr kleinen Kindern vorhanden ist. Brown (1989) zeigte, dass es schon ab dem 3. Lebensjahr möglich ist, erfolgreich analog zu vergleichen und zuzuordnen. Dabei sollten die Probanden Alltagsgegenstände zuordnen, wie z.B. Kaffeepulver zu einer Tasse Kaffee wie Waschpulver zu einer Schüssel Seifenlauge. Jedoch konnte dabei auch festgestellt werden, dass Kinder Aufgaben mit Analogien schlechter lösen als ältere Personen. Studien zeigten, dass besonders das Erkennen von Beziehungen *höherer Ordnung* erst in dem Alter von 11-12 Jahren einsetzt (vgl. Schwedes, 1996a; Paatz, 2002, S. 16). Dies liegt daran, dass beim Denken und Nutzen von Analogien bereits existierendes, relevantes Wissen aktiviert, transferiert und angewendet wird. Da Kinder jedoch weniger fachliches Faktenwissen besitzen, das sie zur Lösung von Analogieaufgaben aktivieren könnten, können ältere Personen Aufgaben mit Analogien meist besser lösen.

Somit ist neben der Fähigkeit, in Analogien zu denken, das existierende, fachliche Faktenwissen zur Lösung solcher Aufgaben notwendig (vgl. Paatz, 2002, S. 16).

Gentner (1989) konnte darüber hinaus zeigen, dass Erwachsene die Tendenz haben, während des Vergleiches von Analogie- und Zielbereich strukturelle Merkmale wahrzunehmen und für eine Analogie zu nutzen. Kinder hingegen interpretieren eher attributiv und nutzen in erster Linie oberflächliche Merkmale von Objekten. Im Gegensatz zu Gentner (1989) konnten Brown und Kane (1988) keine prinzipiellen entwicklungspsychologischen Einschränkungen in der Wahrnehmung und Nutzung von strukturellen Ähnlichkeiten feststellen. Ihrer Meinung nach entwickeln sich die Fähigkeit, Analogien und die Ähnlichkeiten in den strukturellen Merkmalen zu nutzen, mit dem bereichsspezifischen Wissen über die beiden Bereiche einer Analogierelation (vgl. Brown & Kane, 1988). Auch die Ergebnisse von Bearman, Ball und Ormerod (2007) deuten darauf hin, dass Experten, die über viel bereichsspezifisches Wissen verfügen, dazu tendieren, strukturelle Ähnlichkeiten und Beziehungen bei jeglichen Aktivitäten zu vergleichen. Diese strukturellen Ähnlichkeiten werden jedoch nicht nur von Personen, die über viel bereichsspezifisches Wissen verfügen, genutzt, sondern auch von Novizen bei der Beschäftigung mit Problemlösaufgaben. Allerdings beziehen Novizen auch oberflächliche Ähnlichkeiten in ihren Vergleich ein, wenn sie Sachverhalte erklären oder illustrieren (vgl. Bearman, Ball & Ormerod, 2007; Kretz & Krawczyk, 2014). Dabei entdecken, konstruieren und verknüpfen die Subjekte die Beziehungen und Strukturen der Bereiche je nach Perspektive, Wahrnehmung, Vorwissen und Denkstrukturen sowie Wahrnehmungs- und Denkfähigkeit. Diese Faktoren beeinflussen die jeweiligen Analogien (vgl. Haider, 2010, S. 42).

Auf Basis der vorgestellten Modelle und Definitionen soll der Prozess des Denkens in Analogien für die vorliegende Arbeit wie folgt definiert werden. Analogien sind das Ergebnis eines konstruktivistisch eigenaktiven, kognitiven Prozesses, den ein Subjekt durchführt. Als **Denken in Analogien** (kurz: Analogiedenkprozess) wird ein konstruktivistisch eigenaktiver, kognitiver Prozess eines Subjekts bezeichnet, der sich in die drei Schritte Accessing, Mapping<sup>8</sup> und Transfer<sup>9</sup> gliedert. Davon sind von Lernenden, wenn ihnen Analogie- und Zielbereich vorgegeben werden, die Schritte Mapping und Transfer durchzuführen. Während des Mappings und des Transfers werden von den Lernenden Korrespondenzen zwischen Merkmalen der Netzwerke beider Bereiche hergestellt. Auf Basis derer können Informationen übertragen werden, die sich an der gemeinsamen Struktur beider Bereiche orientieren

---

<sup>8</sup> Mapping wird in der vorliegenden Arbeit auch als *Vergleich* bezeichnet.

<sup>9</sup> Transfer wird in der vorliegenden Arbeit auch als *Ergebnis Mapping* bezeichnet.

(vgl. Gentner, 1983; 1989; Holyoak, 1985; Holyoak & Thagard, 1989; 1997). Die Güte des Denkens in Analogien ist dabei unter anderem von der Anzahl der passenden Elemente sowie von der Struktur der Merkmale abhängig (vgl. Kurtz, Miao & Gentner, 2001, S. 418f).

### 2.1.3 Empirische Studien zum Umgang mit Analogien im Lehr-Lern-Kontext

In den naturwissenschaftlichen Fachdidaktiken (Chemie-, Physik- & Mathematikdidaktik) wurde bereits in einigen empirischen Studien die Wirkung von Analogien auf den Lernprozess untersucht. Dabei wurden in diesen Studien charakteristische Analogien als Lernmittel zur Vermittlung von spezifischen Inhalten vorgegeben und deren Wirksamkeit untersucht (vgl. Clement, 1978; Duit & Glynn, 1992, S. 232). Um diese Wirksamkeit zu messen, waren die Studien als Learning Outcome-Studien konzipiert (vgl. Wilbers, 2000, S. 95). Die Wirksamkeit einer Analogie wurde dabei entweder durch ein Pre-Post-Testdesign oder in einem Kontrollgruppendesign anhand des Lernerfolges bestimmt. War der Lernerfolg positiv, so wurde auf analoges Denken geschlossen.

Bei den chemiedidaktischen Studien lag der Schwerpunkt auf dem Atombegriff und seiner Vermittlung im Rahmen von Reaktionskinetik und Stöchiometrie (vgl. Harrison & Treagust, 1996) sowie auf dem Einsatz von Analogien in gesteuerten und selbstständigen Lernprozessen (vgl. Krämer, Reiners & Schumacher, 2008). In der Biologiedidaktik wurden charakteristische Analogien zum Thema Genetik (vgl. Martins & Ogborn, 1997) und Proteinsynthese (vgl. Pittman & Beth-Halachmy, 1997) eingesetzt. In der Physikdidaktik lag der Fokus auf physikalischen Themen wie dem Stromkreis (vgl. Gentner & Gentner, 1983; Black & Solomon, 1987; Kircher, 1995; Menge, 1996; Dudeck, 1997; Paatz, 2002; Haider, 2010). Dabei wurde häufig die charakteristische Analogie zwischen dem Wasserstromkreis und einem einfachen elektrischen Stromkreis untersucht. Zudem sind die Themen Atomphysik (vgl. Rohr & Reimann, 1999) und Chaostheorie (vgl. Wilbers, 2000) in den Studien zum Denken in Analogien auffindbar.

In einer Zusammenfassung von neun Studien zum Einsatz des Wasserstromkreis als Analogie zum elektrischen Stromkreis (1972-1998) konnte Dudeck (1997, S. 47-51) darstellen, dass die Ergebnisse beim Einsatz der Wasseranalogie zum Erlernen des elektrischen Stromkreises uneinheitlich sind. Um herauszufinden, mit welchen Modellen Lernende ein Verständnis von Stromkreisen erlangen können, setzte Haider (2010) verschiedene Modelle ein. Er untersuchte, ob die Modelle einen Effekt auf den Lernzuwachs haben. Dabei konnte er zeigen, dass das Nutzen von Modellen zu einem höheren Lernfortschritt bei Lernenden führt und somit Modelle einen positiven Effekt auf den Lernzuwachs haben (vgl. Haider, 2010, S. 182). Jedoch

eignen sich nicht alle Modelle gleichermaßen. Denn Haider konnte auch nachweisen, dass unterschiedliche Modelle einen unterschiedlichen Lernzuwachs bewirken. Es konnte jedoch bei dieser sowie den zuvor vorgestellten Learning Outcome-Studien aufgrund der Konzeption der Studien nicht identifiziert werden, aus welchen Gründen die Ergebnisse uneinheitlich sind und warum manche Schüler\*innen beim Umgang mit Analogien erfolgreicher waren als andere.

Um diese Gründe identifizieren zu können, muss der Prozess beim Lernen mit Analogien auf der Mikroebene analysiert werden. Dieser Prozess wurde in Studien bisher selten untersucht. Wilbers (2000), Dudeck (1997), Kleine (1998), Paatz (2002) und Klein, Piacente-Cimini & Williams (2007) haben erste Ergebnisse zur Untersuchung dieses Lernprozesses geliefert.

So machten Dudeck (1997) und Paatz (2002) erste Prozessuntersuchungen anhand der Wasseranalogie zum elektrischen Stromkreis. In der Studie von Paatz (2002) sollten Schüler\*innen der 10. Jahrgangsstufe das Begriffssystem einer speziellen Wasseranalogie (Analogiebereich) zur elektrischen Stromkreislehre (Zielbereich) über einen langen Zeitraum konzeptuell entwickeln, um Aussagen über die Lernprozesse im Analogiebereich zu erhalten. Dabei sollte der Hinweis, welche Funktion dieser Analogiebereich hat, den Zugang zu einem Zielbereich erleichtern. Anschließend wollte Paatz (2002) identifizieren, welche charakteristischen Schritte sich bzgl. der Prozessdynamik des analogieorientierten Lernens (bei Erschließung des Zielbereiches) abbilden lassen. Es konnte gezeigt werden, dass die Schritte Aktivierung des Analogiebereichs, Postulieren von *local matches*, Zusammenfügen zum *global match* und *candidate inferences* im Wesentlichen identifiziert werden konnten.

Klein, Piacente-Cimini & Williams (2007) untersuchten die Rolle des Schreibens beim Erlernen wissenschaftlicher Prinzipien durch Analogien anhand von Studierenden ( $M(\text{Alter}) = 22.97$ ) einer kanadischen Universität. Während des Vergleichs<sup>10</sup> von zwei Demonstrationen zu jeweils einem physikalischen Thema (Auftriebskraft eines Fluids, Projektionsbewegung bzw. Kräfte im Inneren eines Systems) konnten sie einzelne Analogieoperationen (Describe source, Causal explanation of source, Describe target, Causal explanation of target, Map descriptions of source and target, Map explanations of source and target) identifizieren. Die Studierenden, welche die Zielanalogie lösten, haben während des Vergleichs der beiden Demonstrationen schrittweise einfache Aussagen miteinander in Beziehung gebracht, um komplexe Aussagen zu bilden. Zudem konnte bei ihnen ein Wechsel zwischen dem Abbilden

---

<sup>10</sup> Der Fokus des Vergleiches lag auf dem Erkennen von Gemeinsamkeiten.

von Beschreibungen und dem Abbilden von kausalen Erklärungen zwischen den beiden Demonstrationen festgestellt werden. Dabei wurden die abbildenden Analogieoperationen (Map descriptions of source and target, Map explanations of source and target) unabhängig von der Vergleichsrichtung zwischen Analogie- und Zielbereich kodiert.

In einer anderen Studie konnte Wilbers (2000) am Beispiel einer Analogie zum deterministischen Chaos zeigen, dass ein Ähnlichkeitsvergleich nur so lange von den Schüler\*innen durchgeführt wird, bis der heuristische Nutzen der Analogie erschöpft ist, also bis die Schüler\*innen ausreichend viel über den Zielbereich gelernt hatten und ihr Klärungsbedarf gedeckt war. Bei dieser Studie orientierte sich die Lernprozessanalyse sehr stark an dem konkreten Gegenstand des deterministischen Chaos, weshalb sie für die vorliegende Arbeit nicht detaillierter betrachtet werden soll.

Um einen Einblick in die Mikroebene und damit die konkrete Vorgehensweise beim Umgang mit Analogien zu erhalten, hat Kleine (1998) fallbezogen kognitive Prozesse beim Nutzen einer literarischen Analogie, der Analogiegeschichte *Der Ball der einsamen Herzen*, zum Erlernen des chemischen Gleichgewichtes untersucht (vgl. Kleine, 1998; Sumfleth & Kleine, 1999). Diese Analogie ermöglicht durch einen bekannten, bildhaften Analogiebereich das Aufgreifen von Vorwissen von Probanden, um einen Zugang zu dem abstrakten Konzept des chemischen Gleichgewichtes zu erhalten. Besonders bei Probanden mit geringem Vorwissen konnte über die verwendete Analogiegeschichte der „Zugang zum Zielbereich über oberflächliche[n] Merkmale[n] zu tiefergehenden Strukturen erleichtert werden“ (Kleine, 1998, S. 231). Um die zeitliche Abfolge der kognitiven Prozesse und damit die individuelle Bedeutungsentwicklung von den Probanden beim Umgang mit der Analogiegeschichte abilden zu können, wurden leitfadenorientierte Interviews eingesetzt. Aufgrund der Komplexität dieser zeitlichen Abfolge von kognitiven Prozessen, war nur eine geringe Stichprobenanzahl möglich. Im Zusammenhang mit dem Nutzen der Analogiegeschichte lag diese bei 12, davon 6 Probanden mit Vorwissen und 6 Probanden ohne Vorwissen (vgl. Kleine, 1998, S. 81). Die einzelnen Aussagen (Sinneinheiten) der Probanden wurden schwerpunktmäßig mithilfe der Wahrnehmungsebenen (Objekte, Eigenschaften, Ereignisse, Programme, Prinzipien und Systeme) ausgewertet (vgl. Kleine, 1998, S. 77). Die Darstellung der zeitlichen Abfolge der kognitiven Prozesse erfolgte u.a. über ein Diagramm (y-Achse: Wahrnehmungsebenen; x-Achse: semantisch abgeschlossene Sinneinheiten) (vgl. Kleine, 1998, S. 82). Dabei wurde auf eine gleichzeitige graphische Kopplung mit den Ereignisebenen (Zielbereich, Analogiebereich, A-Z, Z-A) und dem konkreten Inhalt bezüglich des Konzeptes des chemischen Gleichgewichts verzichtet. Kleine

(1998) zeigte, dass ein Verständnis des Konzeptes *chemisches Gleichgewicht* über Analogietexte auch bei geringem Vorwissen entwickelt werden kann. Bei geringem Vorwissen liegt der Schwerpunkt der kognitiven Prozesse der Probanden auf Beschreibungen im Analogiebereich. Diese Schwerpunktsetzung erscheint offensichtlich, da dem Analogiebereich und dem Zielbereich in diesem Fall andere Sprachvarianten zugrunde liegen (vgl. Strippel & Bohrmann-Linde, 2018). Die Begrifflichkeiten, die den Analogiebereich beschreiben, sind der Alltagssprache zuzuordnen. Die Begriffe, die den Zielbereich charakterisieren, gehören zur chemischen Fachsprache. Aufgrund dieser unterschiedlichen sprachlichen Varianten können sich die Probanden mit geringem Vorwissen die Fachbegriffe nicht einfach aus dem Analogievergleich herleiten.

Weiter wurde festgestellt, dass die Bedeutungskonstruktion aller Analogienutzer auf der Eigenschaftsebene mit ungefähr zwei Sinneinheiten beginnt (vgl. Kleine, 1998, S. 116). Gleichzeitig fand ein Wechselspiel zwischen pure-mapping (durch vorgegebene Objektkorrespondenz ermöglicht) und carry-over (transfer des Systems vom Analogie- zum Zielbereich) statt. Die Sinneinheiten waren zumeist Objektkorrespondenzen zwischen den Bereichen (vgl. ebd.). Analogienutzer begannen mit Objektzuordnungen (Edukte und Produkte entsprechen den Objekten). Danach folgten weitere Aussagen, die an Vernetzung und Komplexität zunahmen (ebd., S. 114). Durchschnittlich formulierten Probanden mit geringem Vorwissen (insgesamt 13,5 Sinneinheiten) mehr Sinneinheiten als Probanden mit Vorwissen (11,8 Sinneinheiten) (ebd., 1998, S. 116). Probanden, die über Wissen in beiden Bereichen verfügten, deuteten teilweise nur die Objektknoten an und belegten sie mit den bekannten Konzepten der Chemie. In dem Fall diente die Analogie nicht zur Vermittlung neuen Wissens, – wie es bei Probanden ohne Vorwissen schwerpunktmäßig ist, – sondern zur Fokussierung der Aufmerksamkeit auf ein gemeinsames System der Prädikate (pure-matching) und als Kontrollinstrument. Im Gegensatz dazu dienten Analogien den Probanden mit geringem Vorwissen als Grundlage der Problemlösung. Um zu untersuchen, inwieweit die Probanden in früheren Problemsituationen anwendbare Wissensstrukturen aufgebaut haben, die sie auf ein neues Problem anwenden, d.h. transferieren können, wurde anhand einer Wortgleichung für eine Gleichgewichtsreaktion untersucht (ebd., S. 163).

Die in diesem Abschnitt vorgestellten naturwissenschafts-didaktischen Studien zeigen, dass es erste Ergebnisse zur zeitlichen Abfolge des kognitiven Prozesses beim Einsatz von speziellen Analogien auf der Mikroebene gibt. In diesen Studien wurden die kognitiven Prozesse mithilfe verschiedener Abstraktionsebenen modelliert. Diese kognitiven Prozesse wurden entweder mithilfe von Wahrnehmungsebenen (Objekte, Eigenschaften, Ereignisse, Programme, Prinzipien und Systeme; Kleine,

1998), inhaltlich definierten Analogieoperationen (Describe source, Causal explanation of source, Describe target, Causal explanation of target, Map descriptions of source and target, Map explanations of source and target; Klein, Piacente-Cimini & Williams, 2007) oder als eine Sequenz von vier zu durchlaufenden Schritten (Aktivierung des Analogiebereichs, Postulieren von *local matches*, Zusammenfügen zum *global match*, *candidate inferences*; Paatz, 2002) abgebildet. Jedoch wurden diese verschiedene Abstraktionsebenen bislang nicht miteinander in Beziehung gesetzt, um den Analogiedenkprozesse beim Umgang mit Analogien auf der Mikroebene noch detaillierter nachzeichnen zu können (vgl. Hinweise u.a. bei Duit & Glynn, 1992; Wilbers, 2000, S. 95). Dabei sind solche detaillierten Erkenntnisse zum Analogiedenkprozess aus der Sicht der Chemiedidaktik besonders wichtig, da im Chemieunterricht Modellexperimente und Experimente als dynamische Prozesse eingesetzt werden, um den Erkenntnisgewinn auf der makroskopischen, mikroskopischen und submikroskopischen Ebene zu unterstützen. Durch eine derart detaillierte Untersuchung könnte identifiziert werden, wie genau Lernende bei der Identifikation relevanter ähnlicher Merkmale zwischen den beiden Bereichen, dem Analogie- und Zielbereich, und der Übertragung dieser Ähnlichkeiten vorgehen. Diese detaillierten Erkenntnisse können anschließend dazu genutzt werden, um Lernprozesse zu steuern.

## 2.2 Modellexperimente

Modellexperimente weisen aufgrund ihrer Genese Analogien zu einem originalen Phänomen auf. Auch wenn Modellexperimente häufig in der Wissenschaft zur Erkenntnisgewinnung und in Lehr-Lern-Kontexten zur Veranschaulichung eingesetzt werden, existiert wenig Forschung dazu. Bei dem Begriff Modellexperiment handelt es sich um ein Kompositum aus den Wörtern *Modell* und *Experiment*. Jedoch lassen sich die Modellexperimente eher den Modellen als den Experimenten zuordnen (vgl. Pfeifer & Sommer, 2018). Dabei wird ein Experiment an analogen materiellen Modellen durchgeführt (vgl. Klaus & Buhr, 1972; Neuhäuser, 1975).

### 2.2.1 Definition der Begriffe Modell, Original und Modellexperiment

#### **Modelle**

Modelle sind gegenständliche Abbilder von einem materialistischen, komplexen Sachverhalt, den es in der Realität gibt oder geben wird (vgl. Haider, 2010, S. 34; Steinbuch, 1977). Dabei stellen sie keine direkte Kopie des materialistischen Originals dar, denn die Eigenschaften eines Modells sind nicht identisch zu denen eines Originals (vgl. Abschnitt *Original*), sondern sind vielmehr „theoriebezogene Abbilder von Originalen“ (Kattmann, 2006, S. 330f.). Häufig kommt es beim Modell im Vergleich zum Original zu Veränderungen, u.a. des Maßstabs, des Detailgrades und Qualitätsgrades (ebd., S. 330). Diese und weitere Definitionsansätze für den Begriff Modell sind rein objektbezogen und beschränken sich auf das reale Modell.

Zusätzlich wurden alle existierenden Modelle von einem Subjekt ausgewählt oder hergestellt (Modell von etwas) (vgl. Mahr, 2003; 2004; 2008a; Steinbuch, 1977). D.h. sie sind nicht nur rein objektbezogen zu betrachten, sondern auch abhängig von einem Subjekt, das das Modell durch Wahrnehmungs-, Verständnis- und Veranschaulichungsprozesse konstruiert hat (vgl. Steinbuch, 1977). Somit ist all das, was ein Subjekt (Individuum, Gruppe, gemeinsames Konstrukt) zum Modell erklärt, ein Modell (vgl. Mahr, 2003; 2004; 2008a; 2009). Diese Subjektbezogenheit wurde u.a. von Stachowiak (1973; 1983), Steinbuch (1977) und Mahr (2003; 2004; 2008a) in den Definitionen des Modellbegriffs beachtet. Stachowiak (1973; 1983) und Mahr (2003; 2004; 2008a) haben einen allgemeingültigen Modellbegriff in der Wissenschaft geprägt. Er wird durch drei Hauptmerkmale charakterisiert, die auf Stachowiak (1973) zurückgehen:

- **Abbildungsmerkmal (Abbild und Vorbild):** „Modelle sind stets Modelle von etwas, nämlich Abbildungen und damit Repräsentationen gewisser natürlicher und künstlicher Originale, die selbst wieder Modelle sein können“ (Stachowiak, 1973, S. 131).

Modelle sind abbildende Systeme auf der Basis eines Originals. Zuerst gibt es das Original<sup>11</sup> auf Grundlage dessen das konkrete Modell<sup>12</sup> konstruiert wird. Das Original sowie das Modell stellen Systeme dar, die durch Attribute charakterisiert werden. Bestimmte Attribute des Originals werden in dem Modell abgebildet bzw. repräsentiert (vgl. Krell, 2013, S. 6).

- **Verkürzungsmerkmal (Abstraktion):** „Modelle erfassen nicht alle Eigenschaften des durch sie repräsentierten Originalsystems, sondern nur solche, die den jeweiligen Modellerschaffern und -nutzern relevant erscheinen“ (Stachowiak, 1973, S. 132).

Dies ist eine Ergänzung des ersten Merkmals, denn es werden nicht alle Attribute, sondern nur bestimmte Attribute, eine Teilmenge der Gesamtattribute, im System *Modell* abgebildet. Dabei handelt es sich um die wesentlichen Attribute (**Hauptmerkmale**), die abgebildet werden und so zwischen dem Original und dem Modell ähnlich sind (vgl. Kattmann, 2006, S. 332). Diese Teilmenge charakterisiert die Attributenabbildung (vgl. Abbildung 3). Steinbuch (1977) erachtet eine solche Reduktion als notwendig, denn das menschliche Gedächtnis verfügt nur über eine begrenzte Aufnahmekapazität, sodass komplexe Sachverhalte der Realität nicht immer in ihrer Gänze verarbeitet werden können. Die Attribute des Originals, die nicht im Modell abgebildet werden, werden von Stachowiak als *präterierte Attribute* bezeichnet. Jedoch gibt es, neben den ähnlichen Attributen, auch Attribute, die im Modell u.a. zu dessen Herstellung notwendig sind, aber gleichzeitig keine Entsprechung im Original aufweisen. Diese werden von Stachowiak als *abundante Attribute* bezeichnet.

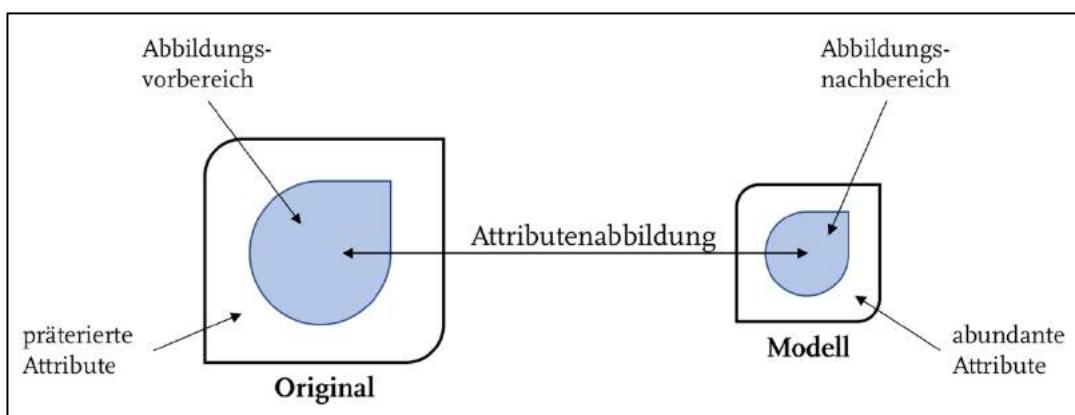


Abbildung 3: Stachowiaks Original-Modell-Beziehung (verändert nach Krell, 2013 und angelehnt an u.a. Stachowiak, 1973, S. 155ff.).

<sup>11</sup> Original auch Abbildungsvorbereich bei Stachowiak (1973) genannt.

<sup>12</sup> Modell auch Abbildungsnachbereich bei Stachowiak (1973) genannt.

Der Gedanke, dass Modelle für einen gewissen Zweck entwickelt werden, wird im Subjektivierungsmerkmal weiter konkretisiert:

- **Subjektivierungsmerkmal (Verwendungszweck):** „Modelle sind ihren Originallen nicht per se eindeutig zugeordnet. Sie erfüllen ihre Ersetzungsfunktion a) für bestimmte – erkennende und/oder handelnde, modellbenutzende – Subjekte, b) innerhalb bestimmter Zeitintervalle und c) unter Einschränkung auf bestimmte gedankliche oder tatsächliche Operationen“ (Stachowiak, 1973, S. 132f.).

Modelle erfüllen ihre Repräsentations- und Ersetzungsfunktion daher immer nur für bestimmte Subjekte (Modelle für jemanden) unter Einschränkung auf bestimmte gedankliche oder tatsächliche Operationen (zu einem bestimmten Zweck) und innerhalb bestimmter Zeitspannen (zu einem bestimmten Zeitpunkt).

Auch Steinbuch (1977) und Gutmann (1996, S. 175 f.) sehen Modelle nicht nur als Modell für ein Original, sondern für einen Zweck. Unabhängig von der wissenschaftlichen Disziplin unterstützt auch Mahr (2008a) diesen Gedanken. Mahr (2008a) sieht das Modellsein als das Ergebnis eines Urteils. Dabei ist ein System ein Modell, wenn es von einem Subjekt als Modell für etwas (Vorbild – Anwendungsperspektive) und Modell von etwas (Abbildung – Herstellungsperspektive) wahrgenommen wird (vgl. Krell, 2013, S. 12; Mahr, 2008b; Upmeier zu Belzen & Krüger, 2010). Somit ist eine Beurteilung eines Modells bei Mahr (2008a), Gutmann (1996), Steinbuch (1977) und Stachowiak (1973) nur kontextabhängig möglich. Jedoch unterscheiden sich diese drei Definitionen auch voneinander. Denn bei Mahr (2008a) gibt es keine zweigliedrige Trennung zwischen Modellen von etwas (Vorbild) und Modellen für etwas (Abbildung).

Steinbuch (1977) legt in seinem Modell *Denken in Modellen* den Fokus auf den kognitiven Prozess bei der Konstruktion eines Modells und kann als Ergänzung der Original-Modell-Beziehung bei Stachowiak (1973) gesehen werden (vgl. Abbildung 4). Bevor ein konkretes Modell in der Realität von einem Original gebildet wird, wird durch Wahrnehmungs- und Verständnisprozesse im Bewusstsein des modellierenden Subjektes ein abstraktes Modell ausgebildet. Dieses abstrakte Modell (auch Denkmodell genannt) beinhaltet die wesentlichen Informationen des Originals (Hauptmerkmale bei Stachowiak) und trägt als Werkzeuge dazu bei, Erfahrungen zu ordnen, zu deuten und zu kategorisieren, um mentale Systeme zu bilden, in die neues Wissen integriert werden kann (vgl. Graf, 2002). So fließen Zusatzinformationen beispielsweise durch Vorwissen in das Denkmodell ein. Aus diesem Denkmodell wird in einem nächsten Schritt ein konkretes Modell konstruiert. Zu

dieser Konstruktion werden bei Steinbuch (1977) *irrelevante Zutaten* genutzt, die von Stachowiak (1973) als *abundante Attribute* bezeichnet werden.

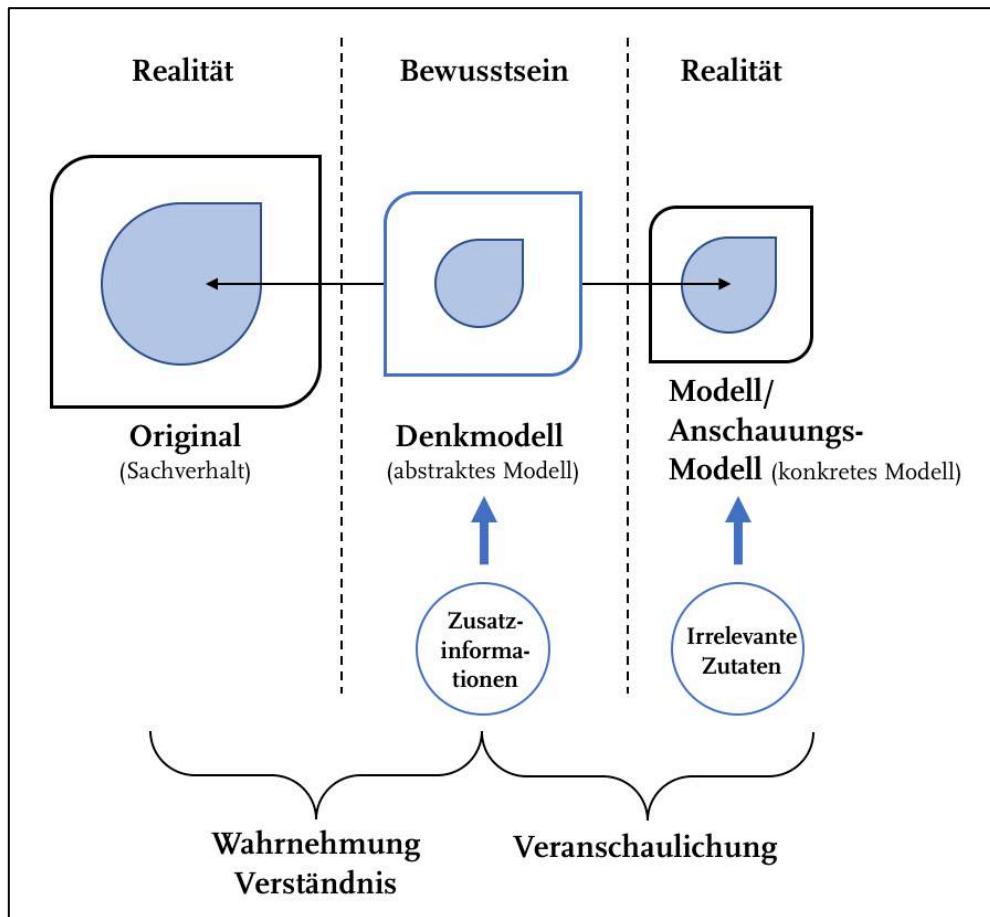


Abbildung 4: Ergänzung der Original-Modell-Beziehung von Stachowiak (1973) durch Steinbuchs Modell „Denken in Modellen“ (1977, S. 11).

### **Original**

Der Begriff Original schließt sowohl natürlich entstandene Phänomene, Materialien und Produkte als auch durch Menschen entwickelte Phänomene, Materialien und Produkte sowie Geräte ein (vgl. Sommer, Toschka, Schröder, Schröder, Steff & Fischer, 2017). Originale sind Systeme, die durch unendlich viele Merkmale und Eigenschaften charakterisiert werden.

In der Modelltheorie werden die Originale in einer Beziehung zu einem Modell gesehen. Dort werden „ausgehend von gegenständlicher Realität (Originale) [...] über die gedankliche Realität [...] gegenständliche[ ] Modelle[ ]“ während des Prozesses der Modellierung entwickelt (Kattmann, 2006, S. 330). Aus naturalistischer Sicht existiert eine „vom Menschen unabhängige, objektive Welt“, die diese gegenständliche Realität darstellt (Wünsch, 2000, S. 99). Jedoch gibt es weitere Sichtweisen, die einer gegensätzlichen Meinung sind. Dabei repräsentiert die Realität nicht die Welt an sich, sondern entsteht nur durch eine Beobachtung (vgl. Stachura, 2010, S. 5; Wasser, 2007, S. 11). Weiter haben die verschiedenen Forschungsströmungen

unterschiedliche Auffassungen, wie die Realität von Individuen beobachtet bzw. wahrgenommen werden kann. Der Realismus ist der Überzeugung, dass der Mensch die Welt so wahrnehmen kann, wie sie ist. Daher gibt es eine objektive Wirklichkeit<sup>13</sup>, die erkennbar ist und sich im Original widerspiegelt (vgl. Stachura, 2010, S. 4). Im Gegensatz dazu geht der Idealismus davon aus, dass die objektive Welt mit den enthaltenen materiellen Dingen von Menschen nicht wahrgenommen werden kann (vgl. Stachura, 2010, S. 4). Der idealistischen Sichtweise entspricht der Konstruktivismus in Teilen (vgl. von Ameln, 2004, S. 9f.; Stachura, 2010, S. 5). Denn auch der Konstruktivismus ist der Auffassung, dass es nicht möglich ist, Natur und Gegenstände objektiv wahrzunehmen, da der Mensch diese objektive Natur bzw. Gegenstände erst durch die Betrachtung subjektiv eigenständig konstruiert (vgl. Stachura, 2010, S. 5; Wasser, 2007, S. 11). Daher wird die Welt mit ihren Originalen niemals so gesehen werden können, wie sie *wirklich ist*, sondern nach Maßgabe der jeweiligen Wahrnehmungsfähigkeit (vgl. Stachura, 2010, S. 8f.; Berger & Luckmann, 1977, S. 46). Jedoch wirkt die Abbildung der Wirklichkeit von außen betrachtet als ein System aus Objektivationen.

In diesem Sinne werden Originale in der vorliegenden Arbeit als ein System von Objektivationen verstanden, welche durch unendlich viele Merkmale und Eigenschaften charakterisiert sind. Dabei kann es sich um Abbildungen natürlich entstandener Phänomene, Materialien und Produkte als auch durch Menschen entwickelter Phänomene, Materialien, Produkte und Geräte mit einem Bezug zur Chemie handeln.

### **Modellexperiment**

Basierend auf verschiedenen Definitionsansätzen haben Sommer et al. (2017) eine objektbezogene Definition für den Begriff Modellexperiment entwickelt. Diese Definition beinhaltet drei Kriterien, die bei einem Objekt erfüllt sein müssen, damit es als Modellexperiment bezeichnet werden kann. Im Folgenden werden diese Kriterien zitiert und kurz erläutert, da diese Definition die Grundlage des in dieser Arbeit verwendeten Modellexperimente-Begriffes bildet.

---

<sup>13</sup> Die Begriffe Realität (Mittelstraß, 2016, S. 15ff.) und Wirklichkeit (Mittelstraß, 2016, S. 527f.) werden häufig synonym benutzt. Die Wirklichkeit kennzeichnet das Bestehen eines Ganzen und bei der Realität liegt der Fokus auf einem Sachverhalt/Aspekt der Wirklichkeit (Gessmann, 2009, S. 77of.). Die Wirklichkeit ist „im naturwissenschaftlichen Sinne der Inbegriff dessen, was wir auf Grund äußerer oder innerer Wahrnehmung nach deren kritischer Läuterung von subjektiven Zutaten und auf Grund von Schlüssen aus der Wahrnehmung (z.B. aus registrierbaren Daten über nicht sinnlich Wahrnehmbares, aber Meßbares) als objektiv seiend anerkennen“ (Regenbogen & Meyer, 1998, S. 736).

**Kriterium 1:** „Das Modellexperiment ist ein Experiment (Bezug zum Experiment)“ (Sommer et al., 2017, S. 14).

Dieses Kriterium beinhaltet den Gedanken von Neuhäuser (1975) und Klaus und Buhr (1972), dass an einem Modell eine experimentelle Handlung (basierend auf den Methoden des Faches Chemie) durchgeführt wird, um Erkenntnisse zu generieren.

**Kriterium 2:** „Das Modellexperiment verfügt über einen originalen Zielbereich (Bezug zum Original)“ (Sommer et al., 2017, S. 15).

Ein Modellexperiment kann erst entstehen, wenn es ein originales Analogon gibt, das es modelliert. Dabei können Originale natürlich entstandene Phänomene, Materialien und Produkte sowie durch Menschen entwickelte Phänomene, Materialien, Produkte und Geräte sein.

**Kriterium 3:** „Im Modellexperiment ist das Objekt (der Gegenstand) nicht das Original selbst, sondern das Original wird durch das Objekt materiell modelliert (Bezug zum Modell)“ (Sommer et al., 2017, S. 15).

Das Modellexperiment basiert somit auf einem Modell, das zum Original analog, aber nicht identisch ist.

### 2.2.2 Charakteristika von Modellexperimenten

Modellexperimente, aber auch originale Experimente können mit Hilfe von vier Merkmalsgruppen eindeutig charakterisiert werden (vgl. u.a. Steinbuch, 1977; Psarros, 1999; Pfeifer, Lutz & Bader, 2002; Sommer, 2007; Schmidkunz, 2012; Steff, 2015; Sommer, Steff & Toschka, 2018; Sommer, Toschka, Steff & Wirth, 2019). Es handelt sich um drei materielle Merkmale (Substanz, Material, fachmethodisch relevante Bedingungen) (vgl. Barke & Harsch, 2011; Bader, 2002; Pfeifer, Lutz & Bader, 2002; Sommer et al., 2017) und ein konzeptionelles Merkmal (Fachmethode). Die Merkmale werden im Folgenden kurz erläutert:

- **Substanz:** stoffliche Basis/ Chemikalien, die zum Experiment/ für die experimentelle Handlung eingesetzt werden und direkt an der Fachmethode beteiligt sind. Sie sind für das Gelingen des Experiments relevant.
- **Material:** Baumaterialien; nicht an der Fachmethode beteiligt, werden trotzdem benötigt, um das materielle Modell zu konstruieren bzw. das Experiment durchführen zu können. Sie sind für den experimentellen Prozess irrelevante Bauteile.
- **Fachmethode:** Methoden des Experimentierens wie Methoden zur Ermittlung von Stoffeigenschaften; Methoden zur Trennung von Stoffgemischen bis hin

zum Reinstoffkonzept; Methoden der instrumentellen Analytik; Methoden, wie Analyse oder Synthese, auf der Basis des Begriffs der chemischen Reaktion.

- **Fachmethodisch relevante Bedingungen:** Konzentration, Temperatur, Druck, pH-Wert, durch die die Fachmethode näher charakterisiert wird.

Weisen in einem Experiment die Merkmale Substanz, Material, Fachmethode und fachmethodisch relevanten Bedingungen die gleichen Ausprägungen auf, wie sie in einem Original vorkommen, so handelt es sich bei dem Experiment um ein Original. Wird jedoch ausgehend von einem Original die Ausprägung einzelner Merkmalsgruppen bei einem Experiment verändert bzw. modelliert, handelt es sich um ein Modellexperiment. So können die Merkmalsgruppen insgesamt in der Ausprägung *Original* oder *Modell* vorliegen. Je mehr Merkmalsgruppen modelliert werden, umso weiter ist das Modellexperiment vom ursprünglichen Original entfernt. Die Stärke der Modellierung kann im Modellierungsgrad ausgedrückt werden (vgl. Sommer et al., 2017).

Zur Veranschaulichung der Kriterien und Merkmale wird im Folgenden mit Hilfe der drei Kriterien und der vier Merkmalsgruppen das Beispiel des *Modellexperiments zur Staubexplosion* reflektiert.

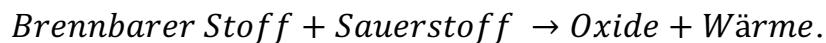
### 2.2.3 Staubexplosion

Ein bekanntes Modellexperiment, welches dem Inhaltsfeld Arbeitssicherheit zugeordnet werden kann, ist das Modellexperiment zur Staubexplosion (vgl. Sommer, Steff & Toschka, 2018). Dieses wird häufig eingesetzt, um das Konzept Staubexplosion mit besonderem Fokus auf dem Prozess der Aufwirbelung und der Ausbildung eines explosionsfähigen Staub-Luft-Gemisches zu vermitteln. Dieses Modellexperiment steht als Untersuchungsgegenstand innerhalb der hier vorliegenden Studie im Zentrum und eine genaue Kenntnis dessen ist für die Datenauswertung und -analyse von großer Relevanz. Daher wird im weiteren Verlauf auf den Gegenstand *Staubexplosion* sowie deren Definition und Bedingungen eingegangen. Anschließend werden die Mehlstaubexplosion der Bremer Rolandmühle als ein Original sowie das dazu analoge Modellexperiment in der Low-Cost-Hartmann Apparatur vorgestellt (vgl. Schröder, Steff & Sommer, 2015a; 2015b).

#### Definition

Eine Staubexplosion ist eine sehr schnelle chemische Verbrennungsreaktion (vgl. Beck et al., 1997, S. 8; Schmiermund, 2019, S. 479). Bei dieser Verbrennungsreaktion bildet ein brennbarer Stoff in Staubform mit einem Oxidationsmittel (meist Sauerstoff) innerhalb eines Raumes ein brennbares Staub-Luft-Gemisch. Auf der

Basis dieses Gemisches läuft eine sehr schnelle Verbrennungsreaktion ab (vgl. Eckhoff, 2003, S. 5):



Während der Verbrennungsreaktion pflanzt sich eine Flamme selbstständig fort (vgl. Bender, 2013, S. 35; Schröder, 2017). Die dabei entstehenden Kräfte und Geschwindigkeiten erhöhen sich „with increasing degree of subdivision of the material“, das die Staubexplosion verursacht (Eckhoff, 2003, S. 1).

### ***Bedingungen für das Auftreten einer Staubexplosion***

In der zuvor genannten Definition für eine Staubexplosion sind einige Bedingungen, die für das Auftreten einer Staubexplosion notwendig sind, enthalten. Damit eine Staubexplosion auftreten kann, müssen insgesamt fünf Bedingungen gleichzeitig erfüllt sein. Diese sind in einer Erweiterung des Verbrennungsdreieckes – dem Staubexplosionspentagon – systematisch dargestellt (Abbildung 5).

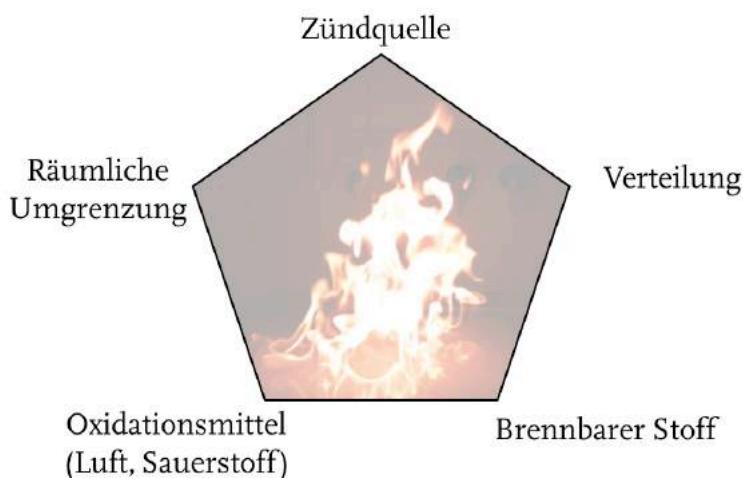


Abbildung 5: Staubexplosionspentagon (verändert nach Kauffman, 1982; Amyotte & Eckhoff, 2010).

Zuerst muss ein **brennbarer Stoff (Brennstoff)** vorliegen. Dieser muss zum einen die chemische Eigenschaft haben, zusammen mit einem Oxidationsmittel (Luft, Sauerstoff) ein Brennstoff-Luft-Gemisch zu bilden und eine exotherme Reaktion einzugehen. Bei dieser exothermen Reaktion muss mehr Energie freigesetzt werden können als gleichzeitig an das umliegende Medium abgegeben werden kann (vgl. Schröder, 2017). Zum anderen muss dieser brennbare Stoff als Staub vorliegen, also eine Partikelgröße von unter 500 µm aufweisen, um durch den relativ hohen Zerteilungsgrad mit einer großen Partikeloberfläche schnell aufgewirbelt werden zu können. Durch die größere Oberfläche ist dieser gleichzeitig auch sehr reaktiv und bildet ein explosives Staub-Luft-Gemisch (vgl. Stahmer & Gerhold, 2014; DIN EN ISO 80079-20-2, S. 5; Bartknecht & Zwahlen, 1993, S. 148). Zusätzlich darf der brennbare Stoff nur einen geringen Wassergehalt aufweisen. Das

bedeutet, dass er relativ trocken sein muss, da es ab einem Feuchtigkeitsgehalt von ca. 50 % zu einer Beeinträchtigung der Reaktivität kommt, so dass sich meistens kein explosionsfähiges Staub-Luft-Gemisch mehr bilden kann (vgl. Bartknecht, 1978).

In der Industrie gibt es verschiedene Staubarten, auf deren Grundlage sich verhältnismäßig häufig Staubexplosionen ereignen. Holzstaubexplosionen treten mit 31 % in der Industrie am häufigsten auf. Bei einem Viertel aller Staubexplosionen (25 %) sind Stäube aus der Nahrungs- und Futtermittelindustrie beteiligt (vgl. Bartknecht & Zwahlen, 1993, S. 160). Darunter fallen unter anderem Getreide, Futtermittel, Mehl, Stärke und Zucker (vgl. ebd., S. 157). Ein Beispiel für eine Staubexplosion ist die Mehlstaubexplosion der Bremer Rolandmühle, die im Anschluss an die zusammenfassende Darstellung der fünf Bedingungen für eine Staubexplosion vorgestellt wird (vgl. ebd., S. 159 f.). Auch Metalle, vor allem Aluminium, sind relativ häufig an Staubexplosionen beteiligt (13 %).

Gleichzeitig muss ein **Oxidationsmittel** (Luft, Sauerstoff) vorliegen. Dieses wird weitgehend durch den in der Luft vorhandenen Sauerstoff bereitgestellt. Selten sind auch andere gasförmige Stoffe an Staubexplosionen als Oxidationsmittel beteiligt. So können Stickstoff oder Kohlenstoffdioxid, z.B. bei Metallstaubexplosionen, zu einer exothermen Reaktion führen (vgl. Bartknecht & Zwahlen, 1993, S. 149; Eckhoff, 2003, S. 6).

Darüber hinaus muss eine **Verteilung des brennbaren Stoffes** in dem Oxidationsmittel, der Luft, erfolgen. Diese Verteilung wird häufig durch eine Aufwirbelung des brennbaren Stoffes mit einem hohen Zerteilungsgrad ermöglicht. Auf diese Weise vergrößert sich die freie Oberfläche des brennbaren Stoffes im Vergleich zum abgelagerten Stoff, welche zur Reaktion mit dem im Staub-Luft-Gemisch vorhandenen Sauerstoff bereitsteht. Dadurch wird ein schnellerer Reaktionsverlauf ermöglicht. Bei dieser Verteilung muss die Konzentration des brennbaren Staubes in dem Gemisch mit Luft eine definierte Größe aufweisen, um explosionsfähig zu sein. So gibt es für alle brennbaren Stoffe eine untere und eine obere Explosionsgrenze, zwischen denen eine Explosion erfolgen kann (vgl. DIN EN 14034-3, S. 6). Diese Explosionsgrenzen sind stoffbezogen und variieren bei unterschiedlichen Stoffen. Jedoch sind die meisten brennbaren Stäube zwischen 20 - 60 g (untere Explosionsgrenze) und 2 - 6 kg (obere Explosionsgrenze) Staub je m<sup>3</sup> Luft explosionsfähig (vgl. Schmiermund, 2019, S. 483). Außerhalb dieser beiden Explosionsgrenzen liegen entweder zu wenige brennbare Partikel vor oder zu viele unverbrannte Partikel, welche die Energie der chemischen Reaktion ohne selbst zu reagieren aufnehmen und damit die Reaktionsgeschwindigkeit senken (vgl. Stahmer & Gerhold, 2014).

Damit sich durch die Verteilung eine Explosion ausbilden kann, ist eine **räumliche Umgrenzung** notwendig. So sind als räumliche Umgrenzungen Silos und Bunker (20 %), Entstaubungs- und Mahlanlagen (15 bzw. 14 %) aber auch Schleifeinrichtungen (5 %) an Staubexplosionen beteiligt. Konkret ermöglicht die räumliche Umgrenzung, dass sich innerhalb dieser Umgrenzung bei der Verbrennungsreaktion ein Überdruck aufbauen und die Reaktionsgeschwindigkeit ansteigen kann. Jedoch müssen die räumlichen Umgrenzungen nicht vollständig sein, sodass durch Einrichtungsgegenstände, Stellwände oder Maschinen bereits Bereiche entstehen können, die einen lokalen Überdruck in Verbindung mit einer beschleunigten Verbrennung auslösen und somit zu einer Staubexplosion führen können (vgl. Amyotte, 2014).

Zur Zündung des Staub-Luft-Gemisches muss zudem eine **Zündquelle** vorliegen. Für die Zündung muss die Temperatur der Zündquelle die jeweilige stoffspezifische Zündtemperatur des Staubes überschreiten. Die Zündtemperatur ist die „[...] niedrigste Temperatur einer heißen Oberfläche, die das zündfähigste Staub-/ Luft-Gemisch unter festgelegten Prüfbedingungen entzündet“ (DIN EN ISO 80079-20-2, S. 6). Als häufigste Zündquelle bei Staubexplosionen in der Industrie werden mechanisch erzeugte Zündfunken (28 %) gesehen. Weitere Zündquellen sind u.a. Glimmnestester, mechanische Erwärmungen, elektrostatische Entladung, Feuer und heiße Oberflächen (vgl. Bartknecht & Zwahlen, 1993, S. 161).

Da sich in der Industrie relativ häufig Staubexplosionen ereignen und bei 25 % davon die Nahrungs- und Futtermittelindustrie beteiligt ist, wird die Mehlstaubexplosion in der Bremer Rolandmühle als konkretes Beispiel näher betrachtet (vgl. Bartknecht & Zwahlen, 1993, S. 160). Diese wird im Folgenden kurz erläutert und bildet die Basis des Analogievergleiches innerhalb der vorliegenden Studie.

### ***Die Mehlstaubexplosion in der Bremer Rolandmühle – Original 1***

Eines der größten Staubexplosionsunglücke der Bundesrepublik Deutschland ist die Mehlstaubexplosion der Bremer Rolandmühle im Jahr 1979. Ein Kabelbrand löste zunächst einen Brand innerhalb der Weizenmühle aus. Durch das in der Luft aufgewirbelte Weizenmehl entstanden zuerst kleinere Mehlstaubexplosionen, die wiederum angesammeltes Weizenmehl aufwirbelten. Es bildete sich eine Kettenreaktion, die in der Weizenmühle zu einer großen Mehlstaubexplosion geführt hat. Dabei kamen 14 Menschen ums Leben und es entstand ein Sachschaden in Höhe von 50 bis 100 Millionen D-Mark (vgl. Graefe, 1979).

### **Modellexperiment in der LC-Hartmann Apparatur**

Basierend auf diesem originalen Staubexplosionsunglück wurde von Schröder, Steff und Sommer (2015a; 2015b) ein Modellexperiment zur Staubexplosion mit einer Low-Cost-Hartmann Apparatur (LC-HA) entwickelt. In diesem Modellexperiment wird ein brennbarer Staub mit Hilfe einer Luftpumpe aufgewirbelt und mit der enthaltenen Luft in einem Plexiglasrohr vermischt. Das auf diese Weise entstehende Staub-Luft-Gemisch wird dann an einer Glühwendel gezündet. Es findet eine schnelle Verbrennungsreaktion mit Flammenerscheinung statt, bei der der entstehende Druck über einen am Plexiglasrohr montierten beweglichen Deckel entweichen kann. In der vorliegenden Studie wurde dieses Modellexperiment in der LC-HA durchgeführt (Abbildung 6).

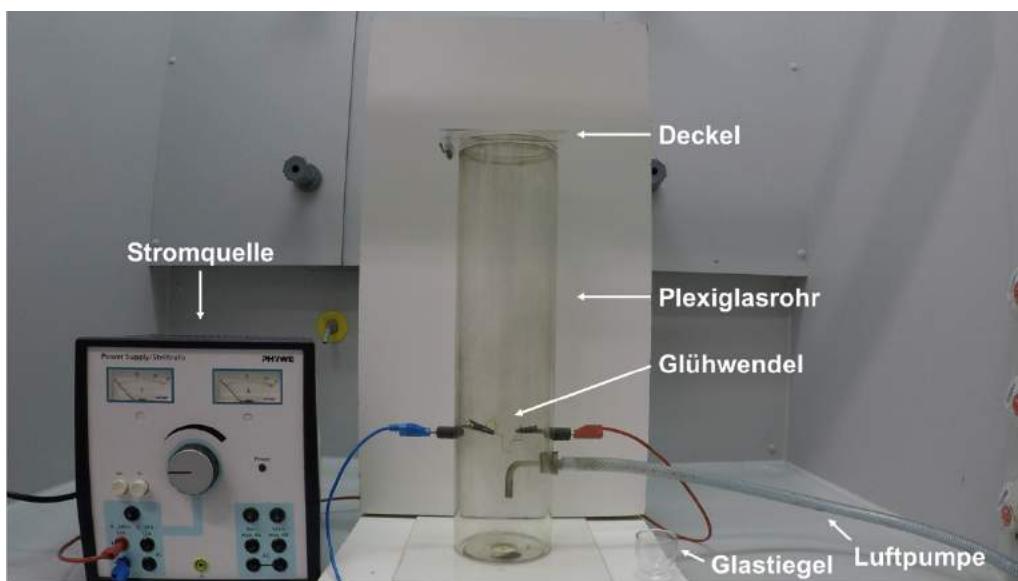


Abbildung 6: Aufbau des Modellexperiments in der LC-HA.

Das Modellexperiment besteht aus einem Plexiglasrohr an dem oben ein beweglicher Deckel angebracht ist. In diesem Plexiglasrohr ist mittig eine Glühwendel eingespannt, die an ein Netzteil angeschlossen ist. Im unteren Drittel des Plexiglasrohrs ist ein gewinkeltes Glasrohr eingebaut, das durch einen langen Plastikschnürring mit einer Luftpumpe verbunden ist. Am unteren Ende ist das Plexiglasrohr offen, damit ein Glastiegel samt Unterlegscheibe hineingestellt werden kann. In den Glastiegel werden zur Durchführung des Experiments ein bis zwei Teelöffel der brennbaren Testsubstanz eingefüllt. Der gefüllte Glastiegel wird auf eine Unterlegscheibe gestellt und mit dem Plexiglasrohr samt Inhalt überdeckt. Als Nächstes wird ein Netzteil bis auf 15 V eingeschaltet. Beginnt die Glühwendel zu leuchten, wird die Luftpumpe zunächst vorsichtig aufgezogen und dann ruckartig betätigt. Nach der Feuererscheinung wird das Netzteil ausgeschaltet. Während des Experimentierens kann beobachtet werden, dass sich zunächst die Testsubstanz im gesamten Plexiglasrohr verteilt und ein Staub-Luft-Gemisch bildet. Erst nachdem sich dieses

gleichmäßige Staub-Luft-Gemisch gebildet hat, entzündet es sich an der Glühwendel. Die Feuererscheinung entsteht dabei in unmittelbarer Nähe der Glühwendel und breitet sich im gesamten Plexiglasrohr nach oben hin aus. Der Deckel wird dabei geöffnet, da während dieser Staubexplosion ein Überdruck entsteht, der über den Deckel entweichen kann.

## 2.3 Synthese von Modellexperiment und Denken in Analogien am Beispiel Staubexplosion

Im Folgenden sollen nun anhand des Modellexperiments zur Staubexplosion in der LC-HA die Synthese zwischen der Theorie der Modellexperimente und der Theorie des Denkens in Analogien vorgestellt werden.

### 2.3.1 Modellexperiment

Bei der Staubexplosion in der LC-HA handelt es sich um ein Modellexperiment, da die drei Kriterien für ein Modellexperiment nach Sommer et al. (2017) erfüllt sind.

**Kriterium 1:** Es findet eine experimentelle Handlung statt. Dabei basiert diese experimentelle Handlung auf einer schnell ablaufenden Verbrennungsreaktion (Explosion). Somit ist der Bezug zum Experiment gegeben und das Kriterium 1 erfüllt.

**Kriterium 2:** Ein möglicher originaler Zielbereich ist die Mehlstaubexplosion in der Bremer Rohlandmühle (vgl. Abschnitt – Die Mehlstaubexplosion in der Bremer Rolandmühle – Original 1). Damit ist der Bezug zum Original gegeben und das Kriterium 2 erfüllt.

**Kriterium 3:** Auch der Bezug zum Modell ist bei der Staubexplosion in der LC-HA gegeben (Kriterium 3 erfüllt). In dem Modellexperiment wird der Prozess der Staubexplosion modelliert. Im Experiment wird u.a. eine Glühwendel als Zündquelle verwendet, die an einen Stromgenerator angeschlossen ist. Dies modelliert das Feuer, das bei der originalen Mehlstaubexplosion zur Entzündung des Mehl-Luft-Gemisches geführt hat. Zudem werden in dem Modellexperiment weitere Materialien und die Substanz sowie fachmethodisch relevante Bedingungen modelliert.

### 2.3.2 Charakterisierung

Im Folgenden werden Merkmalsgruppen (vgl. Abschnitt 2.2.2) genutzt, um die Merkmale des Modellexperiments zur Staubexplosion in der LC-HA zu charakterisieren. Anschließend werden die Merkmale in Anlehnung an die theoretischen Grundlagen der Analogieforschung (Objekt, Attribut und Relation) kategorisiert.

Das Modellexperiment in der LC-HA besitzt eine Vielzahl von Merkmalen. Diese sind zum einen durch den Versuchsaufbau bzw. das materielle Modell, mit dem das Experiment durchgeführt werden soll, direkt zu erkennen (*Modell*). Zum anderen können weitere Merkmale durch den Prozess, der beim Experimentieren an dem Modell abläuft, identifiziert werden (*Experiment am Modell*). Die Merkmale sind in Tabelle 2 aufgelistet.

## 2.3 Synthese von Modellexperiment und Denken in Analogien am Beispiel Staubexplosion

---

Tabelle 2: Charakterisierung des Modellexperiments in der LC-HA anhand der ME-Merkmalgruppen und Analogiearten.

	Charakteristika des ME	Merkmalsgruppen mit Ausprägungen	Analogiearten
Modell	<b>Glühwendel</b>	Material	Objekt
	<b>Stromgenerator</b>	Material	Objekt
	<b>Plexiglasrohr mit Deckel</b>	Material	Objekt
	- geschlossen	Material	strukturelles Attribut
	<b>Luftpumpe</b>	Material	Objekt
	<b>Glastiegel</b>	Material	Objekt
	<b>Stoff</b>	Substanz	Objekt
	<b>Luftsauerstoff</b>	Substanz	Objekt
	<b>Stoffeigenschaften:</b>		
	- Farbe des Stoffes	Substanz	oberflächliches Attribut
Experiment am Modell	- chemische Struktur	Substanz	oberflächliches Attribut
	- Brennbarkeit	Substanz	strukturelles Attribut
	- hoher Zerteilungsgrad (Korngröße)	Substanz	strukturelles Attribut
	- Trockenheit	Substanz	strukturelles Attribut
	<b>Mindestzündtemperatur</b>	Fachmethodisch relevante Bedingung	strukturelles Attribut
	<b>Verbrennungstemperatur</b>	Fachmethodisch relevante Bedingung	strukturelles Attribut
	<b>Maximaler Explosions(über)druck</b>	Fachmethodisch relevante Bedingung	strukturelles Attribut
	<b>Untere Explosionsgrenze</b>	Fachmethodisch relevante Bedingung	Relation
	<b>Aufwirbelung (basierend auf dem Zusammentreffen des Stoffes mit hohem Zerteilungsgrad und dem Luftsauerstoff)</b>	Fachmethodisch relevante Bedingung	Relation
	<b>Schnelle Verbrennungsreaktion (Explosion)</b>	Fachmethode	Relation

Dem Modellexperiment in der LC-HA liegt dieselbe Fachmethode wie dem Original zugrunde, eine schnelle Verbrennungsreaktion (auch Explosion genannt). Diese schnelle Verbrennungsreaktion, auch Explosion genannt, kann im Modellexperiment mit jeglicher brennbaren Substanz neben Weizenmehl ausgelöst werden, die einen hohen Zerteilungsgrad aufweist. Dazu gehören beispielsweise Maismehl, Bärlappsporen, Holzpulver oder Toner. Damit diese Explosion stattfinden kann, werden bei verschiedenen Stoffen unterschiedliche Mindestzündtemperaturen

benötigt. Das zündwilligste Gemisch von Weizenmehl (Typ 405) mit Luft entzündet sich bei einer Temperatur von 400 °C, ein Maisstärke-Luft-Gemisch (bildet die Basis von Holipulver, vgl. Steff, Schröder, Buse, Bär, Vogel, Heller & Sommer, 2016) bei 440 °C und ein Toner-Luft-Gemisch bei 500 °C (vgl. GESTIS STAUB-EX Datenbank). Die Mindestzündtemperaturen können den fachmethodisch relevanten Bedingungen zugeordnet werden, da sie die Fachmethode näher charakterisieren.

Eine weitere fachmethodisch relevante Bedingung ist die untere Explosionsgrenze. Die drei zuvor genannten Stoffe (Weizenmehl, Maisstärke und Toner) weisen eine ähnliche untere Explosionsgrenze auf. So liegt die untere Grenze des Konzentrationsbereichs, in dem ein Staub im Gemisch mit Luft zur Explosion gebracht werden kann, von Weizenmehl, Maisstärke sowie Toner bei 60 g/m<sup>3</sup> (vgl. GESTIS STAUB-EX Datenbank).

Die Merkmale können nicht nur mithilfe der Merkmalsgruppen charakterisiert werden, sondern auch mit der Kategorisierung beim Analogiedenken (Objekt, Attribute und Relationen) in Beziehung gebracht werden (vgl. Tabelle 2, rechte Spalte). So werden die Substanz und die Materialien, die notwendig sind, um das materielle Modell zu konstruieren und das Experiment durchführen zu können, auf der Objektebene eingeordnet. Die Substanz und die Materialien weisen auch Attribute auf, die für das Experiment relevant bzw. irrelevant sind. Beispielsweise kann das Modellexperiment in der LC-HA zur Staubexplosion, konkret der Mehlstaubexplosion (siehe Abschnitt 2.2.3), nicht korrekt ablaufen, wenn ein nicht brennbarer Stoff wie Gips oder Kalk eingesetzt wird (vgl. Sommer, Toschka, Steff & Wirth, 2019). Dagegen kann, wie bereits genannt, das Modellexperiment mit jeglichem brennbaren Stoff durchgeführt werden, der einen hohen Zerteilungsgrad aufweist. Neben den strukturellen Attributen, zu denen konzeptbezogene funktionelle Attribute zählen, die für das Verständnis des zugrundeliegenden fachlichen Konzeptes relevant sind, existieren auch oberflächliche Attribute. Diese sind für das Verständnis des zugrundeliegenden Prozesses des Modellexperiments nicht relevant, für die Durchführung des Modellexperiments jedoch notwendig (vgl. Beller & Bender, 2010, S. 135; Forbus et al., 1994; Kircher, 1995; Wilbers, 2000).

Im Zusammenhang mit der Substanz bei diesem Modellexperiment sind beispielsweise die Farbe und die spezifische chemische Struktur für das Phänomen nicht relevant (z.B. Bärlappsporen auf Eiweißbasis oder Toner auf Kunstharzbasis im Vergleich zum Weizenmehl auf Stärkebasis) (vgl. Sommer, Toschka, Steff & Wirth, 2019).

Um aus der Vielzahl an charakteristischen Merkmalen die für das Verständnis des Explosionskonzeptes relevanten Merkmale auszuwählen, können die gesamten

Merkmale in einen Zusammenhang mit den fünf Merkmalen, die im Explosionspentagon (Abbildung 5) dargestellt sind, in Beziehung gebracht werden (vgl. Tabelle 3). Dabei werden in Tabelle 3 gleichzeitig die Merkmale, die das Modellexperiment charakterisieren, mit denen, die das Original 1 beschreiben, in Beziehung gebracht.

Tabelle 3: Detaillierter tabellarischer Vergleich von Original 1 (Unfall) und Modellexperiment mit Bezug zum Explosionskonzept.

Original 1 (Unfall in der Rolandmühle)		Modellexperiment	Konzept
Kabelbrand	ent-spricht	Glühwendel	Zündquelle
Windaufwirbelung	ent-spricht	Aufwirbelung durch Luftzufuhr über eine Luftpumpe	Verteilung eines Stoffes mit einem hohen Zerteilungsgrad und Luftsauerstoff
Weizenmehl	ent-spricht	Toner	Brennbarer Stoff
Luftsauerstoff	ent-spricht	Luftsauerstoff	Oxidationsmittel (Luft, Sauerstoff)
Getreidemühle	ent-spricht	Plexiglasrohr mit Deckel	Räumliche Umgrenzung

### 2.3.3 Denken in Analogien beim Umgang mit Modellexperimenten im Lehr-Lern-Kontext

Das Modellexperiment und das Original stellen die in der Analogieliteratur in Beziehung gesetzten Bereiche, den Analogie- und Zielbereich, dar. Während des Umgangs mit Modellexperimenten findet ein Analogiedenkprozess statt (vgl. Falkenhainer et al., 1989; Holyoak & Thagard, 1989; Kalogerakis, 2010; Schwering, Krumnack, Kühnberger & Gust, 2009). Dabei werden mindestens drei Schritte durchlaufen: *Accessing, Mapping* und *Transfer*.

Im Lehr-Lern-Kontext dienen diese Modellexperimente den Lernenden häufig als Lernmittel. Dabei werden die Modellexperimente durch Lehrer\*innen, Lehrmittelentwickler\*innen und Schulbuchautor\*innen (kurz: Dritte) in Analogie zu einem konkreten Original entwickelt und den Lernenden vorgegeben. Bei der Entwicklung dieser Modellexperimente haben die Dritten zunächst mögliche bekannte Modellexperimente aus ihrem Langzeitgedächtnis spontan abgerufen und diese Modellexperimente nach ihrer Güte zur Veranschaulichung bzw. Erklärung des jeweiligen Originals bewertet. Dabei sollte das Modellexperiment in den Strukturmerkmalen prinzipiell analog zum Original sein (vgl. Beller & Bender, 2010; Forbus et al., 1994). Die Dritten haben somit den Schritt *Accessing* im Analogiedenkprozess durchgeführt (siehe Abbildung 2). Dabei haben sie das zugehörige Original sowie die intendierten Analogien zwischen Modellexperiment und Original in der

Analogierelation festgelegt (vgl. Clement, 1978; 2008; Duit, 1995). Somit ist es bei diesem Schritt auf der Basis von Analogien zu einer Modellbildung gekommen. Aufgrund dieser Genese weist das Modellexperiment Analogien zum Original auf (vgl. Sommer et al., 2018).

Damit die Lernenden mithilfe des vorgegebenen Modellexperiments Erkenntnisse auf das intendierte Original übertragen können, werden von ihnen zahlreiche Denkschritte verlangt. Zunächst müssen sie das Modellexperiment verstehen und das Original rudimentär kennen, bevor sie in einem nächsten Schritt das Mapping durchführen können. Während des Mappings müssen die Lernenden die einzelnen Merkmale des Modellexperiments mit dem Original vergleichen und dadurch die Ähnlichkeiten und Unterschiede identifizieren (vgl. Beller & Bender, 2010; Forbus et al., 1994; Kircher, 1995; Wilbers, 2000). Beispielsweise können von den Lernenden bezogen auf das Modellexperiment in der LC-HA und das Original 1 die folgenden Merkmale miteinander verglichen werden (visuelle Darstellung vgl. Abbildung 7). Als Objekte können zwischen den beiden Bereichen – Modellexperiment und Original 1 – die Stoffe (Toner, Weizenmehl) und die Zündquellen (Glühwendel, Kabelbrand) miteinander verglichen werden. Diese Objekten können verschiedene *Attribute* zugeordnet werden (brennbar, schwarz/ weiß, hoher Zerteilungsgrad). Diese Attribute können auch in diesem Beispiel in Anlehnung an die theoretischen Grundlagen der Analogieforschung prinzipiell in zwei Gruppen aufgeteilt werden: *oberflächliche und strukturelle Attribute*. Die beiden Bereiche weisen in Bezug auf das oberflächliche Attribut der Farbe des jeweiligen Stoffes keine Ähnlichkeiten auf, da die Farbe des Weizenmehl weiß ist und die des Toners schwarz ist. Als *strukturelle Attribute* können die Attribute Brennbarkeit und hoher Zerteilungsgrad des Stoffes in dem gewählten Beispiel eingeordnet werden. Diese sind zueinander ähnlich. Treten verschiedene Objekte sowie Attribute in einem komplexeren Wechselverhältnis auf, wird dieses Wechselverhältnis als Relation bezeichnet. Für das Beispiel bedeutet es, dass das Zusammenkommen aller fünf in Abbildung 7 markierten Objekte mit ihren relevanten Attributen zur Entstehung einer Explosion führen. Das Beispiel zeigt, dass im Zusammenhang mit Modellexperimenten der Analogierelation mindestens eine Ähnlichkeit in den Relationen zugrunde liegt. Dies gründet darauf, dass die im Modellexperiment zu modellierende originale chemische Reaktion ausgelöst werden soll (vgl. Tabelle 2). Damit dies möglich ist, wird im Modellexperiment häufig dieselbe Fachmethode wie im Original verwendet, um den experimentellen Prozess umsetzen zu können (vgl. Steff, 2015).

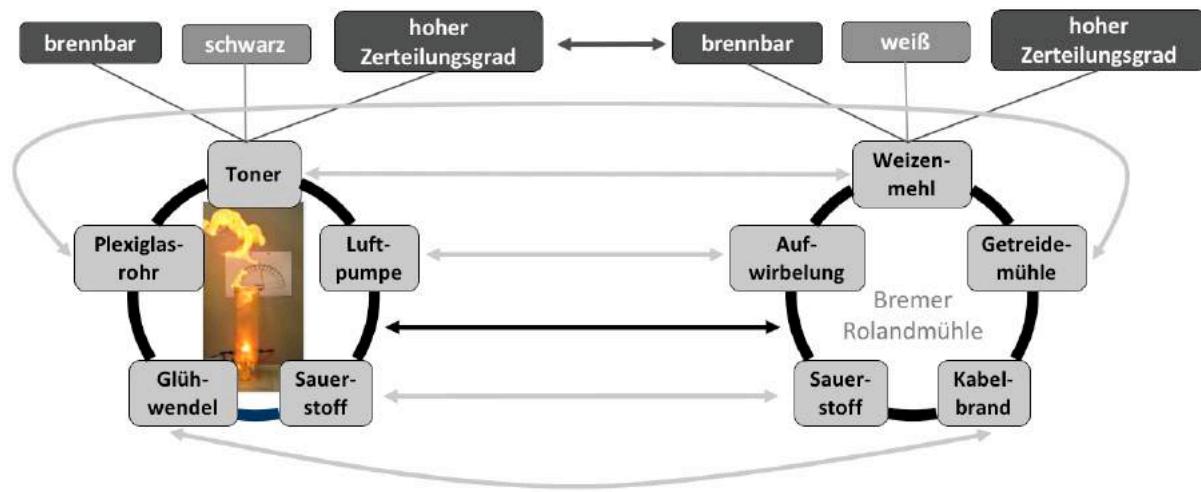


Abbildung 7: Darstellung der konkreten Merkmale eingeteilt nach Objekten (hellgrau), oberflächliche (mittelgrau) und strukturelle Attribute (dunkelgrau) und Relationen (schwarz), welche die Analogie zwischen Modellexperiment und Original bilden.

Insgesamt handelt es sich beim Mapping aus kognitiver Sicht um die systematische Erkennung von gemeinsamen Mustern – Merkmalen (Aussehen, Struktur, Eigenschaften und Funktion bzw. Prozess) (vgl. Rossa, 1975; Pfeifer & Sommer, 2018, S. 528 f.). Ausgehend von diesem Mapping können Erkenntnisse aus dem Modellexperiment korrekt auf das Original transferiert sowie neue Konzepte und Erklärungen eingeführt werden (Transfer). Im Lehr-Lern-Kontext müssen somit die Schritte Mapping und Transfer von den Lernenden aktiv und korrekt durchgeführt werden, damit die Modellexperimente lernwirksam sein können.

#### 2.3.4 Empirische Studien zum Lernen mit Modellexperimenten und deren Zusammenhang mit dem Denken in Analogien

Bisher existieren nur wenige empirische Befunde zu den Lernprozessen beim Umgang mit Modellexperimenten. Harrison und Treagust (1996) haben das Verständnis über Analogiemodelle in der Chemie von Schüler\*innen der achten bis elften Jahrgangsstufe untersucht. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchung wurde ein Konzept für den Einsatz von Analogiemodellen im naturwissenschaftlichen Unterricht entwickelt. Die Autoren haben empfohlen, dass eine Modellierungsfähigkeit von Schüler\*innen entwickelt werden soll, indem u.a. analoge Modelle mit ihren ähnlichen und unterschiedlichen Attributen besprochen werden. Steff (2015) hat sich mit der Lernwirksamkeit von Modellexperimenten beschäftigt. Dabei lag der Schwerpunkt auf der Variation der im Modellexperiment eingesetzten Modellsubstanz. Es wurde untersucht, ob eine erhöhte Ähnlichkeit in den Oberflächenmerkmalen zwischen Originalsubstanz und Modellsubstanz den spontanen Abruf des Zielbereiches (Original) bzw. das Mapping begünstigen. Dabei wurde zwischen einer Kontrollgruppe und drei Experimentalgruppen unterschieden, bei denen jeweils die Ähnlichkeiten in den Oberflächenmerkmalen variierten. Es konnte gezeigt

werden, dass ein spontaner Abruf des Originals begünstigt wird, wenn eine Substanz, die an der Fachmethode beteiligt ist, viele Oberflächenähnlichkeiten zum Original aufweist (vgl. Steff, 2015; Sommer, Toschka, Steff & Wirth, 2019). Das würde bedeuten, dass bei Modellexperimenten, bei denen verschiedene Modellsubstanzen zur Auswahl stehen, die Substanzen für einen spontanen Abruf des Originals ausgewählt werden sollten, die eine erhöhte Ähnlichkeit der Oberflächenmerkmale aufweisen. Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, dass das Mapping der Modellsubstanz mit der Originalsubstanz durch eine erhöhte Ähnlichkeit der Oberflächenmerkmale begünstigt wird. Gleichzeitig konnte jedoch auch gezeigt werden, dass gerade bei Substanzen mit wenigen Oberflächenähnlichkeiten zum Original auch andere charakteristische Merkmale (Materialien) von den Lernenden häufiger fokussiert und als analog eingeschätzt werden als bei der Originalsubstanz oder der Modellsubstanz mit hohen Oberflächenähnlichkeiten (vgl. Steff, 2015). In dieser Studie wurden ausschließlich schriftliche Befragungsinstrumente eingesetzt, um das Ergebnis der Analogiebildung in Bezug auf den spontanen Abruf und das Mapping zu messen. Somit bleibt offen, wie genau die Lernenden bei der Identifikation relevanter ähnlicher Merkmale zwischen Modellexperiment (Analogiebereich) und Original (Zielbereich) und der Übertragung dieser Ähnlichkeiten vorgehen. Diesem Forschungsdesiderat soll in der vorliegenden Studie begegnet werden. Dabei sollen detaillierte Informationen über den konkreten mentalen Prozess und das Vorgehen des Denkens in Analogien von Schüler\*innen beim Umgang mit Modellexperimenten identifiziert werden. Insbesondere sollen verschiedene Abstraktionsebenen miteinander in Beziehung gesetzt werden, um den mentalen Prozess auf der Mikroebene sehr detailliert nachzeichnen zu können.

## 2.4 Visuelle Wahrnehmung

Um die Identifikation von Ähnlichkeiten zwischen Modellexperiment und Original und die Analogieübertragung auf das Original zu gewährleisten, muss vorab ein korrektes und umfassendes Verständnis von einem Modellexperiment entwickelt werden. Damit die Schüler\*innen ein solches korrektes Verständnis entwickeln können, müssen die relevanten Merkmale und Prozesse im Modellexperiment wahrgenommen werden. Wie Menschen diese Merkmale und Prozesse aus der Umgebung wahrnehmen, aufnehmen und anschließend verarbeiten, ist Gegenstand gedächtnispsychologischer Theorien. Aus diesen Theorien können unter anderem Implikationen für das Lernen mit dynamisch ablaufenden Modellexperimenten als einem wahrnehmbaren Reiz abgeleitet werden.

### 2.4.1 Wahrnehmungsprozess

Die Wahrnehmung eines Reizes ist ein komplexer, dynamischer Prozess von Informationsverarbeitungs-, Transformations-, Selektions- und Interpretationsschritten (vgl. Becker-Carus & Wendt, 2017). Während des Prozesses transformiert das wahrnehmende Subjekt die über die Rezeptoren der Sinnesorgane aufgenommenen Informationen eines Reizes in ein mentales Format und verwendet dies zur Konstruktion einer mentalen Repräsentation eines verfügbaren Reizes (vgl. Gnöyke, 1997, S. 65). Die einzelnen Schritte des Wahrnehmungsprozesses sind ausführlich in Abbildung 8 dargestellt.

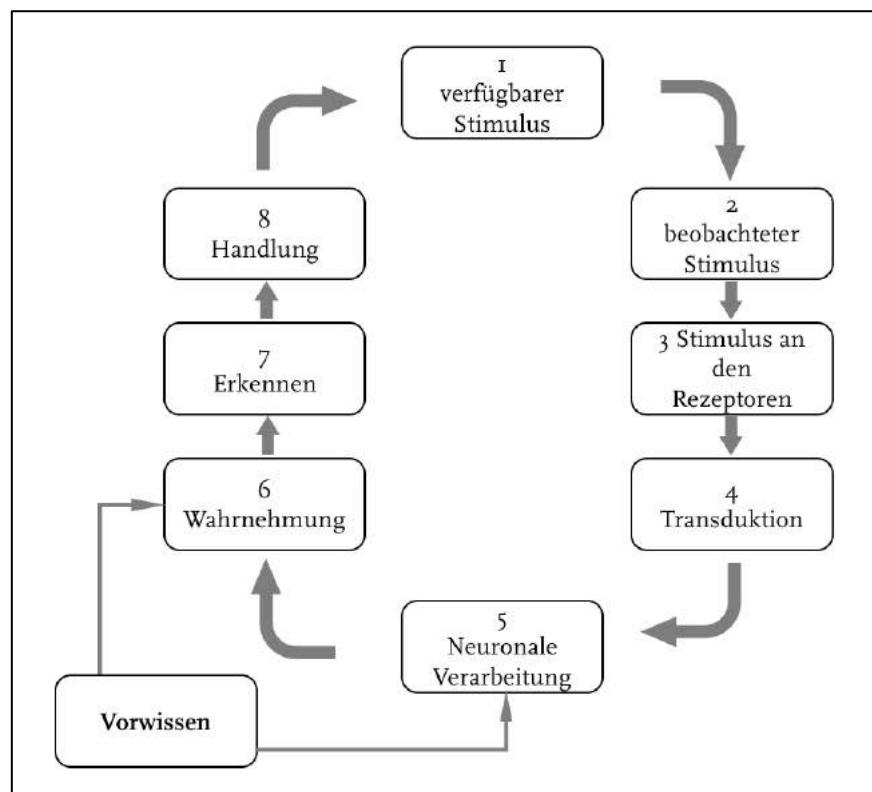


Abbildung 8: Zyklische Darstellung des Wahrnehmungsprozesses (verändert nach Engelkamp & Zimmer, 2006).

- 1 Den Ausgangspunkt für einen Wahrnehmungsprozess bildet ein Stimulus. Dieser *verfügbare Stimulus* besteht aus allen Reizen bzw. Objekten der Umwelt, die prinzipiell von einem wahrnehmenden Subjekt wahrgenommen werden können. Innerhalb dieser Umwelt schweift der Blick des wahrnehmenden Subjektes unbewusst hin und her.
- 2 Während des Hin- und Herschweifens wird die Aufmerksamkeit gezielt auf einen Teil des gesamten verfügbaren Stimulus gelegt, den *beobachteten Stimulus*. Dabei kommt es zu einer ersten Einschätzung der Umrisse des beobachteten Stimulus. Anschließend werden diese Umrisse durch figurale Charakteristika spezifiziert und vervollständigt (vgl. Gnoyke, 1997, S. 41). Abhängig von der Komplexität des wahrgenommenen Gegenstandes findet der Wahrnehmungsprozess statt. Je komplexer der beobachtete Stimulus ist, desto detaillierter ist der Wahrnehmungsprozess.
- 3 Durch das gezielte Betrachten eines Objektes (beobachtete Stimulus) entsteht ein Abbild des Objektes und dessen unmittelbarer Umgebung an den Rezeptoren der Retina (*Stimulus an den Rezeptoren*).
- 4 Anschließend werden diese Abbilder der Objekte auf der Retina in ein elektrisches Signal umgeformt (*Transduktion*). Sie werden neuronal repräsentiert. Dabei erfolgt die Repräsentation durch Aktivitätsmuster in den Rezeptorzellen, in denen die visuelle Information gespeichert und verarbeitet wird (vgl. Gnoyke, 1997, S. 43).
- 5 Diese elektrischen Signale breiten sich entlang neuronaler Bahnen zum Gehirn und innerhalb des Gehirns aus. Während der Ausbreitung werden die Signale neuronal verarbeitet (*neuronale Verarbeitung*). Dazu wird bereits verfügbares Wissen abgerufen. Das bedeutet, dass die kognitiven Auswertungsprozesse unmittelbar bei der visuellen Aufnahme erfolgen. Laut traditioneller Gedächtnistheorie dauert der Verarbeitungsprozess umso länger, je mehr Informationen in dem für den Suchprozess relevanten Netzwerkteilen gespeichert sind (vgl. Anderson, 1983). Jedoch nimmt gleichzeitig die Geschwindigkeit von Such- und Abrufprozessen mit zunehmendem Wissen ab.
- 6 Die elektrischen Signale, die das gesehene Objekt repräsentieren, werden zum Schluss in eine Erfahrung des Sehens des Objektes transformiert und das Objekt wird wahrgenommen (Wahrnehmung). Dieser Schritt basiert auf einem Abgleich mit dem Vorwissen.
- 7 In Folge der Wahrnehmung der Einzelkomponenten des Objektes kann zum einen ein Objekt identifiziert werden bzw. in eine Kategorie eingeordnet werden und somit eine Bedeutung erhalten (Erkennen). Zudem kann die Wahrnehmung auch dazu führen, dass eine Handlung (motorische Aktivität) ausgeführt wird.

Insgesamt ist dieser Wahrnehmungsprozess abhängig von der Gestalt des verfügbaren Stimulus, dem bereits bestehendem Wissen (Vorwissen) und der Aufmerksamkeit.

#### 2.4.2 Stimulus als Grundlage der Wahrnehmung

Der Wahrnehmungsprozess findet ausgehend von einem verfügbaren Stimulus statt. Dabei kann die Gestalt dieses verfügbaren Stimulus u.a. statisch, dynamisch, multipel oder interaktiv sein. Bei den in der vorliegenden Arbeit fokussierten Modellexperimenten handelt es sich um komplexe, dynamische Stimuli. Solche Stimuli stellen besondere Anforderungen an das betrachtende Subjekt. Aufgrund der Komplexität eines Modellexperiments können die relevanten Informationen, die in einem bestimmten Zusammenhang zueinander stehen und den zugrundeliegenden Prozess beschreiben, nicht nur aufeinander folgen, sondern auch gleichzeitig auftreten. Zudem erscheinen die Informationen immer nur innerhalb eines ganz bestimmten Momentes und verändern sich im Laufe der Zeit, sodass fortwährend ein veränderliches Reizangebot zur Verfügung steht (vgl. Hegarty, 1992; Jarodzka, Van Gog, Dorr, Scheiter & Gerjets, 2013). Dies hat zur Folge, dass das betrachtende Subjekt zu einem ganz bestimmten Zeitpunkt (dem richtigen) seine Aufmerksamkeit auf die relevanten Informationen legen muss, um diese aufnehmen zu können und ein korrektes mentales Modell des Prozesses zu entwickeln.

#### 2.4.3 Aufmerksamkeitssteuernde Faktoren

Welche Informationen von einem betrachtenden Subjekt aus der Vielzahl an Reizen als relevant angesehen, wahrgenommen, verarbeitet und im Gedächtnis gespeichert werden, wird durch die Aufmerksamkeit gesteuert (vgl. Gnöck, 1997). Der Begriff der Aufmerksamkeit wird in der Neuropsychologie vielfach verwendet, jedoch ist er schwierig zu definieren. In der Literatur ist die Aufmerksamkeit definiert als ein willkürlicher (willentlicher) oder unwillkürlicher (durch Reize ausgelöster, passiver) Aktivitätsgrad des Bewusstseins auf bestimmte Bewusstseinsinhalte, beispielsweise auf die Wahrnehmung der Umwelt (vgl. Sandkühler, 1990, S. 285). Sie wird auch als Wachheit (Vigilanz) der eigenen psychischen Funktionen oder Tätigkeiten wie Wahrnehmung, Erkennen, Bewusstsein und Lernen definiert (vgl. ebd., S. 285). So mit werden aus einer Fülle an Informationen, die ein Reiz insgesamt bereithält, einige Informationen ausgewählt (Selektion), denen die Aufmerksamkeit durch einen erhöhten Aktivitätsgrad und eine gesteigerte Wachheit zugewandt wird. Diese selektive Aufmerksamkeitssteuerung setzt die Hemmung von Reaktionen auf irrelevante Reize voraus und ist besonders wichtig. Beispielsweise wird selektiv bevorzugt, was sich ändert. Dies führt dazu, dass unbewegte Faktoren nur eine bestimmte Zeit lang beachtet werden. Bei Bewegungen im dreidimensionalen Raum

existieren Invarianten, die für die Bildung mentaler Vorstellungen der Bewegungen ausgenutzt werden können (vgl. Gnoyke, 1997, S. 37; Lüer, Werner & Lass, 1995). Dieses Hervorheben bestimmter Reize wird in der Psychologie auch als Salienz (Auffälligkeit) bezeichnet. So wird dieser jeweilige Reiz dem Bewusstsein leichter zugänglich gemacht als ein nicht-salienter Reiz. Die Aufmerksamkeit ist dann auf die Orte gerichtet, welche die Aufmerksamkeit auf sich ziehen. An diesen Orten landet eine Fixation<sup>14</sup> (vgl. Abschnitt 4.3.2.1) (vgl. Voßkühler, 2010).

Wolfe & Horowitz (2017) haben fünf aufmerksamkeitssteuernde Faktoren zusammengefasst:

- **Bottom-up – Stimulus gesteuert (unwillkürlicher Aktivitätsgrad):**  
Die Aufmerksamkeit wird auf Gegenstände gelenkt, die sich von ihrer Umgebung unterscheiden. Die Unterschiede müssen dabei groß genug sein und in einem begrenzten Satz von Attributen auftreten, die die Aufmerksamkeit leiten.
- **Top-down – Nutzer gesteuert (willkürlicher Aktivitätsgrad):**  
Top-down Steuerung ist eine benutzergesteuerte Lenkung. Bei dieser Steuerung wird die Aufmerksamkeit auf Objekte mit bekannten Merkmalen und gewünschten Zielen gerichtet, beispielsweise wenn ein Gegenstand gesucht wird. Dabei lenken ungefähr 24 verschiedene Merkmale die Aufmerksamkeit. Eine Auflistung der Merkmale, welche die Aufmerksamkeit lenken und nicht lenken, ist bei Wolfe & Horowitz (2017) zu finden. Dabei lenken zum Beispiel die Merkmale Farbe, Bewegung, Orientierung und Größe die Aufmerksamkeit (vgl. Proulx & Green, 2011).
- **Szenen gesteuert:**  
Bei der Szenen gesteuerten Aufmerksamkeitslenkung lenken die Attribute einer Szene die Aufmerksamkeit auf Bereiche, die sinnvollermaßen relevante Informationen enthalten können.
- **Merkmal gesteuert:**  
Die merkmalsgesteuerte Lenkung basiert auf dem wahrgenommenen Wert einiger Gegenstände oder Merkmale.
- **Erfahrungsbasierte Steuerung:**  
Eine erfahrungsbasierte Steuerung basiert auf eigenen Erfahrungen und vorherigen Suchprozessen.

---

<sup>14</sup> Ein relativer Stillstand des Auges zu einem Sehfeldbereich, bei dem ein Punkt fokussiert und festgehalten wird (vgl. Young & Sheena 1975; Duchowski 2007).

Welche Informationen für die Wahrnehmung ausgewählt werden und in welchem Umfang ist größtenteils von einem Zusammenspiel aus Bottom-up- und Top-down-Steuerungsprozessen abhängig.

Insgesamt bereitet es der Wissenschaft Schwierigkeiten, die Aufmerksamkeit als eine Funktion oder Tätigkeit zu definieren, die zu einem klar definierbaren Produkt führt, das gemessen werden kann. In der Neuropsychologie wird sie als Augentätigkeit operationalisiert (vgl. Sandkühler, 1990, S. 285). Diese Operationalisierung basiert auf der Auge-Geist-Annahme (eye-mind assumption) (vgl. Just & Carpenter, 1980). Die Annahme besagt, dass eine kausale Beziehung zwischen den Augen (Aufmerksamkeit) und dem Geist (Arbeitsgedächtnis) besteht. So werden die Informationen bzgl. eines Reizes, worauf sich das Auge fixiert, vom Geist verarbeitet.

#### 2.4.4 Gedächtnis

Die Verarbeitung und Speicherung der Reize, auf welche die Aufmerksamkeit gerichtet war, geschieht im Gedächtnis. Das Gedächtnis wird definiert als „Prozesse und Systeme, die für die Einspeicherung, die Aufbewahrung, den Abruf und die Anwendung von Informationen [jegliche Art von Reizen] zuständig sind, sobald die ursprüngliche Quelle der Information nicht mehr verfügbar ist“ (Gruber, 2011, S. 10). Das System Gedächtnis ist insgesamt sehr komplex und wird im *Mehrspeichermodell* von Atkinson und Shiffrin (1968) als ein dreigeteiltes System abstrakt beschrieben. Atkinson und Shiffrin differenzieren zwischen dem sensorischen Speicher (auch Ultrakurzzeitgedächtnis genannt), dem Arbeitsgedächtnis (auch Kurzzeitgedächtnis genannt) und dem Langzeitgedächtnis (vgl. Artelt & Wirth, 2014). Zunächst gelangen die Informationen, welche über die Sinnesorgane aufgenommen wurden, in den sensorischen Speicher und werden dort für Sekunden bzw. Sekundenbruchteile zwischengespeichert. Die Informationen, die beachtet, nicht überschrieben und nicht zerfallen, werden dann an das *Arbeitsgedächtnis* weitergeleitet. Dort halten sich die Informationen Sekunden bis wenige Minuten auf und werden weiter verarbeitet und mit Vorwissen verknüpft, um sie zu kategorisieren. Die relevanten Informationen, die aktiv verarbeitet wurden, überdauern im Kurzzeitgedächtnis und werden in das Langzeitgedächtnis überführt. Dort werden die Informationen dauerhaft gespeichert. Während dem sensorischen Speicher und dem Langzeitgedächtnis nahezu unbegrenzte Kapazitäten zugeschrieben werden, ist die Speicherkapazität des Arbeitsgedächtnisses stark begrenzt. Miller schätzt die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses auf  $7 \pm 2$  Informationseinheiten (vgl. Miller, 1956; Artelt & Wirth, 2014). Jedoch muss dieses Intervall eingeschränkt betrachtet werden. Die Informationseinheiten, die der Studie, aus der diese Einschätzung stammt, zugrunde lagen, waren Zahlen. Zudem nahmen ausschließlich

englischsprachige Probanden teil. Wie sich die Kapazität beispielsweise bei Wörtern oder abstrakten Bildern verhält und inwieweit das Langzeitgedächtnis Einträge zu einem Stimulus gespeichert hat, ist nicht genau definiert. Jedoch sorgt eine solche starke Limitation der Speicherkapazität des Arbeitsgedächtnisses für Herausforderungen. So kann es aufgrund dieser Limitation besonders bei komplexen, dynamischen Stimuli, bei denen viele Reize gleichzeitig oder in kurzer Zeit auftreten und von einem Subjekt verarbeitet werden müssen, zu einem Informationsverlust kommen (vgl. Artelt & Wirth, 2014; Hillmayr, 2017). Denn die aufgenommen Informationen müssen nach der Informationsaufnahme im Arbeitsgedächtnis weiter aktiv gehalten werden, während gleichzeitig neue Informationen in das Wahrnehmungssystem gelangen. Diese doppelte Belastung beeinträchtigt das Arbeitsgedächtnis stark (vgl. z.B. Ayres & Paas, 2007; Spanjers, Van Gog, & Van Merriënboer, 2010; Jarodzka, Van Gog, Dorr, Scheiter, & Gerjets, 2013). Darüber hinaus führt ein gleichzeitiges Betrachten von mehreren relevanten Elementen zur Aufsplittung der Aufmerksamkeit des Betrachters auf die verschiedenen Elemente. Dies kann zu einer getrennten Aufmerksamkeit führen, die nachweislich die Informationsverarbeitung behindert (vgl. Split-Attention-Effekt: Chandler & Sweller, 1991).

### 2.4.5 Unterstützung der Wahrnehmung im Lehr-Lern-Kontext

Dass eine hohe Informationsdichte eines Stimulus die visuelle Wahrnehmung erschwert, konnte u.a. in der Studie von Voßkühler (2010) gezeigt werden. Dabei wurde der Einfluss von drei Repräsentationsformaten von physikalischen Versuchsaufbauten untersucht. Dazu wurden Probanden 52 Fotos von 13 Versuchsaufbauten, die jeweils in 4 Repräsentationsformen aufgebaut waren, präsentiert. Die Repräsentationsformen unterschieden sich im Komplexitätsgrad (Abstrakte Darstellung, Fotorealistische, komplexitätsreduzierende Darstellung und Fotografische Darstellung – Fotos von real aufgebauten Experimenten mit Geräten von zwei verschiedenen Lehrmittelherstellern). Es konnte gezeigt werden, dass der Detailgrad der Darstellung der wesentliche Prädiktor für die Dauer der kognitiven Erfassung eines Versuchsaufbaus ist. Somit sind Fotos schwerer zu verarbeiten als fotorealistische oder abstrakte Darstellungen, da in den Fotos mehr Informationen enthalten sind. Diese Ergebnisse lassen vermuten, dass dynamische Prozesse wie beispielsweise Demonstrationsexperimente und Schüler\*innenexperimente noch schwerer verarbeitet werden könnten als Fotos, da es sich bei diesen Prozessen um eine Sequenz von schnell nacheinander geschalteten Fotos handelt.

Um die Wahrnehmung auf der Ebene der Gestaltung eines Experiments als Stimulus zu unterstützen, hat Schmidkunz (1983) die von Metzger (1953) entwickelten Gesetze des Sehens auf die Gestaltung von Demonstrationsexperimenten

übertragen. Nehring und Busch (2017) prüften deren Gültigkeit mit einer Stichprobe von 146 Schüler\*innen. Dabei wurden den Schüler\*innen sechs Demonstrationsexperimente mit korrekten Gestaltgesetzen und sechs mit falschen Gestaltgesetzen in Form von Fotos präsentiert und die visuelle Aufmerksamkeit auf relevante Elemente einer Demonstration gemessen. Bei der Aufnahme der Fotos haben Nehring und Busch (2017) bewusst auf das Prozesshafte eines Demonstrationsexperiments und den Einsatz von Chemikalien verzichtet, da es typischerweise zur Änderung der Farbe (pH-Indikator bei veränderndem pH-Wert) oder des Aggregatzustandes während der Durchführung eines Demonstrationsexperiments komme. Der Einsatz von Chemikalien könnte so Aufmerksamkeit auf die Farbe lenken und nicht den gesamten Versuchsaufbau, was eine eindeutige Zuordnung der Wahrnehmungssteuerung in Folge der Gestaltgesetze nicht möglich gemacht hätte.

Die Ergebnisse zeigten, dass die Art und Weise der Aufbauten einen Einfluss auf die visuelle Aufmerksamkeit mit messbaren Effekten für die einzelnen Gestaltgesetze hatten. Zwar ermöglicht diese statische Aufnahme der Versuchsaufbauten ohne eingesetzte Chemikalien Rückschlüsse auf die Gestaltgesetze, jedoch bildet sie nicht die Realität bei der Demonstration von Experimenten ab.

Ablaufende Prozesse in Demonstrationsexperimenten wurden den Schüler\*innen in der Studie von Klaetsch (2002) gezeigt. Klaetsch (2002) untersuchte anhand der konkreten Demonstration von Experimenten den Einfluss verschiedener Gestaltgesetze auf das Ergebnis der Wahrnehmung bei 103 Schüler\*innen (52 Jungen, 48 Mädchen; 9. Jahrgangsstufe). Beispielsweise wurde das Experiment *Darstellung von Salzsäure aus Schwefelsäure und Natriumchlorid* eingesetzt. Es wurden drei Gestaltgesetze untersucht; (i) das Gesetz des Figur-Grund-Kontrastes, (ii) der Gleichartigkeit und (iii) der durchlaufenden Linie (Kurve). Dabei sollten die Schüler\*innen den Versuchsaufbau nach der Betrachtung der Experimente, die nach den Gestaltgesetzen aufgebaut wurden, skizzieren und die verwendeten Geräte benennen. Gleichzeitig sollten von den Schüler\*innen die Chemikalien richtig platziert werden, damit analysiert werden konnte, ob die Reaktionsabläufe auch nachvollzogen werden konnten. In vier verschiedenen Zeitintervallen nach dem Betrachten des demonstrierten Experiments sollten die Schüler\*innen die Anordnung noch einmal skizzieren: unmittelbar nach dem Experiment, 1 Woche später, 6 Wochen später und 10 Wochen später. Zur Erstellung der Zeichnung wurde ihnen nur das Thema des Experiments genannt. Ziel der Untersuchung war es, herauszufinden, mit welchem Grad der Vollständigkeit die Versuchsaufbauten aus der Erinnerung zeitlich zeichnerisch reproduziert wurden. Aufgrund der guten Reproduktionsquote nach 10 Wochen (56% der Mädchen und 54% der Jungen haben die experimentellen Vorgaben

korrekt reproduziert) wurde in Bezug auf die Anwendung der Gestaltgesetze eine gute Erfolgsquote ermittelt.

Auch in der Physikdidaktik wurden verschiedene Gestaltungsprinzipien untersucht. Dabei haben Fäth, Watzka und Girwidz (2013) den Einfluss von drei Gestaltungsprinzipien (Kohärenz-, Vorübungs- und Segmentierungsprinzip) bezogen auf Animationen am Beispiel eines Modelles zur Funktionsweise einer Kolbenpumpe untersucht. Die Ergebnisse bestätigten das Kohärenz- und Vorübungsprinzip, da sich das Weglassen von nicht relevanten Bauteilen günstig auf die Wahrnehmung relevanter Bauteile auswirkte. So könnten auch Experimente in Videoform aufgenommen werden, um irrelevante Reize (beispielsweise Hintergrundreize) auszuschalten und gleichzeitig zeit- und ortsunabhängig präsentierbar zu werden. Neben dem Weglassen von irrelevanten Informationen kann auch das Hinzufügen von Hinweisen die Wahrnehmung von visuellen Darstellungen unterstützen. So untersuchten Watzka, Hoyer, Ertl & Girwidz (2020) den Einfluss von visuellen (Textfeld und Hell-Dunkel-Kontrast) und auditiven (gesprochener Text) Hinweisen auf die Wahrnehmung von relevanten Informationen in Videos von Wirbelstromexperimenten. Bei auditiven Hinweisen konnte festgestellt werden, dass die Probanden signifikant häufiger und länger auf das im Video gezeigte Experiment geblickt haben als die Probanden der Gruppe mit den visuellen Hinweisen. Darüber hinaus konnten sie sich nach dem Betrachten der Videos signifikant besser an den Versuchsaufbau erinnern, da sie mehr Geräte in der Beschreibung und der Skizze des Aufbaus korrekt angaben. Somit helfen auditive Hinweise bei visuellen Darstellungen, die relevanten Informationen wahrzunehmen. Studien zeigen, dass die Wahrnehmung dieser relevanten Informationen zudem einen positiven Einfluss auf das Verständnis und alle weiteren Lernprozessschritte, wie auch das Denken in Analogien beim Umgang mit Modellexperiment und Original haben kann (vgl. Madsen, Larson, Loschky & Rebello, 2012; Klein, Küchemann & Kuhn, 2020).

Die Messung der visuellen Wahrnehmung ist nicht trivial. Daher wurde in den ersten naturwissenschafts-didaktischen Studien, in denen die Wahrnehmung untersucht werden sollte, Schüler\*innenzeichnungen eingesetzt. Zeichnungen sind eine grafische Methode, mit der retrospektiv die Wahrnehmung, konkret das Ergebnis des Wahrnehmungsprozesses, erfasst werden kann. Jedoch ist die Aussagekraft dieser Methode über die konkrete Wahrnehmung eingeschränkt, da neben der Wahrnehmung auch Erinnerungs- und Zeichenfähigkeiten die Ergebnisse der Zeichnungen beeinflussen können (vgl. Nehring & Busch, 2017). Erst in den letzten Jahren hat sich die naturwissenschafts-didaktische Forschung einer Methode bedient, die im Vergleich zu den Schüler\*innenzeichnungen eine in situ-Messung und Aufnahme objektiver Messdaten ermöglicht, die Eye-Tracking Methode. Sie ist in der

Psychologie eine etablierte und leistungsstarke Methode zur Wahrnehmungsmesung. Sie ermöglicht über die Blickbewegungen, visuelles Verhalten, den Aufmerksamkeitsfokus und damit die Elemente, die zur Informationsaufnahme bereitstehen, zu messen (vgl. Holmqvist et al., 2011; Rakoczi, 2012; Maljusch, 2018). Dabei wurde die Anwendung der Methode in der Fachdidaktik aufgrund des technischen Fortschritts und der einfacheren Bedienbarkeit möglich (vgl. Nehring & Busch, 2018).

Dennoch werden Blickbewegungsdaten immer noch selten zur Erfassung der Wahrnehmung in den Fachdidaktiken verwendet (vgl. Gnoyke, 1997; Voßkühler, 2010; Nehring & Busch, 2018). Die vorliegenden Studien konzentrieren sich auf statische naturwissenschaftliche und chemische Inhalte ohne dynamische Veränderungen. So liegt der Fokus der Forschung auf Argumentationen und Problemlösprozesse (vgl. Tang & Pienta, 2012; Cullipher & Sevian, 2015; Tang, Kirk & Pienta, 2014). Es konnte gezeigt werden, welche Elemente bei der Arbeit an Problemlösungsaufgaben (vgl. Tang, & Pienta, 2012; Williamson, Hegarty, Deslongchamps, Williamson & Schultz, 2013), mit NMR-Diagrammen (vgl. Topczewski, Topczewski, Topczewski, Tang, Kendhammer & Pienta, 2017) und Reaktionsgleichungen der organischen Chemie (vgl. Havanki, 2012), sowie experimentelle Anordnungen nach Designprinzipien (vgl. Nehring & Busch, 2018) mehr Aufmerksamkeit erhalten. Mithilfe dieser Methode wurden bisher jedoch keine Daten zur Wahrnehmung von experimentellen, chemischen Inhalten mit dynamischen Veränderungen in Form von Demonstrationen erhalten. Dies gründet auf der Komplexität der Datenaufnahme. Denn besonders bei dynamischen Stimuli ist die Messung der Wahrnehmung sehr komplex, da es zu zeitlichen Veränderungen der Szenen kommt, die bei der Analyse der Daten mitbeachtet werden müssen.

Zudem wird in den fachdidaktischen Studien nur ganz selten ein direkter Zusammenhang zwischen Blickbewegungen und Lernerfolg gemessen, obwohl sie einander bedingen. Denn die Blickbewegungen spiegeln wider, auf welche Teile einer Lernumgebung die Schüler\*innen achten und welche Teile damit dem Lernen zugrunde liegen (vgl. Lai et al., 2013). Somit können Blickbewegungen Aufschluss über einen Lernerfolg geben. Zum Beispiel hatten sich Schüler\*innen, die bei physikalischen Problemen eine Frage richtig beantwortet hatten, länger auf spezifische relevante Bereiche eines Diagramms wie die Achsen konzentriert (vgl. Madsen et al., 2012). Auch Susac, Bubic, Martinjak, Planinic & Palmovic (2017) und Klein, Küchemann & Kuhn (2020) untersuchten in zwei unabhängigen Studien den Zusammenhang zwischen der Verteilung der visuellen Aufmerksamkeit auf Diagramme und dem Verständnis des Steigungs- und Flächenkonzeptes zwischen Physikern und Nicht-Physikern (Psychologen bzw. Wirtschaftswissenschaftlern). In der Studie

von Susac et al. (2017) konnte gezeigt werden, dass die Studierenden der Physik denen der Psychologie überlegen waren. Die Autoren führten diese Überlegenheit darauf zurück, dass die Physikstudierenden mehr Zeit mit der Betrachtung von Diagrammen verbrachten als die Psychologiestudierenden. Darüber hinaus könnten die themenspezifischen Vorerfahrung der Physikstudierenden diesen Trend unterstützen, da diese Vorerfahrungen den Fokus auf die wichtigen Regionen verstärken können (vgl. Madsen et al., 2013). Diese Ergebnisse konnten Klein, Küchemann & Kuhn (2020) in ihrer Replikationsstudie mit Wirtschaftswissenschaftlern als Nicht-Physiker jedoch nicht bestätigen.

Diese Studien zeigen, dass es erste Ergebnisse zur Wahrnehmung von statischen sowie dynamischen Stimuli in Lehr-Lern-Kontexten gibt (vgl. u.a. Nehring & Busch, 2018; Gnoyke, 1997; Fäth, Watzka & Girwidz, 2013). Aus der Sicht der Chemiedidaktik sind detaillierte Erkenntnisse zur Wahrnehmung von experimentellen Prozessen besonders wichtig, da sie die Basis für weitere Denk- und Lernprozesse bilden (vgl. Lai et al., 2013; Zacks et al., 2007). In diesem Zusammenhang kann identifiziert werden, welche relevanten Beobachtungen Lernende machen können und auf welcher Basis sie ihr mentales Modell entwickeln. Diese detaillierten Erkenntnisse können in weiteren Schritten dazu genutzt werden, Wahrnehmungsprozesse zu unterstützen.

### **3 Zielsetzung der Arbeit und Forschungsfragen**

In der hier vorliegenden Arbeit soll das Lernverhalten von Lernenden beim Umgang mit vorgegebenen Modellexperimenten untersucht werden. Dabei wurde sich auf das Modellexperiment zur Staubexplosion in der Low Cost-Hartmann-Apparatur fokussiert.

Daraus ergeben sich sieben Ziele, welche im Folgenden genannt werden und die Grundpfeiler der vorliegenden Arbeit bilden. Das Erreichen dieser Ziele soll durch die Bearbeitung verschiedener Forschungsfragen ermöglicht werden, die nachfolgend zielbezogen dargelegt werden.



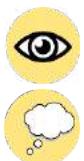
**Ziel I.** Identifizierung des Vorwissens zu den Bedingungen für das Auftreten einer Staubexplosion

**Forschungsfrage 1:** Welche fachlichen Voraussetzungen besitzen Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe im Bereich des Wissens über mögliche Bedingungen für eine Staubexplosion?

Die erste Forschungsfrage zielt auf die Erfassung der fachlichen Voraussetzungen von Schüler\*innen im Bereich der Bedingungen für eine Staubexplosion ab. Es soll geklärt werden,

- welche auf dem Explosionspentagon basierenden Bedingungen für eine Staubexplosion von Schüler\*innen für das Auftreten einer solchen Staubexplosion vor der Intervention als relevant genannt werden.

Studien legen nah, dass die fachlichen Voraussetzungen zu Explosionen von Schüler\*innen nur sehr rudimentär vorhanden sind (vgl. Steff, 2015). Das meiste Vorwissen basiert auf den im Verbrennungsdreieck enthaltenen drei Bedingungen: Brennstoff, Zündquelle und Oxidationsmittel in Form von Luft bzw. Sauerstoff, wobei den Schüler\*innen der Sauerstoff als Reaktionspartner selten bewusst ist (vgl. Barke, 2006).



**Ziel II.** Identifizierung der Informationsaufnahmeprozesse beim Beobachten eines Modellexperiments zur Staubexplosion und der Ergebnisse einer ersten Verarbeitung dieser Informationen

**Forschungsfrage 2:** Inwiefern nehmen Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe die relevanten Bedingungen des Prozesses der Staubexplosion während des Beobachtens eines Modellexperiments zur Staubexplosion in der Low Cost-Hartmann-Apparatur wahr?

### 3 Zielsetzung der Arbeit und Forschungsfragen

Zur Erfassung dieser Wahrnehmung und damit zur Beantwortung der Forschungsfrage, werden (i) der Prozess der Informationsaufnahme beim Betrachten des Modellexperiments zur Staubexplosion und (ii) die Ergebnisse einer ersten Verarbeitung des betrachteten Staubexplosions-Prozesses der Schüler\*innen getrennt von einander betrachtet. Für die Informationsaufnahme (i) soll dabei geklärt werden,

- welche für den Prozess der Staubexplosion relevanten und irrelevanten Elemente des Modellexperiments die Schüler\*innen wahrnehmen,
- wie lange die Schüler\*innen die relevanten Elemente bei der Betrachtung des Modellexperiments fokussieren,
- wie oft die Schüler\*innen die relevanten Elemente bei der Betrachtung des Modellexperiments fokussieren und
- ob die Schüler\*innen bei der Betrachtung des Modellexperiments mit der Fokussierung der Elemente den Prozess der Staubexplosion verfolgen.

Dabei werden die Messdaten unmittelbar während der Informationsaufnahme mittels Eye-Tracking erhoben. Ob diese aufgenommenen Informationen auch verarbeitet werden können, kann direkt im Anschluss erhoben werden. In Bezug auf diese erste Verarbeitung der betrachteten Informationen (ii) soll geklärt werden,

- welche Informationen zur Beobachtung des im Modellexperiment gesehenen Prozesses verarbeitet werden konnten und
- welche Informationen bezüglich der Interpretation des Modellexperiments verarbeitet werden konnten.

Da Just & Carpenter (1984) zwar mit der Eye-Mind Hypothese zeigen, dass Blickbewegungen mit ihren Fixationen Einblicke in die mentalen Prozesse ermöglichen, ist jedoch nicht direkt legitimiert, ob die Informationen, auf die der Aufmerksamkeitsfokus gelegt wurde, auch verarbeitet wurden und nicht direkt überschrieben wurden. Daher muss zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage eine Datentriangulation der Daten zur Informationsaufnahme und -verarbeitung erfolgen, um die Zusammenhänge zwischen der Informationsaufnahme und -verarbeitung zu untersuchen. Dabei soll geklärt werden,

- ob es einen Zusammenhang zwischen der Art und Weise der Fixationen und den Informationen bzgl. der verarbeiteten Beobachtungen zu dem Prozess, der im Modellexperiment demonstriert wird, gibt,
- ob es einen Zusammenhang zwischen der Art und Weise der Fixationen und der Interpretation des Modellexperiments gibt.

Damit die Daten zur Wahrnehmung des Modellexperiments erhoben werden konnten, wurde das Modellexperiment den Schüler\*innen in Form eines Videos

---

präsentiert. Jedoch spiegelt das Präsentieren des Modellexperiments in Videoform nicht die realen Bedingungen wieder, die am häufigsten vorherrschen, wenn Modellexperimente im Lehr-Lern-Kontext zum Einsatz kommen. Um mögliche Unterschiede in der Beobachtung und Auswertung eines Modellexperiments identifizieren zu können, die auf der Präsentationsform basieren, wurde das Ergebnis der ersten Verarbeitung des Modellexperiments nach der selbstständigen Durchführung oder der Betrachtung in Form eines Videos verglichen. Dazu wurde die folgende Forschungsfrage formuliert.

**Forschungsfrage 2.1: Inwiefern gibt es Unterschiede bei der Beschreibung der Beobachtungen und der Auswertung (Informationsverarbeitung) des Modellexperiments zur Staubexplosion in der Low Cost-Hartmann-Apparatur abhängig von der Präsentationsform?**



**Ziel III. Identifizierung von Denkmustern beim Umgang mit Modellexperimenten während des Denkens in Analogien**

Für einen zielgerichteten Umgang mit Modellexperimenten reicht es nicht, die notwendigen Informationen aus einem Modellexperiment aufzunehmen und zu verarbeiten. Vielmehr ist es aufgrund der Funktion eines Modellexperiments notwendig, die Beobachtungen und Interpretationen des Modellexperiments mit dem Original in Beziehung zu bringen. Um Erkenntnisse über die Art und Weise des In-Beziehung-Bringens zu erhalten, sollen die Denkmuster beim Vergleich von Modellexperiment und Original (*Mapping*) und dem Transferieren neuer Erkenntnisse auf das Original analysiert werden. Dabei stellen die Denkmuster die Abfolgen der Denkschritte dar. Zur Identifizierung der Denkmuster wird einerseits überprüft, ob Schüler\*innen die durch Modellexperimente bereitgestellten Analogien beim Vergleich zwischen Modellexperiment und Original erkennen und wie sie dabei genau vorgehen (*Mapping*). Andererseits wird untersucht, ob Schüler\*innen diesen Vergleich nutzen, um originale Sachverhalte zu erklären (*Ergebnis Mapping*). Zudem wird untersucht, welche Elemente sie nutzen, um die Erkenntnisse aus dem Vergleich auf ein neues Original zu übertragen und wie genau sie dabei vorgehen (*Anwendung*). Folgende Forschungsfragen können diesbezüglich formuliert werden:

### **Mapping**

**Forschungsfrage 3:** Welche Denkmuster können während des Denkens in Analogien bei dem Vergleich von Modellexperiment und Original auf der Makro-, Meso- und Mikroebene von Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe an dem chemischen Gegenstand Staubexplosion identifiziert werden?

Diese Forschungsfrage zielt auf eine möglichst umfassende Erfassung der Denkmuster der Schüler\*innen während des Vergleiches zwischen Modellexperiment und Original beim Umgang mit Modellexperimenten ab. Die Denkmuster werden dabei durch die Kombination verschiedener Daten aus aufgenommenen Laut-Denk-Protokollen abgeleitet (vgl. Abschnitt 4). So sollen mögliche Denkvarianten systematisch beschrieben werden. Um eine differenzierte und fokussierte Betrachtung zu ermöglichen, soll der Denkprozess beim Umgang mit Modellexperimenten nach Makro-, Meso- und Mikroebene differenziert betrachtet werden (vgl. Abbildung 9).

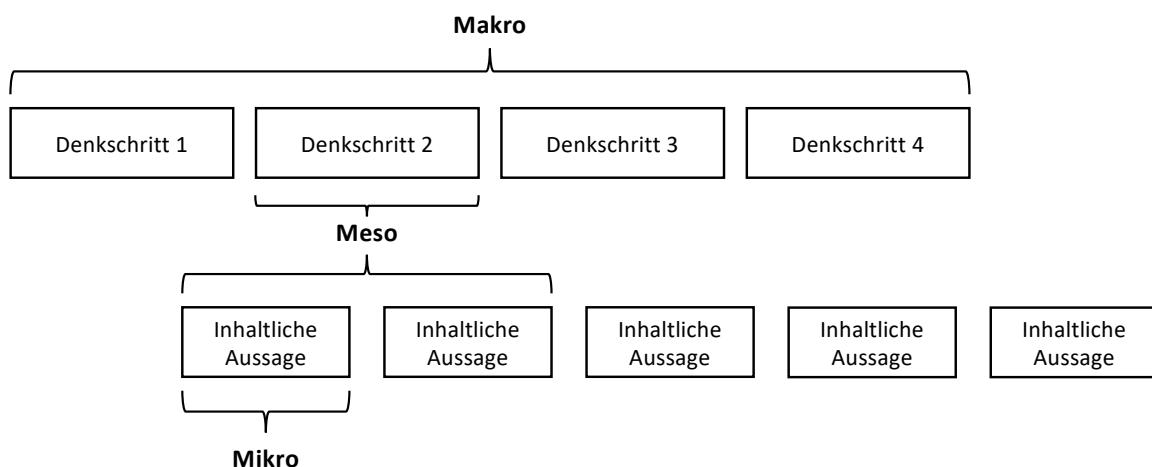


Abbildung 9: Makro-, Meso- und Mikroebene der Denkmuster.

Die *Makroebene* beinhaltet im Rahmen dieser Arbeit eine Übersicht über den gesamten Prozess des Vergleichens zwischen den Bereichen Modellexperiment und Original während des Denkens in Analogien. Hier soll insbesondere betrachtet werden, wie die chronologische Abfolge der einzelnen Denkschritte in Anlehnung an die Analogieoperationen (Beschreibung einzelner Bereiche, richtungsabhängige abbildende Beschreibung, richtungsunabhängige abbildende Beschreibung) gestaltet ist. Ein Denkschritt beginnt, wenn eine Aussage innerhalb einer Analogieoperation artikuliert wird und endet, wenn eine Aussage innerhalb einer anderen Analogieoperation artikuliert wird. Diese Denkschritte beinhalten einzelne inhaltliche Aussagen zu den Charakteristika des Modellexperiments und des Originals. Sie können u.a. Bedingungen, welche eine Staubexplosion kennzeichnen, beinhalten. Diese inhaltlichen Aussagen stellen die *Mikroebene* dar. Die Betrachtung auf Mesoebene beinhaltet die Definition der einzelnen Denkschritte mit jeweiligen inhaltlichen

---

Aussagen auf einer abstrakten Ebene, die an den Analogiearten orientiert sind. Dabei werden die inhaltlichen Aussagen innerhalb eines Denkschrittes mit Hilfe der unterschiedlichen Analogiearten (Objekte, oberflächliche und strukturelle Attribute und Relationen) in Verbindung gebracht. Die Betrachtung dieser *Mesoebene* gibt Aufschluss über die Qualität der einzelnen Denkschritte innerhalb des gesamten Denkprozesses. Die Strukturen auf Makroebene können nur identifiziert werden, wenn die inhaltlichen Aussagen auf der Mikro- und der Mesoebene kategorisiert wurden. Zudem ist die Qualität einer Kategorisierung der inhaltlichen Aussagen auf der Mesoebene ohne Bezug zu ihrer Position innerhalb der Makroebene nur wenig bedeutend. In der Datenaufbereitung ist somit ein ständiger Wechsel zwischen den verschiedenen Ebenen notwendig. Auf diese Weise soll gezeigt werden, inwiefern die einzelnen Denkmuster an einem idealen Denkprozess beim Denken in Analogien orientiert sind. Dabei ist ein Denkprozess ideal, wenn er entweder sehr ausführlich stattfindet – alle Objekte, strukturellen Attribute und Relationen genannt werden – oder sich besonders auf die strukturellen Attribute und Relationen, wie es bei Experten festgestellt wurde, fokussiert (vgl. Abschnitt 2.1.2). Außerdem sollen die Denkmuster bei dem Denken in Analogien über alle Schüler\*innen hinweg miteinander verglichen werden. Das Vorgehen bei der Auswertung ist im Detail unter Abschnitt 4.3.4.3 dargestellt. Konkret soll erklärt werden,

- welche Analogieoperationen Schüler\*innen für den Vergleich von Original und Modellexperiment nutzen
- welche Analogiearten Schüler\*innen für den Vergleich von Original und Modellexperiment nutzen,
- welche inhaltlichen Merkmale Schüler\*innen für den Vergleich von Original und Modellexperiment nutzen,
- in welcher Reihenfolge Schüler\*innen die Analogieoperationen/ Analogiearten/ inhaltlichen Merkmale für den Vergleich von Original und Modellexperiment nutzen.

### ***Ergebnis Mapping***

**Forschungsfrage 4: Inwiefern werden die Bedingungen für das Auftreten einer Staubexplosion aus dem Vergleich von Modellexperiment und Original von Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe zur Erklärung des chemischen Gegenstandes Staubexplosion im Kontext des Originals genutzt?**

Diese Forschungsfrage zielt auf die Erfassung der Merkmale und Prozesse ab, welche die Schüler\*innen beim Vergleich von Modellexperiment und Original erkannt haben und als relevant für die Erklärung des Originals eingestuft haben.

### **Anwendung**

Damit neues Wissen gelernt werden kann, müssen Erkenntnisse und das neue Wissen auch in anderen Kontexten angewendet werden. Wie die Schüler\*innen bei der Anwendung des neuen Wissens auf ein weiteres Original vorgehen, soll mit den Forschungsfragen 5 und 5.1 bearbeitet werden.

**Forschungsfrage 5: Inwiefern werden die Bedingungen aus dem Vergleich von Modellexperiment und Original von Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe bei der Übertragung der Erkenntnisse auf ein weiteres Original zur Staubexplosion angewandt?**

Die fünfte Forschungsfrage zielt auf die Erfassung der Merkmale und Prozesse ab, welche die Schüler\*innen während des Vergleichs von Modellexperiment und Original erkannt haben, für das Original als relevant angesehen haben und für die Erklärung eines weiteren Originals nutzen. Gleichzeitig sollen auch Aussagen darüber gemacht werden, ob die Schüler\*innen bei der Erklärung dieses neuen Originals lediglich bei der Beschreibung des Originals bleiben oder auch Rückbezüge zu dem Modellexperiment, dem ersten Original und/ oder dem Vergleich nutzen.

**Forschungsfrage 5.1: Welche Denkmuster können auf der Makro-, Meso- und Mikroebene von Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe bei dieser Übertragung der Erkenntnisse auf ein weiteres Original während des Denkens in Analogien an dem chemischen Gegenstand Staubexplosion identifiziert werden?**

Diese Forschungsfrage zielt auf die Erfassung der Denkmuster bei der Übertragung der Erkenntnisse aus einem Analogievergleich auf ein weiteres Original ab. Konkret soll geklärt werden,

- welche Analogieoperationen Schüler\*innen für die Übertragung der Erkenntnisse auf ein weiteres Original nutzen,
- welche Analogiearten Schüler\*innen für die Übertragung der Erkenntnisse auf ein weiteres Original nutzen,
- welche inhaltlichen Merkmale Schüler\*innen für die Übertragung der Erkenntnisse auf ein weiteres Original nutzen,
- in welcher Reihenfolge Schüler\*innen die Analogieoperationen/ Analogiearten/ inhaltlichen Merkmale für die Übertragung der Erkenntnisse auf ein weiteres Original nutzen.

Da das Lernen und somit auch der Schritt des Denkens in Analogien beim Umgang mit Modellexperiment und Original von der Qualität der Wahrnehmung (Informationsaufnahme und einer ersten Verarbeitung) des Modellexperiments abhängt, stellt sich die Frage, ob es einen Zusammenhang zwischen der Wahrnehmung und

---

den während des Denkens in Analogien genannten Elementen sowie der Detailtiefe beim Denken in Analogien gibt. Diese Frage wird in der Forschungsfrage 6 konkretisiert.



**Ziel IV.** Identifizierung eines Zusammenhangs zwischen der Wahrnehmung und den Denkmustern während des Denkens in Analogien beim Umgang mit Modellexperimenten

**Forschungsfrage 6:** Inwieweit hat die Wahrnehmung der relevanten Bedingungen des Modellexperiments bei Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe einen Einfluss auf das Denken in Analogien beim Umgang mit Modellexperiment und Original zum chemischen Gegenstand der Staubexplosion?

Diese Forschungsfrage zielt auf eine Triangulation der Informationsaufnahme, der Verarbeitung der Informationen und dem Vergleich zwischen Modellexperiment und Original beim Denken in Analogien ab. Dabei legen Studien nah, dass die Wahrnehmung relevanter Informationen einen Einfluss auf das Verständnis und alle weiteren Lernprozessschritte, wie auch das Denken in Analogien beim Umgang mit Modellexperiment und Original, haben kann (vgl. Madsen, Larson, Loschky & Rebello, 2012; Klein, Küchemann & Kuhn, 2020).



**Ziel V.** Identifizierung des Wissenszuwachs über die Bedingungen für eine Staubexplosion infolge der Intervention

Abschließend wäre es interessant herauszufinden, ob eine detaillierte Auseinandersetzung mit einem Modellexperiment und dem analogen Original, die am Prozess des Denkens in Analogien orientiert ist, zu einem Wissenszuwachs im Bereich des Konzeptes Staubexplosion führen kann. Dieser Frage wird mit der folgenden Forschungsfrage nachgegangen:

**Forschungsfrage 7:** Inwieweit nimmt das Fachwissen zu den Bedingungen für eine Staubexplosion von Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe durch den Umgang mit einem Modellexperiment und Original zur Staubexplosion in der Low Cost-Hartmann-Apparatur innerhalb der Intervention zu?

Dabei wird untersucht, welche der fünf Bedingungen für das Auftreten einer Staubexplosion von den Schüler\*innen nach der Intervention genannt werden und ob ein Wissenszuwachs identifiziert werden kann.

### 3 Zielsetzung der Arbeit und Forschungsfragen

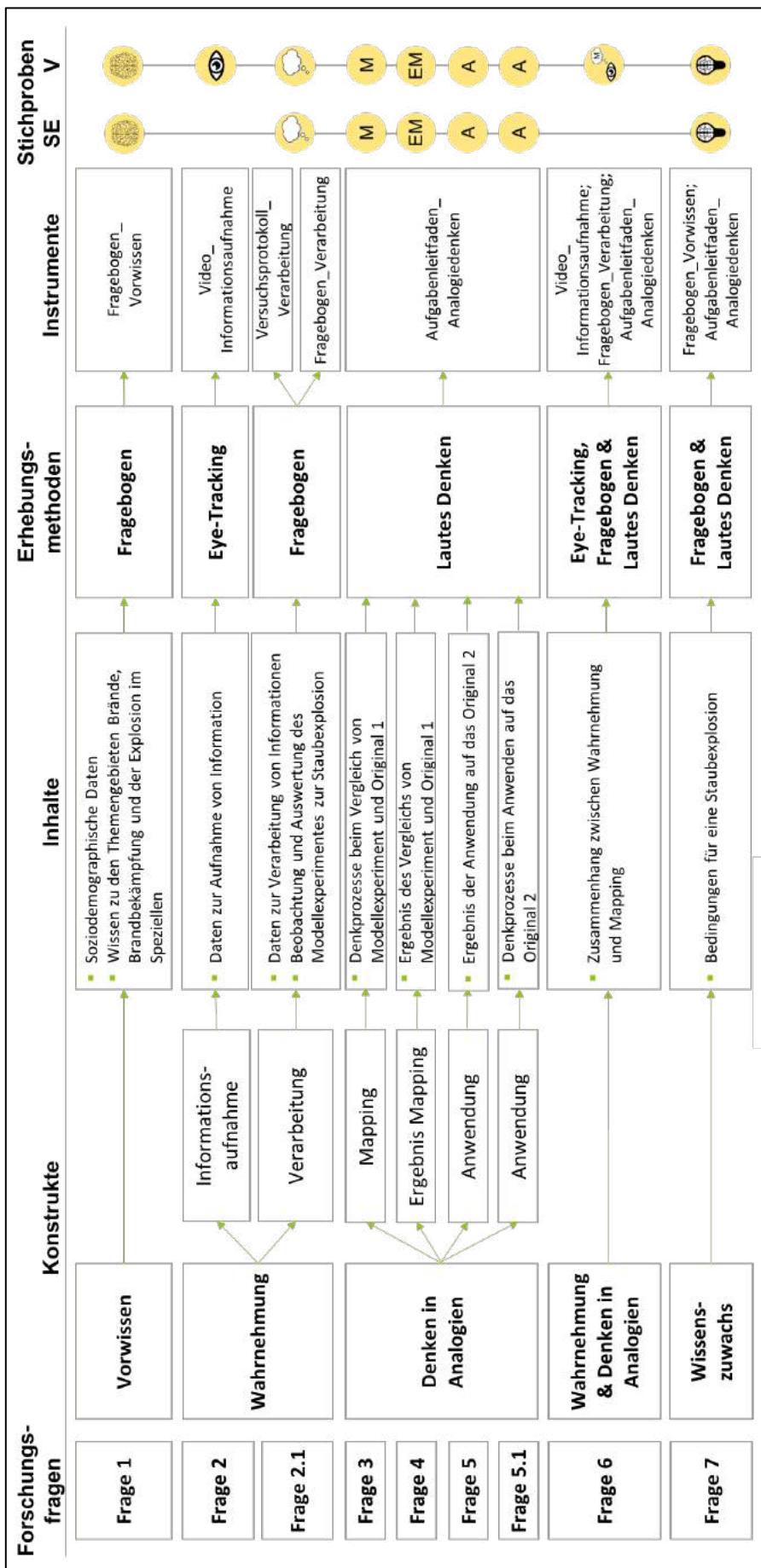


Abbildung 10: Übersicht der Datenerhebungsinstrumente in Abhängigkeit der Ziele und Forschungsfragen (SE: Schüler\*innen-experiment, V: Video).

## **4 Methodisches Vorgehen**

### **4.1 Das Forschungsdesign**

Um den individuellen Umgang mit vorgegebenen Modellexperimenten innerhalb eines Lehr-Lern-Kontextes mit besonderem Fokus auf der Wahrnehmung des Modellexperiments und dem Denken in Analogien erfassen zu können und die Daten dahingehend erheben zu können, wurde die vorliegende Studie nach einem Mixed-Methods-Ansatz konzipiert (vgl. Abbildung 10). Bei diesem Ansatz werden qualitative und quantitative Methoden und Daten innerhalb einer Forschungsstudie eingesetzt und je nach Forschungsziel und -fragestellung ausgewählt und miteinander kombiniert (vgl. Johnson, Onwuegbuzie & Turner, 2007; Tashakkori & Teddlie, 2010; Cresswell, 2014, S. 43 ff.). Durch die Auswahl des Mixed-Methods-Ansatzes konnte ein Zugang zu der Wahrnehmung durch die Verknüpfung der Daten zu der Informationsaufnahme (Eye-Tracking) und der Verarbeitung (Experimentelles Versuchsprotokoll und Fragebögen) der aufgenommenen Informationen erfolgen. Gleichzeitig konnte aber auch ein Zugang zu der vergleichenden inhaltlichen Auseinandersetzung mit einem Modellexperiment und dem zugehörigen analogen Original beim Denken in Analogien (Lautes Denken) sowie den soziokulturellen Aspekten gewährleistet werden. Um diese Daten zu erheben, wurde ein konkretes Modellexperiment, das Modellexperiment zur Staubexplosion (vgl. Abschnitt 2.2.3 – Modellexperiment in der LC-Hartmann Apparatur), ausgewählt und in der vorliegenden Studie genauer betrachtet. Zudem wurde untersucht, inwieweit ein Zuwachs des Fachwissens hinsichtlich des Konzeptes Staubexplosion im Zusammenhang mit der gesamten Auseinandersetzung mit dem Modellexperiment zur Staubexplosion entstehen kann.

Im Folgenden wird von der klassischen Gliederung empirischer Arbeiten abgewichen. Dabei werden zunächst die Intervention, die Erhebungsinstrumente und abschließend die Stichproben beschrieben. Dies gründet darauf, dass einige Erhebungsinstrumente aufgrund des Studiendesigns ausschließlich von einem Teil der Stichprobe bearbeitet wurden (vgl. Abschnitt 4.2 & Abschnitt 4.4).

### **4.2 Intervention**

Die vorliegenden Daten wurden im Zuge eines Lehr-Lern-Arrangements von 2017 bis 2019 erhoben. Dieses orientierte sich thematisch am fachlichen Kontext *Brände und Brandbekämpfung*, welcher im Kernlehrplan der Sekundarstufe I des Landes Nordrhein-Westfalen (NRW) im Fach Chemie verortet ist (vgl. MSW NRW, 2008). Dies ermöglichte die direkte Anknüpfung der Untersuchung an die Unterrichtspraxis und konnte gleichzeitig durch die erhobenen Daten Implikationen für den

Chemieunterricht gewährleisten. Das Lehr-Lern-Arrangement wurde als Tagesintervention mit dem Namen *Feuer(löschen) im Schülerlabor* im Alfried Krupp-Schülerlabor der Ruhr-Universität Bochum angeboten (vgl. Toschka & Sommer 2018, S. 456 ff.). Auf Grund der Festlegung der Ruhr-Universität Bochum als Veranstaltungsort der Studie wurden die Gymnasien aus Bochum und den unmittelbaren Nachbarstädten schriftlich über eine mögliche Teilnahme an der Studie informiert. Das Gymnasium wurde an dieser Stelle als bevorzugte Schulform ausgewählt, da sie bezogen auf ihre absolute Häufigkeit in Nordrhein-Westfalen mit 625 Schulen dominiert (vgl. MSW NRW, 2019, S. 11). Die Teilnahme der Klassen an der Studie war freiwillig.

Zur Erhebung der für die Beantwortung der Forschungsfragen relevanten Daten wurden die Daten zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Intervention erhoben (Abbildung 11). Das genaue Vorgehen zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Intervention wurde in Verlaufsplänen detailliert beschrieben (vgl. Anhang 12.2).

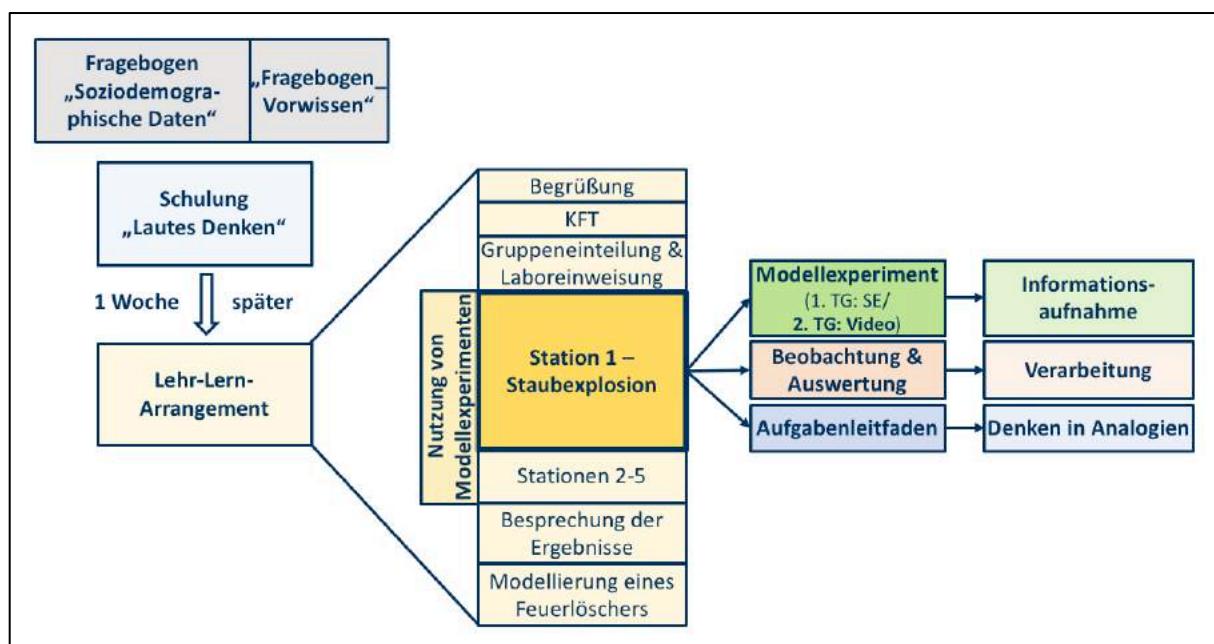


Abbildung 11: Untersuchungsdesign.

Ungefähr eine Woche vor der Teilnahme an der Intervention wurde von allen Schüler\*innen ein Fragebogen zum Vorwissen im Bereich Verbrennungen und Explosion ausgefüllt und soziodemographische Informationen bereitgestellt. Dieser Fragebogen wurde in den Schulklassen innerhalb einer Schulstunde (45 Minuten) bearbeitet. Die zeitliche und räumlich Entkoppelung wurde vorgenommen, um die Reaktivität mit den thematisch analogen Daten, die während der Intervention erfasst wurden, sowie Ermüdungseffekte während der Tagesintervention so gering wie möglich zu halten. Die Erhebung erfolgte anonymisiert über Schüler\*innen-

Identifikationsnummern<sup>15</sup>. Indem die Schüler\*innen-Identifikationsnummern vergeben wurden, konnten die Daten des Fragebogens mit den Daten, die während der gesamten Intervention zu den einzelnen Erhebungszeitpunkten erhoben wurden, in Beziehung gesetzt werden. Nach dem Ausfüllen des Fragebogens haben die Schüler\*innen eine Einführung in die Methode *Lautes Denken* bekommen, die eingesetzt wurde, um während der Intervention Daten zu den Denkprozessen der Schüler\*innen während des Denkens in Analogien aufnehmen zu können.

Zu Beginn der Tagesintervention wurde nach einer allgemeinen Begrüßung von den Schüler\*innen der Kognitive-Fähigkeitstest (vgl. Heller & Perleth, 2000) mit seinen Subskalen figurale und verbale Analogien ausgefüllt. Anschließend wurden die Schüler\*innen für das Experimentieren in Zweier- bzw. Dreiergruppen eingeteilt. Während der Experimentierphase haben die Schüler\*innen fünf Modellexperimente bearbeitet. Es handelt sich um die Modellexperimente Staubexplosion mit der Low-Cost-Hartmann Apparatur (LC-HA), Fettbrand, Davy-Sicherheitslampe, Heißluftballon, Bimetall sowie anschließend die Modellierung eines Feuerlöschers (in Anlehnung an Steff, 2015; siehe Anhang 12.1). Die Bearbeitung der fünf Schüler\*innenexperimente war insgesamt als *Lernen an Stationen* organisiert. Das bedeutet, dass die Modellexperimente an aufeinander folgenden Stationen durchgeführt wurden und die Position des Modellexperiments Staubexplosion, wie auch der anderen Modellexperimente zwischen den Schüler\*innen variierte. Allerdings wiesen alle Modellexperimente einen genügend großen inhaltlichen Abstand zueinander auf, da die zugrundeliegenden chemischen Prozesse auf unterschiedlichen Prinzipien basieren. So können reihenfolgenbedingte Lerneffekte ausgeschlossen werden. Alle Modellexperimente standen an einer Station mehrfach zur Verfügung, so dass mehrere Schüler\*innengruppen parallel an einer Station arbeiten konnten. Die Schüler\*innen führten die Modellexperimente nach einer vorliegenden Durchführungsvorschrift durch und protokollierten diese in einem Versuchsskript (vgl. Anhang 12.1). Jede Station wurde durch eine\*n Betreuer\*in beaufsichtigt.

Im Zentrum der Datenerhebung stand als Untersuchungsgegenstand ausschließlich das Modellexperiment Staubexplosion<sup>16</sup> (vgl. Abschnitt 2.2.3 – Modellexperiment in der LC-Hartmann Apparatur). Als brennbarer Substanz, mit der die

<sup>15</sup> Die Schüler\*innenidentifikationsnummer setzte sich aus zwei Buchstaben und vier Ziffern zusammen, welche die Schüler\*innen selbstständig auf der Basis ihres Namens und ihres Geburtsdatums ermittelt haben.

<sup>16</sup> Die Auswahl erfolgte auf der Basis der guten Anknüpfung des Phänomens Staubexplosion an den fachlichen Kontext „Brände und Brandbekämpfung“ und des gleichzeitig nicht direkt empfohlenen Lehrens des Phänomens im Speziellen, sodass das Vorwissen zu diesem Phänomen über alle Klassen hinweg einheitlich gering sein müsste.

Staubexplosion ausgelöst werden sollte, wurde nicht der originale Brennstoff, Weizenmehl, ausgewählt sondern schwarze Tonerfarbe (vgl. Toschka & Sommer, 2018, S. 456 ff.). Dieser Stoff wurde bewusst ausgewählt, da die Ergebnisse einer vorhergehenden Studie von Steff (2015) die Hypothese nahe legten, dass der Einsatz von einer schwarzen Tonerfarbe zu einer detaillierteren Auseinandersetzung mit dem Konzept der Explosion führt (vgl. Sommer, Toschka, Steff & Wirth, 2019). Bevor das Modellexperiment von den Schüler\*innen durchgeführt wurde, sollten die Schüler\*innen diese Substanz, mit der das Modellexperiment durchgeführt werden sollte, auf die Eigenschaften Brennbarkeit, Leitfähigkeit und Magnetismus testen (vgl. Anhang 12.1). Dabei wurde den Teilnehmer\*innen diese Substanz als unbekannte Substanz präsentiert.

Anschließend sollten Informationen zum Prozess der Staubexplosion durch die Bearbeitung des Modellexperiments aufgenommen werden. Dabei wurde die Form der Bearbeitung des Modellexperiments innerhalb der vorliegenden Studie variiert, was zur Bildung von zwei Treatmentgruppen führte.<sup>17</sup> Entweder führten die Schüler\*innen das Experiment selbstständig als Schüler\*innenexperiment (SE-Gruppe) durch oder sie schauten sich ein Video des Modellexperiments auf einem Bildschirm an (V-Gruppe), das genau die Durchführung im Schüler\*innenexperiment wiedergab. Dabei bestand dieses Modellexperiment bei beiden Treatmentgruppen aus drei Sequenzen. In der ersten Sequenz wurde ihnen in einer Skizze der Versuchsaufbau präsentiert. Die zweite Sequenz bestand aus einem Vorversuch. Dieser wurde genutzt, um den Schüler\*innen zu zeigen, dass die Luft, welche durch die Luftpumpe in das Plexiglasrohr gepumpt wird, nicht ausreicht, um den beweglichen Deckel zu öffnen. Anschließend in der dritten Sequenz wurde das Modellexperiment mit dem eingesetzten Stoff durchgeführt (SE-Gruppe) bzw. betrachtet (V-Gruppe). Bei der Betrachtung des Modellexperiments in Videoform konnten unmittelbar während des Wahrnehmungsprozesses die Daten zur Informationsaufnahme erhoben werden (vgl. Abschnitt 4.3.2). Nachdem die Schüler\*innen das Modellexperiment als Schüler\*innenexperiment oder als Video bearbeitet hatten,

---

<sup>17</sup> Die Relevanz einer zweiten Treatmentgruppe entstand aus der Studie in den Jahren 2017/2018, bei der das Modellexperiment von den Schüler\*innen selbstständig durchgeführt wurde. Es ergab sich die Frage, welche Informationen den Schüler\*innen bei der Wahrnehmung des selbstständig durchgeführten Modellexperiments für den Vergleich von Modellexperiment und analogem Original zur Verfügung standen und ob sie besonders die relevanten Elemente während dieses schnellen Prozesses der Staubexplosion überhaupt wahrnehmen konnten. Dieser Frage sollte in einer weiteren Teilstudie mit analogem Studiendesign nachgegangen werden. Da die Erhebung der Wahrnehmung beim eigenständigen Durchführen des Schüler\*innenexperiments schwierig ist (Gründe für das Laborsetting vgl. Abschnitt 4.3.2.2), wurde eine zweite Treatmentgruppe gebildet, die sich das Modellexperiment als Video auf einem Bildschirm angeschaut hatte, das genau die Durchführung des selbstständig durchgeführten Schüler\*innenexperiments wiedergab (vgl. Abschnitt 4.3.2.2). Jedoch wurde auf die Analyse der Daten der Schüler\*innen, welche das Modellexperiment selbstständig durchgeführt hatten, nicht verzichtet, um die direkte Anknüpfung an den Unterricht zu ermöglichen.

wurde das Ergebnis der Verarbeitung des wahrgenommenen Inhaltes durch ein experimentelles Versuchsprotokoll erhoben. Das experimentelle Versuchsprotokoll wurde von allen Schüler\*innen (unabhängig von der Form der Bearbeitung des Modellexperiments) bearbeitet, indem von jedem\*jeder Schüler\*in auf einem eigenen Protokoll die jeweiligen Beobachtungen und die Auswertung des gesehenen Staubexplosionsprozesses notiert wurden (vgl. Bader, Lühken & Sommer, 2018, S. 491 f.). Darüber hinaus folgte bei den Schüler\*innen, welche das Modellexperiment in Videoform gesehen hatten, auf die Bearbeitung des Versuchsprotokolls hin ein geschlossener Fragebogen zur Legitimation der Videodaten. Im Anschluss an die Erhebung der Daten zur Verarbeitung des wahrgenommenen Modellexperiments wurde von allen Schüler\*innen der Vergleich zwischen Modellexperiment und Original in Form von Laut Denk-Protokollen erhoben. Damit die Datenerhebung durch einen möglichen Austausch zwischen den Schüler\*innen nicht beeinflusst werden konnte, wurde das Modellexperiment in einem separaten Raum von den Schüler\*innen bearbeitet.

Die Erhebungsmethoden werden im Zusammenhang mit den zugehörigen Konstrukten, die innerhalb der vorliegenden Studie erhoben werden, in Abschnitt 4.3 detailliert vorgestellt.

### **Pilotierung**

Das gesamte Forschungsdesign wurde anhand von insgesamt vier Schulklassen der siebten Jahrgangsstufe von Gymnasien in NRW im Mai und Juni 2017 pilotiert. Diese Pilotierung ermöglichte die Erprobung der organisatorischen, experimentellen und testtheoretischen Rahmenbedingungen der Studie. Gleichzeitig konnten anhand der Beobachtungen und Ergebnisse dieser Pilotierung die organisatorische Gestaltung des Lehr-Lern-Arrangements sowie die testtheoretischen Elemente, die Erhebungsinstrumente, optimiert werden.

## **4.3 Erhebungsmethoden und -instrumente**

Das Lehr-Lern-Arrangement mit dem Modellexperiment in der LC-HA im Speziellen wurde genutzt, um in der vorliegenden Studie Daten zur Wahrnehmung und dem Denken in Analogien zu erheben. Im Folgenden werden die eingesetzten Erhebungsmethoden und -instrumente vorgestellt. Eine Übersicht der Konstrukte mit Inhalten, Erhebungsmethoden und zugehörigen Instrumenten ist in Abbildung 12 dargestellt. Dabei handelt es sich um eine Kombination von textanalytischen und statistischen Methoden (Mixed-Methods-Ansatz; vgl. Abschnitt 4.1). Durch diese Kombination können verschiedene Aspekte der Wahrnehmungs- und Denkprozesse komplementär beim Umgang mit Modellexperimenten untersucht werden.

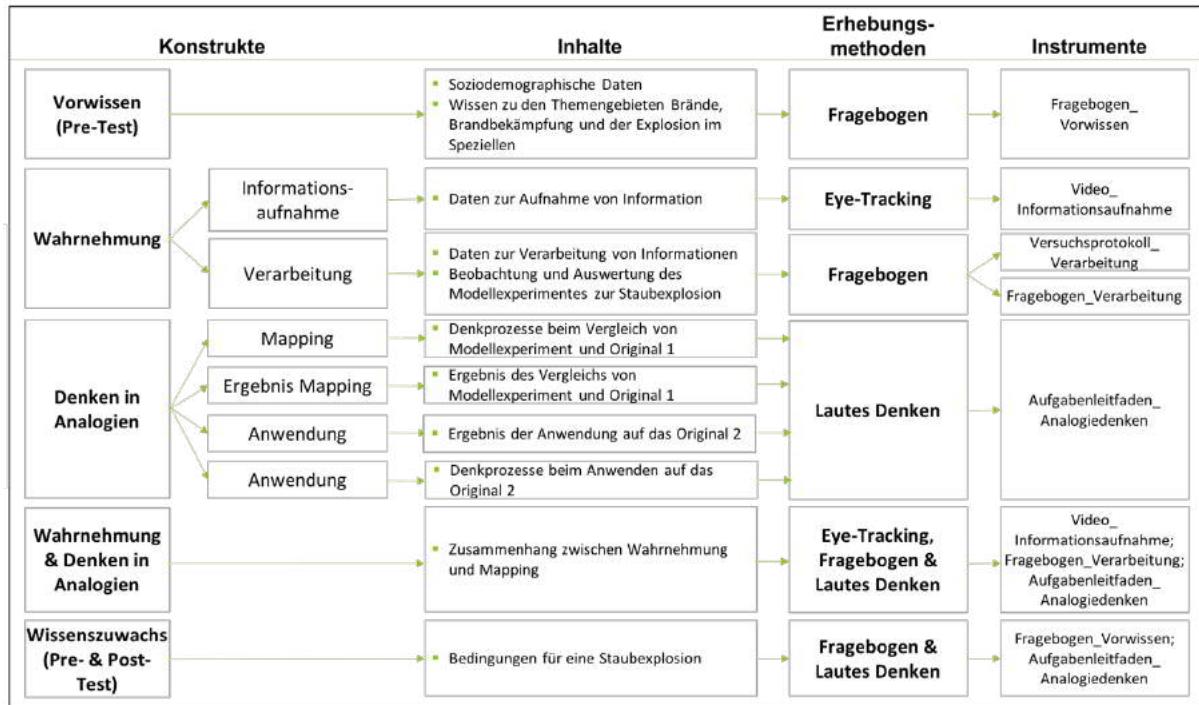


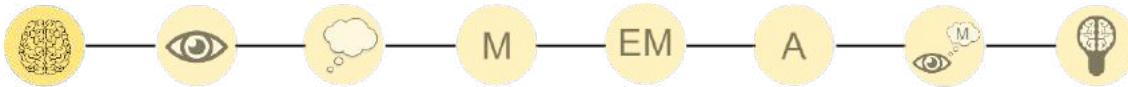
Abbildung 12: Übersicht der Datenerhebungsinstrumente mit Zugehörigkeit zu den einzelnen Konstrukten.

Dabei können sowohl individuelle Wahrnehmungs- und Denkprozesse detailliert abgebildet als auch allgemeine Systematiken umfassend erfasst werden. Gleichzeitig findet eine Integration der verschiedenen Daten zur Beantwortung der globalen Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit statt.

Das Vorwissen wurde mittels eines Fragebogens mit Items im offenem sowie geschlossenem Antwortformat erhoben. Dieses Instrument *Fragebogen\_Vorwissen* wird im kommenden Abschnitt 4.3.1 vorgestellt.

Um im Bereich der Wahrnehmung die Informationsaufnahme durch Modellexperimente zu untersuchen, wurde die Methode *Eye-Tracking* eingesetzt. Diese Methode mit dem genutzten Instrument *Video\_Informationsaufnahme* wird in Abschnitt 4.3.2 erläutert. Die Verarbeitung der aufgenommenen Informationen wurde durch Fragebögen, konkret einem semi-strukturierten experimentellen Versuchsprotokoll im offenen Antwortformat (*Versuchsprotokoll\_Verarbeitung*) und einem Fragebogen bestehend aus drei Teilfragebögen im geschlossenen Antwortformat (*Fragebogen\_Verarbeitung*) untersucht. Die beiden Fragebögen werden in Abschnitt 4.3.3 detailliert vorgestellt. Zuletzt wird die Methode *Lautes Denken* (Abschnitt 4.3.4) beschrieben, mit der Informationen über das Denken in Analogien, welches beim Umgang mit Modellexperiment und Original zentral und besonders ist, erhoben wurde (*Aufgabenleitfaden\_Analogiedenken*).

### 4.3.1 Fragebogen zur Erhebung des Vorwissens zum Themengebiet Verbrennungen und Explosionen



#### 4.3.1.1 Allgemeine Beschreibung der Methode

Die Entwicklung von Fragebögen bzw. Tests zur Überprüfung der Leistungen von Schüler\*innen gehört zum Alltag von Lehrkräften (vgl. Riese & Reinhold, 2014, S. 257). Diese Überprüfung basiert auf einer Bewertung der Antworten, welche Schüler\*innen zu bestimmten Aufgaben innerhalb eines Fragebogens geben. Solche Fragebögen werden in der fachdidaktischen Forschung zur Erhebung von gegenstandsbezogenen Leistungen sowie weiteren Persönlichkeitsmerkmalen eingesetzt, wie z.B. kognitive Leistungen und Überzeugungen oder Interessen (vgl. Riese & Reinhold, 2014, S. 257 ff.; Busker, 2014, S. 269). Der Einsatz von Fragebögen ermöglicht dabei, Persönlichkeitsmerkmale zu erheben und gleichzeitig eine hohe Vergleichbarkeit (objektiv, valide, reliabel) durch Standardisierung zu erhalten (vgl. Riese & Reinhold, 2014, S. 263 ff.). Tests zu Überzeugungen und Interessen von Individuen erhalten häufig skalierte Items, welche zusammen die Überzeugung bzw. das Interesse eines Individuums angeben (vgl. Busker, 2014, S. 272). Statt dieser skalierten Items werden bei schriftlichen Tests, wie z.B. bei fachlichen Berufseignungstests, Intelligenz- oder Leistungstests, bestimmte Aufgaben, die schriftlich zu lösen sind, eingesetzt (vgl. Riese & Reinhold, 2014, S. 257 ff.).

#### Vor- und Nachteile

Der Vorteil schriftlicher Fragebögen bzw. Tests liegt vor allem darin, dass die Individuen, die getestet werden, sich eigenständig und häufig in ihrer eignen Geschwindigkeit mit dem Fragebogen beschäftigen können. So können durchdachte Antworten gegeben werden, da die Individuen in der Regel keinen Zeitdruck verspüren und daher mehr Zeit für Überlegungen zur Verfügung steht. Da zudem kein\*e Interviewer\*in anwesend sein muss, können auch Interviewereffekte ausgeschaltet werden. Die Abwesenheit eines Interviewers führt häufig auch dazu, dass ehrlichere Antworten gegeben werden. Gleichzeitig ist die Anonymität besser gewährleistet. Auch die Größe der Stichprobe kann bei gleichem Mitteleinsatz höher sein als bei den meisten anderen Formen der Befragung.

Bei Fragebögen werden hauptsächlich offene sowie geschlossene Aufgaben eingesetzt (vgl. Riese & Reinhold, 2014, S. 261 f.). Dabei sind vor allem geschlossene Aufgaben, bei denen die Antwortmöglichkeiten vorgegeben sind, leichter auszuwerten. Auf diese Weise werden die Individuen aber auch gezwungen, zwischen

Antworten auszuwählen, die für sie eigentlich nicht in Frage kommen. Damit könnten ihre Antworten unter Umständen in eine bestimmte Richtung gelenkt werden. Jedoch ermöglicht ein Fragebogen mit geschlossenen Aufgaben exakt quantifizierbare Ergebnisse sowie die Ermittlung von statistischen Zusammenhängen (vgl. Riese & Reinhold, 2014, S. 257 ff.). Es sollte jedoch bedacht werden, dass ein solcher Fragebogen für die Probanden häufig weniger motivierend wirkt als z.B. Interviews. Gleichzeitig ermöglicht er keine Flexibilität während der Untersuchung, da die Fragen vorher festgelegt werden und somit kein individuelles Eingehen auf das jeweilige Individuum möglich ist. Somit eignen sich in der vorliegenden Studie zur Erhebung des Vorwissens vor allem Fragebögen mit offenen Items, da sie eine Vielzahl von Antwortmöglichkeiten zulassen, aber mithilfe eines festen Auswertungs-instruments trotzdem noch relativ objektiv und zeiteffizient auszuwerten sind. Je-doch ermöglichen sie im Gegensatz zu Leitfaden gestützten Interviews nicht, inter-ressante Aspekte im Zusammenhang mit dem individuellen Vorwissen durch an-knüpfende Fragen tiefergehend zu erforschen.

### **Pilotierung**

Sechs der insgesamt acht Items des Vorwissenstestes basieren auf Items des Test-instruments *Pre-Test*, das in dem Dissertationsvorhaben von Henning Steff (2015) am Lehrstuhl für Didaktik der Chemie der Ruhr-Universität Bochum eingesetzt wurde. Diese sechs Items wurden für die vorliegende Studie angepasst. Zudem wur-den sie sowohl durch zwei weitere Items als auch anknüpfende Unterfragen, die bestimmt Inhalte noch einmal expliziter fokussieren, ergänzt. Die weiteren und angepassten Items wurden in einer Pilotierung, die vor die Hauptstudie geschaltet war, pilotiert (Toschka, unveröffentlicht).

### **Instrument „Fragebogen\_Vorwissen“**

Mit dem *Fragebogen\_Vorwissen* wurde in der vorliegenden Studie das Vorwissen der Schüler\*innen zum Themengebiet Verbrennungen mit Explosionen im Speziellen erhoben. Damit die unbeeinflussten Präkonzepte der Schüler\*innen hinsichtlich dieser Themen erhoben werden konnten, wurden die Items bewusst in einem offe-nen Aufgabenformat konstruiert (vgl. Bortz & Döring, 2006). Ausschließlich bei zwei Items, den Items 2 und 8, wurden Lösungsvorgaben gemacht, um die Ant-wortvielfalt einzuschränken.

Der Fragebogen *Fragebogen\_Vorwissen* besteht aus insgesamt acht Items (vgl. An-hang 12.3). Darunter sind drei Items, die sich konkreter auf den Prozess der Expl-o-sion, die Bedingungen für das Entstehen einer Explosion und explosive Stoffe be-ziehen. Diese drei Items des Fragebogens, welche in Abbildung 13 - Abbildung 15

dargestellt sind, sind für die vorliegende Studie besonders relevant, da der Schwerpunkt der Studie auf dem Modellexperiment zur Staubexplosion liegt.

6.) Erkläre, was eine Explosion ist.

---

---

---

---

---

Abbildung 13: Vorwissensfragebogen – Item 6.

7.) Begründe, welche Bedingungen gegeben sein müssen, damit es zu einer Explosion kommt.

---

---

---

---

---

Abbildung 14: Vorwissensfragebogen – Item 7.

Die offen formulierten Items 6 und 7 fokussieren die fünf Bedingungen, die für das Entstehen einer Explosion gegeben sein müssen (vgl. Abbildung 5), sowie die Auswirkungen einer Explosion.

Bei Item 8 sollten die Schüler\*innen in einem geschlossenen Antwortformat die Explosivität von zehn Stoffen beurteilen, darunter fünf gasförmige Stoffe und fünf feste Stoffe (siehe Abbildung 15). Zudem sollten sie begründen, dass die Eigenschaft der Explosivität bzw. Brennbarkeit und das Vorliegen eines hohen Zerteilungsgrades für die Explosivität von festen Stoffen entscheidend ist.

8.) Was kann explodieren? Kreuze alle richtigen Antworten an.		
<b>Backpulver</b>		
stimmt <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>	weiß nicht <input type="checkbox"/>
<b>Mehlstaub</b>		
stimmt <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>	weiß nicht <input type="checkbox"/>
<b>Benzindampf</b>		
stimmt <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>	weiß nicht <input type="checkbox"/>
<b>Öldampf</b>		
stimmt <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>	weiß nicht <input type="checkbox"/>
<b>Betonstaub</b>		
stimmt <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>	weiß nicht <input type="checkbox"/>
<b>Sand</b>		
stimmt <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>	weiß nicht <input type="checkbox"/>
<b>Erdgas</b>		
stimmt <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>	weiß nicht <input type="checkbox"/>
<b>Schwarzpulver</b>		
stimmt <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>	weiß nicht <input type="checkbox"/>
<b>Kohlenstoffdioxidgas</b>		
stimmt <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>	weiß nicht <input type="checkbox"/>
<b>Wasserdampf</b>		
stimmt <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>	weiß nicht <input type="checkbox"/>
a. Warum können manche Stoffe explodieren und manche nicht? Begründe deine Vermutungen.		
<hr/> <hr/> <hr/> <hr/>		

Abbildung 15: Vorwissensfragebogen – Item 8.

Da die Aussagen der Schüler\*innen in den Items 6 und 7 zu dem Phänomen Explosion aufgrund der geringen Alltagsnähe des Phänomens nicht sehr differenziert waren, wurde zur Auswertung des Vorwissens noch das Item 1, welches das Thema Feuer fokussiert und ein Teilkonzept des Explosionskonzeptes bildet, zusätzlich bei der Auswertung mitbetrachtet.

1.) Notiere die Bedingungen, die nötig sind, um ein Feuer zu entzünden.
<hr/> <hr/> <hr/> <hr/>

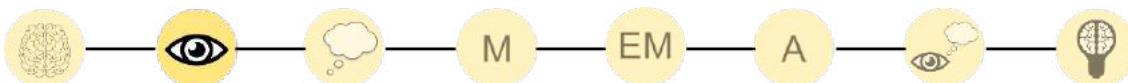
Abbildung 16: Vorwissensfragebogen – Item 1.

#### 4.3.1.2 Datenaufbereitung und Datenauswertung Fragebögen

Die Antworten der Schüler\*innen zu den Items des Vorwissenstests wurden qualitativ ausgewertet. Dabei wurde sich an dem Kategoriensystem *Explosion* von Steff (2015) orientiert und auf die veränderten Inhalte angepasst sowie durch Musterlösungen zu den weiteren Items ergänzt (siehe Anhang 12.4). Zur Auswertung der erhobenen Daten im Zusammenhang mit der Einschätzung der Explosivität von verschiedenen Stoffen (Item 8, Abbildung 15) wurden die Antwortmöglichkeiten zunächst kodiert (Stimmt = 1, Stimmt nicht = 2, weiß nicht = 3) und die kodierten Antworten der Schüler\*innen in das Statistik-Programm SPSS eingepflegt. Zur Beurteilung der Korrektheit der Antworten wurden die Antwort-Variablen so umkodiert, dass jede korrekte Antwort mit einem Punkt und jede falsche Antwort mit null Punkten kodiert wurde (Richtige Antwort = 1, Falsche Antwort = 0). Um die Korrektheit der Vorstellungen der Schüler\*innen bezüglich explosiver Stoffe (Aggregatzustände fest sowie flüssig) zu bestimmen, wurde zudem eine Gesamtpunktzahl berechnet, welche die Punkte für alle in dem Item zur Explosivität von Stoffen enthaltenen Stoffe summirt.

Die innerhalb des Fragebogens von einer\*m Schüler\*in erhaltenen Punkte wurden mit SPSS einer weiteren Analyse unterzogen. Unter anderem wurden deskriptiv die Häufigkeiten der jeweiligen Antworten bestimmt.

#### 4.3.2 Eye-Tracking zur Erhebung von objektiven Wahrnehmungsdaten



Das Lernen neuer Inhalte basiert auf der Wahrnehmung der zugrundeliegenden Informationen (vgl. Mazur, 2004). Für jeden Lernprozess müssen zunächst neue Informationen über die Augen aufgenommen werden. Dazu muss diesen Informationen von den Lernenden Aufmerksamkeit geschenkt werden. Durch das Richten der persönlichen Aufmerksamkeit auf die als relevant erachteten Informationen bildet sich aus den betrachteten Informationen eine mentale Repräsentation innerhalb des Gehirns aus und sie werden weiterverarbeitet. Somit ist es gerade in Lernsituationen besonders interessant, welche Informationen durch die Informationsaufnahme zur weiteren mentalen Verarbeitung bei den Lernenden bereitstehen. Um Daten zu diesen bereitstehenden Informationen zu erhalten, ist ein Einsatz der Methode Eye-Tracking – auch für die fachdidaktische Forschung im Chemiekontext – sehr sinnvoll (vgl. Cullipher, Hansen & VandenPlas, 2018).

#### 4.3.2.1 Allgemeine Beschreibung der Methode

Die Methode „Eye-Tracking ist ein apparatives, rezeptionsbegleitendes Verfahren zur Ermittlung der Blickrichtung von Personen“ (Blake, 2013, S. 367). Diese quantitative Methode hat die Fähigkeit, sowohl bewusste als auch unbewusste Blickbewegungen zu verfolgen. Damit ermöglicht die Methode *Eye-Tracking* den Forscher\*innen genaue Aussagen darüber, welche Teile eines präsentierten Stimulus Individuen wie lange und in welcher Reihenfolge betrachten, d.h. ihnen ihre Aufmerksamkeit schenken (vgl. Blake, 2013; vgl. auch Cullipher, Hansen & VandenPlas, 2018).

Hoffman und Subramaniam (1995) haben gezeigt, dass die Aufmerksamkeit des Individuums auf ein Objekt gerichtet ist, wenn die Augen eines Individuums auf dieses Objekt fokussiert sind. Diese prozessbezogenen Informationen zu den Blickbewegungen können derzeit mit keiner anderen Methode erfasst werden (vgl. Blake, 2013; Havanki & VandenPlas, 2014, S. 191; VandenPlas, Hansen & Cullipher, 2018). Dabei beschränken sich die ermittelten Informationen nicht nur auf die Aufzeichnung der reinen Blickbewegungen. Solche Blickaufzeichnungsdaten werden auch nutzbar gemacht, um Einblicke in kognitive und emotionale Prozesse zu gewinnen, die sich während des Betrachtens spezifischer Inhalte abspielen (Blake, 2013). Durch die Blickaufzeichnungsdaten können Forscher\*innen also nicht nur durch die Augen des Individuums schauen, sondern – wenngleich in sehr beschränktem Maße – auch Erkenntnisse über die im Gehirn ablaufenden kognitiven Prozesse der Individuen erhalten (vgl. Blake, 2013). Der Zusammenhang zwischen der mentalen Verarbeitung und den Augenbewegungsdaten wurde ebenfalls ausführlich untersucht (vgl. Just & Carpenter, 1980; Rayner, Raney & Pollatsek, 1995; Rayner, 2009; Anderson, Bothell & Douglass, 2004). Um die Beziehung zwischen der Kognition (mentalen Verarbeitung) und den Augenbewegungen zu belegen, wird sich auf zwei Annahmen bezogen:

- Die *Unmittelbarkeitsannahme* (immediacy assumption) besagt, dass das betrachtende Individuum das Objekt, das es fixiert, sofort und vor dem nächsten Objekt beginnt zu verarbeiten. Wenn sich das Individuum dann mit dem Blick einem neuen Objekt zuwendet, beginnt das Individuum auch direkt mit der Verarbeitung dieser neuen Informationen.
- Die *Auge-Geist-Annahme* (eye-mind assumption) (Just & Carpenter, 1980) besagt, dass eine kausale Beziehung zwischen den Augen (Aufmerksamkeit) und dem Geist (Arbeitsgedächtnis) besteht. So werden die Informationen bzgl. des Objektes, worauf sich das Auge fixiert, vom Geist verarbeitet. Basierend auf dieser Annahme kann davon ausgegangen werden, dass die häufig

vorkommenden Blickmuster ähnliche Wege zur Verarbeitung eines visuellen Stimulus darstellen können.

Dabei wird bei diesen beiden Annahmen davon ausgegangen, dass ein Objekt direkt angeschaut wird. Wird ein Objekt direkt angeschaut, fällt dessen Abbild in den Bereich des höchsten Auflösungsvermögens auf der Netzhaut (vgl. Hofer & Mayerhofer, 2010, S. 146; Blake, 2013). Jedoch ist bei der Abbildung visueller Reize auf der Netzhaut des menschlichen Auges die Hochauflösung nicht in jedem Bereich des Auges gegeben (vgl. Nielsen & Pernice, 2010, S. 6). Die Dichte der für das Sehen bei Tageslicht und das Sehen in Farbe relevanten Photorezeptoren (sogenannte Zapfen) ist nur in einem bestimmten Areal der Netzhaut so hoch, dass darauf einfallendes Licht in ein hochaufgelöstes und detailreiches Bild umgesetzt werden kann (Blake, 2013). Anhand der Ausrichtung der Augen kann also relativ genau bestimmt werden, welchen Bereich ihres Sichtfeldes Individuen gerade hochauflösend sehen können (foveales Sehen) und welche Bereiche nicht (peripheres Sehen; vgl. Bente, 2004, S. 303; Leven, 1991, S. 75). Entsprechend der unterschiedlichen Leistungsfähigkeit fovealer und peripherer Wahrnehmung kommen beiden Arten des Sehens unterschiedliche Funktionen zu. Das foveale Sehen wird zur Inspektion von Details ausgewählter Bereiche des Blickfeldes benötigt (vgl. Blake, 2013). Im peripheren Sichtfeld können markante Bereiche eines Stimulus ausgemacht werden, die in einem nächsten Schritt detailliert foveal in den Blick genommen werden sollen (vgl. ebd.). Somit muss die Auge-Geist-Annahme einschränkend betrachtet werden. Denn es existiert neben dem fovealer Sehen das periphere Sehen, mit welchem zwar der Stimulus wahrgenommen werden kann, diese Informationen aufgrund der niedrigen Qualität für die Informationsverarbeitung jedoch nicht weiter zur Verfügung stehen.

Diesen Umstand macht sich das Eye-Tracking zu Nutze, um die von Individuen visuell wahrgenommenen Inhalte bestimmen zu können (vgl. ebd.). Die Grundlage für diese Datenaufnahme mithilfe eines Eye-Trackers und der Umgang mit diesen Grundlagen ist in Abbildung 17 dargestellt und wird im Folgenden genauer erläutert.

Die meisten modernen Eye-Tracking Systeme verwenden ein Detektionsverfahren, welches auf der Kornea-Reflexion beruht, und vorwiegend videobasiert ist. Dabei werden die per Kamera aufgezeichneten und mit einem Detektionsverfahren identifizierten Positionen von Pupille und Kornea-Reflex in Relation zueinander gesetzt (vgl. Holmqvist et al., 2011, S. 26 ff.). Der Kornea-Reflex bezeichnet die Spiegelung einer Lichtquelle auf der konvex geformten Hornhaut des Auges (vgl. Duchowski, 2007, S. 57).

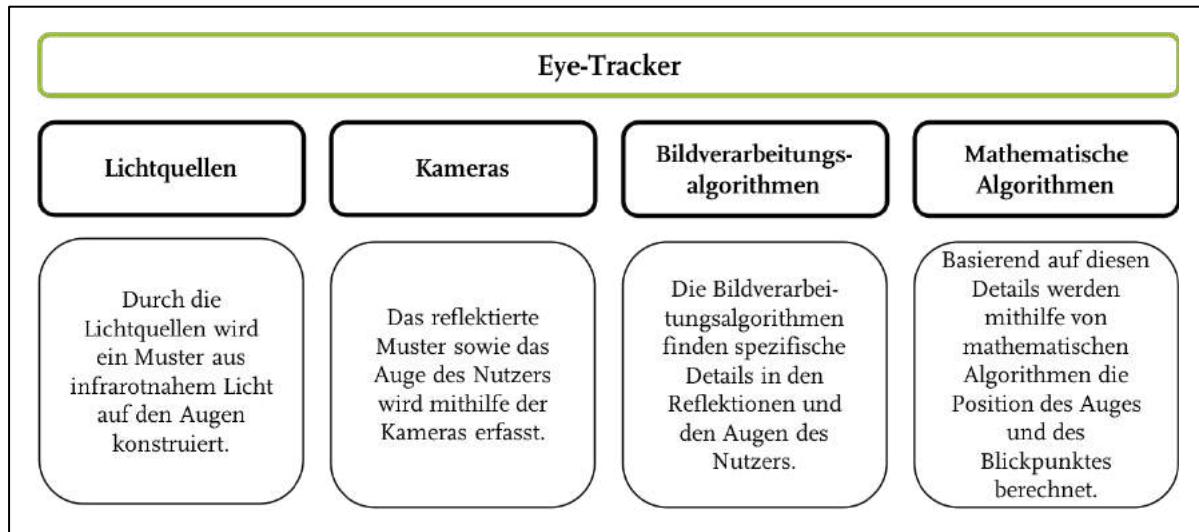


Abbildung 17: Aufbau eines Eye-trackers (angelehnt an <https://www.tobiidynavox.de/wie-funktioniert-eyetracking/>).

Durch eine bestimmte Geometrie der Reflexionspunkte und einem auf physiologischen Informationen basierenden mathematischen Algorithmus werden dann die Position der Pupille und die Koordinaten des Blickpunkts bestimmt (vgl. Block, 2002; Duchowski, 2007). Dabei werden die Koordinaten als Punkte im zweidimensionalen Raum  $(x_i, y_i) \in \mathbb{R}^2$  mit der Zeitinformation  $FD_i$  (Fixationsdauer) gespeichert. Basierend auf diesen Informationen werden zwei Arten des Blickverhaltens unterschieden, die zum Zweck der Detailbetrachtung bildlicher oder textlicher Informationen sowie zur Neuausrichtung auf weitere Zielobjekte durchgeführt werden: *Fixationen* und *Sakkaden* (vgl. Joos et al., 2003). *Fixationen* sind Phasen des relativen Stillstandes zu einem Sehfeldbereich, bei denen ein Punkt fokussiert und festgehalten wird (vgl. Young & Sheena, 1975; Duchowski, 2007). Der dabei in den Blick genommene (fixierte) Stimulusbereich wird foveal betrachtet. Während einer Fixation wird dieser Bereich wahrgenommen und die dadurch erhaltene Information verarbeitet (vgl. Just & Carpenter, 1976). Auch wenn der Begriff Fixation einen Stillstand der Augen nahelegt, weichen die Augen immer wieder geringfügig vom Fixationsobjekt ab und müssen durch minimale Positionskorrekturen in die ursprüngliche Position gebracht werden (vgl. Rötting, 1999, S. 5 zu den Begriffen Drifts, Tremor und Microsakkaden). Auch um ein sich bewegendes Objekt (z. B. ein fahrendes Auto) im Blick zu behalten, können langsame, gleitende Folgebewegungen (auch: smooth pursuit) während der Fixationen erfolgen (vgl. Joos et al., 2003, S. 155; Yarbus, 1967, S. 159). Aus beiden Gründen ist bei der Definition von Fixationen daher von einem relativen Stillstand der Augen die Rede. Von einer Fixation spricht man in der Literatur häufig ab einer Fixierungslänge von mehr als 100 ms (vgl. Duchowski, 2007). Jedoch unterscheiden sich die Definitionen einer angemessenen minimalen Fixationsdauer bei unterschiedlichen Arten des Stimulus. Sie schwanken in der Literatur zwischen 50 ms und 240 ms (vgl. Überblick bei

Hofer & Mayerhofer, 2010, S. 153). Dabei basieren diese verschiedenen Definitionen der minimalen Fixationsdauer auf der unterschiedlichen Komplexität der zu verarbeitenden Inhalte, die den Individuen präsentiert werden (Text vs. Bild, statische vs. dynamische Inhalte) (vgl. Blake, 2013). Bei dynamischen Stimuli könnte aufgrund der erhöhten Komplexität ebenfalls eine längere Fixationsdauer vonnöten sein als bei statischen Stimuli bis der Inhalt wirklich verarbeitet wird. Relevante Informationen wiesen jedoch gerade bei dynamischen Stimuli nicht immer diese erweiterte Länge auf. Zwischen den Fixationen liegen die Sakkaden. *Sakkaden* sind sehr schnelle Augenbewegungen von einer Fixation zu einer anderen, die lediglich dem Fokuswechsel dienen (vgl. Voßkühler, 2010; Blake, 2013). Dabei richten sich die Augen foveal auf ein neues Ziel aus (vgl. Rötting, 1999, S. 4; Young & Sheena, 1975; Duchowski, 2007). Die Sakkaden haben eine Dauer von ca. 10-100 ms. Die Initierung einer Sakkade kann zum einen bottom-up, also unwillkürlich und reflexartig durch plötzliche auffällige Änderungen im peripheren Blickfeld (z.B. durch Bewegungen), hervorgerufen werden. Zum anderen können Sakkaden auch top-down, also willentlich von dem betrachtenden Individuum, ausgelöst werden, um peripher wahrgenommene Objekte, die das Interesse des Individuums geweckt haben, detaillierter zu betrachten (vgl. Godijn & Theeuwes, 2003, S. 3). Es herrscht weitgehender Konsens darüber, dass nur im Rahmen von Fixationen visuelle Informationen wahrgenommen werden können. Während der schnellen Sakkaden ist das Sehvermögen extrem eingeschränkt, sodass eine detaillierte Wahrnehmung und eine visuelle Verarbeitung nicht möglich sind (vgl. Hammoud & Mulligan, 2008, S. 7; Leven, 1991, S. 82; Blake, 2013). Ein noch umfassenderer Überblick über die Grundlagen, Techniken, Methoden sowie Anwendungen der Eye-Tracking Methode sind bei Duchowski (2007) sowie Holmqvist et. al. (2011) zu finden.

### Vor- und Nachteile der Methode

Besonders der digitale Fortschritt hat dazu geführt, dass die Aufnahme der Informationen zu Blickbewegungen von Individuen wesentlich kostengünstiger, einfacher und unter natürlicheren Rahmenbedingungen einsetzbar geworden ist (vgl. Duchowski, 2007; Blake, 2013). Dabei werden die Informationen zu Blickbewegungen von Individuen als quantitative Daten gespeichert, die einen objektiven und einfachen Umgang mit diesen Daten ermöglichen. Durch den digitalen Fortschritt konnten auch Eye-Tracking-Systeme mit sehr hohen zeitlichen Auflösungen entwickelt werden, die eine sehr genaue und kleinschrittige Aufnahme der Blickbewegungen ermöglichen. Dies führt dazu, dass sehr große Datenmengen erhalten werden, die eine Auswertung erschweren können. Eine sehr hohe Auflösung ist bei Studien, die sich vor allem für Fixationen interessieren, in vielen Fällen nicht unbedingt notwendig. Hier kann in der Regel auch auf Systeme mit einer Auflösung von

60 Hz oder 120 Hz zurückgegriffen werden, um die Anzahl an Datenpunkten zu reduzieren (vgl. Holmqvist et al., 2011; Blake, 2013).

Gleichzeitig hat dieser vereinfachte Zugang zu Erkenntnissen über die Informationsaufnahme mittels Blickbewegungsdaten mit Hilfe der Eye-Tracking Methode auch einige Schwächen. So kann „die ‚Plug’n Play‘ Bedienbarkeit moderner Systeme zu einem unreflektierten Umgang mit der scheinbar ohne intensive Einarbeitung verwendbaren Methode führen“ (Blake, 2013, S. 384). Dies kann zu Aussagen führen, die unreflektiert bleiben und damit eventuell nicht korrekt interpretiert werden. Bezuglich der Interpretation ist bei der Nutzung von Eye-Tracking Daten zu beachten, dass diese Methode nur eine begrenzte Interpretationsreichweite hat. Aufgrund der Auge-Geist-Annahme sowie der Unmittelbarkeitsannahme kann die Eye-Tracking Methode nämlich lediglich Informationen dazu liefern, auf welchen Objekten eines Stimulus der Aufmerksamkeitsfokus liegt. Dabei kann auch nur eingeschränkt gesagt werden, ob diese fokussierten Daten auch wirklich von dem Individuum verarbeitet wurden. Zudem ermöglicht die Methode keinen Zugriff auf Informationen über die Art der Verarbeitung. Aufgrund dieser Einschränkungen der Methode, welche auf der alleinigen Messung des Aufmerksamkeitsfokus über Blickbewegungsdaten (objektive Wahrnehmung) basiert, stützen sich die meisten Forschungsuntersuchungen auf eine methodische Triangulation. Dabei handelt es sich um den Einsatz von mehr als einer Datenerhebungsmethode, um die Ergebnisse zu legitimieren und das Verständnis der mittels Eye-Tracking erhobenen quantitativen Ergebnisse zu festigen, wenn eine konkrete Forschungsfrage untersucht wird (vgl. Denzin, 1973). Häufig werden die Eye-Tracking Daten dabei mit einem Fragebogen, Interviews oder der Methode *Lautes Denken* kombiniert (vgl. Cullipher, Hansen & VandenPlas, 2018, S. 4). Dadurch kann ermittelt werden, ob die objektiven Daten auch wirklich subjektiv wahrgenommen und verarbeitet wurden. Folglich wurde in der vorliegenden Studie die Eye-Tracking Methode mit weiteren Methoden (Versuchsprotokoll und Fragebogen) komplementär ergänzt.

#### **4.3.2.2 Umsetzung der Eye-Tracking Methodik zur Erhebung der objektiven Wahrnehmungsdaten in der vorliegenden Studie**

Für die Erfassung und Messung der Informationsaufnahme über die Blickbewegungen der Schüler\*innen beim Betrachten des Modellexperiments wurde in der vorliegenden Studie die Eye-Tracking Methode genutzt und auf den Untersuchungsgegenstand angepasst.

Um den Untersuchungsgegenstand, das Modellexperiment zur Staubexplosion, den Schüler\*innen zu präsentieren, waren verschiedene Präsentationsvarianten wie Fotos, Fotosequenzen, Videos, Demonstrationsexperimente sowie selbst

durchgeführte Schüler\*innenexperimente denkbar. Im Folgenden wird die Entscheidung für das Video als Präsentationsform begründet. Der Vorteil eines Demonstrationsexperiments sowie eines Schüler\*innenexperiments ist, dass die Schüler\*innen den chemischen Prozess mit seinen dynamischen Aspekten in natura und in einer realen Unterrichtssituation wahrnehmen können. Jedoch sind zur Aufnahme der Blickbewegungen bei diesen beiden Präsentationsformen mobile Eye-Tracking Geräte notwendig. Der Nachteil dieser Geräte ist, dass sie keine hohe Auflösung ermöglichen. Zudem sind in diesem Setup Blickbewegungen auch zu anderen, irrelevanten Orten außerhalb des Modellexperiments möglich, die den Vergleich zwischen den einzelnen Schüler\*innen aufgrund einer steigenden Komplexität erschweren können. Zusätzlich könnten bei Demonstrationsexperimenten sowie Schüler\*innenexperimenten die Beobachtungen durch weitere Variablen beeinflusst werden. Bei Demonstrationsexperimenten könnten unterschiedlich handelnde Personen zu einer Ablenkung von dem Experiment auf die jeweils handelnde Person führen oder die Blickbewegung der beobachtenden Person in eine bestimmte Richtung lenken. Beim selbstständige Experimentieren (Schüler\*innen-experiment) könnte der Experimentator durch das Konzentrieren und Kontrollieren der eigenen Handlungen von den eigentlichen Beobachtungen, die unmittelbar während der Handlung stattfinden, abgelenkt werden. Im Gegensatz zu der Präsentation des Modellexperiments in natura, bei der kontrollierte Rahmenbedingungen lediglich eingeschränkt vorliegen, kann der Fokus bei der Präsentation von Fotos und Videos auf den reinen chemischen Prozess gelegt werden. So können die Fotos und Videos derart konstruiert werden, dass sie auf das Wesentliche, das beobachtet werden soll, reduziert sind. Es finden keine Nebentätigkeiten statt und es gibt keine weiteren aufmerksamkeitslenkenden Elemente, die neben dem Modellexperiment noch betrachtet werden könnten. Dem hingegen bilden sie nur eingeschränkt die reale Situation der Durchführung eines Modellexperiments ab. Allerdings ist beim Einsatz von Fotos und Videos als Wahrnehmungsgrundlage ein stationärer Einsatz von Eye-Tracking Systemen möglich, welcher prinzipiell qualitativ hochwertigere Blickbewegungsdaten und eine bessere Auswertung ermöglicht. Zusätzlich können Videos den dynamischen Aspekt hervorheben. Der Nachteil von Fotos ist, dass sie den Prozess eines Modellexperiments über Bildabfolgen nur indirekt darstellen können. Aus Gründen der Datenqualität, der Kontrolle der Rahmenbedingungen und dem visualisierbaren dynamischen Aspekt wurde sich daher für den Einsatz eines Videos als Präsentationsform entschieden.

Als Setup für das Eye-Tracking wurde ein stationäres System, der Remote-Eye-Tracker SMI RED500 (SensoMotoric Instruments, Teltow, Deutschland), gewählt (Abbildung 18). Dieses stationäre System gewährleistet durch eine hohe zeitliche

und örtliche Auflösung eine exakte Bestimmung der Koordinaten eines Blickpunktes über die Reflexionspunkte sowie – durch eine gute Reproduzierbarkeit – das Erhalten der gewünschten hohe Datenqualität. Zudem wurden die Videos auf einem 27-Zoll-Monitor (Bildschirmauflösung: 1920 x 1080) präsentiert. Um unvorhergesehene Körperbewegungen während der Aufnahme der Blickbewegungen zu vermeiden, wurde ein stationärer Stuhl verwendet. Zur Anpassung der Sitzhöhe wurden verschiedene Sitzpolster bereitgestellt, da die Körpergrößen der Schüler\*innen eine hohe Varianz aufwiesen. Darüber hinaus wurden die Lichtverhältnisse konstant gehalten und indirektes Licht eingesetzt, um Irritationen des Eye-Trackers durch Lichtreflexion zu vermeiden.



Abbildung 18: Setup mit genutztem Eye-Tracker der Firma SMI (eigenes Bild).

Für die Instruktion, die den Schüler\*innen vor der Präsentation des Videos mündlich gegeben wurde, wurde ein Leitfaden erstellt (siehe Anhang 12.5). Beim Betrachten der Videoaufnahmen wurden die Augenbewegungen der Schüler\*innen mit dem Eye-Tracker alle 2 ms (500 HZ Bildwiederholfrequenz) verfolgt. Die Augenbewegungen wurden dabei mit der Bildwiederholfrequenz von 500 Hz durch eine hochauflösende Kamera und zwei Infrarot-LEDs erfasst. Mit Hilfe der Infrarot-LEDs wurde der Kornea-Reflex, wie in der allgemeinen Beschreibung erörtert (vgl. Abschnitt 4.3.2.1), genutzt, um die Positionen der Pupillen-Zentren festzustellen. Diese Position wird in Koordinaten ausgedrückt.

Um die Berechnung der Koordinaten gewährleisten zu können, wurden einige Systemparameter und probandenabhängige Augenparameter ermittelt. Als Systemparameter wurden beispielsweise die Positionen der Infrarot-LEDs, des Monitors sowie die Augenhöhe der Probanden, die einmal beim Systemaufbau bestimmt wurden, gemessen (vgl. iViewX System Manual, 2011; Maljusch, 2018). Zur Definition der probandenabhängigen Augenparameter mussten die Schüler\*innen eine 9-Punkte-Kalibrierung durchführen, bevor sie sich das Video ansehen konnten. Bei

dieser Kalibrierung mussten die Schüler\*innen nacheinander eine Reihe von Punkten mit bekannten Koordinaten fixieren. Darauf aufbauend schätzte das System aus beliebigen Relationen der Pupillenzentren zum Mittelpunkt des Kornea-Reflexes den fixierten Bereich des Sichtfeldes (vgl. Chen, 2011; Blake, 2013; iViewX System Manual, 2011). Diese Werte können in die Bestimmungen der Blickpunkte während der Untersuchung mit einbezogen werden, sodass genaue und zuverlässige Ergebnisse erhalten werden können (vgl. iViewX System Manual, 2011). In der vorliegenden Studie wurde ein Kalibrierungswert kleiner als zwei angestrebt, bei dem erfahrungsgemäß optimale Ergebnisse erwartet werden können. Die durchschnittliche Abweichung der Kalibrierung betrug weniger als  $0,7^\circ$  (x-Koordinate:  $M = 0,60^\circ$ ,  $SD = 0,43^\circ$ ; y-Koordinate:  $M = 0,68^\circ$ ,  $SD = 0,53^\circ$ ). Nach der Kalibrierung wurde den Schüler\*innen das Modellexperiment in einem Video präsentiert. Vor dem Betrachten des Videos wurden auch Informationen über die Verwendung von Brillen oder Kontaktlinsen gesammelt, da diese den Eye-Tracker neben starkem Augen Make-up und diversen Augencharakteristika (hängende Lider, dunkle oder lange Wimpern, schmalen Augen) stören könnten (vgl. Holmqvist et. al., 2011). Die Ergebnisse zeigten jedoch keine verzerrenden Effekte.

### **Pilotierung**

Die Pilotierung der praktischen Umsetzung der Eye-Tracking Methode zur Untersuchung der Blickbewegung beim Betrachten eines Modellexperiments wurde im Zuge einer Abschlussarbeit des Studiengangs Master of Education am Lehrstuhl für Didaktik der Chemie der Ruhr-Universität Bochum von Maljusch (2018) durchgeführt. Dabei wurde mit 19 Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe das Studiendesign mit der Eye-Tracking Methode und den Erhebungsinstrumenten getestet. Nach den Ergebnissen dieser Pilotstudie wurden die Erhebungsinstrumente für die vorliegende Studie verbessert. Der modifizierte Videoaufbau wird in dem nächsten Abschnitt ausführlich beschrieben.

### ***Erhebungsinstrument objektive Wahrnehmung (Eye-Tracking)***

#### **Videoaufbau**

Grundlage des Videos ist das Modellexperiment zur Staubexplosion in der LC-HA (vgl. Schröder et al., 2015a; 2015b) (siehe Abschnitt 2.2.3 – Modellexperiment in der LC-Hartmann Apparatur). Das Video besteht insgesamt aus drei Sequenzen, die in Tabelle 4 dargestellt sind.

## 4 Methodisches Vorgehen

Tabelle 4: Übersicht über die Arten und der Längen der Sequenzen, die im Video präsentiert werden.

Sequenz	Zeitabschnitt des Videos
1. Versuchsaufbau	00:00 – 00:13 min
2. Modellexperiment ohne Substanz	00:13 – 00:50 min
3. Modellexperiment mit Substanz	00:50 – 01:39 min

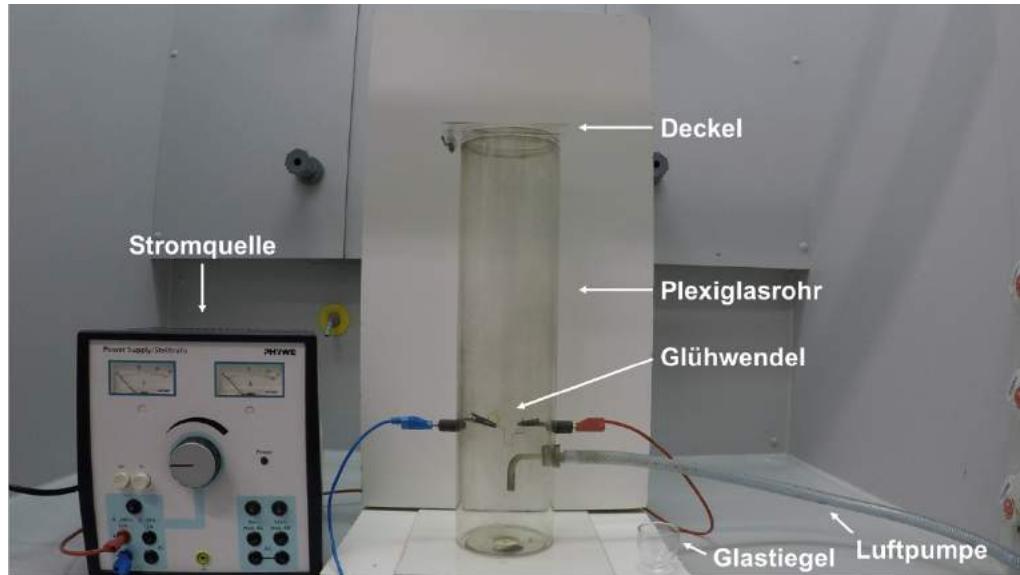


Abbildung 19: Beschrifteter Versuchsaufbau (Bild aus einem Video).

In der ersten Sequenz des Videos wird der markierte Versuchsaufbau für 13 Sekunden (Sequenz 1) wie in Abbildung 19 dargestellt. Die zweite Sequenz beinhaltet den Ablauf des Modellexperiments ohne Substanz, um zu demonstrieren, dass der von der Luftpumpe erzeugte Luftstoß nicht zum Öffnen des Deckels führt (Sequenz 2). In der dritten Sequenz wird das Modellexperiment mit der Substanz durchgeführt (Sequenz 3). Die Inhalte dieser dritten Sequenz wurden über die Schilderung der Durchführung in Abschnitt 2.2.3 detailliert beschrieben. Der bei dieser Durchführung ablaufende Prozess der Staubexplosion ist in Abbildung 20 anhand einer Bildsequenz dargestellt.

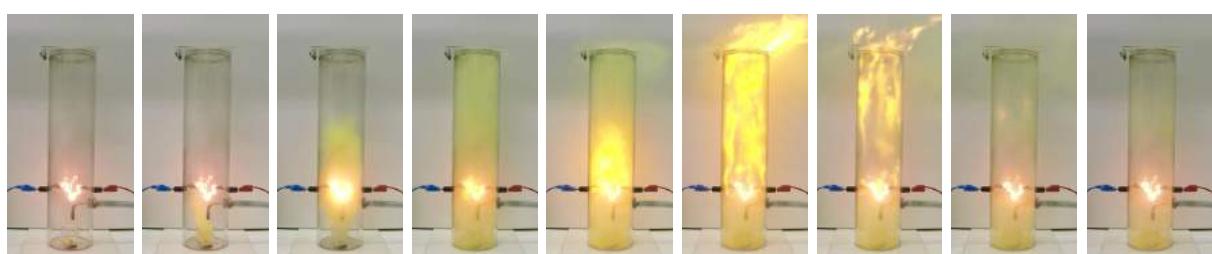


Abbildung 20: Aufwirbelung und Entzündung im Bereich der Geschwindigkeitsreduzierung (Bildsequenz aus einem Video).

Das Video wurde von Experten des Lehrstuhls für Didaktik der Chemie erstellt, die mit der Durchführung des Modellexperiments vertraut waren. Das Video zeigt die experimentelle Situation aus der Ich-Perspektive, sodass die Perspektive beim eigenständigen Experimentieren möglichst gut imitiert wird und sich die betrachtenden Individuen auf diese Weise besser in die experimentelle Situation hineinversetzen können. Zudem wurden bei der Erstellung des Videos die Gesetze des Sehens beachtet (vgl. Schmidkunz, 1983; Bader & Lühken, 2018, S. 471 ff.). Diese Gesetze geben an, welche Regeln bei der Präsentation von Experimenten zu beachten sind, damit die relevanten Anordnungen und Prozesse von betrachtenden Individuen prägnant wahrgenommen werden können. Sie berücksichtigen, dass unter anderem die Struktur einfach und weniger komplex ist, keine irrelevanten Stimuli sichtbar sind und sich der Stimulus vom Hintergrund abhebt. Damit sich in dem eingesetzten Modellexperiment der brennbare Stoff, der einen hohen Zerteilungsgrad aufweist, vom Hintergrund und dem restlichen Versuchsaufbau abhebt, wurde in den Videos ein gelbes Holi-Pulver anstatt eines schwarzen Pulvers, wie es beim eigenständigen Experimentieren eingesetzt wurde, verwendet. Auf diese Weise bildet die Einhaltung dieser Gesetze eine Voraussetzung für bessere Lernergebnisse.

#### 4.3.2.3 Datenaufbereitung und Datenauswertung Eye-Tracking

Die Daten wurden von dem Eye-Tracker als .txt-Dateien ausgegeben, die u.a. die zeitlich definierten  $(x_i, y_i)$ -Koordinaten der registrierten Kornea-Reflexe und einige probandenabhängige Augenparameter enthalten (siehe Anhang 12.9 – beispielhafte Tabelle der .txt-Datei).

Für die weitere Blickbewegungsanalyse mit Hilfe dieser Rohdaten wurden zunächst die Fixationen und Sakkaden mit dem Sakkadenerkennungsalgorithmus von SR Research ermittelt (vgl. Tatler, 2007, S. 3). Bei den Sakkaden springt das Auge von einer Fixation zur nächsten. Sakkaden sind in dem Algorithmus als Auslenkungen der Augenposition von mehr als  $0,1^\circ$  definiert, die mindestens 4 ms lang sind und eine Mindestgeschwindigkeit von  $30^\circ\text{s}^{-1}$  sowie einer Mindestbeschleunigung von  $8000^\circ\text{s}^{-2}$  aufweisen. Somit kann der Algorithmus auch als Beschleunigungsalgorithmus bezeichnet werden. Damit eine Sakkade abgeschlossen ist, muss eine Fixation von mindestens 50 ms (minimale Fixationsdauer) folgen. Des Weiteren wurden Interessensgebiete (Areas of Interest – AOIs) definiert, um die Daten zielgerichtet analysieren zu können. Insgesamt wurden sechs Areas of Interest (AOI) um alle relevanten Handlungsfelder herum festgelegt (siehe Abbildung 21). Die AOIs 1 - 4 beinhalten die relevanten Beobachtungen die während des Prozesses der Staubexplosion gemacht werden konnten. AOI 5 und AOI 6 sind lediglich für die Durchführung des Experiments relevant,

bilden jedoch nicht den Prozess der Staubexplosion mit ab. Basierend auf diesen Interessensgebieten wurden die Daten bei der weiteren Auswertung qualitativ-de-skriptiv sowie quantitativ-deskriptiv betrachtet.

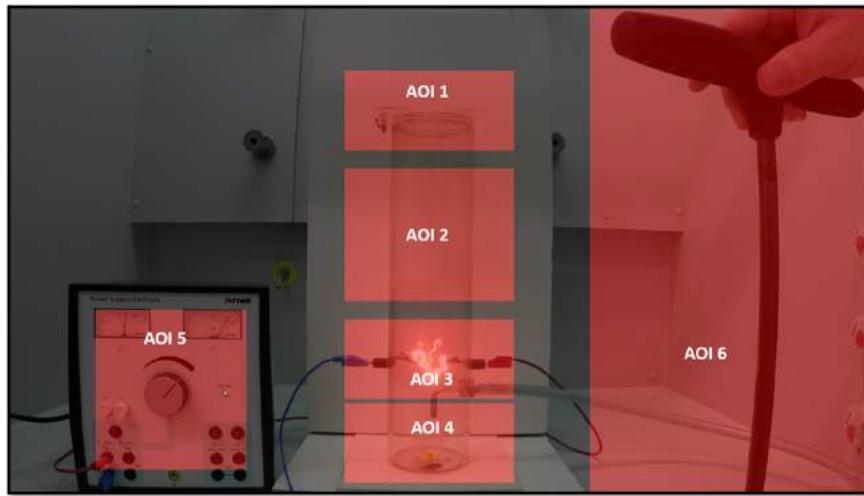


Abbildung 21: Areas of Interest des Versuchsaufbaus.

Auf Basis dieser Areas of Interest wurden die Standard-Augenbewegungsvariablen berechnet und für die weiteren Analysen verwendet: Fixationsanzahl, Fixationsdauer und die Zeit bis zur ersten Fixation (Tabelle 5).

Tabelle 5: Fixationsbezogene Indikatoren mit den zugehörigen Implikationen (verändert nach Geise, 2011; Nehring & Busch, 2018).

Indikator	Implikation
<b>Fixationsanzahl</b> ( <i>fixation count</i> )	Sie gibt Aufschluss über die <b>Interessiertheit</b> an einem Bereich bzw. das <b>Aktivierungspotential</b> eines Bereiches. Eine hohe Fixationsanzahl in einem Bereich lässt Rückschlüsse auf einen erhöhten Grad an Interessiertheit/beigemessener Relevanz/ Aktivierungspotential zu – kann jedoch auch ein Anzeichen für eine (zu) hohe Komplexität des jeweiligen Bereiches sein.
<b>Fixationsdauer</b> ( <i>fixation duration oder observation length of fixation</i> )	Sie gibt Aufschluss über die <b>Aufmerksamkeitsallokation</b> . Hohe Fixationsdauern innerhalb eines Bereiches lassen sich vermutlich mit einem höheren Grad der Informationsaufnahme in Beziehung bringen.
<b>Zeit bis zur ersten Fixation</b> ( <i>time of first fixation</i> )	Sie gibt Aufschluss über das <b>Aktivierungspotential</b> eines Bereiches. Bei geringer Zeit bis zur ersten Fixation liegt ein hohes Aktivierungspotential vor, sodass wenig visuelle Suche erforderlich ist, um das betreffende Element wahrzunehmen.

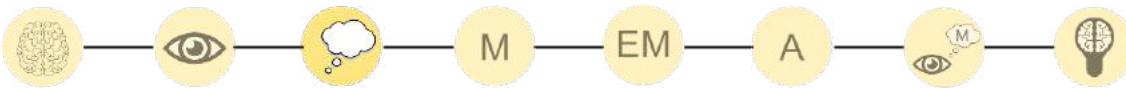
Die **Fixationsanzahl** wurde definiert als die Akkumulation der Fixationen innerhalb einer AOI. Die **Fixationsdauer** quantifiziert die Zeit, die ein Individuum für die Betrachtung einer bestimmten AOI akkumuliert aufgewendet hat. Die **Zeit bis zur ersten Fixation** wurde als die Zeitspanne definiert, die ein Individuum benötigt, um eine bestimmte AOI ab Beginn des Stimulus zum ersten Mal zu betrachten. Der Beginn des Stimulus wird in der vorliegenden Studie in Abhängigkeit der ausgewählten Videosequenz definiert. Die Variablen *Fixationsdauer* und *Zeit bis zur ersten Fixation* wurden in Sekunden bestimmt.

Eine zusätzliche, abhängige Augenbewegungsvariable war die **Anzahl der Blinzel-Signale**. Blinzeln wurde mit dem von der iView-Software (SensoMotoric Instruments, Teltow, Deutschland) bereitgestellten Event Detector for High Speed Event Detection erkannt. Im Allgemeinen ist zwischen jedem Blinzeln ein Intervall von 2-10 Sekunden. In einer Laborumgebung kommt es durchschnittlich zu 10 Blinzeln pro Minute. Die tatsächliche Anzahl pro Minute variiert jedoch je nach Individuum, welches eine Aufgabe bearbeitet, stark. Denn die Anzahl der Blinzler hängt auch von dem momentanen Zustand eines Individuums ab, z.B. Müdigkeit (höhere Blinzelanzahl erwartet) oder Aufmerksamkeit (niedrigere Blinzelanzahl erwartet; vgl. Stern, Boyer & Schroeder, 1994; Wascher et al., 2015). Insgesamt ist das Blinzeln ein Indikator für die kognitive Verarbeitung. So wird das Blinzeln normalerweise während der Ausführung einer Aufgabe, z.B. während des Entscheidungsprozesses, gehemmt (vgl. Boehm-Davis, Gray & Schoelles, 2016). Jedoch war diese Hemmung in der Studie von Boehm-Davis et al. (2016) nicht immer gleich. Vielmehr konnte eine Abhängigkeit zu den Eigenschaften einer zu bearbeitenden Aufgabe festgestellt werden. So war die Anzahl der Blinzel-Signale bei kognitiv anspruchsvollen Aufgaben geringer als bei weniger anspruchsvollen Aufgaben.

Die zuvor erläuterten Augenbewegungsvariablen wurden in der vorliegenden Studie aufgrund der drei Sequenzen des Videos zusätzlich getrennt und anhand derer einzeln betrachtet. So wurden zur Untersuchung der Informationsaufnahme während der Betrachtung des Aufbaus des Modellexperiments die aufgenommenen Blickdaten der Schüler\*innen verwendet, die während der ersten Sequenz des Videos (00:00 – 00:13 min) aufgenommen wurden. Zur Untersuchung der Informationsaufnahme während der Betrachtung des Prozesses der Staubexplosion wurden die Blickdaten der Schüler\*innen ausgewählt, die während der dritten Sequenz des Videos aufgenommen wurden. Diese Augenbewegungsvariablen jedes Individuums wurden sequenzspezifisch aggregiert. Auf diese Weise konnten die Blickbewegungsmuster der Individuen betrachtet werden und die Fixationsdauer sowie die Fixationsanzahl zwischen den einzelnen Individuen verglichen werden. Bevor die

Daten jedoch verglichen und weiter analysiert wurden, wurde der Datensatz von Schüler\*innen mit fehlerhaften Eye-Tracking-Daten bereinigt.

### 4.3.3 Fragebögen zur Erhebung der Verarbeitung aufgenommener Informationen



Wenn Schüler\*innen ein Modellexperiment in der Realität oder innerhalb eines Videos betrachten, ist es möglich, dass sie die präsentierten visuellen Informationen zwar mit den Augen fokussieren, jedoch trotzdem nicht beachten oder die Informationen direkt überschreiben, sodass sie zerfallen und vom Kurzzeitgedächtnis nicht ins Arbeitsgedächtnis gelangen können. Zur Legitimation der mithilfe der Eye-Tracking Methode erhobenen Blickdaten ist es wichtig, dass die visuellen Informationen, die von den Schüler\*innen im Video objektiv betrachtet wurden, auch aufgenommen und verarbeitet werden können. Um konkret zu überprüfen, welche Elemente von den Schüler\*innen während des Betrachtens des Videos wirklich aufgenommen und verarbeitet wurden, wurden auf der Basis des Videos ein experimentelles Versuchsprotokoll und ein Fragebogen, der aus drei Teilfragebögen bestand, entwickelt.

#### *Pilotierung*

Ein Fragebogen zur Messung der Verarbeitung des Modellexperiments im offenen Antwortformat wurde im Zuge einer Abschlussarbeit des Studiengangs Master of Education am Lehrstuhl für Didaktik der Chemie der Ruhr-Universität Bochum von Maljusch (2018) pilotiert. Nach den Ergebnissen der Pilotstudie wurde dieser grundlegend überarbeitet und ein experimentelles Versuchsprotokoll und ein Fragebogen mit drei Teilfragebögen zu den drei Sequenzen des Videos mit geschlossenem Antwortformat entwickelt. Das experimentelle Versuchsprotokoll und die finalen Fragebögen werden in den nächsten Abschnitten ausführlich beschrieben.

#### *4.3.3.1 Erhebungsinstrumente „Versuchsprotokoll\_Verarbeitung“ und „Fragebogen\_Verarbeitung“*

##### *Versuchsprotokoll\_Verarbeitung*

Bei dem *Versuchsprotokoll\_Verarbeitung* handelt es sich um ein experimentelles Versuchsprotokoll, das semi-strukturiert war. Es standen einige Zeilen für die schriftliche Schilderung der Beobachtungen sowie der Auswertung des Modellexperiments zur Verfügung.

Das Versuchsprotokoll wurde qualitativ anhand eines Erwartungshorizontes mit Bewertungsschlüssel ausgewertet. Die erwarteten Beschreibungen, die den Explosionsprozess und die Elemente der Explosion kennzeichnen, sind im Folgenden aufgeführt. Dabei wurden im Zusammenhang mit den Beobachtungen folgende Aussagen definiert:

- O<sub>1</sub>: die Substanz wird in einen Glastiegel gefüllt und unter das Plexiglasrohr gestellt (Substanz im Experiment),
- O<sub>2</sub>: der Strom wird eingeschaltet und die Glühwendel beginnt zu glühen (Elektrizität im Experiment),
- O<sub>3</sub>: die Luftpumpe wird hochgezogen und die Luft durch Herunterdrücken in den Tiegel geblasen, so dass die pulverförmige und brennbare Substanz im Plexiglasrohr aufgewirbelt wird (Experiment während der Aufwirbelung),
- O<sub>4</sub>: es entsteht ein Staub-Luft-Gemisch, das durch die Energie der Glühwendel gezündet wird (Experiment nach der Aufwirbelung).

Die maximale Punktzahl, die bei vollständiger Beschreibung der Beobachtungen erhalten werden konnte, waren 12 Punkte.

Als Interpretationen, bei deren Vollständigkeit maximal 12 Punkte erreicht werden konnten, wurden folgende Aussagen definiert:

- I<sub>1</sub> & I<sub>5</sub>: Eigenschaften der Substanz, die für das Auftreten einer Explosion relevant sind (Grad der Zerteilung des Stoffes & Brennbarkeit des Stoffes),
- I<sub>2</sub>: Funktion der Luftpumpe zum Aufwirbeln des Stoffes,
- I<sub>3</sub>: Reaktion der Substanz mit dem Sauerstoff,
- I<sub>4</sub>: Glühwendel für die Entzündung,
- I<sub>6</sub>: Druckentstehung durch den Verbrennungsprozess,
- I<sub>7</sub>: Verbrennungsprozess.

### ***Fragebogen\_Verarbeitung***

Da in der Pilotierung beim Einsatz von Aufgaben mit einem offenen Antwortformat aufgefallen war, dass den Schüler\*innen nicht bewusst war, wie präzise, umfangreich und detailliert die Antwort auf die einzelnen Fragen ausfallen sollten, wurden für die vorliegende Studie Aufgaben mit geschlossenem Antwortformat konstruiert. Bei diesen konnte zwischen mehreren Antwortmöglichkeiten ausgewählt werden, bei denen jedoch nur jeweils eine Antwortmöglichkeit korrekt war (Single Choice-Aufgaben).

Da das Video aus drei Sequenzen besteht, wurden in Anlehnung an diese Sequenzen insgesamt drei Teilfragebögen erstellt. Diese Fragebögen wurden von den Schüler\*innen nacheinander und getrennt voneinander bearbeitet, um

Antwortänderungen durch Rückbezüge zwischen den Fragen vermeiden zu können. Gleichzeitig konnte durch die drei Teilfragebögen die Aufmerksamkeit der Schüler\*innen auf alle drei Video-Sequenzen gelegt werden und allen drei Sequenzen eine Relevanz zugeordnet werden.

Im Folgenden werden die drei Teilfragebögen kurz erläutert (vgl. Anhang 12.8). Zur ersten Video-Sequenz wurde eine Frage konstruiert, die nach den Elementen, die im Versuchsaufbau dargestellt wurden, fragt. Die Fragen zur zweiten Sequenz fokussieren die Beobachtungen, die am Deckel bzw. in dessen unmittelbarer Nähe gemacht wurden. Der Fokus der Datenerhebung und anschließenden Analyse liegt jedoch primär auf der dritten Sequenz, dem Modellexperiment mit der Substanz. Dies liegt daran, dass dieser Fragebogen das Ziel der Legitimation der Daten zur Informationsaufnahme, die mittels Eye-Tracking aufgenommen wurden, verfolgt. Daher wird im Folgenden dieser Teilfragebogen zur dritten Sequenz detaillierter vorgestellt als die anderen beiden Teilfragebögen. Dabei sollte dieser Teilfragebogen (Sequenz 3) dazu dienen, Informationen zu den Beobachtungen und dem Verständnis, welches durch die Interpretationen der Beobachtungen angegeben wird, in Bezug auf das gesamte Modellexperiment mit allen Elementen zu erhalten. Daher wurde dieser Teilfragebogen mithilfe der Literatur zum Prozess einer Staubexplosion sowie der Beschreibung des Modellexperiments zur Staubexplosion deduktiv konzipiert. Die Testaufgaben dieses Teilfragebogens basieren auf den fünf Bedingungen für eine Staubexplosion: Brennstoff mit hohem Zerteilungsgrad, Zündquelle, Oxidationsmittel (Luft, Sauerstoff), Verteilung bzw. Aufwirbelung des Staubes und eine geschlossene Umgebung (siehe Abschnitt 2.2.3). Ausgehend von diesen Bedingungen sind die konkreten Beobachtungs- und Interpretationsansätze entwickelt und Items konstruiert worden. Eine Übersicht ist in Tabelle 6 dargestellt.

Zur Minimierung der Ratewahrscheinlichkeit wurden sowohl die falschen Antworten (Distraktoren) als auch der richtigen Antworten (Attraktoren) besonders sorgfältig konstruiert. So sollte ein guter Distraktor nicht trivial auszuschließen sein, sondern für einen Unwissenden als plausibel oder richtig erscheinen. Auch die einzelnen Attraktoren sollten nicht zu leicht oder zu schwierig sein. Zusätzlich wurden bei der Gestaltung einzelner Items und Antwortmöglichkeiten sprachliche Hinweise auf die richtige Antwort (Cues) vermieden. Um die Items mit vorgegebenen Antwortmöglichkeiten inhaltlich und sprachlich korrekt sowie vom Anforderungsniveau her für die Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe geeignet zu konstruieren, wurden darüber hinaus unnötige Fremdwörter oder Fachbegriffe sowie doppelte Verneinungen, mehrdeutige Begriffe und komplizierte Aussagen vermieden (vgl. Neuhaus & Braun, 2007; Riese & Reinhold, 2014, S. 261). Um zusätzlich

regelbasiertes Lernen zu vermeiden wurde auf eine logische Anordnung der möglichen Antworten geachtet.

Tabelle 6: Beobachtungs- und Interpretationsansätze basierend auf den Bedingungen für eine Staubexplosion.

	Beobachtungen	Interpretationen	Konzept	Items
<b>Voraussetzungen für eine Explosion</b>	Aussehen des Plexiglasrohres	Funktion des Plexiglasrohres	Geschlossener Behälter	3a & 3g
	Staub aufgewirbelt/ Verteilung des Staubes in dem gesamten Rohr vor Entzündung	Durchmischung mit Luft/Sauerstoff	Staubverteilung/ Aufwirbelung & Sauerstoff	3c & 3h
	Entzündung des Stoffes	Begründung, warum sich der Stoff gerade zu diesem Zeitpunkt entzündet	Zündquelle	3d
	Stoff fein zerteilt	Stoff fein zerteilt & brennbar	Zerteilungsgrad (ermöglicht erst die Staubverteilung)	3b & 3j
<b>Auswirkungen einer Explosion</b>	Stoff brennt		Brennstoff	3h
	Ausbreitung der Flamme	Voraussetzungen für eine Explosion: Warum entsteht die Stichflamme? Denn ein brennbares Material mit hohem Fragmentierungsgrad und Sauerstoff ist zusammen.	Explosionspentagon & Auswirkung/Folge der Reaktion	3e
	Deckel öffnet sich	Begründung, warum sich der Deckel öffnet	Auswirkung des geschlossenen Behälters	3f & 3i

Zu diesen Beobachtungs- und Interpretationsansätzen sowie den daraus konstruierten Items wurden Interviews mit Studierenden und Wissenschaftler\*innen aus der Fachdidaktik und anderen Fachbereichen durchgeführt, um sicherzustellen, dass die im Fragebogen berücksichtigten Elemente das Beobachtbare und Interpretabare in seiner Gänze widerspiegeln. Gleichzeitig wurden die Fragebögen von

Studierenden und Wissenschaftler\*innen aus der Fachdidaktik und anderen Fachbereichen bearbeitet und diskutiert, um Verständnisschwierigkeiten identifizieren zu können.

Dem gesamten Fragebogen, welcher die drei Teilfragebögen enthält, wurde eine Einleitung und Instruktionsanweisung vorangestellt, die Informationen über die Ziele, Hinweise zur Durchführung der Untersuchung und zur Anonymität enthält. Auch bei den Teilfragebögen wurden die zuvor eingeführten anonymisierten Schüler\*innen-Identifikationsnummern verwendet, sodass die Zuordnung auch dieser Teilfragebögen zu den Schüler\*innen ermöglicht werden konnte. Die ausführlichen Fragebögen sind in Anhang 12.8 dargestellt.

Die Items wurden anhand eines Erwartungshorizontes mitsamt Bewertungsschlüssel für die Aufgaben ausgewertet. Da sich die vorgegebenen Antworten zu den einzelnen Items nur gering voneinander unterschieden, gab es nur eine richtig/falsch-Codierung jeweils einer gesamten Aufgabe und keine Teilpunkte für teilweise korrekte Antworten. Wird die korrekte Antwort angekreuzt, wird es mit einem Punkt bewertet, eine fehlerhafte oder fehlende Antwortauswahl wird mit null Punkten bewertet. Insgesamt konnte ein Maximum an Punkten vergeben werden (vgl. Tabelle 7).

### ***Gütekriterien des Fragebogens bestehend aus den drei Teilfragebögen***

Für die drei Teilfragebögen wurden die Gütekriterien Validität, Reliabilität und Objektivität geprüft. Die Teilfragebögen sollten das Verständnis der Inhalte messen, die den Schüler\*innen über das Video zu den einzelnen Sequenzen des Modellexperiments zur Staubexplosion präsentiert wurden. Die Teilfragebögen wurden ausgehend von den theoretischen Grundlagen einer Staubexplosion konstruiert und auf das im Video präsentierte Modellexperiment angepasst. Darüber hinaus wurden sie ausgehend von der eigenständigen Bearbeitung der Teilfragebögen mit Studierenden und Wissenschaftler\*innen aus der Fachdidaktik und anderen Fachbereichen diskutiert. Daher können die Fragebögen als valide angesehen werden (Inhaltsvalidität). Zudem ist das Instrument reliabel, da die Ergebnisse reproduzierbar sind (vgl. Bortz & Döring, 2006). Um das nachzuweisen, wurde die Retest-Reliabilität bestimmt. Dazu wurde der gleiche Test zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten mit zwei Wochen zeitlichem Abstand an derselben Stichprobe erhoben. Die Stichprobe für die Retest-Reliabilität bestand aus Studierenden der Chemie, Physik und des Maschinenbaus und war unabhängig von der finalen Stichprobe ( $N = 6$ ). Die Ergebnisse des Tests zu den beiden Testzeitpunkten wurden miteinander korreliert (vgl. Bortz & Döring, 2006, S. 196 f.). Das Ergebnis der Korrelationsanalyse zeigt eine hohe Retest-Reliabilität mit einer Korrelation von .78 an. Die

Durchführungsobjektivität konnte durch eine Durchführungsanleitung gewährleistet werden, die für vergleichbare Testbedingungen bei allen Datenerhebungen sorgte. Die Bewertung der Aufgaben erfolgte anhand einer Musterlösung mit Punkteangaben, was eine gute Auswertungsobjektivität ermöglicht.

#### 4.3.3.2 Datenaufbereitung und Datenauswertung der Fragebögen

Die innerhalb des Fragebogens von einer\*m Schüler\*in erhaltenen Punkte wurden mittels SPSS einer weiteren Analyse unterzogen. Für diese weitere Analyse wurden die drei thematischen und videobasierten Bereiche (1) beschrifteter Versuchsaufbau, (2) Modellexperiment ohne Substanz und (3) Modellexperiment mit Substanz genutzt. Die maximale Punktzahl für die einzelnen Themenbereiche ist in Tabelle 7 dargestellt.

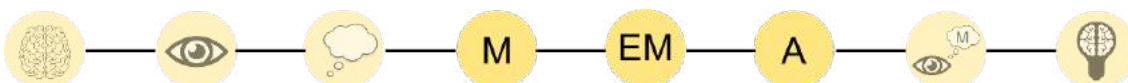
Tabelle 7: Maximale Punktzahlen nach Themenbereichen sortiert.

Themenbereiche	Maximale Punktzahl
1. Versuchsaufbau	18
2. Modellexperiment ohne Substanz	2
<b>3. Modellexperiment mit Substanz</b>	<b>10</b>
– Beobachtung	5
– Interpretation	5

Um innerhalb der Daten zwischen den Beobachtungen und dem Verständnis des Modellexperiments mit Substanz (3) konkret differenzieren zu können, wurde der dritte Teilfragebogen für die Auswertung in zwei Bereiche aufgeteilt, welche verschiedene Items beinhalten: Items, welche sich auf die Beobachtungen beziehen, und Items, welche sich auf die Interpretationen des Modellexperiments fokussieren.

Zur Beantwortung der Forschungsfragen 2 und 6 wurden zunächst deskriptive statistische Methoden in SPSS wie Median und Standardabweichung für die Probandengruppe, welche das Modellexperiment als Video gesehen hat, eingesetzt. Detailliertere Informationen zu den eingesetzten Tests zur Datenauswertung sind in Abschnitt 4.5 genauer erläutert.

#### 4.3.4 Lautes Denken zur Erhebung des Denkens in Analogien



##### 4.3.4.1 Allgemeine Beschreibung der Methode

Die Methode *Lautes Denken* wird „meist bei kognitiven Aufgaben und beim Problemlösen“ eingesetzt und dient prinzipiell zur Erfassung aller bewussten kognitiven

Prozesse des Kurzzeitgedächtnisses, die während der Bearbeitung einer kognitiven Aufgabe ablaufen (Bortz & Döring, 2006, S. 315; vgl. Buber, 2007; Sandmann, 2014, S. 179). Dabei müssen die Schüler\*innen ihre ablaufenden kognitiven Prozesse laut verbalisieren. Um zwischen diesen verbalisierten Informationen und den kognitiven Prozessen einen Zusammenhang herstellen zu können, wird vorausgesetzt, dass die verbalisierten Informationen als Repräsentationen der kognitiven Prozesse gesehen werden können (vgl. Ericsson & Simon, 1993).

### **Vor- und Nachteile der Methode**

Nur wenige Methoden existieren, die – wie die Methode *Lautes Denken* – Aufschluss über die während einer Handlung ablaufenden, bewussten kognitiven Prozesse geben (vgl. Sandmann, 2014; Konrad, 2010). Unter den Methoden ermöglicht insbesondere die Methode *Lautes Denken* diese kognitiven Prozesse ganz ursprünglich und unbeeinflusst zu erheben. Dies basiert auf dem Prinzip der Methode, bei dem während der Durchführung einer Handlung und der Verbalisierung der Gedanken keine Unterbrechungen durch mögliche Interviewer\*innen vorgesehen sind. Somit können Verzerrungen und Selektionseffekte vermieden werden (vgl. Scheibe, Trittel, Klug & Schmitz, 2014). Jedoch führt diese fehlende Lenkung durch Interviewer\*innen gleichzeitig dazu, dass die Laut Denk-Protokolle – wie Denkprozesse an sich auch – nicht zwingend logisch und gut strukturiert sind. Vielmehr spiegeln sie Ausschnitte von individuellen Denkprozessen wieder (vgl. Sandmann, 2014). Trotzdem sind sie häufig gut nachvollziehbar, sodass detaillierte Daten über die während einer Aufgabenbearbeitung stattfindenden Denkprozesse gewonnen werden und individuelle Denkprozesse differenziert beschrieben werden können (vgl. ebd.). Dabei ermöglicht die zeitliche Abhängigkeit der Aufgabenbearbeitung, die prozesshaften und dynamischen Aspekte der kognitiven Prozesse, d.h. die Abfolge von aufeinanderfolgenden Denkschritten, sichtbar zu machen (vgl. Funke und Sperling, 2006, S. 26; Konrad, 2010).

Neben diesen Besonderheiten weist die Methode auch spezifische Einschränkungen auf. Häufig wird als Nachteil der Methode eine mögliche Unvollständigkeit der Laut-Denk-Protokolle diskutiert (vgl. Konrad, 2010). Die Argumentation basiert auf zwei Faktoren: zum einen laufen einige kognitive Teilprozesse unbewusst (routiniert) ab. Das hat zur Folge, dass sie nicht verbalisierbar sind (vgl. Sandmann, 2014). Zum anderen kann die Komplexität der kognitiven Prozesse und das gleichzeitige Verbalisieren zu einer erhöhten Belastung des Arbeitsgedächtnisses (cognitive load) führen. Dies kann darin resultieren, dass bei komplexen Denkschritten von den Schüler\*innen häufiger Sprechpausen eingelegt werden und die Untersuchungsleiter\*innen keinen Zugang zu diesen Schritten bekommen. Gleichzeitig kann

auch die kognitive Leistung verändert werden, wodurch der Lern- und Bearbeitungserfolg sinken kann (vgl. Sandmann, 2014; Konrad, 2010). Um diese kognitive Belastung zu verringern und den Schüler\*innen die Bearbeitung der Aufgaben im Sinne der Forschungsfrage zu erleichtern, ist es daher wichtig, das richtige Maß zwischen Strukturiertheit und Offenheit der Aufgaben zu wählen. Dieses Maß muss je nach Forschungsfrage definiert werden. Je offener die Aufgabe formuliert ist, umso schwieriger ist es, genau die Antworten zu erhalten, die zur Beantwortung einer präzisen Forschungsfrage notwendig sind. Je stärker strukturiert, umso leitender ist die Aufgabe und das Ausmaß der Streuung möglicher Gedanken wird eingeengt. Obwohl das Problem einer möglichen Unvollständigkeit nie ganz greifbar sein wird, kann mit hoher Sicherheit aufgrund der zeitlichen Simultanität gesagt werden, dass Introspektion zu detaillierteren und umfassenderen Laut-Denk-Protokollen führt, als die nachträgliche Artikulation der Gedanken während der Retrospektion (vgl. Sandmann, 2014). Darüber hinaus ist offen, inwieweit das Verbalsierungsvermögen der Lernenden und die Artikulationsfähigkeit einen Einfluss auf die Laut-Denk-Protokolle hat (vgl. Konrad, 2010; Sandmann, 2014). Dabei sind Schüler\*innen der Jahrgangsstufen sieben bis neun schon problemlos in der Lage, laut zu denken (vgl. Sandmann, 2014; Mackensen-Friedrichs, 2004).

Als weitere Ursachen für negative Einflüsse auf die Aufgabenbearbeitung und damit die Laut-Denk-Protokolle können u.a. die unnatürliche Kommunikationssituation, die Lernsituation oder die soziale Erwünschtheit gesehen werden. Ein weiterer methodischer Kritikpunkt, der besonders bei der Erhebung quantitativer Daten genannt wird, ist die eingeschränkte Validität. Aufgrund des methodischen Prinzips und der damit einhergehenden Individualität und Offenheit der entstehenden Laut-Denk-Protokolle können diese nicht vollständig kontrollierbar und nur bedingt reproduzierbar sein (vgl. Konrad, 2010). Dies kann in dem Kontext, in dem die Häufigkeit eines Phänomens oder deren Verteilung gemessen und quantifiziert werden soll sowie Hypothesen geprüft werden sollen, negative Auswirkungen haben. Sollen tiefere Einblicke in komplexe Zusammenhänge gewonnen werden, werden in der qualitativen Forschung nicht-standardisierte Daten erhoben. Dabei führen gerade die Individualität und Offenheit der Laut-Denk-Protokolle zu einem positiven Effekt auf die Datenqualität. Jedoch muss der Schwierigkeit, die Reliabilität und Validität zu gewährleisten, auch hier begegnet werden. Um kontrollierte und reproduzierbare Daten zu erhalten, ist daher die Standardisierung der Datensammlung und -analyse in der Studie notwendig (vgl. Konrad, 2010).

#### 4.3.4.2 Umsetzung der Laut Denk Methodik zur Erhebung der Daten zum Denken in Analogien in der vorliegenden Studie

Um die Nachteile zu minimieren und gleichzeitig die Vorzüge zur Erhebung von Denkprozessen zu optimieren, wurden für die Datenerhebung innerhalb eines eintägigen Lehr-Lern-Arrangements einige inhaltliche und organisatorische Bedingungen für den Einsatz der Methode *Lautes Denken* geschaffen, die in Abbildung 22 aufgeführt sind. Sie sollen in der zeitlichen Abfolge ausgehend von der Vorbereitung der Datenerhebung über die Datenerhebung zur Sicherung und Analyse der Daten gesehen werden. Vorab wurden, um die Laut-Denk-Einheit nicht zu stören, die für die Datenauswertung wichtigen Kontrollvariablen (siehe Abschnitt 4.3.5) erhoben. Anschließend wurde ein zielgruppenorientiertes Training zur Methode *Lautes Denken* durchgeführt. Dies wird in der Literatur empfohlen, um eine positive Einstellung zum Umgang mit der Methode *Lautes Denken* zu erhalten (vgl. Konrad, 2010; Sandmann, 2014). Es bestand aus einer Instruktion mit einfachen und alltagsnahen AufwärmAufgaben (kurze Multiplikationsaufgabe und Schätzaufgabe) (vgl. Konrad, 2010). Die Materialien für dieses zielgruppenorientierte Training sind in Anhang 12.10 dargestellt.

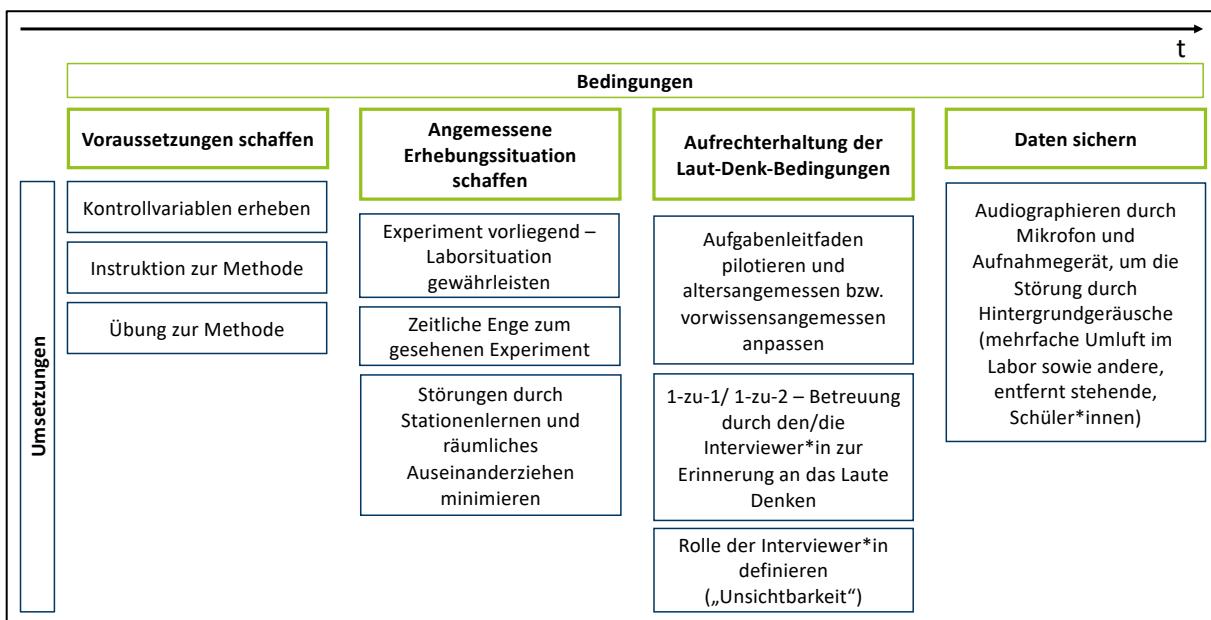


Abbildung 22: Notwendige Schritte beim Arbeiten mit der Methode „Lautes Denken“ und deren Umsetzung innerhalb der vorliegenden Studie.

Darüber hinaus war es wichtig, die notwendigen organisatorischen Rahmenbedingungen, angepasst an ein eintägiges Lehr-Lern-Arrangement, zu schaffen, da es sich um kein klassisches Laborexperiment mit strenger Variablenisolation handelt – in dem die Methode sonst zum Einsatz kommt. Um eine möglichst natürliche und trotzdem standardisierte Situation zu gewährleisten, wurden folgende Rahmenbedingungen konkret umgesetzt:

- Schaffung einer natürlichen Experimentierlabor-/ Chemieseiterlabor-Lernsituation durch örtliche Verknüpfung der Experimentierphase und Aufgabenbearbeitung in den Laborräumen,
- Reduktion der Schüler\*innen-Anzahl durch Organisation als Stationenlernen, um die notwendige Ruhe und ein angemessenes Betreuungsverhältnis zu gewährleisten sowie die Audiographie der Laut-Denk-Protokolle zu ermöglichen,
- Nutzung angrenzender Laborräume für die Station, bei der die Daten erhoben wurden, um die Vorwegnahme der Lösung für die Schüler\*innen an den anderen Stationen zu verhindern und gleichzeitig Ruhe zu gewährleisten,
- Aufrechterhaltung der Laut-Denk-Bedingung durch 1-zu-1-/1-zu-2-Betreuung mit geschulten Betreuern (Aufgabe der Betreuer\*innen: Erinnerung der Schüler\*innen an die Aufgabenstellung und das Aussprechen ihrer Gedanken).

Um die Erhebung der Denkschritte in der Studie beim Denken in Analogien zu gewährleisten, wurden die Aufgaben so gebildet, dass diese nach Aktionen fragen und daher keine Interpretationen notwendig machen. Dies führt dazu, dass sie die Inhalte des Arbeitsgedächtnisses abfragen und somit einfacher verbalisierbar sind (vgl. Konrad, 2010). Im Anschluss an die Erhebungssituation während des Lehr-Lern-Arrangements wurden die Laut-Denk-Protokolle für die Analyse transkribiert und kategoriengleitet analysiert.

### **Pilotierung**

Die Methode, das Erhebungsinstrument *Aufgabenleitfaden\_Analogiedenken* und die weiteren Erhebungsinstrumente (siehe Abschnitt 4.3.5) wurden im Jahr 2017 an vier Schulklassen der siebten Jahrgangsstufe pilotiert. Die Pilotierung war durch die Rückmeldung der Schüler\*innen vor allem dahingehend sehr hilfreich, um die Komplexität der Aufgaben anzupassen und missverständliche Formulierungen sowie unklare Instruktionen und unerwünschte Verständnisprobleme zu identifizieren und diese durch Anpassung des Aufgabenleitfadens vor der Hauptstudie zu beheben. Das finale Instrument zur Erhebung des Denkens in Analogien beim Umgang mit Modellexperimenten wird im Folgenden detailliert vorgestellt.

### **Erhebungsinstrument „Aufgabenleitfaden\_Analogiedenken“**

Die Abfolge der Denkschritte beim Denken in Analogien wurde mithilfe eines Aufgabenleitfadens erhoben. Bei den Aufgaben stand der Vergleich von Modellexperiment und Original im Mittelpunkt. Nachdem den Schüler\*innen das Modellexperiment mit der LC-Hartmann Apparatur (siehe Abschnitt 2.2.3 – *Modellexperiment in der LC-Hartmann Apparatur*) dargeboten wurde, wurde ihnen in Textform das erste Original – die Mehlstaubexplosion in der Bremer Rolandmühle (Original 1) –

präsentiert. Dann folgte eine kurze Anweisung, kontinuierlich die Gedanken bei der Bearbeitung der Aufgaben zu äußern. Daran anschließend waren die fünf Aufgaben aufgelistet (siehe Abbildung 23).

Spreche Deine **Schüler-ID** auf das Tonband.  
**DENKE nun LAUT!** Lese dazu den folgenden Text auch laut vor.

**Unfall:**  
„In einer Getreidemühle der Stadt Bremen hat sich im Jahre 1979 eine schwere Explosion ereignet, welche große Teile des Gebäudes vollständig zerstörte. In dieser Mühle wurden unter anderem Weizenkörner zu Weizengrund verarbeitet, die sich auf dem Boden des Gebäudes ablagerten. Als Grund für den Unfall konnte einige Zeit später ein Kabelbrand identifiziert werden.“

Im Folgenden findest Du einige Aufgaben.  
Bearbeite die Aufgaben bitte **in der angegebenen Reihenfolge**.  
**DENKE dabei weiterhin LAUT!**

1) Vergleiche das Experiment mit dem Unfall, indem du Ähnlichkeiten und Unterschiede findest. **Erkläre**, warum es passiert. Antwort so vollständig wie möglich.

2) Beschreibe noch einmal genau, wie es zur Explosion in der Mühle gekommen ist. Nutze die von dir gefundenen Ähnlichkeiten und Unterschiede.

3) Es gibt noch weitere Unglücke, bei denen es zu einer Explosion gekommen ist. Daher wird im folgenden Text ein weiterer Unfall beschrieben. Lese ihn dir bitte sorgfältig durch.

„Die Laptops eines großen Laptopherstellers werden aus einem Block Aluminium gefräst, dabei kommt Metall-Staub in die Luft. In einem chinesischen Werk, in dem diese Laptops produziert werden, kam es dadurch zu einer Explosion.“

a) Beschreibe detailliert, wie es bei diesem Unfall zu einer Explosion gekommen sein kann. Nutze dazu den Vergleich, den du beim vorherigen Unfall gemacht hast.

4) Nenne abschließend bitte noch einmal, welche Bedingungen ganz allgemein gegeben sein müssen, damit eine Explosion stattfinden kann.

5) Wie wirken diese Bedingungen zusammen?

Mapping

Ergebnis Mapping

Anwendung

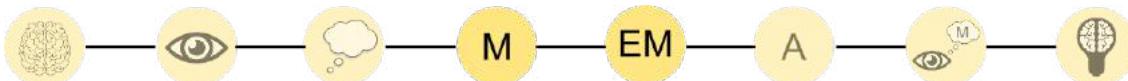
Post-Test  
Explosion

Abbildung 23: Aufgabenleitfaden zur Bearbeitung mittels der Methode „Lautes Denken“ und deren Zuordnung zu den verschiedenen thematischen Abschnitten.

Die ersten beiden Aufgaben beziehen sich auf den Vergleich zwischen den Bereichen Original 1 und dem Modellexperiment (*Mapping*) sowie das Ergebnis des *Mapping*-Prozesses (*Ergebnis Mapping*). Dabei fokussiert sich Aufgabe 1 lediglich auf das reine Identifizieren der ähnlichen Strukturelemente (Ähnlichkeiten) und Unterschiede zwischen diesen beiden Bereichen, dem Modellexperiment sowie dem Original 1. Aufgabe 2 erfordert eine Anwendung der gefundenen Ähnlichkeiten und Unterschiede zur detaillierten Erklärung des originalen Unfalls, der Mehlstaubexplosion in der Bremer Rolandmühle. In Aufgabe 3 wird ein aktuelleres Original, eine Aluminium-Staubexplosion in einer Werkstatt eines großen Laptopherstellers (Original 2), vorgestellt. Dieses zweite Original wird den Teilnehmer\*innen in

einem kurzen Text beschrieben. Anschließend sollen die Erkenntnisse des Vergleiches zwischen Original 1 und Modellexperiment, welcher innerhalb der ersten beiden Aufgaben stattgefunden hat, auf das aktuelle Original 2 angewendet werden (*Anwendung*). Abschließend sollen in Aufgabe 4 und 5 Bedingungen für eine Staubexplosion genannt werden. Die für die Analyse der vorgestellten Aufgaben relevanten Aspekte werden im Folgenden genauer erläutert.

### **Mapping und Ergebnis Mapping**



#### **Original 1 – Die Mehstaubexplosion in der Bremer Rolandmühle**

Das eingesetzte Modellexperiment in der LC-Hartmann Apparatur basiert auf dem Unfall in der Bremer Rolandmühle im Jahr 1979 (siehe Abschnitt 2.2.3 – *Die Mehstaubexplosion in der Bremer Rolandmühle*). Dieser Unfall wird den Schüler\*innen im Aufgabenleitfaden in einem kurzen Text präsentiert, der wie folgt lautet:

„In einer Getreidemühle der Stadt Bremen hat sich im Jahre 1979 eine schwere Explosion ereignet, welche große Teile des Gebäudes vollständig zerstörte. In dieser Mühle wurden unter anderem Weizenkörner zu Weizengehl verarbeitet, die sich auf dem Boden des Gebäudes ablagerten. Als Grund für den Unfall konnte einige Zeit später ein Kabelbrand identifiziert werden.“

Dieser Text beinhaltet einige inhaltliche Merkmale, die den Explosionsprozess kennzeichnen (unterstrichen). Um diese inhaltlichen Merkmale zu kategorisieren, können sie mit den Analogiearten, die aus der Literatur zum Denken in Analogien bekannt sind, in Beziehung gebracht werden (siehe Abschnitt 2.1.1): *Objekte, oberflächliche und strukturelle Attribute sowie Relationen*.

Aus dem Text können folgende Merkmale herausgearbeitet werden:

- **Objekte:** (Getreide)mühle, Explosion, Gebäude, Weizenkörner, Weizengehl, Boden, Kabelbrand,
- **Oberflächliche Attribute:** Ablagerung (Stoff).

Dabei wird deutlich, dass lediglich Objekte sowie oberflächliche Attribute in dem Text genutzt werden, um das Unglück zu beschreiben.

Darüber hinaus wird eine Staubexplosion durch weitere Merkmale gekennzeichnet, welche in dem dargestellten Text zur kompletten Charakterisierung des Staubexplosionsunfalls jedoch fehlen. Dabei handelt es sich um folgende Merkmale, die wie folgt zu den Analogiearten zugeordnet werden können:

- **Strukturelle Attribute:** Zerteilung und brennbar/explosiv (bzgl. der Stoffeigenschaften), Energie (bzgl. der Zündquelle), geschlossener Raum,
- **Relationen:** Verteilung/Aufwirbelung, Entzündung (Relation zwischen Stoff & Zündquelle), Explosion (Relation zwischen Stoff, Aufwirbelung mit Luft & Zündquelle).

Diese mögliche Aufzählung der einzelnen Merkmale aus dem Text sowie die Identifizierung der Merkmale in den Bereichen Original 1 und Modellexperiment wird von den Schüler\*innen in dem Aufgabenleitfaden nicht ausschließlich gefordert. Vielmehr sollen sie die beiden Bereiche miteinander vergleichen, die Ähnlichkeiten und Unterschiede herausfinden und miteinander in Beziehung setzen (*mappen*). Daher sollen im Folgenden die zuvor präsentierten Bereiche, das Original 1 und das Modellexperiment, miteinander exemplarisch verglichen werden.

### **Vergleich zwischen Original 1 und Modellexperiment**

Der Vergleich bezieht sich auf die zuvor vorgestellten gesamten Merkmale, von denen nicht alle in der Beschreibung von Original 1 (vgl. Abbildung 23) genannt wurden, und deren Kategorisierung. Diese Merkmale können im Zusammenhang mit dem Konzept der Staubexplosion gesehen werden, welches auf fünf Elementen basiert. Diese Elemente sind im Explosionspentagon (siehe Abbildung 5) dargestellt und werden im Folgenden zunächst genutzt, um den Vergleich basierend auf diesen fünf Elementen detailliert durchzuführen (Tabelle 8).

Tabelle 8: Detaillierter tabellarischer Vergleich von Original 1 (Unfall) und Modellexperiment mit Bezug zum Explosionskonzept (entspricht Tabelle 3).

Original 1 (Unfall in der Roland- mühle)	ent- spricht	Modellexperiment	Konzept
Kabelbrand	ent- spricht	Glühwendel	Zündquelle
Aufwirbelung z.B. durch Wind, Luftzug	ent- spricht	Aufwirbelung durch Luftzu- fuhr über eine Luftpumpe	Verteilung
Weizenmehl	ent- spricht	Toner	Brennbarer Stoff
Luftsauerstoff	ent- spricht	Luftsauerstoff	Oxidationsmittel (Luft, Sauerstoff)
Getreidemühle	ent- spricht	Plexiglasrohr mit Deckel	Räumliche Um- grenzung

Diese Merkmale können auch in Anlehnung an die theoretischen Grundlagen der Analogieforschung kategorisiert werden. Diese Kategorisierung ist nochmals in Abbildung 24 visuell dargestellt und wird im Folgenden erläutert.

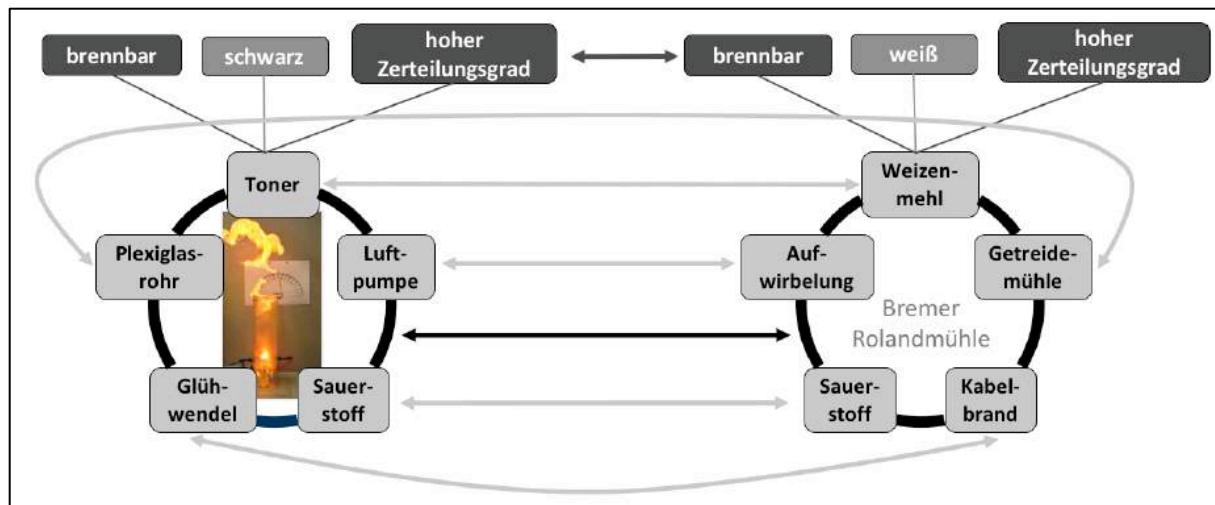
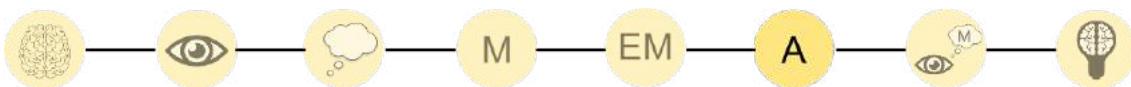


Abbildung 24: Darstellung der konkreten Merkmale eingeteilt nach Objekten (hellgrau), oberflächlichen (mittelgrau) und strukturellen Attributen (dunkelgrau) und Relationen (schwarz), welche die Analogie zwischen Modellexperiment und Original 1 bilden (entspricht Abbildung 7).

Als Objekte können zwischen den beiden Bereichen – Modellexperiment und Original 1 – die Stoffe (Toner, Weizenmehl) und die Zündquellen (Glühwendel, Kabelbrand) miteinander verglichen werden. Diese Objekten können verschiedene *Attribute* zugeordnet werden (brennbar, schwarz/ weiß, hoher Zerteilungsgrad). Diese Attribute können auch in diesem Beispiel in Anlehnung an die theoretischen Grundlagen der Analogieforschung prinzipiell in zwei Gruppen aufgeteilt werden: *oberflächliche und strukturelle Attribute*. Wie in der theoretischen Einführung erläutert, weisen die *oberflächlichen Attribute* keine Bedeutung für das Verständnis des zugrundeliegenden fachlichen Konzeptes auf; bei dem Beispiel u.a. die Farbe des Stoffes (vgl. Kircher, 1995). Jedoch weisen die beiden Bereiche keine Ähnlichkeiten in der Farbe auf, da die Farbe des Weizenmehls im Original 1 weiß ist, im Modellexperiment der eingesetzte Toner schwarz ist. Die *strukturellen Attribute* sind im Vergleich zu den *oberflächlichen Attributen* für das Verständnis des zugrundeliegenden fachlichen Konzeptes relevant (vgl. Forbus et al., 1994; Kircher, 1995). Zu ihnen können konzeptbezogene funktionelle Attribute wie die Brennbarkeit und der hohe Zerteilungsgrad des Stoffes in dem gewählten Beispiel gehören. Diese sind zueinander ähnlich. Treten verschiedene Objekte sowie Attribute in einem komplexeren Wechselverhältnis auf, wird dieses Wechselverhältnis als *Relation* bezeichnet. Für das Beispiel bedeutet es, dass u.a. das Zusammenkommen aller fünf der in Abbildung 24 markierten Objekte mit ihren relevanten Attributen zur Entstehung einer Explosion führt.

### Anwendung



Um zu untersuchen, wie die Informationen nach dem Mapping auf ein weiteres Anwendungsbeispiel übertragen werden können, wurde in Aufgabe 3 eine Staubexplosion gewählt, die nicht mit der Nahrungsmittelindustrie in Verbindung steht (siehe Abbildung 23). Als Anwendungsbeispiel wurde ein aktuelleres Original, eine Aluminium-Staubexplosion in einer Werkstatt eines Laptopherstellers, vorgestellt.

#### ***Original 2 – Die Aluminium-Staubexplosion bei einem Zulieferer eines großen Laptopherstellers***

Die Aluminium-Staubexplosion wurde in einer Pressemitteilung vom Handelsblatt (2012) wie folgt beschrieben: Ein großer Laptophersteller „bestätigte in dem Bericht erstmals auch, dass die zwei Explosionen in chinesischen Werken im vergangenen Jahr [2011], bei denen vier Menschen getötet und 77 verletzt wurden, auf die Arbeit mit Aluminium-Staub zurückgehen. Das Gehäuse einiger [...] -Geräte wie des [...] -Laptops wird aus einem Block Aluminium gefräst, dabei kommt Metall-Staub in die Luft, der unter Umständen explodieren kann“ (Handelsblatt, 2012).

Diese Pressemitteilung wurde leicht angepasst, indem auf irrelevante Informationen wie die Anzahl der Todesopfer sowie weitere markenbezogene Informationen verzichtet wurde. Daher wurde den Schüler\*innen das zweite Original wie folgt in einem kurzen Text beschrieben:

„Die Laptops eines großen Laptopherstellers werden aus einem Block Aluminium gefräst, dabei kommt Metall-Staub in die Luft. In einem chinesischen Werk, in dem diese Laptops produziert werden, kam es dadurch zu einer Explosion.“

Auch dieser Text beinhaltet einige inhaltliche Merkmale, die den Explosionsprozess kennzeichnen (unterstrichen). Jedoch unterscheiden diese sich teilweise von denen, welche in Original 1 gewählt wurden. Aus dem Text können folgende Merkmale herausgearbeitet werden:

- **Objekte:** Aluminium, Explosion, Werk (Gebäude), Metall,
- **Strukturelle Attribute:** Zerteilung (Metall-Staub)
- **Relation:** Verteilung/Aufwirbelung (Metall-Staub in die Luft).

Diese inhaltlichen Merkmale von Original 2 sollen in Aufgabe 3 mit den Erkenntnissen des Vergleiches zwischen Original 1 und Modellexperiment, welcher

innerhalb der ersten beiden Aufgaben stattgefunden hat, in Beziehung gebracht werden. Dabei können die Merkmale aus den Aufgaben 1 und 2 auf das Original 2 angewendet werden. Ein detaillierter tabellarischer Vergleich der drei Bereiche ist in Tabelle 9 dargestellt.

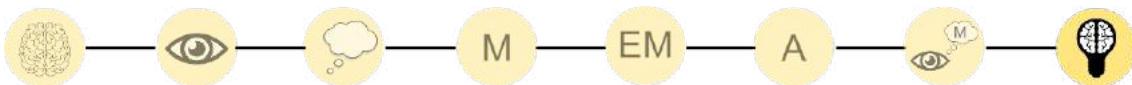
Bei genauerer Betrachtung des Textes und des Vergleiches mit dem Text zur Beschreibung des Original 1 fällt auf, dass nun keine Zündquelle genannt wurde. So mit muss als Leistung von den Schüler\*innen erbracht werden, dass sie in dem neuen Original u.a. das Vorliegen einer Zündquelle, welche Energie abgibt, identifizieren, sodass es zur Entzündung kommen kann. Zudem fehlen für die komplette Charakterisierung des Staubexplosionsunfalls die folgenden Elemente:

- **Objekte:** Boden, mögliche Zündquelle,
- **Oberflächliche Attribute:** Ablagerung (Stoff),
- **Strukturelle Attribute:** brennbar/explosiv (bzgl. der Stoffeigenschaften), Energie (bzgl. der Zündquelle), geschlossener Raum,
- **Relationen:** Entzündung (Stoff & Zündquelle), Explosion (Stoff, Aufwirbelung mit Luft & Zündquelle).

Tabelle 9: Detaillierter tabellarischer Vergleich von Anwendungsbeispiel (Aluminium-Staubexplosion) und Original 1 bzw. Modellexperiment mit Bezug zum Explosionskonzept.

Original 2 (Aluminium-Staubexplosion)		Original 1 (Unfall in der Roland- mühle)		Modellexperi- ment	Konzept
mechanische Erwärmung	ent-spricht	Kabelbrand	ent-spricht	Glühwendel	Zündquelle
Aufwirbelung durch das Fräsen	ent-spricht	Windaufwirbelung	ent-spricht	Aufwirbelung durch Luftzufuhr über eine Luftpumpe	Verteilung
Aluminiumstaub	ent-spricht	Weizenmehl	ent-spricht	Toner	Brennbarer Stoff
Luftsauerstoff	Ent-spricht	Luftsauerstoff	ent-spricht	Luftsauerstoff	Oxidationsmittel (Luft, Sauerstoff)
Fabrikgebäude	ent-spricht	Getreidemühle	ent-spricht	Plexiglasrohr mit Deckel	Räumliche Umgrenzung

### **Post-Test zur Explosion**



Um gleichzeitig zu untersuchen, ob durch die Durchführung des Modellexperiments und eine detaillierte Auseinandersetzung mit dem Konzept der Staubexplosion eine Wissenssteigerung stattgefunden hat, wurde ein Post-Test eingesetzt. Dort sollten die Schüler\*innen angeben, welche Bedingungen generell eine Explosion kennzeichnen (Abbildung 23, Aufgabe 4). Darüber hinaus sollten sie angeben, wie diese Bedingungen zusammen wirken (Abbildung 23, Aufgabe 5). Die Aufgaben wurden im Vergleich zum Pre-Test, in dem innerhalb eines schriftlichen Fragebogens zum Vorwissen der Teilnehmer\*innen nach den Bedingungen für eine Explosion (siehe Anhang 12.3) gefragt wurde, mündlich beantwortet und audiografiert.

#### **4.3.4.3 Datenaufbereitung und Datenauswertung „Lautes Denken“**

Im Auswertungsprozess dieser qualitativen Daten, die mit Hilfe der Methode *Lautes Denken* erhoben wurden, sind drei Schritte zu unterscheiden, die direkt an die Datenerhebung anknüpfen: Aufbereitung, Analyse und Systematisierung der Daten. Die Analyse der erhobenen Daten ist prinzipiell je nach Fragestellung, mit der die Daten betrachtet werden, und Detailgrad mit und ohne Transkription möglich. Der Aufwand der Transkription lohnt sich, wenn Lernprozesse im Detail analysiert und beschrieben werden sollen. Da die Analyse der Denkschritte in der vorliegenden Studie sehr detailliert erfolgen sollte, die Datengrundlage in den Laut-Denk-Protokollen dicht gepackt war und reichhaltige Informationen zu den einzelnen Denkschritten lieferte, wurden die verbalen Äußerungen vollständig und detailliert transkribiert (siehe Abschnitt 4.3.4.3 – *Transkription*). Danach konnten diese Transkripte mit unterschiedlichen qualitativen Analysemethoden (u.a. Hermeneutik, Inhaltsanalyse) untersucht werden. In der vorliegenden Studie wurde sich für die qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (2015) entschieden, um die Inhalte der individuellen Denkschritte systematisch und sequenzanalytisch analysieren zu können (siehe Abschnitt 4.3.4.3 – *Qualitative Inhaltsanalyse*).

#### **Transkription**

Da die Transkripte der verbalen Laut-Denk-Protokolle sequenzanalytisch ausgewertet werden, wird von Fuß und Karbach (2019, S. 61) ein komplexes Regelsystem als unerlässlich angesehen. Ein komplexes Regelsystem ermöglicht „durch den hohen Detaillierungsgrad eine kleinschrittige Rekonstruktion des prozesshaften“ Denkprozesses (ebd., S. 61). Zudem geht „mit einer höheren Detailtreue in der

Verschriftlichung ein größerer Erkenntnisgewinn [zu verschiedenen Aspekten] einher [...]“, dessen Relevanz häufig auch erst zu späteren Zeitpunkten deutlich wird (ebd., S. 59).

Die Grundlage der Transkription der verbalen Laut-Denk-Protokolle bildet ein an das inhaltlich-semantische Regelsystem nach Dresing und Pehl (2018, S. 16) angelehntes Regelsystem. Dieses wurde durch einige Module des modularartigen Transkriptionssystems ergänzt (vgl. Fuß & Karbach, 2019, S. 39 ff.). Zur Rekonstruktion der konkreten Abfolge der Denkschritte auf der Basis des Transkriptes sind auch „Pausen und Planungsäußerungen [...] für diese Art der Interpretation unter anderem von zentraler Bedeutung“ (ebd., S. 61). Dabei wurden die Sprechpausen in Sekunden (Angabe durch (x); x = Anzahl der Sekunden) genau mittranskribiert. Diese Sprechpausen werden während des lauten Denkens eine besondere Bedeutung zugeschrieben (vgl. Giesen, 1974). Es kann während des lauten Denkens beim Verbalisieren von komplexen kognitiven Prozessen zu einer erhöhten Belastung des Arbeitsgedächtnisses kommen, wobei eine interne, hohe Strukturierungsleistung erbracht werden muss. Diese führen von der denkenden Person wiederum intuitiv zu Sprechpausen (vgl. ebd., S. 27). Gleichzeitig finden jedoch weiterhin Denkschritte statt, die aufgrund des cognitive loads nicht mehr verbalisiert werden können und damit für die Untersuchungsleiter\*innen nicht zugänglich sind (vgl. Ericsson & Simon, 1984). Daher sind diese Informationen für die hier vorliegende Studie nicht zu vernachlässigen. Zudem wurden Lautäußerungen wie *ähm* und *mhm*, Wortabbrüche und Verschleifungen bzw. sehr schnelle Wortwiederholungen transkribiert. Wortabbrüche kommen u.a. vor, wenn sich der Sprechende selbst korrigiert (vgl. Fuß & Karbach, 2019, S. 49). Gleichzeitig können Ausdrücke, welche inhaltliche Aussagen relativieren können, sowie Planungsänderungen auf diese Weise identifiziert werden (vgl. ebd., S. 39 ff.). Dadurch wird sichergestellt, dass der anschließenden inhaltsanalytischen Auswertung der verbalen Daten keine Fehlininterpretation der Denksituation zugrunde liegt. Zudem wurde eine leichte Sprachglättung angewendet. Dabei wurde ein starker Dialekt korrigiert, umgangssprachliche und mundartliche Formulierungen sowie fehlerhafte Ausdrucksweisen und Satzbauten erhalten. Die Zeichensetzung wurde in Anlehnung an die grammatischen Zeichensetzung gewählt (vgl. ebd., S. 56). Gleichzeitig wurden interaktive Phänomene nur transkribiert, wenn sie Einfluss auf den individuellen Denkprozess hatten, da der Fokus der Auswertung auf der Inhaltsebene der individuellen und personenbezogenen Denkprozesse während des Denkens in Analogien liegt (vgl. ebd., S. 61).

### ***Qualitative Inhaltsanalyse***

Die qualitative Inhaltsanalyse ist in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung eine etablierte Methode, um Kommunikationsinhalte qualitativ zu untersuchen (vgl. Göhner & Krell, 2020). Diese Methode wurde in der vorliegenden Studie zur Auswertung der Laut-Denk-Protokolle genutzt. Dabei wurde im Speziellen die qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (2015) angewendet. Bei dieser Methode handelt es sich um ein systematisches kategorisierendes Analyseverfahren, mit dem der Inhalt eines kommunizierten Materials analysiert werden kann (vgl. Göhner & Krell, 2020; Fuß & Karbach, 2019; Mayring, 2015). Dabei wird die inhaltliche Bedeutsamkeit über eine Kategorie erfasst und beschrieben. Ziel ist es, Einzelfälle mit ihren jeweils spezifischen Bedeutungen zu erfassen und nicht, das kommunizierte Material von mehreren Personen zu vereinheitlichen. Dabei führt diese Beschreibung von Aussagen mittels Kategorien zwar zu einer querbildlichen Datenreduktion, ermöglichen aber gleichzeitig auch latente Sinnstrukturen zu erfassen (vgl. Mayring, 2015, S. 58). Diese latenten Sinnstrukturen können interpretativ erschlossen werden, wenn die kommunizierten Materialien jeweils in ihrer jeweiligen Gesamtstruktur als sinntragendes Ganzes betrachtet werden und nicht nur als manifeste Kommunikationsinhalte (vgl. Göhner & Krell, 2020; Gläser-Zikuda, 2017, S. 102; Mayring, 2015; Kracauer, 1952). Somit handelt es sich prinzipiell bei der qualitativen Inhaltsanalyse um eine qualitativ-interpretative Methode. Diese lässt aber gleichzeitig auch quantifizierende Analyseschritte zu (vgl. Gläser-Zikuda, 2017, S. 104). Daher können gleichzeitig qualitative und quantitative Forschungsfragen mit Hilfe dieses Auswertungsverfahrens bearbeitet werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden mit Hilfe der inhaltlich-strukturierenden Inhaltsanalyse konkret die prozesshaften Schritte während des Denkens in Analogien beim Umgang mit Modellexperimenten und die inhaltlichen Aspekte zu dem Prozess der Staubexplosion im Detail analysiert (inhaltliche Strukturierung). Zur systematischen Anwendung dieser Methode muss vor der Analyse die grundlegende Analyseeinheit (Kodiereinheit, Kontexteinheit und Auswertungseinheit) definiert werden, auf die sich die Inhaltsanalyse beziehen soll. In den vorliegenden Laut-Denk-Protokollen (Auswertungseinheit), die jeweils nacheinander ausgewertet wurden, wurden Textabschnitte kodiert, die mindestens ein einzelnes Wort umfassten (Kodiereinheit). Der größte Textabschnitt, der mit einer Kategorie kodiert werden konnte, entsprach den vollständigen Antworten zu den einzelnen Aufgaben (Kontexteinheit) (vgl. Gläser-Zikuda, 2017, S. 105). Die Kategorien, die zur Kodierung genutzt wurden, wurden in den Kategoriensystemen zusammengefasst, die im Folgenden vorgestellt werden.

### ***Kategoriensysteme für die deduktive qualitative Inhaltsanalyse zum Denken in Analogien mit Modellexperimenten***

Zur Analyse der prozessbezogenen Schritte beim Denken in Analogien wurde auf die Analogiedenk literatur zurückgegriffen. Dabei wurden fünf Kategoriensysteme deduktiv mit der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2015) neu konstruiert (vgl. Gentner, 1989; Kircher, 1995; Klein, Piacente-Cimini & Williams, 2007; Glynn, 2008) und induktiv mit Hilfe der Daten aus einer vorab durchgeföhrten Pilotierung erweitert. Sie sollten dazu dienen, die prozessbezogenen Schritte auch inhaltsunabhängig erfassen und darstellen zu können.

Konkret haben sich die folgenden Kategoriensysteme ergeben:

- Beschreibung des Originals (O),
- Beschreibung des Modellexperiments (M),
- richtungsabhängige abbildende Beschreibung M zu O,
- richtungsabhängige abbildende Beschreibung O zu M sowie
- richtungsunabhängige abbildende Beschreibung M ↔ O.

In den bisherigen Studien zu den prozessbezogenen Schritten beim Denken in Analogien konnten keine konkreten, weiterverwendbaren Einteilungen nach Analogiearten identifiziert werden. Dabei können mit den Analogiearten (Objekte, oberflächliche und strukturelle Attribute sowie Relationen) die beiden phänomenologisch wahrnehmbaren Bereiche, auf die sich das Denken in Analogien bezieht, eindeutig und inhaltsunabhängig charakterisiert werden (vgl. Gentner, 1989; Kirchner, 1995). Diese Analogiearten werden im Folgenden als Ebenen bezeichnet. Mit ihnen wurden die Kategoriensysteme weiter ausdifferenziert und jeweils folgendermaßen unterteilt: Ebene 1 (Objektebene) wurde vergeben, wenn einzelne Komponenten einer Kategorie ohne nähere Nennung von Eigenschaften, wie zum Beispiel die Substanz und die Materialien, die einen Bereich charakterisieren, genannt werden. Ebene 2 (oberflächliche Attributebene) und 3 (strukturelle Attributebene) wurden vergeben, wenn eine Komponente mit einem Attribut in Beziehung gesetzt wird. Die oberflächliche Attributebene ordnet den einzelnen Komponenten Attribute zu, die für den chemischen Prozess irrelevant sind. Dazu zählt beispielsweise eine nähere Beschreibung des Aussehens einer Komponente, wie die Farbe, die Form oder Ähnliches. Die strukturelle Attributebene hingegen besteht aus den relevanten Eigenschaften der Komponenten, die für das untersuchte Phänomen (hier die Staubexplosion) bedeutend sind. Ebene 4 (Relationen) wurde vergeben, wenn darüber hinaus Komponenten und/oder Attribute innerhalb eines Bereiches miteinander in Beziehung gebracht werden, z.B. durch

- (a) Verbindung zwischen verschiedenen Objekten (z.B. „Mehl hat sich bei einem Kabelbruch entzündet.“),
- (b) Verbindung zwischen Objekten mit Zuordnung von strukturellen Merkmalen (z.B. „Ein brennbarer Stoff, der in der Luft fein verteilt ist, also aufgewir-, ein Stoff, der gleichmäßig fein in der Luft, in der Luft verteilt ist.“).

Bei (a) werden die Objekte nicht gesondert kodiert, da ohne sie eine übergeordnete Relation nicht vorliegen würde. In (b) sind jedoch zusätzlich zu den Objekten, welche eine Relation kennzeichnen, weitere Attribute genannt, die die Objekte kennzeichnen. Da diese Attribute für das Auftreten einer Relation nicht relevant sind, werden sie auch innerhalb einer Relation noch einmal auf der Attributebene kodiert.

Alle Kategoriensysteme umfassen diese vier Ebenen, die nach steigendem Komplexitätsgrad der Inhalte und deren Zusammenhängen sortiert sind. In Tabelle 10 bis Tabelle 14 sind die Kategoriensysteme verkürzt dargestellt. Die vollständigen Kategoriensysteme inklusive der abgrenzenden Kodierregeln befinden sich in *Anhang 12.12 – Kategoriensysteme zum Denken in Analogien*. Zusätzlich zu den fünf Kategoriensystemen wurde das Kategoriensystem *Sonstiges* entwickelt. Es besteht aus den für einen Lernprozess relevanten Elementen wie Textwiederholungen, Rückfragen, Fehlvorstellungen und metakognitive Operationen. Mithilfe der Textwiederholungen konnte nachgewiesen werden, ob die Schüler\*innen während ihres Denkprozesses immer wieder in den zuvor präsentierten Text zurückgehen oder ihn nach einem einmaligen Lesen unbeachtet lassen.

### ***Beschreibung eines Bereiches***

In zwei Kategoriensystemen wird thematisch jeweils die Beschreibung eines Bereiches, der für das Denken in Analogien vorliegt, fokussiert. Dabei enthalten die Kategoriensysteme die Inhalte, die zur Beschreibung von phänomenologischen Bereichen für die Jahrgangsstufe angemessen sind. Der Aufbau der Kategoriensysteme entspricht dem oben beschriebenen allgemeinen Aufbau, der im Folgenden anhand der Kategoriensysteme *Beschreibung des Originals* und *Beschreibung des Modellexperiments* ausführlicher vorgestellt wird.

### ***Kategoriensystem „Beschreibung des Originals“***

Das Kategoriensystem zur Beschreibung des Originals (Tabelle 10) beinhaltet die Aussagen zu Merkmalen, die ausschließlich das Original beschreiben.

Tabelle 10: Kategoriensystem „Beschreibung des Originals“ (kursiv: Anmerkungen zu den Ankerbeispielen).

Ebene	Kategorienbeschreibung	Ankerbeispiele
1. Objekt-ebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eine <b>einzelne Komponente</b> oder ein Objekt (Gegenstand), welche/ welches das originale System kennzeichnet, wird als Substantiv genannt.</li> <li>▪ Es ist nicht in ein größeres korrespondierendes System eingebunden.</li> <li>▪ Lediglich eine Komponente wird in den Fokus gestellt.</li> </ul>	„Also die Weizenkörner und das Weizenmehl ist ja“; „kam es irgendwann zu einer Explosion“; „Also es in der Mühle zwar zu einer Explosion gekommen“; „Okay, ich glaube, dass es halt so ist, (.) dass (.) dieser Kabelbrand (.)“
2. Oberflächliche Attribut-ebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eine einzelne Komponente oder ein Objekt des originalen Systems wird durch eine explizite <b>Eigenschaftszuweisung</b> näher charakterisiert.</li> <li>▪ Diese Zuweisung soll auf oberflächlichen, d.h. für das Phänomen <b>irrelevante</b> Eigenschaften (Aussehen, wörtliche Kennzeichnung, irrelevante Stoffeigenschaften, ...) basieren.</li> <li>▪ Die Komponente und die Eigenschaft sollen in <b>direkter</b> Beziehung zueinander stehen.</li> </ul>	„die Kabel an waren“; „[...] da war nur noch so ein bisschen von dem Kabel da. Nur noch dieses. Also die Isolierung war ab. Nur noch (.) der Draht davon war da.“; „Weizenkörner lagen auf dem Boden“; „Das Weizenmehl ist weiß ( <i>selbst entwickeltes Beispiel</i> )“
3. Strukturelle Attributebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eine einzelne Komponente oder ein Objekt des originalen Systems wird durch eine explizite Eigenschaftszuweisung näher charakterisiert.</li> <li>▪ Diese Zuweisung soll auf strukturellen, d.h. für das Phänomen relevanten Eigenschaften (u.a. Brennbarkeit, große Oberfläche/feine Verteilung, Energie, ...) basieren.</li> <li>▪ Die Komponente und die Eigenschaft sollen in direkter Beziehung zueinander stehen.</li> </ul>	„Weizenkörner so leicht brennbar sind [...]“; „Dafür ist aber wichtig, dass das Pulver verteilt ist in der Luft.“; „Und das Weizenmehl ist dann wahrscheinlich explosiv.“; „Weizenmehl ist halt pulverig, also das ist halt, ähm, ja ist halt pulverig“; „kam in dem Fall von den Kabeln die (.) Wärme“
4. Relations-ebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eine Beziehung/ ein wechselseitiges Verhältnis zwischen mindestens zwei einzelnen Komponenten des originalen Systems wird genannt.</li> </ul>	„Das Pulver müsste sich sozusagen in der Luft verbreitet haben und ähm, ähm dann, und dann kam halt diese Hitze, die erforderlich ist für so eine Explosion von

	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ein sinnbezogener Zusammenhang zwischen diesen einzelnen Komponenten ist deutlich erkennbar.</li> </ul>	<p>dem äh Kabelbrand. Wahrscheinlich war es da nicht isoliert dann. Ähm ja. Und dann kam es halt zu der Explosion und dann ist halt alles explodiert.“; „beim Kabelbrand erhitzt sich das Kabel auch (2) und entzündet (.) den Mehstaub.“; „[...] zu der Explosion ist es gekommen, weil die Weizenkörner ähm durch den Wind mit aufgepustet wurden und dann mit dem Ka-, mit den Kabeln in Verbindung kam und dadurch ein Kabelbrand ausgelöst wurde.“</p>
--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### *Kategoriensystem „Beschreibung des Modellexperiments“*

Das Kategoriensystem zur Beschreibung des Modellexperiments (Tabelle 11) beinhaltet die Aussagen zu Merkmalen, die ausschließlich das Modellexperiment beschreiben, und ist analog zu dem vorherigen Kategoriensystem aufgebaut.

Tabelle 11: Kategoriensystem „Beschreibung des Modellexperiments“ (kursiv: Anmerkungen zu den Ankerbeispielen).

Ebene	Kategorienbeschreibung	Ankerbeispiele
1. Objektebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eine <b>einzelne Komponente</b> oder ein Objekt, welche/welches das Modellexperiment kennzeichnet, wird genannt.</li> <li>▪ Es ist nicht in ein größeres korrespondierendes System eingebunden.</li> <li>▪ Lediglich eine Komponente wird in den Fokus gestellt.</li> </ul>	<p>„[...], dass da halt dieses Pulver war und dieses heiße Draht, das glühende Draht und dann halt, [...]“</p>
2. Oberflächliche Attributebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eine einzelne Komponente oder ein Objekt des Modellexperiments wird durch eine explizite Eigenschaftszuweisung näher charakterisiert.</li> <li>▪ Diese Zuweisung soll auf oberflächlichen, d.h. für das Phänomen irrelevanten Eigenschaften (Aussehen,</li> </ul>	<p>„Das, was wir untersucht haben, dieses schwarze, trockene Pulverform.“ („trockene Pulverform“ auf der Strukturellen Attributebene einzuordnen); „auch die Plexiglaswand äh ja schwarz wurde.“</p>

	<p>wörtliche Kennzeichnung, ...) basieren.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Die Komponente und die Eigenschaft sollen in direkter Beziehung zueinanderstehen.</li> </ul>	
3. Strukturelle Attributebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eine einzelne Komponente oder ein Objekt des Modellexperiments wird durch eine explizite Eigenschaftszuweisung näher charakterisiert.</li> <li>▪ Diese Zuweisung soll auf strukturellen, d.h. für das Phänomen relevanten Eigenschaften (u.a. Brennbarkeit, große Oberfläche/feine Verteilung, ...) basieren.</li> <li>▪ Die Komponente und die Eigenschaft sollen in direkter Beziehung zueinanderstehen.</li> </ul>	<p>„Das was wir untersucht haben, dieses [...] trockene Pulverform.“ (es handelt sich um die Eigenschaften „trocken“ und „pulverförmig“); „der Glühdraht [...] hat sich erhitzt“</p>
4. Relations-ebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eine Beziehung/ ein wechselseitiges Verhältnis zwischen mindestens zwei einzelnen Komponenten des Modellexperiments wird genannt.</li> <li>▪ Ein sinnbezogener Zusammenhang zwischen diesen einzelnen Komponenten ist deutlich erkennbar.</li> </ul>	<p>„als man mit der Pumpe äh das, die Luft in die äh in das Gefäß gepumpt hat, ging das Pulver hoch und da kam das an die Glühdraht und dadurch gabs eine äh Flamme“; [...] im Versuch war es so, dass (.) dieser schwarze Staub, oder, ja ja, der schwarze Staub wurde durch die Luft hochgepumpt [...]“</p>

### Richtungsabhängige abbildende Beschreibung

Die Kategoriensysteme mit einer *richtungsabhängigen abbildende Beschreibung* folgen denselben Prinzipien. Sie beinhalten die Prozessschritte, die den direkten Vergleich zwischen zwei analogen Sachverhalten thematisieren, das Mapping. Der Aufbau der Kategoriensysteme entspricht dem oben beschriebenen allgemeinen Aufbau.

### Kategoriensystem „Abbildende Beschreibung Original → Modellexperiment“

In Tabelle 12 ist das Kategoriensystem dargestellt, mit dem Aussagen zu den Merkmalen der Bereiche kodiert werden, die vom Original auf das Modellexperiment übertragen werden.

Tabelle 12: Kategoriensystem „Abbildende Beschreibung von Original zu Modellexperiment“.

Ebene	Kategorienbeschreibung	Ankerbeispiele
1. Objekt-ebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einzelne <b>Komponenten</b> oder Objekte aus den zwei Systemen (Original &amp; Modellexperiment) werden zwischen Original und Modellexperiment <b>verglichen</b> bzw. aufeinander abgebildet (gemappt).</li> <li>▪ Sie sind <b>nicht</b> in ein größeres korrespondierendes System eingebunden.</li> <li>▪ Die Richtung für die Übertragung vom Original zum Modellexperiment ist direkt identifizierbar.</li> <li>▪ Lediglich eine <b>Eins-zu-Eins-Korrespondenz</b> wird hergestellt.</li> </ul>	<p>„Ich denke, dass die Weizenkörner ähnlich wie das Pulver waren“ (<i>Es findet ausschließlich eine Abbildung auf der Objektebene statt, da den Weizenkörnern keine Eigenschaft zugewiesen wird.</i>); „Also, (...liest Aufgabe erneut...) ähm, wir hatten ja auch son, so was Ähnliches wie ähm Elektrokabel, ähm, ja das war halt genau gleich.“</p>
2. Oberflächli- che Attribut- ebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einfache <b>Objekteigenschaften</b> aus beiden Systemen (Original &amp; Modell-experiment), welche auf oberflächlichen, d.h. für das Phänomen <b>irrelevanten</b> Eigenschaften (Aussehen, wörtliche Kennzeichnung, ...) basieren, werden zwischen Original und Modellexperiment verglichen bzw. aufeinander abgebildet (gemappt).</li> <li>▪ Die Komponente und die Eigenschaft sollten jeweils in einer expliziten, <b>direkten</b> und korrekten Beziehung zueinander stehen.</li> <li>▪ Die Richtung für die Übertragung vom Original zum Modellexperiment ist direkt identifizierbar.</li> <li>▪ Dennoch sollten die Eigenschaften <b>nicht</b> in ein größeres korrespondierendes System eingebunden sein.</li> </ul>	<p>„Weizenkörner die zu Mehl gemacht wurden auf dem Boden (2) sich abgelagerten haben des Gebäudes ist das so wie im Experiment als wir die ähm (.) ähm dieses schwarze Pulver in (.) in die Schüssel da getan haben, so als ob wir das auf diesen Boden gelegt hätten.“; „Bei der Mühle [...] das ist ja wie eine Art Turm und es ist ja dann so wie mit der Plexiröhre.“</p>
3. Strukturelle Attributebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einfache <b>Objekteigenschaften</b> aus beiden Systemen (Original &amp; Modell-experiment), welche auf strukturellen, d.h. für das Phänomen <b>relevanten</b> Eigenschaften (Aussehen, wörtliche Kennzeichnung, ...) basieren, werden zwischen Original und</li> </ul>	<p>„In der Mühle sind (.) hat sich das Kabel erhitzt, wie bei dem Experiment, und [...].“; „Kabel, ach, Kabelbrand identifiziert werden konnte, so wie bei uns halt das mit dem, mit dem, mit dem“</p>

	<p>Modellexperiment verglichen bzw. aufeinander abgebildet (gemappt).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Die Komponente und die Eigenschaft sollten jeweils in einer expliziten, <b>direkten</b> und korrekten Beziehung zueinanderstehen.</li> <li>▪ Die Richtung für die Übertragung vom Original zum Modellexperiment ist direkt identifizierbar.</li> <li>▪ Dennoch sollten die Eigenschaften <b>nicht</b> in ein größeres korrespondierendes System eingebunden sein.</li> </ul>	<p>Glühwendel, ist ja auch heiß“; „Also es ist ja auch so, dass es ein geschlossener Raum war, auch in dem Experiment.“</p>
4. Relations-ebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Beziehungen/ wechselseitige Verhältnisse</b>, welche in jedem System (Original &amp; Modellexperiment) aus mindestens <b>zwei</b> einzelnen Komponenten bestehen, werden zwischen Original und Modellexperiment <b>verglichen</b> bzw. aufeinander abgebildet (gemappt).</li> <li>▪ Die Richtung für die Übertragung vom Original zum Modellexperiment ist direkt identifizierbar.</li> </ul>	<p>„In der Mühle sind (.) hat sich das Kabel erhitzt, wie bei dem Experiment, und ist (.) mit dem Mehlstaub ist an das Kabel gekommen, so hat es sich entzündet, genauso wie der Staub bei dem Experiment.“; „Also das ist wahrscheinlich so, dieses Mehl da, was da rumlag, wurde wie in dem Experiment mit diesem Kabelbrand, wurden die, weil die so fein überall lagen, wurden die dann angezündet, und dann wurde alles da, hat alles gebrannt und das ist halt genauso wie in dem Experiment.“</p>

#### *Kategoriensystem „Abbildende Beschreibung Modellexperiment → Original“*

Die Aussagen zu den Merkmalen der Bereiche, welche vom Modellexperiment auf das Original übertragen werden, werden in dem Kategoriensystem in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Kategoriensystem „Abbildende Beschreibung von Modellexperiment zu Original“.

Ebene	Kategorienbeschreibung	Ankerbeispiele
1. Objekt-ebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Einzelne Komponenten</b> oder Objekte aus den zwei Systemen (Original &amp; Modellexperiment) werden zwischen Original und Modellexperiment <b>verglichen</b> bzw. aufeinander abgebildet (gemappt).</li> <li>▪ Die Richtung für die Übertragung vom Modellexperiment zum Original ist direkt identifizierbar.</li> <li>▪ Sie sind <b>nicht</b> in ein größeres korrespondierendes System eingebunden.</li> <li>▪ Lediglich eine <b>Eins-zu-Eins-Korrespondenz</b> wird hergestellt.</li> </ul>	„Der Stoff ist das die Weizenkörner.“; „Wir haben dazu so ganz, son, ganz viel Luft, ähm, ganz viel Luft auf einmal dahin gepustet, ich weiß nicht, wie das in der Mühle gekommen ist, ja ähm vielleicht war es auch windig oder so.“; „im Fall des Experiments ein schwarzes Pulver ist und in dem, also in dem Unfall, bei dem Unfall, war es Getrei-, also war es anscheinend Getreide“; „das Pulver könnten die Körner sein“; „Glühwendel könnte ein brennendes Kabel darstellen.“
2. Oberflächliche Attribut-ebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einfache <b>Objekteigenschaften</b> aus beiden Systemen (Original &amp; Modellexperiment), welche auf oberflächlichen, d.h. für das Phänomen <b>irrelevanten</b> Eigenschaften (Aussehen, wörtliche Kennzeichnung, ...) basieren, werden zwischen Original und Modellexperiment verglichen bzw. aufeinander abgebildet (gemappt).</li> <li>▪ Die Komponente und die Eigenschaft sollten jeweils in einer expliziten, <b>direkten</b> und korrekten Beziehung zu einanderstehen.</li> <li>▪ Die Richtung für die Übertragung vom Modellexperiment zum Original ist direkt identifizierbar.</li> <li>▪ Dennoch sollten die Eigenschaften nicht in ein größeres korrespondierendes System eingebunden sein.</li> </ul>	„[...] Getreide ist ja, denke ich, auch gelb [...]“; „Dieser glühende Draht sieht aus wie das Kabel (selbst entwickeltes Beispiel).“

3. Strukturelle Attributebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einfache <b>Objekteigenschaften</b> aus beiden Systemen (Original &amp; Modell-experiment), welche auf strukturellen, d.h. für das Phänomen <b>relevanten</b> Eigenschaften (Aussehen, wörtliche Kennzeichnung, ...) basieren, werden zwischen Original und Modellexperiment verglichen bzw. aufeinander abgebildet (gemappt).</li> <li>▪ Die Komponente und die Eigenschaft sollten jeweils in einer expliziten, <b>direkten</b> und korrekten Beziehung zueinanderstehen.</li> <li>▪ Die Richtung für die Übertragung vom Modellexperiment zum Original ist direkt identifizierbar.</li> <li>▪ Dennoch sollten die Eigenschaften <b>nicht</b> in ein größeres korrespondierendes System eingebunden sein.</li> </ul>	<p>„da die Glühwendel sich erhitzt hat, beim Kabelbrand erhitzt sich das Kabel auch (2); „in dem Versuch war [...] ein Staub, und durch die größere Oberfläche [...] die Körner“; „[...] da der Stoff brennbar ist oder man vielleicht Weizenmehl oder so (.) ähm brennen könnte, das brennbar ist [...].“</p>
4. Relations-ebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Beziehungen/ wechselseitige Verhältnisse</b>, welche in jedem System (Original &amp; Modellexperiment) aus mindestens <b>zwei</b> einzelnen Komponenten bestehen, werden zwischen Original und Modellexperiment <b>verglichen</b> bzw. aufeinander abgebildet (gemappt).</li> <li>▪ Die Richtung für die Übertragung vom Modellexperiment zum Original ist direkt identifizierbar.</li> </ul>	<p>„als man mit der Pumpe äh das, die Luft in die äh in das Gefäß gepumpt hat, ging das Pulver hoch und da kam das an die Glühdraht und dadurch gabs eine äh Flamme. Ähm. Und, und ja. Ich denke, dass bei dem Unfall fast dasselbe passiert ist.“; „[...] Pulver. Da wurde es ja mit Luft hochgewirbelt, und das kann ich mir vorstellen, dass dann durch die Mühle ein Windzug kam“; „Das [...] Pulver hat sich an dem Glühdraht in Flammen gesetzt und das Weizenmehl aber am Kabelbrand.“</p>

### Richtungsunabhängige abbildende Beschreibung

Auch das Kategoriensystem mit einer **richtungsunabhängigen abbildenden Beschreibung** (Abbildungse Beschreibung O – M) (Tabelle 14) ist analog zu den vorherigen Kategoriensystemen aufgebaut. Dabei ist elementar, dass in den zugehörigen

Textstellen zwar beide Bereiche, das Original und das Modellexperiment, genannt werden, jedoch nicht identifiziert werden kann, dass ein Merkmal ausgehend von dem einen Bereich in den anderen abgebildet wird. Hier werden häufig Aussagen eingeordnet, bei denen eine Analogie durch „gleich ist, dass wir auch einen Stoff hatten, der [...] pulverig und staubig war“ ausgedrückt wird.

Tabelle 14: Kategoriensystem „Richtungsunabhängige abbildende Beschreibung zwischen Original und Modellexperiment“ (kurziv: Anmerkungen zu den Ankerbeispielen).

Ebene	Kategorienbeschreibung	Ankerbeispiele
1. Objekt-ebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einzelne <b>Komponenten</b> oder Objekte aus den zwei Systemen (Original &amp; Modellexperiment) werden zwischen Original und Modellexperiment <b>verglichen</b> bzw. aufeinander abgebildet (gemappt).</li> <li>▪ Sie sind <b>nicht</b> in ein größeres korrespondierendes System eingebunden.</li> <li>▪ Lediglich eine <b>Eins-zu-Eins-Korrespondenz</b> ohne Richtungsangabe bei der Übertragung wird hergestellt.</li> </ul>	„auch bei beiden ein Feuer da, also eine Flamme.“; „wir hatten ja auch ein Kabel bei dem Unfall in der Mühle und bei unserem Experiment.“; ein Pulver und Weizen ist ähnlich.“
2. Oberflächliche Attribut-ebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einfache <b>Objekteigenschaften</b> aus beiden Systemen (Original &amp; Modell-experiment), welche auf oberflächlichen, d.h. für das Phänomen <b>irrelevanten</b> Eigenschaften (Aussehen, wörtliche Kennzeichnung, ...) basieren, werden zwischen Original und Modellexperiment verglichen bzw. aufeinander abgebildet (gemappt).</li> <li>▪ Die Komponente und die Eigenschaft sollten jeweils in einer expliziten, <b>direkten</b> und korrekten Beziehung zueinanderstehen.</li> <li>▪ Keine Richtung für die Übertragung eines Bereiches und den anderen ist identifizierbar.</li> <li>▪ Dennoch sollten die Eigenschaften <b>nicht</b> in ein größeres korrespondierendes System eingebunden sein.</li> </ul>	„Weil der Draht und das Kabel ähnlich aussehen, von der Form aus.“ ( <i>selbst entwickeltes Beispiel</i> )

3. Strukturelle Attributebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einfache <b>Objekteigenschaften</b> aus beiden Systemen (Original &amp; Modellexperiment), welche auf strukturellen, d.h. für das Phänomen <b>relevanten</b> Eigenschaften (Aussehen, wörtliche Kennzeichnung, ...) basieren, werden zwischen Original und Modellexperiment verglichen bzw. aufeinander abgebildet (gemappt).</li> <li>▪ Die Komponente und die Eigenschaft sollten jeweils in einer expliziten, <b>direkten</b> und korrekten Beziehung zueinanderstehen.</li> <li>▪ Keine Richtung für die Übertragung eines Bereiches und den anderen ist identifizierbar.</li> <li>▪ Dennoch sollten die Eigenschaften <b>nicht</b> in ein größeres korrespondierendes System eingebunden sein.</li> </ul>	<p>„beides waren Pulverstoffe“;      „beides waren ja halt heiße Kabel“; „die Ähnlichkeiten sind, dass es brennbare Stoffe [...]“;      „gleich ist, dass es halt ein geschlossener Raum war“</p>
4. Relations-ebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Beziehungen</b>/ wechselseitige Verhältnisse, welche in jedem System (Original &amp; Modellexperiment) aus mindestens <b>zwei</b> einzelnen Komponenten bestehen, werden zwischen Original und Modellexperiment <b>verglichen</b> bzw. aufeinander abgebildet (gemappt).</li> <li>▪ Keine Richtung für die Übertragung eines Bereiches und den anderen ist identifizierbar.</li> </ul>	<p>„das (.) Pulver (.) und das Mehl haben sich wahrscheinlich (2) in der Luft verteilt und wurden dann durch eine Flamme entzündet.“; „gleich ist, dass die Sachen wahrscheinlich aufgewirbelt worden sind, [...]“; „das Gleiche, [...], dass (2) ja also, es war was Feines und das ist mit (.) Strom oder Wärme (2) zusammengekommen und [...].“</p>

### *Beispiel zur Anwendung der Kategoriensysteme auf ein Transkript*

Ein Transkript von einem Laut Denk-Prozess (Laut-Denk-Protokoll) besteht aus verschiedenen, zeitlich aufeinander folgenden Phrasen. Mithilfe der Kategoriensysteme wurden von den einzelnen Laut-Denk-Protokollen (Auswertungseinheit) Abschnitte kodiert, die mindestens eine Textphrase, d.h. ein einzelnes Wort, umfassen (Kodiereinheit). Die vollständigen Antworten auf die einzelnen Aufgaben waren der größte Textbaustein, der unter eine Kategorie fallen konnte (Kontexteinheit). Somit bildet eine Phrase einen inhaltsrelevanten Abschnitt und ist definiert durch die Analogieart und den konkreten Inhalt.

Im Folgenden werden konkrete Schüler\*innenaussagen und die dazugehörige Einordnung mit Hilfe der Kategoriensysteme an einem Laut-Denk-Protokoll beispielhaft vorgestellt (vgl. Abbildung 25). Ergänzt werden diese inhaltsunabhängigen Kodierungen durch die zusammengefassten Inhalte, welche sich an dem konkreten Beispiel der Staubexplosion orientieren. Im eigentlichen Kodierungsprozess stellte es einen weiteren Schritt dar, der im Anschluss an die Kodierungen mit Hilfe der Kategoriensysteme durchgeführt wurde. Die Kodierungen wurden computergestützt mit Hilfe des Programms MAXQDA durchgeführt.

Abbildung 25: Beispielhaftes Laut-Denk Protokoll mit Kodierungen in MAXQDA.

Bei der Phrase „die Weizenkörner sich entzündet haben“ steht das Original im Mittelpunkt und wird beschrieben (Kategoriensystem 1; Abbildung 25). Das Objekt *Stoff* (konkret die Weizenkörner) werden mit der Eigenschaft *Entzündbarkeit* charakterisiert. Diese Eigenschaftszuweisung steht in direkter Beziehung zu dem Objekt und ist für das Konzept des Phänomens relevant. Somit wird diese Phrase auf der strukturellen Attributebene eingeordnet und mit dem Niveau 3 kodiert. Das Original wird weiter in der Phrase „durch den Kabelbrand haben sich die Weizenkörner entzündet und dann ist es explodiert“ beschrieben. Dabei wird eine Beziehung zwischen der Zündquelle und dem Stoff hergestellt, sodass es auf der Relationsebene eingeordnet und mit dem Niveau 4 kodiert werden kann. In einem nächsten Schritt wird eine Beziehung zwischen dem Stoff in dem Original, den Weizenkörnern, und dem Stoff in dem Modellexperiment hergestellt (Phrase: „Weizenkörner (...) explodiert, genauso wie bei dem Stoff“). Dabei wird von dem Original ausgehend eine Beziehung zu einem Objekt im Modellexperiment hergestellt. Es findet eine Explosion statt. Diese wird hier lediglich als Objekt kodiert, da sie als Folge genannt wird und keine Beziehung zwischen den für eine Explosion relevanten Elementen genannt wird. Daher wird die Phrase in dem Kategoriensystem *Abbildungende Beschreibung O → M* auf der Objektebene (Niveau 1) kodiert. Die weiteren Phrasen stellen nun das Modellexperiment in den Fokus. Als relevant für den Vergleich wird die

Aufwirbelung erkannt (Phrase: „Stoff, als der hochgewirbelt wurde (...)\"). Diese wird im Kategoriensystem *Beschreibung des Modellexperiments* auf der Relationsebene eingeordnet und mit dem Niveau 4 kodiert. Auch bei der Phrase „Stoff (...)“ ist er durch diesen, durch ähm die Hitze explodiert“ handelt es sich um eine Phrase, die auf der Relationsebene (Niveau 4) eingeordnet werden kann (Reaktion des Stoffes mit der Hitze, welche zur Entzündung führt). In dieser Phrase ist darüber hinaus gleichzeitig ein strukturelles Attribut enthalten (die Hitze). Dieses strukturelle Attribut „Hitze“ beschreibt eine Eigenschaft der Zündquelle, die für den Explosionsprozess relevant ist und kann daher mit dem Niveau 3 kodiert werden.

### **Gütekriterien des Kategoriensystems**

Da die Daten handlungsnah erfasst wurden, kann zunächst davon ausgegangen werden, dass sie in enger Beziehung zu den Denkprozessen der Schüler\*innen stehen und es sich somit um Daten von hoher Validität handelt (vgl. Sandmann, 2014). Auch die vorgestellten Kategoriensysteme wurden auf Validität und Reliabilität geprüft. Da zu allen Ebenen und Kategoriensystemen in den Laut-Denk-Protokollen Aussagen identifiziert werden konnten, können auch die Kategoriensysteme als valide angesehen werden. Die Reliabilität – die Einordnung der Äußerungen in die Kategoriensysteme – ist durch die präzise, trennscharfe Definition und Beschreibung der Kategoriensysteme mit Beispielkodierungen und Kodierregeln gegeben (vgl. Mayring, 2015). Die Reliabilität der vier Ebenen wurde durch die Interkoderreliabilität nach Cohen (1988) geprüft. Bei der Berechnung dieser Interkoderreliabilität (Cohens Kappa) wurden „nicht nur die Quote der übereinstimmenden Kodierungen verschiedener Auswerter[\*innen] [...] berücksichtigt, sondern das Ergebnis noch um die Zahl der zufällig zu erwartenden Übereinstimmungen bereinigt“ (Gläser-Zikuda, 2017, S. III). Für die Messung der Interkoderreliabilität wurden fünf- und zwanzig Prozent des zu kodierenden Textmaterials erzeugt, die als repräsentativ für das vorliegende Textmaterial gelten können (vgl. Baur, 2018). Die ausgewählten Laut-Denk-Protokollen wurden von zwei unabhängigen Kodierer\*innen kodiert (Zweitauswertung durch geschulte wissenschaftliche Hilfskraft) und die Interkoderreliabilität nach Cohen (1988) berechnet. Nichtübereinstimmungen wurden diskutiert und mithilfe eines Konsens gelöst. Dabei wurden gegebenenfalls die bisherigen Kategorien und ihre Definitionen, Kodierhinweise und Ankerbeispiele weiter ausgeschärft. Die so erhaltenen Kategoriensysteme wurden am eigenen Lehrstuhl sowie durch Vorstellung innerhalb eines Workshops zur qualitativen Inhaltsanalyse im Sinne eines Peer Debriefings bewertet und diskutiert. Abschließend wurden die Interkoderreliabilitäten der Kategoriensysteme und zusätzlich die Interkoderreliabilitäten der einzelnen Ebenen bestimmt. Die Werte der Prüfung der Reliabilität des Kategoriensystems anhand der Interkoderreliabilität nach Cohen

(1960) sind in Tabelle 15 dargestellt. Die Interkoderreliabilität war für alle Kategoriensysteme  $> 0.8$  und weist damit auf eine gute Übereinstimmung zwischen den Kodierern hin.

Tabelle 15: Interkoderreliabilitäten für alle fünf Kategoriensysteme und jeweils den einzelnen Ebenen ( $n = 20$  Aufnahmen, 2 Kodierer) – Für die abbildenden Kategoriensysteme müssen die Werte noch einmal berechnet werden, da momentan noch Problem mit den Daten im Programm gibt. Das Programm erkennt die Beziehungen nicht.

Kategoriensystem	Cohens $\kappa$
<b>Beschreibung des Originals</b>	<b>.92</b>
Objekt	.94
Oberflächliches Attribut	1.00
Strukturelles Attribut	.95
Relation	.95
<b>Beschreibung des Modellexperiments</b>	<b>.80</b>
Objekt	.83
Oberflächliches Attribut	1.00
Strukturelles Attribut	.98
Relation	.87
<b>Abbildende Beschreibung von Original → Modellexperiment</b>	<b>.91</b>
Objekt	.89
Oberflächliches Attribut	.90
Strukturelles Attribut	.92
Relation	.90
<b>Abbildende Beschreibung von Modellexperiment → Original</b>	<b>.90</b>
Objekt	.81
Oberflächliches Attribut	.98
Strukturelles Attribut	.90
Relation	.91
<b>Abbildende Beschreibung von Original – Modellexperiment</b>	<b>.95</b>
Objekt	.98
Oberflächliches Attribut	.97
Strukturelles Attribut	.81
Relation	.99
<b>Sonstiges</b>	<b>.95</b>
Textwiederholung	.97
Rückfrage	1.00
Fehlvorstellung	.95
Metakognitive Operationen	.85

Die perfekten Übereinstimmungen für die Ebene *oberflächliches Attribut* in den Kategoriensystemen *Beschreibung des Originals* und *Beschreibung des Modellexperiments* und im Bereich *Rückfragen* in dem Kategoriensystem *Sonstiges* sind vermutlich eine Überschätzung dieser Ebene bzw. des Bereiches innerhalb der Kategoriensysteme.

Allerdings gibt es zu der Ebene *oberflächliches Attribut* und dem Bereich *Rückfragen* im Verhältnis zu allen anderen Ebenen in allen Laut-Denk-Protokollen auch nur wenige Nennungen. Gleichzeitig ist die oberflächliche Attributebene vor allem durch die Zuordnung der Farbe zu einem Stoff bestimmt, welche eine einfache Identifikation der zu kodieren Elemente ermöglicht. Zudem können Rückfragen aufgrund ihres Fragecharakters einfach identifiziert werden. Somit können die Kategoriensysteme für die Analyse der Laut-Denk-Protokolle als reliabel betrachtet werden. Auf die zusätzliche Überprüfung der Intraraterreliabilität wurde aus forschungsökonomischen Gründen verzichtet.

### ***Visualisierung der inhaltsanalytisch ausgewerteten Laut-Denk Protokolle in Denkgraphen***

Obwohl Lernprozesse und die dabei ablaufenden Gedanken und Kommunikationen zur Identifikation von Unterstützungsmöglichkeiten in der Naturwissenschaftsdidaktik von großem Interesse sind, werden diese Prozesse kaum veranschaulicht. So werden Kommunikationsgraphen in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung relativ selten eingesetzt, um diese Prozesse zu visualisieren und zu analysieren. Strippel (2017) nutzte diese Visualisierungsmöglichkeit, um die Kommunikationsmuster über einzelne Aspekte der Erkenntnisgewinnung bei der Bearbeitung von offenen Experimentieraufgaben zu untersuchen.

Das Interesse der vorliegenden Studie liegt auf der zeitlichen Abfolge von Inhalten während des Denkens in Analogien beim Umgang mit Modellexperimenten. Diese Abhängigkeit zwischen Inhalt und zeitlicher Abfolge kann gerade bei der Darstellung in Kommunikationsgraphen nachvollzogen werden (vgl. Lehesvuori et al., 2013; Strippel, 2017). So wurde auch das Vorgehen bei der Visualisierung mit Kommunikationsgraphen von Lehesvuori et al. (2013) und von Strippel (2017) übertragend beschrieben (Abbildung 26). In der vorliegenden Arbeit wird dieses Vorgehen nun auch adaptiert, um die artikulierten Denkprozesse während des Denkens in Analogien beim Umgang mit Modellexperimenten zu visualisieren und zu analysieren. Das adaptierte Vorgehen für die vorliegende Arbeit ist in Abbildung 27 dargestellt. Bei Strippel (2017) wurden die Audioaufnahmen zunächst in Gespräche über einzelne Aspekte der Erkenntnisgewinnung eingeteilt. Dies entspricht in der vorliegenden Arbeit der Einteilung der autographierten Laut-Denk-Protokolle in artikulierte Gedanken über einzelne Aspekte des Denkens in Analogien beim Umgang mit Modellexperimenten.

## 4 Methodisches Vorgehen

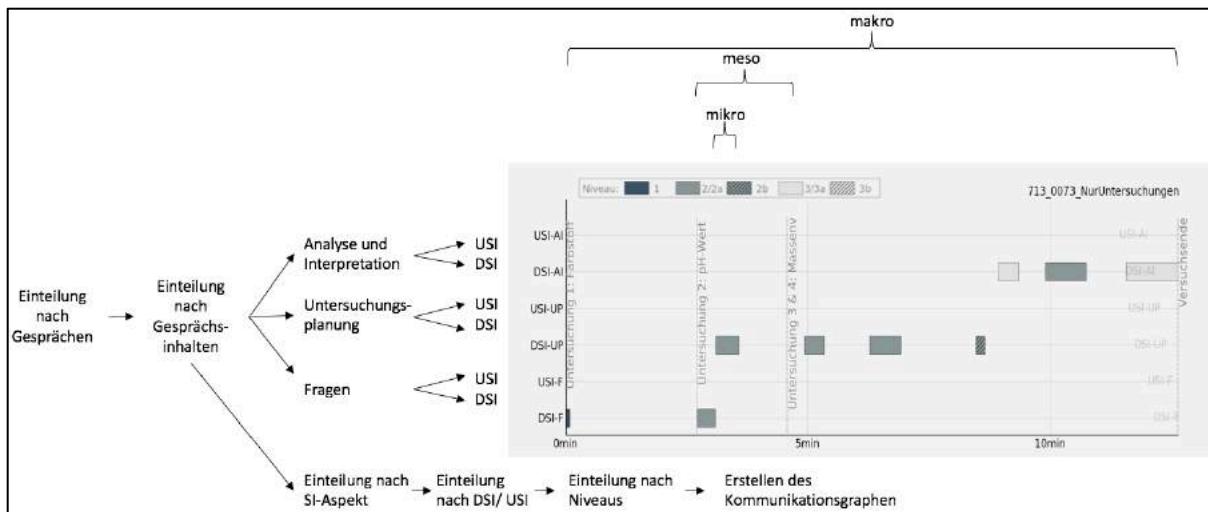


Abbildung 26: Vorgehen bei der Visualisierung von Kommunikationsgraphen zur naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung (Strippel, 2017).

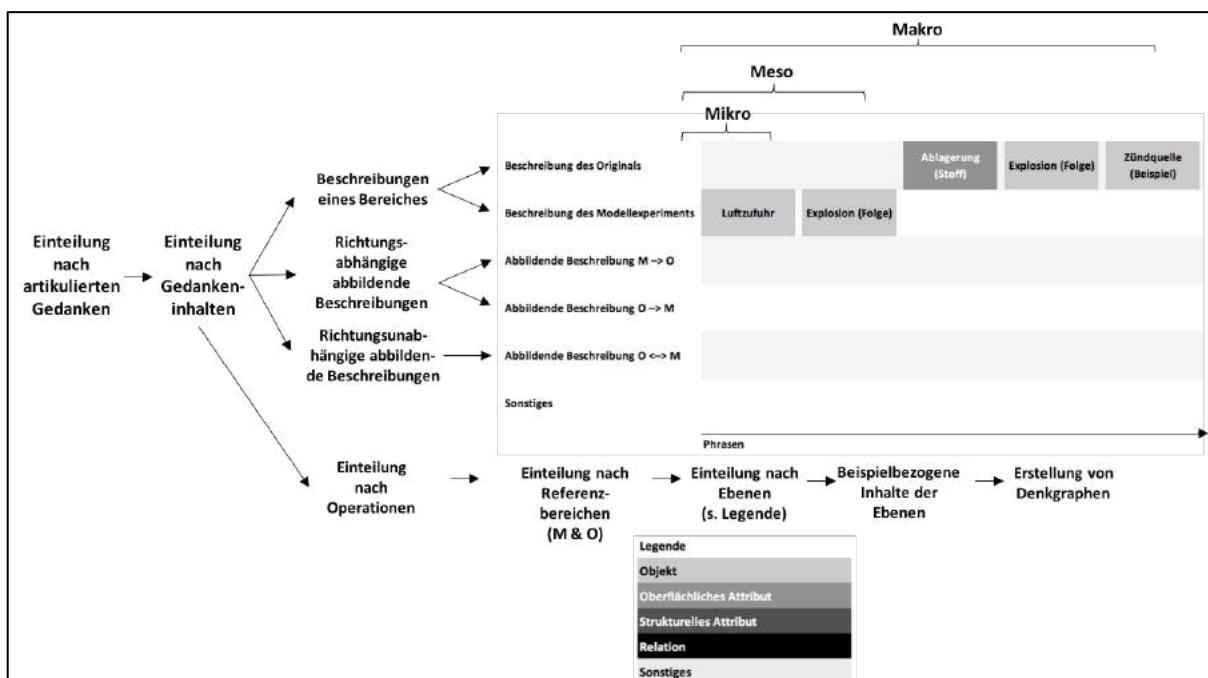


Abbildung 27: Vorgehen bei der Visualisierung der inhaltsanalytisch ausgewerteten Laut-Denk Protokolle in Denkgraphen in der vorliegenden Arbeit.

Diese artikulierten Gedanken wurden zu der jeweiligen Analogieoperationen zugeordnet, der Beschreibung eines Bereiches, richtungsabhängige abbildende Beschreibung und richtungsunabhängige abbildende Beschreibung. Diese Analogieoperationen wurden mit Hilfe der Referenzbereiche eingeteilt. Das bedeutet, dass sie ausdifferenziert wurden. Die Beschreibung eines Bereiches konnte dabei entweder die Beschreibung des Originals oder die Beschreibung des Modellexperiments sein. Die richtungsabhängige abbildende Beschreibung konnte ausgehend vom Modellexperiment auf das Original abgebildet werden oder umgekehrt. Zusätzlich wurden Informationen über die dabei gewählten Ebenen (Objekt, oberflächliches Attribut, strukturelles Attribut und Relation) berücksichtigt. Diese Ebenen sind durch

eine Graustufenkodierung innerhalb der artikulierten Gedanken ersichtlich. Die Ebenen wurden weiterhin durch die beispielbezogenen Inhalte der Ebenen ergänzt, welche in den Begriffskästen dargestellt sind. Auf diese Weise ist eine sehr detaillierte Visualisierung und Analyse einzelner Laut-Denk-Protokolle nach Makro-, Meso- und Mikroebene möglich.

Abbildung 28 visualisiert beispielhaft die Makro-, Meso- und Mikroebene eines ausgewählten Denkgraphen. Die Grundlage für dieses Beispiel bildete das Laut-Denk-Protokoll aus Abbildung 25. Die Länge der einzelnen Kästen bezieht sich auf eine zugrundeliegende Phrase. An dem ganz rechten Kasten des Denkgraphen ist zu erkennen, dass die Phrase insgesamt eine höherrangige Relation (inhaltlich: Explosion) beinhaltet, diese Phrase aber gleichzeitig noch zusätzlich durch ein strukturelles Attribut ergänzt wurde, das ein Objekt (hier: Zündquelle) näher kennzeichnet. Daher ist der Phrasenkasten in diesem beschriebenen Beispiel ein weiteres Mal halbiert.

Objekt	Oberflächliches Attribut	Strukturelles Attribut	Relation	Sonstiges
<b>FE0107_I_map.xlsx</b>				
Beschreibung des Originals	Entzündbarkeit (Stoff)	Entzündung		
Beschreibung des Modellexperiments			Aufwirbelung	Explo- sion Energie (Zünd- quelle)
Abbildende Beschreibung M → O				
Abbildende Beschreibung O → M			Explosion (Folge)	
Abbildende Beschreibung O <→ M				
Sonstiges				
Phrasen				

Abbildung 28: Visualisierung eines beispielhaften Laut-Denk Protokolls.

Aufgrund der aus diesem Detailgrad resultierenden Datenmenge in Verbindung mit der Darstellung von mehr als hundert Fällen, von denen jeweils zwei aufgabenbezogene Denkgraphen (Aufgabe *Mapping* und Aufgabe *Transfer*, Abbildung 23) erstellt werden mussten, wurde auch in der vorliegenden Arbeit eine computerunterstützte Darstellungsvariante gewählt. So wurde zur Visualisierung mit Hilfe der Denkgraphen ein Excel-Skript mit Visual Basics geschrieben.<sup>18</sup> Um dieses

<sup>18</sup> Das Skript wurde in einer ersten Version von Jan Hoppius (Doktorand am Lehrstuhl für Laseranwendungstechnik) auf Anfrage der Autorin angefertigt und nachträglich von der Autorin angepasst. Dafür gilt ihm ein großer Dank der Autorin.

anwenden zu können, wurden die mit MAXQDA kodierten Laut-Denk-Protokolle zuerst in Tabellendateien umgewandelt und anschließend die gewünschten Graphen erstellt (Abbildung 27). Diese Graphen stellen die Kodierungen in einer zeitlichen Abfolge dar und enthalten durch die Graustufenkodierung und die in den Begriffskästen enthaltenen beispielbezogenen Inhalte sehr detaillierte Informationen über die Gedanken beim Denken in Analogien (Abbildung 27). Durch dieses Excel-Skript konnte auch das hier vorhandene, umfangreiche Datenmaterial effizient in Form von Denkgraphen dargestellt und analysiert werden. Gleichzeitig konnten durch die Darstellung der Ebenen über die Graustufenkodierung und die beispielbezogenen Inhalte weitere Dimensionen visualisiert werden. Die Ergebnisse zu den mit Hilfe der Denkgraphen visualisierten Laut-Denk-Protokolle sind in Abschnitt 5.3 dargestellt.

### **Weiterführende Analyse- und Visualisierungsschritte ausgehend von den Denkgraphen**

Um die einzelnen Denkgraphen aller Schüler\*innen auf den einzelnen Ebenen vergleichen zu können und Ähnlichkeiten sowie Unterschiede zu identifizieren, wurden weitere Visualisierungen genutzt, mithilfe derer die in den Denkgraphen bestehende Informationsvielfalt reduziert werden konnte. Dies ermöglichte, in den einzelnen Analysen den Fokus stärker auf die jeweilige Ebene zu legen.

#### **Makro**

Die Makro-Ebene des in Abbildung 28 beispielhaft dargestellten Denkgraphen wurde für den Vergleich der einzelnen Denkgraphen auf die Abfolge der Analogieoperationen reduziert (Abbildung 29). Dabei wurde auf die Darstellung der Anzahl der Phrasen pro genutzter Analogieoperation verzichtet.

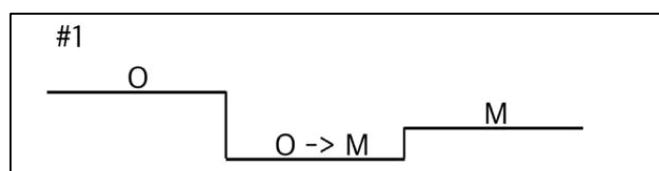


Abbildung 29: Reduzierte Darstellung der Makro-Ebene anhand eines beispielhaften Laut-Denk Protokolls.

#### **Meso**

Zur überblicksartigen Darstellung der Meso-Ebene, d.h. der Abfolge der genannten Analogiearten, wurden Roadmaps verwendet. Solche Roadmaps haben Bindernagel und Eilks (2009) genutzt, um das Pedagogical Content Knowledge (PCK) deutscher Chemielehrkräfte zum Teilchenkonzept darzustellen (vgl. Abbildung 30).

Dabei wurden mithilfe einer Roadmap die unterschiedlichen Unterrichtswege zur Einführung wesentlicher Erklärungsmodelle auf der Teilchenebene von 28 erfahrenen Chemielehrer\*innen überblicksartig zusammengefasst. Die einzelnen

Erklärungsmodelle bilden dabei die Knotenpunkte, die mithilfe von Linien (Pfaden) miteinander verbunden sind. An den Linien ist zusätzlich die absolute Häufigkeit der Lehrer\*innen, die einem jeweiligen Pfad folgen, angeben.

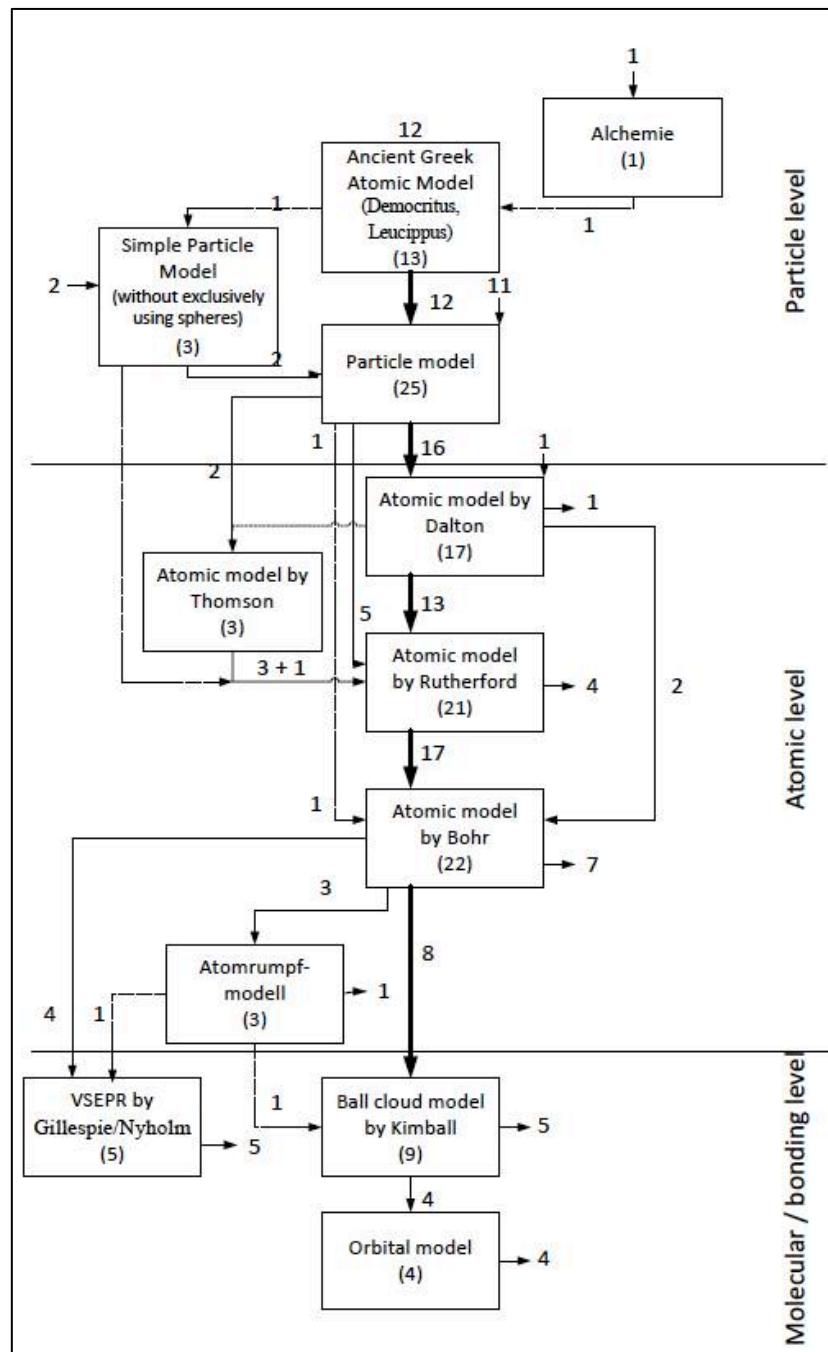


Abbildung 30: Roadmap von Bindernagel & Eilks (2009).

Die Methode einer Roadmap wurde in der vorliegenden Arbeit übernommen und an den Gegenstand der Denkprozesse von Schüler\*innen angepasst. So konnten die Ergebnisse über mehrere Schüler\*innen in einer Grafik dargestellt werden. In dem hier beschriebenen Zusammenhang wurden die einzelnen Knotenpunkte durch die Analogiearten präsentiert. Dabei wurde von der zuerst genannten Art (Objekt, oberflächliches oder strukturelles Attribut, Relation) ganz links begonnen und

mit den anknüpfenden Arten fortgesetzt. Die absolute Häufigkeit, mit der die Schüler\*innen einem Pfad folgten, wurde durch die Dicke der jeweiligen Linien ausgedrückt.

In Abbildung 31 ist die Roadmap des zuvor genutzten Beispiels (vgl. Abbildung 25, Abbildung 28) mithilfe der dunkelblau gefärbten Linien dargestellt. Darüber hinaus sind noch zwei weitere Beispiele blass blau dargestellt, um zu zeigen, wie die einzelnen Roadmaps im Zusammenschluss dargestellt werden. Dabei wird deutlich, dass zwei Schüler\*innen ähnlich starten. Die Anzahl der Schüler\*innen, die einen Abschnitt gemeinsam beschreiten, wird durch die Breite der jeweiligen Linie visualisiert (2 pt.). Die beiden dargestellten Schüler\*innen nennen nach dem strukturellen Attribut erst eine Relation und dann ein Objekt. Erst bei der vierten Phrase variieren die genannten Analogiearten. So wird im Weiteren von einem\*einer Schüler\*in ein Objekt genannt, von dem\*der Anderen zwei Relationen und ein strukturelles Attribut.

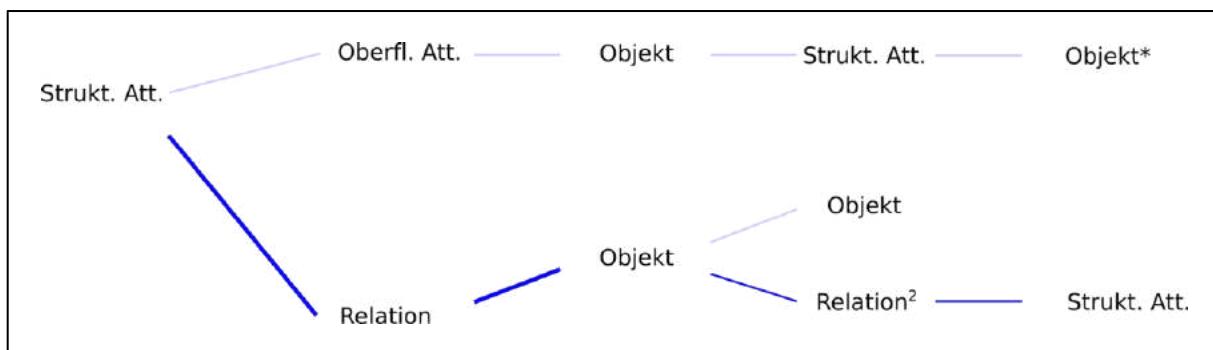


Abbildung 31: Reduzierte Darstellung der Meso-Ebene anhand eines beispielhaften Laut-Denk Protokolls (blau) und zwei weiteren Protokollen (blass blau) mit Hilfe von Roadmaps.

### Mikro

Um die Mikro-Ebene, d.h. die Inhalte bezogen auf das Explosionskonzept, darzustellen, wurde das Explosionspentagon genutzt. In Abbildung 32 sind die von dem\*der Schüler\*in genannten Inhalte des zuvor eingeführten Beispiels (vgl. Abbildung 25, Abbildung 28) visualisiert. In einer Abbildung wurden die Begriffe kursiv und rot markiert, welche von dem\*der jeweiligen Schüler\*in beim Mapping genannt wurden.

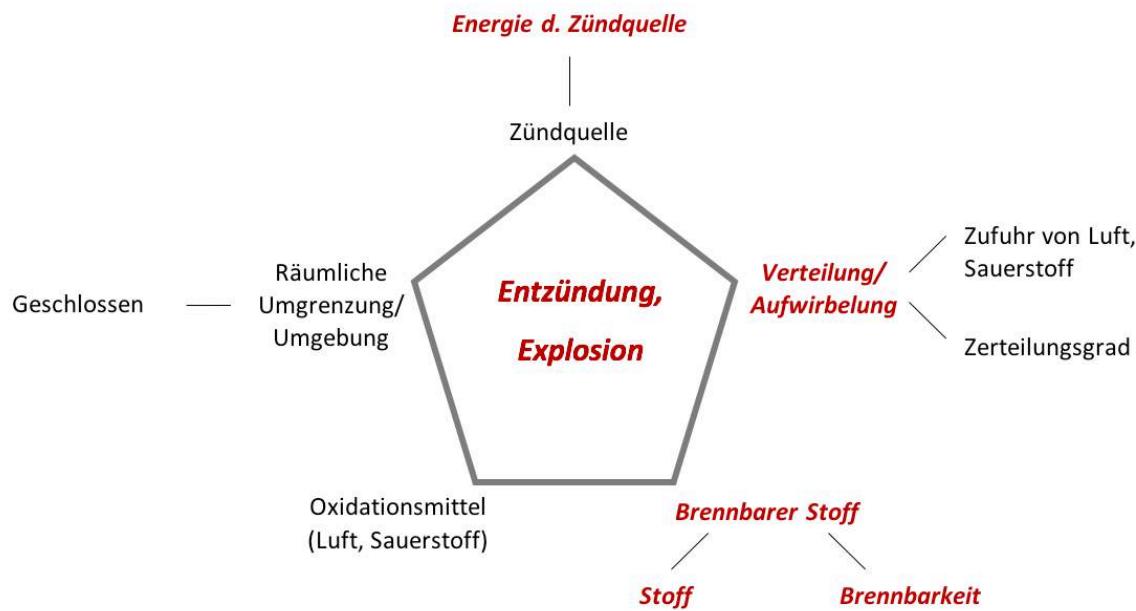


Abbildung 32: Reduzierte Darstellung der Mikro-Ebene mit Hilfe der Explosionspentagons anhand eines beispielhaften Laut-Denk Protokolls.

#### 4.3.5 Kontrollvariablen

Zusätzlich zur inhaltlichen Analyse wurden als Kontrollvariablen die *soziodemografischen Variablen* Alter, Geschlecht, Muttersprache und Schulleistung in naturwissenschaftlichen (Mathematik, Chemie und ggf. Physik) und sprachlichen Fächern (Deutsch und Englisch) erhoben und ausgewertet. Zudem wurde das *Interesse* mit einem etablierten Instrument nach Baumert et al. (1986) erhoben, welches an das Fach Chemie angepasst wurde. Jedes Interesse-Item wurde zunächst entsprechend seiner vierstufigen Likertskaala mit den Polen 1 = *stimme voll und ganz zu* bis 4 = *stimme überhaupt nicht zu* bewertet. Somit repräsentiert ein niedriger Wert ein hohes Interesse. Um die Werte miteinander zu vergleichen, wurden sie jedoch umkodiert, sodass ein hoher Wert auch ein hohes Interesse repräsentiert. Dadurch kann das Gesamtinteresse in Form des Mittelwerts der sieben Einzelitems dargestellt werden.

Um Einblicke in die *kognitiven Fähigkeiten* der Schüler\*innen zu ermöglichen, wurde der Kognitive Fähigkeits-Test (KFT) eingesetzt (vgl. Heller & Perleth, 2000). Von diesem Kognitiven Fähigkeits-Test wurden die Subskalen verbale und figurale Analogien ausgewählt, da der Fokus der Studie auf dem Denken in Analogien zwischen sprachlichen und visuellen Repräsentationen liegt. Für die Datenauswertung wurden definierte Auswertungsschablonen genutzt (vgl. ebd.).

Bei den Schüler\*innen, bei denen die Eye-Tracking Technologie zur Datenerhebung genutzt wurde, wurden zusätzlich Informationen zum Tragen einer Sehhilfe erfragt. Diese Daten sind relevant, da sie die Registrierung des Kornea-Reflexes und damit der Blickbewegungen aufgrund von unerwünschten Reflexionen zwischen

Glasoberfläche und LED negativ beeinflussen und damit sogar zu fehlerhaften Daten führen könnten.

#### 4.4 Stichproben

Die vorliegende Arbeit kann insgesamt in zwei Teilstudien differenziert werden (vgl. Tabelle 16). Diese Teilstudien wurden in unterschiedlichen zeitlichen Abschnitten von 2017 bis 2019 durchgeführt. Daraus ergaben sich auch die beiden Stichprobengruppen: die Schüler\*innenexperiment-Gruppe (SE-Gruppe), welche das Modellexperiment in der Intervention selbstständig als Schüler\*innenexperiment durchgeführt hat, und die Video-Gruppe (V-Gruppe), welche sich das Modell-experiment in einem Video angeschaut hat. In Abbildung 33 ist dargestellt, von welchen Gruppen welche Daten vorliegen. So liegen die Vorwissensdaten sowie die Daten zum Verständnis, welche mit dem Versuchsprotokoll erhoben wurden, und die Laut-Denk-Protokolle zum Denken in Analogien von den Schüler\*innen beider Gruppen vor. Lediglich die Daten zur Informationsaufnahme und die noch detailliertere Erhebung der Verarbeitungsdaten durch den Fragebogen mit den geschlossenen Items liegen ausschließlich von den Schüler\*innen der V-Gruppe vor. Somit kann auch nur von diesen Schüler\*innen ein Zusammenhang zwischen der Informationsaufnahme und dem Mapping analysiert werden.

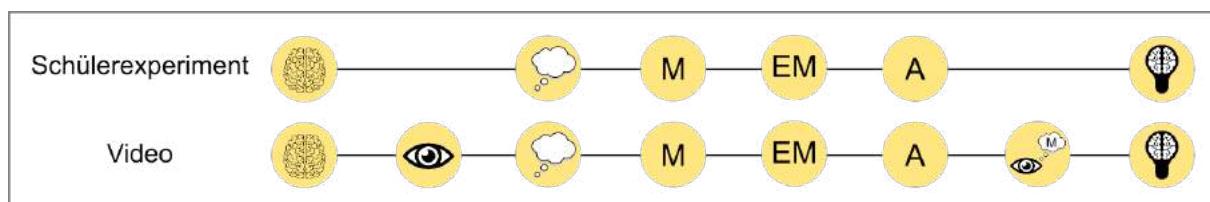


Abbildung 33: Stichprobenbezogene Vorlage der Daten bezogen auf die einzelnen Studienschwerpunkte.

Im Folgenden werden die Stichproben forschungsthemen- und personengruppenbezogen betrachtet. Daher wird zwischen den Untersuchungen zum Vorwissen, zur Wahrnehmung (Informationsaufnahme und Verarbeitung), zum Denken in Analogie und zum Wissenszuwachs differenziert. Eine dezidierte Übersicht über die grundsätzlichen und absoluten Stichprobengrößen bezogen auf die einzelnen Studienschwerpunkte ist in Tabelle 16 dargestellt. Aus den insgesamt sechs Schulklassen wurden zwei Probandengruppen zwischen 58 und 36 Schüler\*innen gebildet (vgl. Tabelle 16).

Tabelle 16: Grundsätzliche und absolute Stichprobengrößen nach den Studienschwerpunkten.

Stichprobe bezogen auf den jeweiligen Studienschwerpunkt	Gesamtstichprobe	Auschluss aufgrund fehlender bzw. fehlerhafter Werte	Endgültige Stichprobengröße für die Auswertung	Teilstichproben und Probandengruppen
<b>Vorwissen</b>	N = 105	n = 15	N = 94	<u>nSE = 58</u> nv = 36
<b>Informationsaufnahme beim Be trachten des Modellexperiments</b>	N = 36	n = 5	N = 31	nv = 31
<b>Eye-Tracking</b>	N = 36	n = 5	N = 31	nv = 31
<b>Verarbeitung des Modellexperiments</b>				
<b>Versuchsprotokoll</b>	N = 105	n = 15	N = 94	<u>nSE = 58</u> nv = 36
<b>Fragebogen</b>	N = 36	n = 0	N = 36	nv = 36
<b>Denken in Analogien</b>	N = 105	n = 15	N = 90	<u>nSE = 57</u> nv = 33
<b>Unverbundene Stichprobe Mapping</b>	N = 105	n = 15 (+2)	N = 90 (88)	
<b>Unverbundene Stichprobe Ergebnis Mapping</b>	N = 105	n = 15	N = 90	
<b>Unverbundene Stichprobe Transfer</b>	N = 105	n = 15 (+6)	N = 90 (84)	
<b>Verbundene Stichprobe Mapping und Ergebnis Mapping</b>	N = 105	n = 15	N = 90	
<b>Wissenszuwachs</b>				
<b>Verbundene Stichprobe Wissenszuwachs Pre-Intervention-Post zur Explosion</b>	N = 105	n = 2	N = 103	<u>nSE = 67</u> nv = 36
<b>SE: Selbstständig durchgeführtes Schüler*innenexperiment; V: Experiment wurde als Video in Normalgeschwindigkeit gesehen</b>				

### **Video-Gruppe: Wahrnehmung – Informationsaufnahme (Eye-Tracking) & Verarbeitung (Fragebogen)**

An der Teilstudie zur Wahrnehmung nahmen insgesamt 36 Schüler\*innen<sup>19</sup> (22 weiblich; 61,1%) mit einem mittleren Alter von 12,69 Jahren ( $SD = 0,63$  Jahr) aus drei Schulklassen an Gymnasien aus NRW teil. Alle Schüler\*innen stammten aus der siebten Jahrgangsstufe und hatten keine schulischen Vorkenntnisse im Themengebiet Feuer und Explosion. Statt der eigenen Durchführung des Modellexperiments zur Staubexplosion haben die Schüler\*innen dieses Modellexperiment in Form eines Videos gesehen. Von diesen 36 Schüler\*innen mussten fünf Schüler\*innen<sup>20</sup> von der Datenanalyse ausgeschlossen werden, da weniger als 90 % der Eye Tracking-Daten aufgrund von Tracking-Fehlern nicht verfügbar waren. Somit enthält die Endstichprobe 31 Schüler\*innen (Alter:  $M = 12,71$  Jahre,  $SD = 0,64$  Jahr; 20 weiblich, 64,5%).

### **Schüler\*innenexperimente- und Video-Gruppe: Vorwissen, Verarbeitung (Versuchsprotokoll), Denken in Analogien & Wissenszuwachs**

Insgesamt nahmen 105 Schüler\*innen an den Teilstudien zum Denken in Analogien teil. 46,7 % aller 105 Schüler\*innen sind weiblich ( $n = 49$ ), 52,4 % männlich ( $n = 55$ ). Bei 1 % der Schüler\*innen ( $n = 1$ ) konnte kein Geschlecht ermittelt werden, da diesbezüglich im Pre-Test keine Angabe gemacht wurde. Das Durchschnittsalter beträgt 12,50 Jahre. Sowohl die männlichen als auch die weiblichen Schüler\*innen haben ein vergleichbares Alter ( $SD = 0,61$ ). In der Regel sprechen die Schüler\*innen zu Hause hauptsächlich Deutsch, wobei 25,7 % der Schüler\*innen ebenfalls eine zweite Sprache angegeben haben, die sie zu Hause sprechen. Die 105 Schüler\*innen entstammen aus insgesamt sechs siebten Klassen von Gymnasien aus NRW. Von diesen 105 Schüler\*innen mussten fünfzehn Schüler\*innen von der Datenanalyse des Denkens in Analogien ausgeschlossen werden, da von diesen Schüler\*innen die Laut-Denk-Protokolle aufgrund des festen zeitlichen Rahmens der Intervention und aufgrund fehlender relevanter Aussagen zum Denken in Analogien nicht vollständig vorlagen. Von den vorliegenden 90 Schüler\*innen sind 44,4 % weiblich ( $n = 40$ ) und 54,4 % männlich ( $n = 49$ ; 1 fehlende Angabe). Das Durchschnittsalter beträgt 12,46 Jahre. Sowohl die männlichen als auch die weiblichen Schüler\*innen haben ein vergleichbares Alter ( $SD = 0,57$ ). In der Regel besitzen die

---

<sup>19</sup> Die Anzahl der Schüler\*innen erscheint trotz der Teilnahme von drei Schulklassen sehr gering zu sein. Dies liegt jedoch daran, dass es bei der Erhebung noch eine weitere Treatmentgruppe (Betrachtung des Experiments in Zeitlupengeschwindigkeit) gab, welche aufgrund des thematischen Fokus der vorliegenden Dissertation aber nicht in die Analysen eingeflossen sind.

<sup>20</sup> Versuchspersonen 9, 41, 45, 49 und 57

Schüler\*innen Deutsch als Muttersprache, wobei 24,4 % der Schüler\*innen ebenfalls eine zweite Sprache angegeben haben, die sie zu Hause sprechen.

## 4.5 Zusammenfassung der Datenauswertungsmethoden und weiterführende Analysen in SPSS

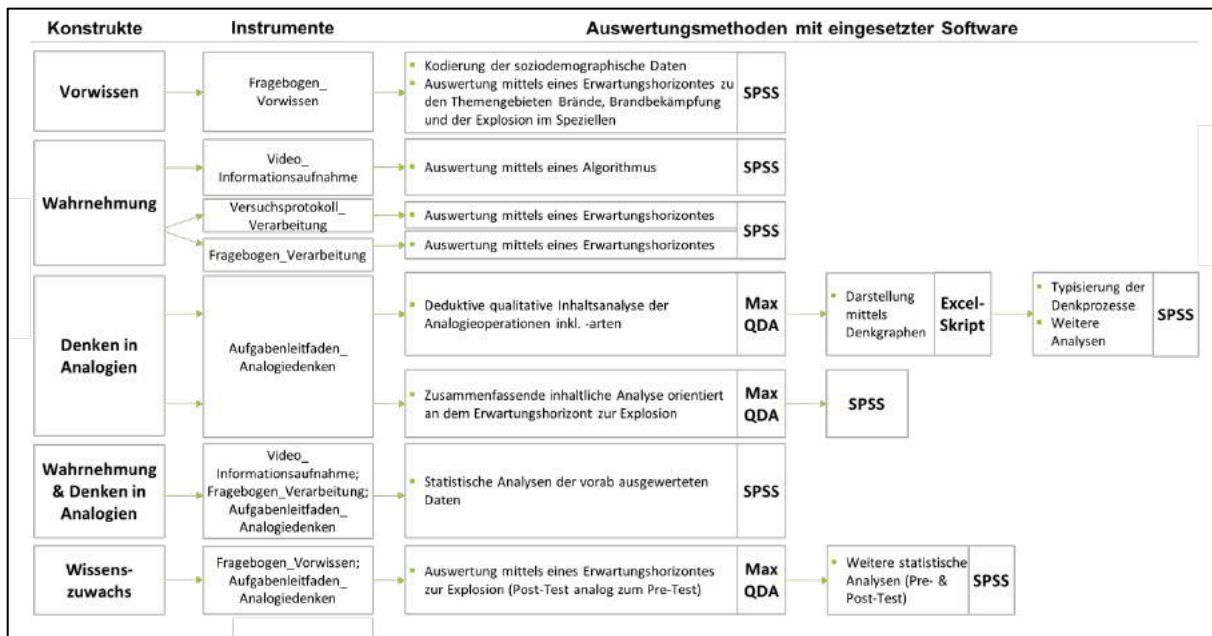


Abbildung 34: Übersicht der Datenauswertungsinstrumente mit softwarebezogenen Datenauswertungsschritten und der Zugehörigkeit zu den einzelnen Konstrukten.

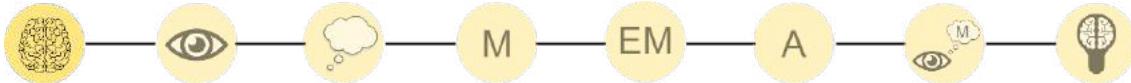
Beim Vergleich der beiden Probandengruppen (Video und Schüler\*innenexperiment) konnte bezüglich der erhobenen Kontrollvariablen (soziodemographische Daten, kognitive Fähigkeiten und Interesse am Chemieunterricht) vor der Studie keine signifikanten Gruppenunterschiede identifiziert werden (Kognitiver Fähigkeitstest:  $U = 1113.500$ ,  $Z = -.756$ ,  $p = .449$ ; Gesamtinteresse am Chemieunterricht:  $U = 1141.000$ ,  $Z = -.331$ ,  $p = .740$ ) (vgl. Anhang 12.13). Diese Analyse war notwendig, um mögliche Unterschiede zwischen den beiden Probandengruppen aufzudecken. Jedoch konnte gezeigt werden, dass sich die Gruppen vor der Studie nicht in den relevanten Merkmalen unterscheiden. Entsprechend wurden diese Variablen bei den folgenden Analysen nicht weiter berücksichtigt.

Zur Beantwortung der Forschungsfragen 1 bis 7 wurden zunächst deskriptive statistische Methoden in SPSS wie Median und Standardabweichungen eingesetzt (vgl. Bühl, 2010, S. 149 ff.; vgl. Abbildung 34). Dabei wurden die deskriptiven Kenndaten u.a. mithilfe von Boxplot-Diagrammen visualisiert. Darüber hinaus wurden weitere statistische Testverfahren zum quantitativen Vergleich der Stichproben eingesetzt. So wurden die Daten mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung geprüft. Der Kolmogorov-Smirnov-Test ergab für alle Variablen, dass die

verfügbaren Daten nicht normalverteilt sind ( $p < .001$ ) (vgl. Bühl, 2010, S. 368 f.). Daher wurden non-parametrische Methoden (z.B. Rangkorrelation nach Spearman und Wilcoxon-Test) zur weiteren Datenanalyse verwendet. Der Wissenszuwachs wurde im Bereich der Bedingungen für eine Staubexplosion zwischen dem Pre-Testzeitpunkt und dem Post-Testzeitpunkt nach der Intervention insgesamt über den Wilcoxon-Test gemessen. Der Wilcoxon-Test überprüft, ob sich die zentralen Tendenzen zu den unterschiedlichen Testzeitpunkten hinsichtlich der vergleichenden Zielvariable (Bedingungen für eine Explosion) unterscheiden.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Vorwissen



**Ziel I.** Identifizierung des Vorwissens zu den Bedingungen für das Auftreten einer Staubexplosion

(Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse auf S. 128 f.)

Das Vorwissen der Schüler\*innen zu den Themen Verbrennungen und Explosions bildet eine Grundlage für das Denken in Analogien. Dieses Vorwissen der Schüler\*innen wurde mit einem Fragebogen mit offenen und geschlossenen Items (vgl. Anhang 12.3) erhoben. Die Antworten der offenen Items wurden mittels qualitativer Inhaltsanalyse kategorisiert und die geschlossenen Items mithilfe einer Musterlösung kodiert (vgl. Abschnitt 4.3.1.2 & Anhang 12.4).

Die im Folgenden präsentierten Ergebnisse des Fragebogens zur Erhebung des Vorwissens beziehen sich auf die verbundene Stichprobe aller Schüler\*innen, die an der Studie teilgenommen haben. Die Schüler\*innen haben bei der Studie entweder das Modellexperiment selbstständig durchgeführt (Schüler\*innenexperiment) oder es als Video präsentiert (Video) bekommen (vgl. Abschnitt 4.4). Die gemeinsame Darstellung der Daten beider Probandengruppen ist möglich, da sie sich in den erhobenen Kontrollvariablen nicht signifikant unterschieden (vgl. Abschnitt 4.5) und gleichzeitig ausschließlich die fachlichen Voraussetzungen zu den Themengebieten Verbrennungen und Explosionen dargestellt werden.

Aufgrund des Zusammenhangs zwischen dem Konzept der Verbrennung und dem Konzept einer Explosion wird zur Analyse des Vorwissens bzgl. der Explosionen die Antworten des Item 1 hinzugezogen. Item 1 erhebt das Vorwissen der Schüler\*innen in Bezug auf das Konzept der Verbrennung. Dieses Vorgehen ist dadurch legitimiert, dass das Explosionspentagon mit den Bedingungen für eine Explosion eine Erweiterung des Verbrennungsdreiecks darstellt.

Folgend sind die Antwortergebnisse der Schüler\*innen bezüglich der einzelnen Bedingungen des Verbrennungsdreiecks dargestellt:

- Brennstoff (Tabelle 17),
- Zündquelle (Tabelle 18),
- Sauerstoff (Tabelle 19).

Als Bedingung zum Entzünden eines Feuers wurden häufig die Komponenten *Brennstoff* und *Zündquelle* genannt. So gaben 73,4 % (n = 77) der Schüler\*innen ein

## 5 Ergebnisse

---

Beispiel für einen Brennstoff oder den Oberbegriff Brennstoff und 75,3 % (n = 79) der Schüler\*innen ein Beispiel für eine Zündquelle oder den Oberbegriff Zündquelle an (vgl. Tabelle 17 und Tabelle 18). Ungefähr jede\*r Fünfte notierte keine relevante Aussage.

Tabelle 17: Häufigkeitsverteilung der Ergebnisse zur Aufgabe „Notiere die Bedingungen, die nötig sind, um ein Feuer zu entzünden.“ bzgl. der Komponente Brennstoff.

Ergebnis der Aufgabe	Prozentuale (absolute) Häufigkeit
Kein relevantes Beispiel wird genannt	21,0 % (22)
Ein Beispiel wird genannt	21,0 % (22)
Ein Oberbegriff wird genannt	52,4 % (55)
Fehlerhafte bzw. fehlende Werte	5,7 % (6)

Tabelle 18: Häufigkeitsverteilung der Ergebnisse zur Aufgabe „Notiere die Bedingungen, die nötig sind, um ein Feuer zu entzünden.“ bzgl. der Komponente Zündquelle.

Ergebnis der Aufgabe	Prozentuale (absolute) Häufigkeit
Kein relevantes Beispiel wird genannt	19,0 % (20)
Ein Beispiel wird genannt	62,9 % (66)
Ein Oberbegriff wird genannt	12,4 % (13)
Fehlerhafte bzw. fehlende Werte	5,7 % (6)

Zudem nannten mehr als die Hälfte aller Schüler\*innen (n = 56, 53,4 %) Luft oder Sauerstoff bewusst als eine Komponente für eine Verbrennungsreaktion (vgl. Tabelle 19). Andererseits erkannte nahezu die Hälfte aller Schüler\*innen (n = 44, 41,9 %) nicht die Bedeutung der Luft bzw. des Sauerstoffes als relevante Bedingung.

Tabelle 19: Häufigkeitsverteilung der Ergebnisse zur Aufgabe „Notiere die Bedingungen, die nötig sind, um ein Feuer zu entzünden.“ bzgl. der Komponente Sauerstoff.

Ergebnis der Aufgabe	Prozentuale (absolute) Häufigkeit
Kein relevantes Beispiel wird genannt	41,9 % (44)
Luft wird genannt	4,8 % (5)
Sauerstoff wird genannt	48,6 % (51)
Fehlerhafte bzw. fehlende Werte	4,8 % (5)

In Tabelle 20 ist die Verteilung der prozentualen Häufigkeit bzgl. der Anzahl relevanter Antworten zu Item 6 „Erkläre, was eine Explosion ist.“ (vgl. Abbildung 13) dargestellt. Das Item fragt nach den fünf Bedingungen für das Entstehen einer Explosion sowie deren Auswirkungen. Dabei wurden vom größten Teil der Schüler\*innen (n = 72, 68,6 %) keine bis lediglich sehr undifferenzierte Beispiele für das Vorkommen von Explosionen angegeben, beispielsweise *Auto*, *Feuerwerk*, *Sprengstoff* und *Benzinexplosion* (vgl. Tabelle 20, Zeile 2). Jede\*r Achte (n = 13, 12,4 %) notierte mindestens zwei konkrete Bedingungen, die gegeben sein müssen, damit eine Explosion ausgelöst wird.

Tabelle 20: Häufigkeitsverteilung der Ergebnisse zur Aufgabe „Erkläre, was eine Explosion ist.“.

Ergebnis der Aufgabe	Prozentuale (absolute) Häufigkeit
<b>Keine</b> relevanten Bedingungen, die zur Entstehung einer Explosion führen, werden in einem Verbrennungskontext genannt.	68,6 % (72)
<b>Eine</b> relevante Bedingung, die zur Entstehung einer Explosion führt, wurde in einem Verbrennungskontext genannt.	19,0 % (20)
<b>Zwei</b> Bedingungen die zur Entstehung einer Explosion führen, werden in einem Verbrennungskontext genannt (Stoff und Zündquelle; Stoff und Sauerstoff; Sauerstoff und Zündquelle).	12,4 % (13)

Weiterführend differenziert Item 7 („Begründe, welche Bedingungen gegeben sein müssen, damit es zu einer Explosion kommt.“, vgl. Abbildung 14), wie die einzelnen Bedingungen für das Zustandekommen einer Explosion miteinander in Beziehung stehen (vgl. Abbildung 5). In Tabelle 21 ist die Verteilung der prozentualen Häufigkeit bzgl. der Anzahl relevanter Antworten zu Item 7 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass auch Schüler\*innen, die bei dem vorherigen Item keine relevanten Bedingungen angegeben haben, in diesem Item relevante Beziehungen notiert haben. So konnten 39,1% aller Schüler\*innen ( $n = 41$ ) einen Zusammenhang zwischen verschiedenen Bedingungen (zwei bis vier Bedingungen), die für das Eintreten einer Explosion relevant sind, benennen.

Tabelle 21: Häufigkeitsverteilung der Ergebnisse zur Aufgabe „Begründe, welche Bedingungen gegeben sein müssen, damit es zu einer Explosion kommt.“.

Ergebnis der Aufgabe	Prozentuale (absolute) Häufigkeit
<b>Keine</b> relevante Beziehung wird genannt.	39,1 % (41)
<b>Eine</b> Bedingung wird genannt.	21,9 % (23)
<b>Zwei</b> Bedingungen werden in Beziehung gesetzt.	32,4 % (34)
<b>Drei</b> Bedingungen werden in Beziehung gesetzt.	5,7 % (6)
<b>Vier</b> Bedingungen werden in Beziehung gesetzt.	1,0 % (1)

Eine qualitative Analyse der in Item 7 genannten Beziehungen zwischen den verschiedenen Bedingungen ermöglicht Aussagen darüber, welche auf dem Explosionspentagon basierenden konkreten Bedingungen vor der Intervention von den Schüler\*innen als relevant erkannt wurden (Abbildung 35). Dabei konnten am häufigsten die Bedingungen Brennbarer Stoff ( $n = 32$ ) und Zündquelle ( $n = 44$ ) identifiziert werden. Die Verbindungslien innerhalb des Explosionspentagons zeigen, dass die Beziehung zwischen der Zündquelle und dem Stoff erkannt wurde. Die Beziehung zwischen Sauerstoff und Zündquelle wurde teilweise genannt. Die Bedingung der Verteilung/Aufwirbelung wurde von den Schüler\*innen nicht genannt.

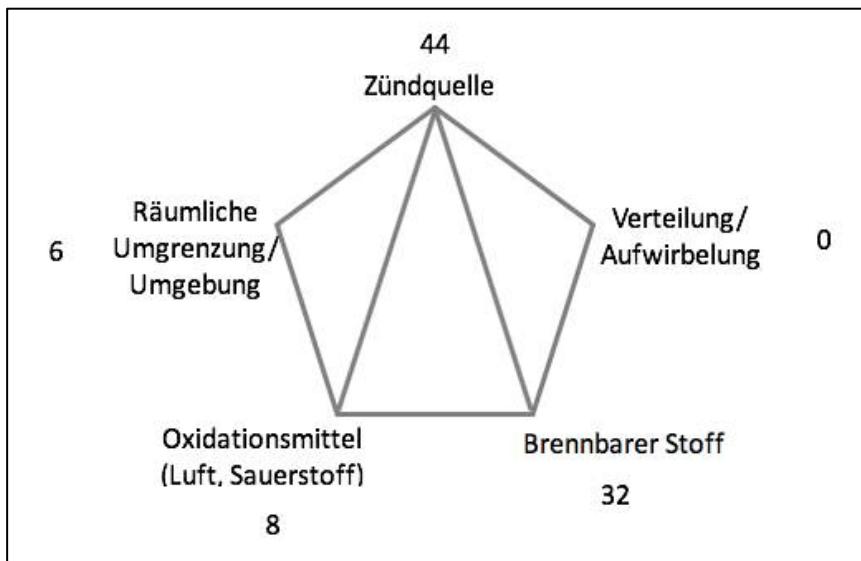


Abbildung 35: Von den Schüler\*innen genannte Bedingungen für eine Staubexplosion und deren absolute Häufigkeiten mit erkannten Beziehungen.

Bei Explosionen besitzt der verwendete Stoff eine hohe Relevanz für das Eintreten sowie die Art einer Explosion. Um die Vorstellungen zu verschiedenen Stoffen und ihrer Explosivität zu erhalten, wurde im Fragebogen zur Erhebung des Vorwissens in Item 8 nach der Explosivität verschiedener Stoffe gefragt. In Tabelle 22 sind die Ergebnisse aller Schüler\*innen zur Beurteilung der Explosivität von Stoffen als prozentuale und absolute Anteile dargestellt. Des Weiteren ist die korrekte Antwort aufgeführt.

Tabelle 22: Ergebnisse der Beurteilung der Explosivität von Stoffen im Vergleich zur korrekten Antwort (Die grüne Einfärbung einer Zeile gibt an, dass die Mehrheit der Schüler\*innen den jeweiligen Stoff korrekt nach dessen Explosivität eingestuft hat).

	Explosiv	Nicht Explosiv	Weiß nicht	Fehlerhafte Werte	Korrekte Antwort
<b>Backpulver</b>	31 % (33)	40 % (42)	25 % (26)	4 % (4)	Nicht explosiv
<b>Betonstaub</b>	6 % (6)	53 % (56)	34 % (36)	7 % (7)	Explosiv
<b>Mehlstaub</b>	16 % (17)	54 % (57)	25 % (26)	5 % (5)	Explosiv
<b>Sand</b>	2 % (2)	79 % (83)	16 % (17)	3 % (3)	Nicht explosiv
<b>Schwarzpulver</b>	79 % (83)	4 % (4)	13 % (14)	4 % (4)	Explosiv
<b>Benzindampf</b>	76 % (80)	10 % (10)	11 % (12)	3 % (3)	Explosiv
<b>Erdgas</b>	85 % (89)	3 % (3)	9 % (9)	3 % (4)	Explosiv
<b>Kohlenstoff-dioxidgas</b>	51 % (54)	16 % (17)	27 % (28)	6 % (6)	Nicht explosiv
<b>Öldampf</b>	52 % (55)	17 % (18)	27 % (28)	4 % (4)	Explosiv
<b>Wasserdampf</b>	5 % (5)	68 % (71)	21 % (22)	6 % (7)	Nicht explosiv

Von den sechs **explosiven** Stoffen (Betonstaub, Mehlstaub, Schwarzpulver, Benzindampf, Erdgas und Öldampf) wurden vier Stoffe (Schwarzpulver, Benzindampf, Erdgas, Öldampf) von der Mehrheit der Schüler\*innen richtig erkannt. Die Stoffe Mehlstaub und Betonstaub wurden fälschlicherweise häufig als nicht explosiv beurteilt.

Unter den vier **nicht explosiven** Stoffen (Backpulver, Sand, Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf) wurden drei Stoffe (Backpulver, Sand, Wasserdampf) von der Mehrheit der Schüler\*innen in Bezug auf ihre Explosivität richtig eingestuft. Lediglich das Kohlenstoffdioxidgas wurde ungefähr von der Hälfte aller Schüler\*innen fälschlicherweise als explosiv eingeschätzt.

Bei den vorgegebenen Stoffen handelte es sich um fünf feste und fünf gasförmige Stoffe. Insgesamt fällt auf, dass gasförmige Stoffe (Ausnahme Wasserdampf) von der Mehrheit der Schüler\*innen als explosiv beurteilt wurden, während feste Stoffe (Ausnahme Schwarzpulver) hingegen als nicht explosiv einstuft wurden.

Zur Analyse der Anzahl der Stoffe, die durch einzelne Schüler\*innen korrekt eingeschätzt wurden, wurde pro Schüler\*in aus den korrekten Antwortwerten ein Score gebildet. Aufgrund der 10 gleichberechtigten Stoffe konnten so maximal 10 Punkte von jedem\*jeder Schüler\*in erreicht werden. Abbildung 36 zeigt die jeweiligen Anteile der Schüler\*innen, die einen jeweiligen Punktewert von den maximal 10 zu erreichenden Punkten erzielt haben. Der Mittelwert liegt bei 5,27 (Median bei 5,0, SD = 1,48). Wird ein Ergebnis von unter fünf Punkten als unterdurchschnittliches Ergebnis bewertet, so zeigten 27,7 % der Schüler\*innen ( $n = 29$ ) solche unterdurchschnittlichen Ergebnisse.

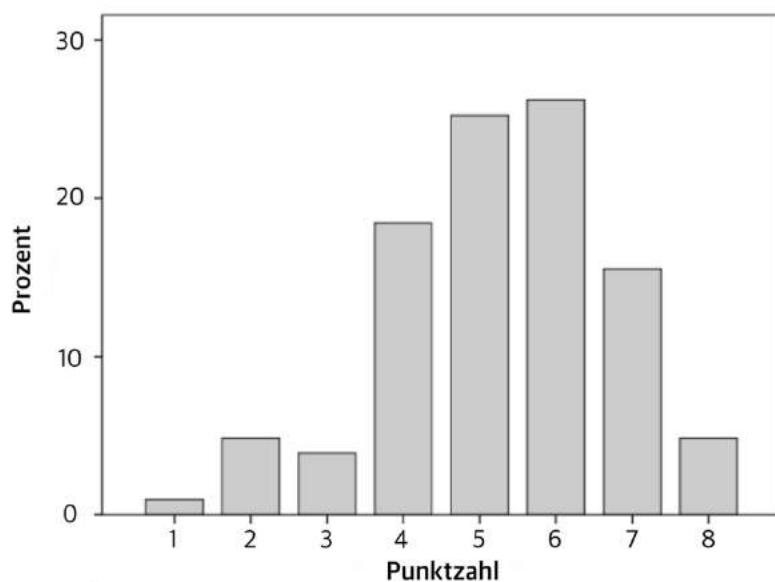


Abbildung 36: Prozentuale Verteilung der Gesamtpunktzahl bei der Explosivitätseinschätzung explosiver Stoffe ( $n = 103$ , 2 fehlend).

Wird ein Ergebnis von fünf und mehr Punkten als überdurchschnittliches Ergebnis bewertet, so haben 70,5 % aller Schüler\*innen ( $n = 74$ ) ein solches Ergebnis gezeigt. Dabei wurde der Median von 26 Schüler\*innen (24,8 %) erreicht. Der größte Anteil der Schüler\*innen hat sechs Stoffe korrekt eingestuft ( $n = 27$ , 25,7 %). Die prozentualen Anteile nehmen von dort zu größeren und kleineren Werten ab. Acht Punkte wurden von 4,8 % der Schüler\*innen ( $n = 5$ ) erreicht. Eine volle Punktzahl von zehn Punkten erreichte kein\*e Schüler\*in.

Um zu analysieren, auf welchen Eigenschaften die Explosivitätseinschätzungen der Schüler\*innen basierte, wurde nach den Gründen für die Explosivität von Stoffen gefragt. Tabelle 23 zeigt, dass für die Explosivität die Eigenschaften *Brennbarkeit* von 21,9 % der Schüler\*innen ( $n = 23$ ) als Hauptgrund genannt wurde. Von diesen 22,9 % hat 1 % ( $n = 1$ ) noch zusätzlich die große Oberfläche eines Stoffes als Bedingung für das Entstehen einer Explosion angegeben.

Tabelle 23: Häufigkeitsverteilung der Ergebnisse zur Aufgabe „Warum können manche Stoffe explodieren und manche nicht?“

Ergebnis der Aufgabe	Prozentuale (absolute) Häufigkeit
Falsche bzw. irrelevante Aussage	52,4 % (55)
Eigenschaft <i>brennbar</i> wird genannt	21,9 % (23)
Eigenschaften <i>brennbar</i> und <i>große Oberfläche</i> werden genannt	1,0 % (1)
Fehlerhafte bzw. fehlende Werte	24,8 % (26)

Beim Betrachten der vorgestellten Ergebnisse fällt insgesamt auf, dass im Bezug zum Gegenstand Explosion häufig irrelevante, alltagsgeprägte und teilweise auch fachwissenschaftlich nicht korrekte Aussagen von den Schüler\*innen im Fragebogen zum Vorwissen notiert wurden.

### 5.1.1 Vergleich des spezifischen Vorwissens der Probandengruppen zur Charakterisierung des Leistungsspektrums

Es soll geprüft werden, ob sich das Leistungsspektrum der Probandengruppen (Schüler\*innenexperiment und Video) voneinander unterscheidet. Dazu werden die zuvor vorgestellten Ergebnisse der relevanten Items zur Verbrennung und Explosion noch einmal gruppenbezogen betrachtet.

#### **Punktzahl des Fragebogens zum Vorwissen der Probandengruppen zum Thema Verbrennungen und Explosion**

Aufgrund der hohen Relevanz der Items 1, 6 und 8 für die Intervention und die Bearbeitung der weiteren Erhebungsinstrumente wurde aus diesen Items ein Gesamtscore gebildet (vgl. Abschnitt 4.3.1.1 – Instrument *Fragebogen\_Vorwissen*). In Abbildung 37 sind die Ergebnisse der Gesamtpunktzahl des Fragebogens zum Vorwissen differenziert nach den beiden Probandengruppen abgebildet.

Im Hinblick auf die Gesamtpunktzahl des spezifischen Vorwissens kann anhand der Boxplot-Diagramme deskriptiv erkannt werden, dass sich die Mediane der beiden Probandengruppen entsprechen (vgl. Abbildung 37). So liegen die Mediane der Video- und Schüler\*innenexperimente-Gruppe bei 9,00 ( $SD = 2,8$ ). Dabei sind auch die Intervalle, in denen sich jeweils 50 % der Versuchspersonen der jeweiligen Gruppe befinden, auf einem vergleichbaren Niveau angesiedelt (Vorwissen Video: 7,00 – 11,00; Vorwissen Schüler\*innenexperiment: 7,00 – 10,75). Lediglich in den maximalen und minimalen Werten unterscheiden sich die beiden Probandengruppen minimal: So weist die Video-Gruppe ein Minimum von 2 Punkten und ein Maximum von 14 Punkten auf. Das Intervall zwischen Minimum und Maximum ist bei der Schüler\*innenexperimente-Gruppe etwas größer (Min = 0, Max = 15).

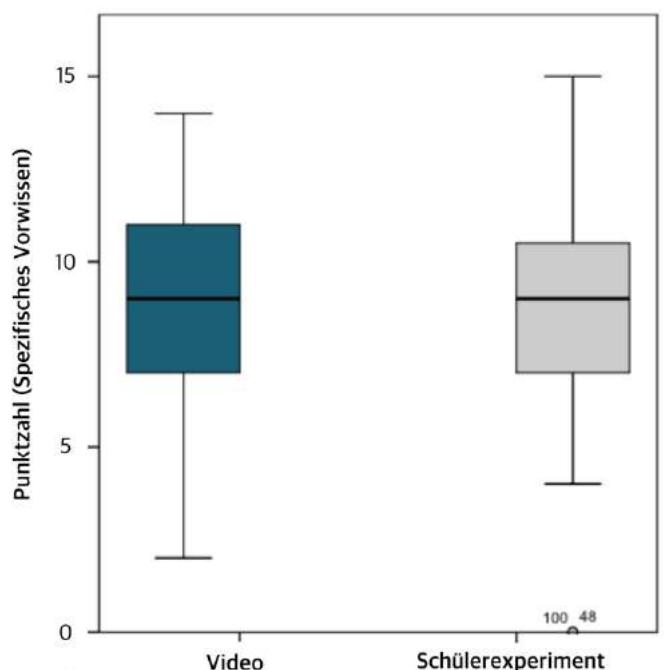


Abbildung 37: Punktzahl Vorwissen der Schüler\*innen differenziert nach Video- und Schüler\*innenexperiment-Gruppe (Kreise mit der jeweiligen Versuchspersonennummer stehen für einzelne Ausreißer, vgl. Anhang 12.13).

Trotz der deskriptiven Homogenität der Ergebnisse der beiden Probandengruppen wurde überprüft, ob sich das Vorwissen statistisch unterscheidet. Zunächst wurde der Kolmogorov-Smirnov-Test eingesetzt, um die Variable auf Normalverteilung zu prüfen. Der Test zeigte, dass die vorliegenden Daten des Vorwissens zu den Themen Verbrennungen und Explosionen signifikant nicht normalverteilt sind ( $p_{\text{Vorwissen\_gesamt\_Kolmogorov-Smirnov-Test}} = .002$ ;  $p < .05$  (Bühl, 2010, S. 368 f.)). Eine Anwendung des Mann-Whitney U-Tests auf die Ergebnisse des spezifischen Vorwissens führte dazu, dass zwischen den beiden Probandengruppen kein signifikanter Unterschied identifiziert werden konnte,  $U = 1123.500$ ,  $z = -0.692$ ,  $p = .489$ .

Zusammenfassend konnte mit den Ergebnissen der Variablen *Kognitiver Fähigkeitstest (KFT) (Gesamtscore)* und den beiden *Subtests des KFTs* (V-Test 3 und N-Test 2)

(vgl. Anhang Abbildung 92), der Variable Gesamtinteresse (vgl. Anhang Abbildung 93) und dem spezifischen Vorwissen (vgl. Abbildung 37) nachgewiesen werden, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Probandengruppen vor der Intervention gab. Somit wiesen die Schüler\*innen vergleichbare kognitive Fähigkeiten, ein vergleichbares Maß an Interesse am Chemieunterricht und ein vergleichbares spezifisches Vorwissen auf. Dies ist ein Anzeichen für ein homogenes Leistungsspektrum zwischen den Probandengruppen. Damit können Einflüsse, die bei den weiteren Ergebnissen auf einem heterogenen Vorwissen der Schüler\*innen basieren könnten, vernachlässigt werden.

### *Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse zum themenspezifischen Vorwissen*

Das Vorwissen bzgl. der Bedingungen einer Explosion war bei den Schüler\*innen vor der Intervention rudimentär vorhanden. Auf die Frage „Erkläre, was eine Explosion ist.“ wurde vom größten Teil der Schüler\*innen ( $n = 72$ , 68,6 %) keine bis lediglich sehr undifferenzierte Beispiele für das Eintreten einer Explosion genannt (vgl. Tabelle 20, Zeile 2). Lediglich jede\*r Achte ( $n = 13$ , 12,4 %) notierte mindestens zwei konkrete Bedingungen für das Eintreten einer Explosion. In einer weiterführenden Frage bzgl. der Beziehungen zwischen den Bedingungen konnten am häufigsten die Bedingungen Brennbarer Stoff ( $n = 32$ ) und Zündquelle ( $n = 44$ ) identifiziert werden (vgl. Tabelle 17).

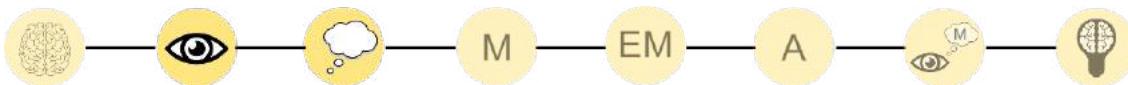
In Bezug auf die Einschätzung der Explosivität von zehn vorgegebenen Stoffen, konnten 70,5 % aller Schüler\*innen ( $n = 74$ ) ein überdurchschnittliches Ergebnis vorweisen. Von den **explosiven** Stoffen (Betonstaub, Mehlstaub, Schwarzpulver, Benzindampf, Erdgas und Öldampf) wurden vier Stoffe (Schwarzpulver, Benzindampf, Erdgas, Öldampf) von der Mehrheit der Schüler\*innen richtig erkannt. Nicht als explosiv beurteilt und damit nicht richtig erkannt wurden die Stoffe Mehlstaub und Betonstaub. Dabei fällt auf, dass gasförmige Stoffe (Ausnahme Wasserdampf) von der Mehrheit der Schüler\*innen als explosiv beurteilt werden, feste Stoffe mit der Ausnahme von Schwarzpulver hingegen als nicht explosiv einstuft werden. Als Grund für die Explosivität eines Stoffes wurde die Eigenschaft *Brennbarkeit* von 22,9 % der Schüler\*innen ( $n = 23$ ) genannt (vgl. Tabelle 23).

Zwischen den Probandengruppen konnte in der Variable *spezifisches Vorwissen* (vgl. Abbildung 37) in Bezug auf die Themen Verbrennungen und Explosion (Item 1, 6 und 8 (vgl. Anhang 12.13)) kein signifikanter Unterschied identifiziert werden, wodurch Einflüsse, die bei den weiteren Ergebnissen auf einem heterogenen Vorwissen der Schüler\*innen basieren könnten,

vernachlässigt werden können, Mann-Whitney U-Test:  $U = 1123.500$ ,  $z = -0.692$ ,  $p = .489$ .

*Die in dieser Zwischenzusammenfassung dargestellten Ergebnisse werden auf S. 205 ff. diskutiert.*

## 5.2 Wahrnehmung des Modellexperiments



**Ziel II.** Identifizierung der Informationsaufnahmeprozesse beim Betrachten eines Modellexperiments zur Staubexplosion und der Ergebnisse einer ersten Verarbeitung dieser Informationen

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse zu den Informationsaufnahmeprozessen beim Betrachten eines Modellexperiments zur Staubexplosion dargestellt. Sie beziehen sich auf die unabhängige Stichprobe ( $N = 31$ ) aller Probanden, die das Eye-Tracking durchgeführt haben.

Die Ergebnisse werden im weiteren Verlauf deskriptiv anhand von Boxplot-Diagrammen dargestellt. Bei den in Abbildung 38 - Abbildung 45 dargestellten Boxplot-Diagrammen wird zwischen den verschiedenen zeitlichen Sequenzen des Videoablaufs sowie verschiedenen Areas of Interest differenziert. In Sequenz 1 des gezeigten Videos wurde der Versuchsaufbau präsentiert, in Sequenz 2 das Modellexperiment ohne Substanz (Vorversuch) und in Sequenz 3 das Modellexperiment mit Substanz (Modellexperiment), bei dem es zu einer Explosion kam. Die Areas of Interest (AOI) sind von oben nach unten entlang der Low-Cost Hartmann Apparatur (LC-HA) nummeriert (1-4). Zusätzliche AOIs außerhalb der LC-HA sind die Bereiche um die Spannungsquelle (5) und um die Luftpumpe (6) (vgl. Abbildung 21). Bei der schriftlichen Darstellung der Ergebnisse wird zwischen den relevanten und irrelevanten Bereichen des Modellexperiments, welche in den unterschiedlichen AOI dargestellt sind, unterschieden. Die für den Explosionsprozess direkt relevanten Bereiche sind in AOI\_1 bis AOI\_4 dargestellt. AOI\_5 und AOI\_6 sind für den Ablauf des Explosionsprozesses selbst irrelevant, aber für die Durchführung des Modellexperiments relevant.

Als Augenbewegungsvariablen wurden der Pupillendurchmesser und die Anzahl der Blinzler der Schüler\*innen erhoben (vgl. Anhang 12.14). Die Schüler\*innen wiesen bei der Untersuchung einen für die während der Untersuchung vorherrschende Helligkeit normalen, durchschnittlichen Pupillendurchmesser von 5 mm auf (vgl. Becker-Carus, 1979, S. 145). Die mittlere Anzahl der Blinzel-Signale zeigte,

dass das Betrachten des Modellexperiments für die Schüler\*innen der 7. Jahrgangsstufe angemessen und nicht zu anspruchsvoll war (vgl. Anhang 12.14). Die Anzahl der Blinzler stieg mit der Länge der einzelnen Video-Sequenzen annähernd proportional von 5 (Sequenz 1) über 14 (Sequenz 2) zu 16 (Sequenz 3) an und veränderte sich während des gesamten Videos nicht.

### *Eye-Tracking Daten*

(Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse auf S. 137 f.)



#### *Sequenz I: Versuchsaufbau*

Beim Betrachten der Fixationsergebnisse differenziert nach den sechs Areas of Interest (AOI) fällt auf, dass sich die Mediane der Fixationsanzahl, Fixationsdauer und der Zeit bis zur ersten Fixation bezüglich des Versuchsaufbaus voneinander unterscheiden (vgl. Abbildung 38 - Abbildung 39, Tabelle 24).

In Abbildung 38 ist die Verteilung der Fixationsanzahl dargestellt. Dies ist die Anzahl, wie häufig ein AOI innerhalb der Präsentation des Versuchsaufbaus betrachtet wurde.

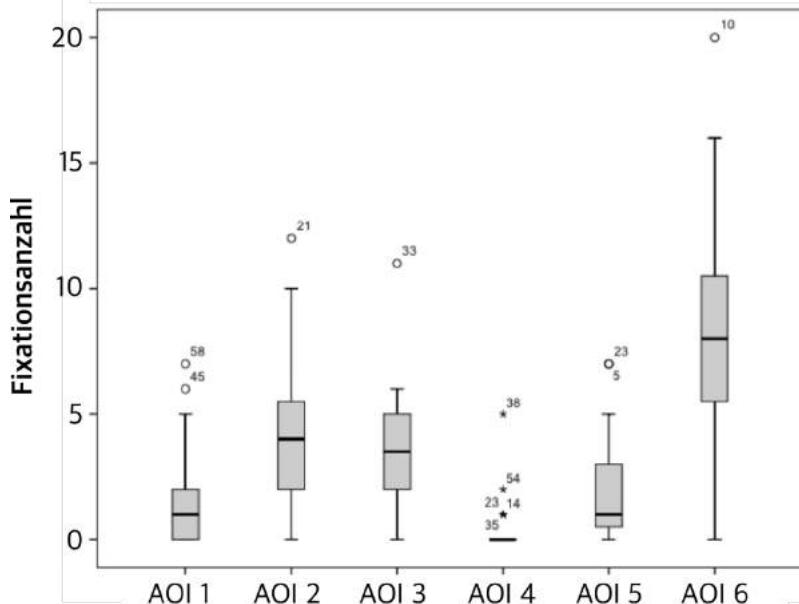


Abbildung 38: Fixationsanzahl der Gesamtstichprobe beim Betrachten des Versuchsaufbaus differenziert nach den Areas of Interest (Kreise und Sterne mit der jeweiligen Versuchspersonennummer stehen für einzelne Ausreißer, vgl. Anhang 12.13).

Während der Betrachtung des Versuchsaufbaus wurden die relevanten AOIs (AOI\_1 – AOI\_4), welche das Plexiglasrohr umspannen, im Mittel zwischen 0- (AOI\_4) und 4-mal (AOI\_2 & AOI\_3) von den Schüler\*innen betrachtet. In AOI\_1 blickten 50 % der Versuchspersonen zwischen 0- und 2-mal, in AOI\_2 zwischen 2- und 6-mal, in AOI\_3 zwischen 2- und 5-mal und in AOI\_4 kein Mal. Jedoch gab es

einzelne Versuchspersonen ( $n = 5$ ), die AOI\_4 maximal 5-mal betrachteten. Die zusätzlichen, für den Explosionsprozess irrelevanten AOIs wurden im Mittel 1-mal (AOI\_5) bzw. 8-mal (AOI\_6) fixiert. Somit ist der Median in AOI\_6 am höchsten. 50 % der Versuchspersonen fixierten zwischen 0- und 3-mal AOI\_5 und zwischen 5- und 11-mal AOI\_6. Während der Betrachtung des Versuchsaufbaus wurden alle AOIs mindestens von einer Versuchsperson gar nicht betrachtet (Minimum).

Der gleiche Trend ist auch für die nach AOI differenzierte Fixationsdauer in Sekunden in Abbildung 39 zu erkennen. Die Mediane der Fixationsdauer von AOI\_1, AOI\_2 und AOI\_3 schwankten zwischen 0,19 Sekunden (s) und 0,94 s. AOI\_4 wies auch in der Fixationsdauer einen Median von 0 s auf. Der Median von AOI\_6 war am höchsten und betrug 2,21 s.

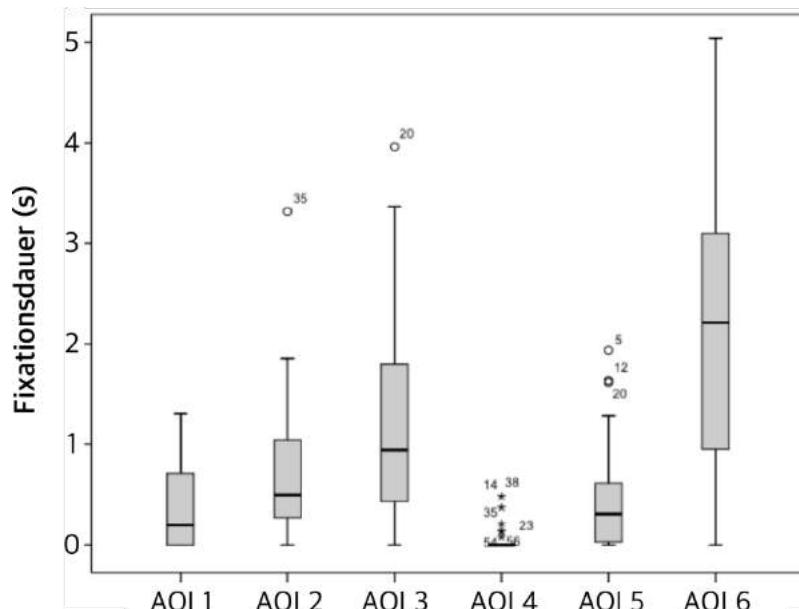


Abbildung 39: Fixationsdauer der Gesamtstichprobe beim Betrachten des Versuchsaufbaus differenziert nach den Areas of Interest (Kreise und Sterne mit der jeweiligen Versuchspersonennummer stehen für einzelne Ausreißer, vgl. Anhang 12.13).

Neben der Fixationsanzahl und Fixationsdauer ist die Zeitdauer, bis eine bestimmte AOI zum ersten Mal betrachtet wird, wichtig (erste Fixation). Bezuglich dieser Zeit sind einige Kenndaten in Tabelle 24 dargestellt. Zuerst wurde im Mittel in AOI\_2 (0,7 s) geblickt, dann über AOI\_6 (2 s), AOI\_1 (6 s), AOI\_3 (6 s), AOI\_4 (7 s) zu AOI\_5 (8 s).

Es war nicht möglich, ein Boxplot-Diagramm mit der Zeit bis zur ersten Fixation zu erstellen, da einige Bereiche von einigen Versuchspersonen gar nicht betrachtet wurden. Das führte dazu, dass es für die Zeit bis zur ersten Fixation innerhalb einer jeden Area of Interest keine vollständig gültigen Werte gab (siehe Tabelle 24). Die Anzahl der Versuchspersonen ohne gültige Werte variierte dabei zwischen 2 und 26 Versuchspersonen.

## 5 Ergebnisse

---

Tabelle 24: Erste Fixation der Gesamtstichprobe beim Betrachten des Versuchsaufbaus differenziert nach den Areas of Interest.

N ...	... für die gültige Werte vorliegen	AOI 1	AOI 2	AOI 3	AOI 4	AOI 5	AOI 6
	... für die keine gültigen Werte vorliegen	12	2	5	26	8	2
<b>Mittelwert</b>		6,73 s	1,01 s	6,57 s	7,84 s	8,10 s	2,07 s
<b>Median</b>		5,65 s	0,72 s	6,41 s	7,45 s	7,89 s	1,51 s
<b>Standardabweichung</b>		2,47 s	1,08 s	2,59 s	2,83 s	2,61 s	2,13 s
<b>Minimum</b>		3,74 s	0,00 s	3,49 s	4,82 s	4,41 s	0,00 s
<b>Maximum</b>		11,49 s	4,47 s	12,38 s	12,41 s	12,59 s	10,73 s
<b>Perzentile</b>		25	4,87 s	0,11 s	4,17 s	5,31 s	1,10 s
		50	5,65 s	0,72 s	6,41 s	7,45 s	7,89 s
		75	8,67 s	1,46 s	7,71 s	10,21 s	10,50 s
							2,06 s

Es gilt zu beachten, dass für die Beobachtung des Versuchsaufbaus im Unterschied zu den anderen beiden Videosequenzen (Vorversuch und Modellexperiment) die einzelnen AOIs beschriftet waren. Ein Großteil der Beschriftungen befand sich in AOI\_6, was zu einer Verzerrung der Messergebnisse hin zu einer Übergewichtung von AOI\_6 führen könnte.

### Sequenz II: Vorversuch

Abbildung 40 zeigt die differenzierte Fixationsanzahl während der Betrachtung des Vorversuchs (Sequenz II) für jede einzelne Area of Interest.

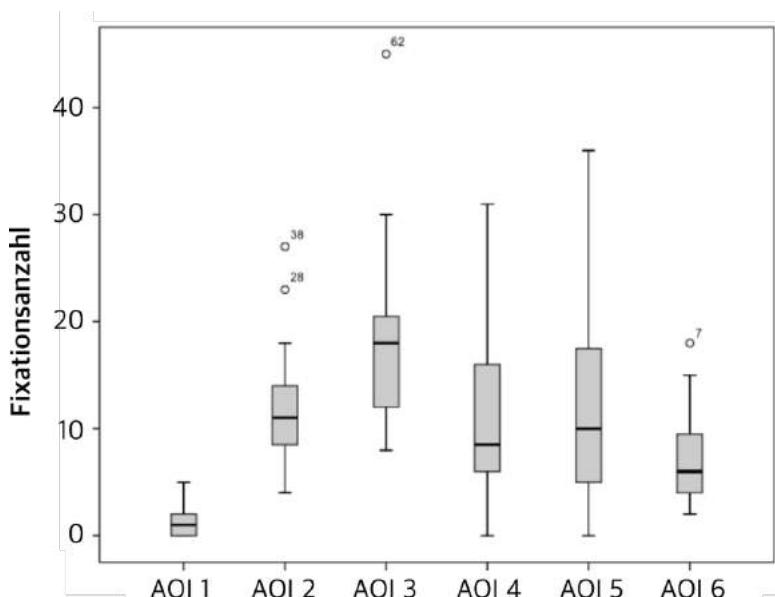


Abbildung 40: Fixationsanzahl der Gesamtstichprobe beim Betrachten des Vorversuchs differenziert nach den Areas of Interest (Kreise und Sterne mit der jeweiligen Versuchspersonennummer stehen für einzelne Ausreißer, vgl. Anhang 12.13).

Während der Betrachtung des Vorversuchs lagen die Mediane der Fixationsanzahl bei den relevanten AOIs zwischen 1 und 18. Die mittlere Fixationsanzahl stieg von AOI\_1 (1-mal) über AOI\_4 (9-mal) und AOI\_2 (11-mal) zu AOI\_3 (18-mal) an. Die Größe der Intervalle, in denen die Fixationsanzahl von 50 % der Versuchspersonen lag, stieg im Gegensatz zur mittleren Fixationsanzahl von AOI\_1 (0- und 2-mal), über AOI\_2 (8- und 14-mal) und AOI\_3 (12- und 21-mal) zu AOI\_4 (6- und 16-mal) an.

In den irrelevanten AOIs lag der Median bei 6 (AOI\_6) bzw. 10 (AOI\_5). 50 % der Versuchspersonen blickten in AOI\_6 zwischen 4- und 10-mal und in AOI\_5 zwischen 5- und 18-mal. Insgesamt wurden AOI\_1, AOI\_4 und AOI\_5 mindestens von einer Versuchsperson gar nicht betrachtet (Minimum).

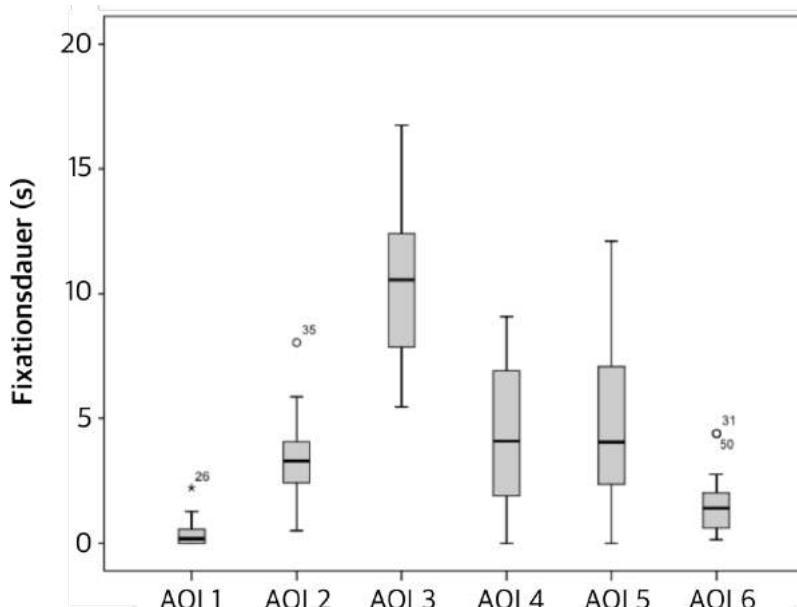


Abbildung 41: Fixationsdauer der Gesamtstichprobe beim Betrachten des Vorversuchs differenziert nach den Areas of Interest (Kreise und Sterne mit der jeweiligen Versuchspersonennummer stehen für einzelne Ausreißer, vgl. Anhang 12.13).

Die differenzierte Fixationsdauer ist in Abbildung 41 dargestellt. AOI\_2, AOI\_3 und AOI\_6 wurden von allen Versuchspersonen fixiert. Im Mittel wurde von den Schüler\*innen am längsten die relevante AOI\_3 mit einem Median von 10,55 Sekunden betrachtet. AOI\_1 wurde im Mittel am kürzesten fixiert (0,19 s). Der Median der Fixationsdauer in AOI\_2 lag bei 3,29 s, der in AOI\_4 bei 4,08 s. Die mittlere Fixationsdauer in der irrelevanten AOI\_5 lag bei 4,08 s. AOI\_6 wurde im Mittel 1,41 s lang fixiert.

Abbildung 42 zeigt die nach AOI differenzierte Zeit bis zur ersten Fixation in Sekunden. Es wurden alle AOIs bis auf AOI\_4 von mindestens einer Versuchsperson direkt, d.h. nach null Sekunden betrachtet. Dabei wurde im Mittel zuerst die relevante AOI\_2 nach 1 Sekunde betrachtet. Daran knüpften AOI\_3 (4 s) und anschließend die für die Durchführung des Modellexperiments relevanten, aber für den

Explosionsprozess irrelevanten Areas of Interest AOI\_6 (6 s) und AOI\_5 (6 s) sowie AOI\_1 (8 s) und AOI\_4 (10 s) an.

Bei der AOI\_2 benötigten 50 % der Versuchspersonen zwischen 0,5 s und 10 s, um das erste Mal in diese Area of Interest zu schauen. In AOI\_3 blickten 50 % der Versuchspersonen zum ersten Mal nach 0,1 s bis 4 s, in AOI\_1 zwischen 5 s und 10 s, AOI\_4 zwischen 6 s und 12 s. Das Intervall für die Zeit bis zur ersten Fixation, in der 50 % der Versuchspersonen eine AOI fixierten, wurde bei den irrelevanten AOIs im Vergleich zu den relevanten AOIs größer. So blickten 50 % der Versuchspersonen zum ersten Mal in AOI\_5 zwischen 4 und 16 s und in AOI\_6 zwischen 0,2 und 16 s.

Insgesamt wurden AOI\_1 von 13 Versuchspersonen und AOI\_4 sowie AOI\_5 von jeweils einer Versuchsperson nicht betrachtet.

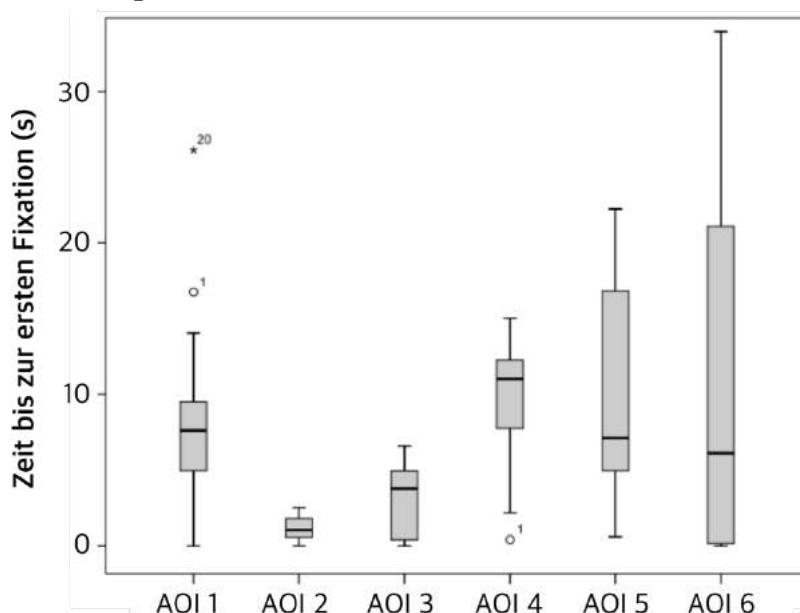


Abbildung 42: Zeit bis zur ersten Fixation innerhalb eines AOIs der Gesamtstichprobe beim Betrachten des Vorversuchs differenziert nach den Areas of Interest (Kreise und Sterne mit der jeweiligen Versuchspersonennummer stehen für einzelne Ausreißer, vgl. Anhang 12.13).

### Sequenz III: Modellexperiment

Abbildung 43 zeigt die differenzierte Fixationsanzahl während der Betrachtung des konkreten experimentellen Prozesses mit eingesetzter Substanz, bei dem es zur Explosion kommt, für jede einzelne AOI.

Während der Betrachtung des Modellexperiments lagen die Mediane der Fixationsanzahl bei den relevanten AOIs zwischen 0 und 17. Die mittlere Fixationsanzahl stieg von AOI\_1 (0-mal) über AOI\_2 (8-mal) und AOI\_3 (15-mal) zu AOI\_4 (17-mal) an. Die Größe der Intervalle, in denen die Fixationsanzahl von 50 % der Versuchspersonen lag, folgte dem Trend und stieg von AOI\_1 (0- und 1-mal), über AOI\_2 (6- und 10-mal) und AOI\_3 (10- und 25-mal) zu AOI\_4 (10- und 29-mal) an.

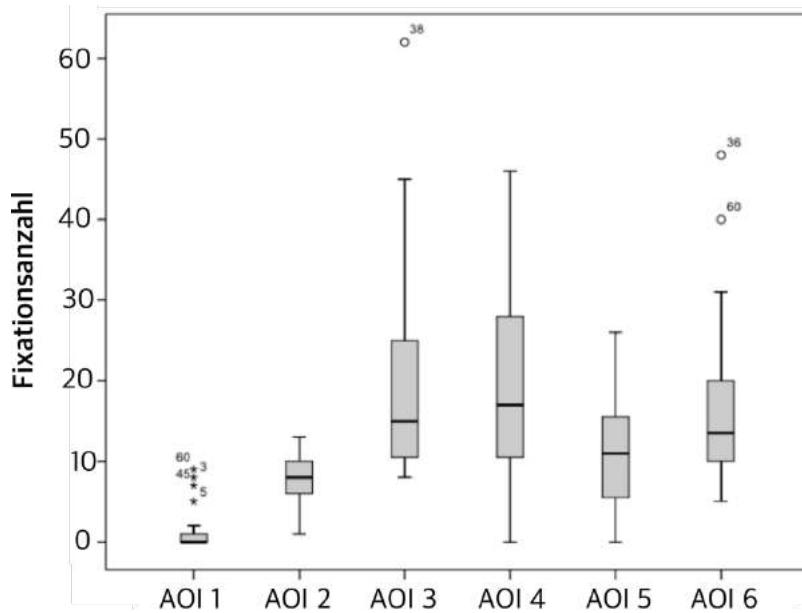


Abbildung 43: Fixationsanzahl der Gesamtstichprobe beim Betrachten des Modellexperiments differenziert nach den Areas of Interest (Kreise und Sterne mit der jeweiligen Versuchspersonennummer stehen für einzelne Ausreißer, vgl. Anhang 12.13).

Die zusätzlichen, für den Explosionsprozess irrelevanten AOIs wurden von den Schüler\*innen im Mittel 11-mal (AOI\_5) bzw. 14-mal (AOI\_6) fixiert und lagen mit ihren Medianen zwischen den relevanten AOIs AOI\_2 und AOI\_3. Dabei wiesen die Intervalle, in denen die Fixationsanzahl von 50 % der Versuchspersonen in Bezug auf die irrelevanten AOIs lag, eine ähnliche Größe auf wie bei den relevanten AOIs: AOI\_5 zwischen 5- und 16-mal und AOI\_6 zwischen 10- und 20-mal. Insgesamt gab es drei AOIs, die von einigen Versuchspersonen gar nicht betrachtet wurden (AOI\_1, AOI\_4, AOI\_5).

In Abbildung 44 ist die nach AOI differenzierte Fixationsdauer in Sekunden dargestellt.

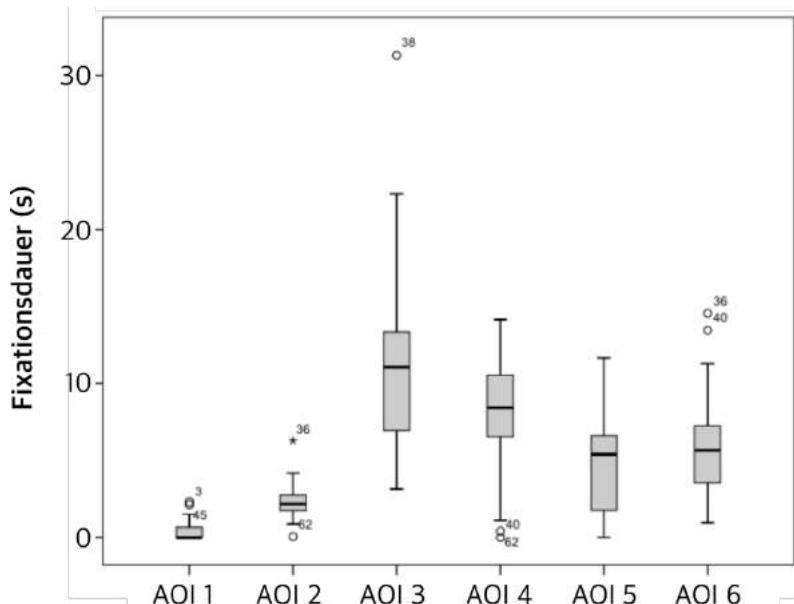


Abbildung 44: Fixationsdauer der Gesamtstichprobe beim Betrachten des Modellexperiments differenziert nach den Areas of Interest (Kreise und Sterne mit der jeweiligen Versuchspersonennummer stehen für einzelne Ausreißer, vgl. Anhang 12.13).

AOI\_2, AOI\_3 und AOI\_6 wurden von allen Versuchspersonen fixiert. Im Mittel wurde von den Schüler\*innen am längsten die relevante AOI\_3 mit einem Median von 11 Sekunden betrachtet. AOI\_1 wurde im Mittel 0 Sekunden lang fixiert. Der Median der Fixationsdauer in AOI\_2 lag bei 2 s, der in AOI\_4 bei 8 s. Auch das Intervall, in dem die Fixationsdauer von 50 % der Versuchspersonen lag, war bei AOI\_3 am größten und lag zwischen 7 s und 13 s. Die mittlere Fixationsdauer in den irrelevanten AOIs lag bei 5,5 s (AOI\_5) bzw. 6 s (AOI\_6). Neben der AOI\_1 wurden die AOIs AOI\_4 und AOI\_5 von einigen Versuchspersonen null Sekunden lang betrachtet.

Abbildung 45 zeigt die nach AOI differenzierte Zeit bis zur ersten Fixation in Sekunden. In zwei relevante (AOI\_3, AOI\_4) und zwei irrelevanten (AOI\_5, AOI\_6) AOIs wurden jeweils von mindestens einer Versuchsperson direkt zu Beginn der Sequenz, in der das Modellexperiment demonstriert wurde, hineingeblickt. Im Mittel wurde zuerst in AOI\_2 (1 s), dann AOI\_3 (2 s) und AOI\_4 (2 s) geblickt. Anknüpfend wurden AOI\_5 (5 s) und AOI\_6 (6 s) zum ersten Mal fixiert. In AOI\_1 wurde erstmalig im Mittel zuletzt nach 30 s geblickt. Das Zeitintervall, das die Zeit angibt, bis 50 % der Versuchspersonen eine AOI zum ersten Mal fixiert haben, ist bei AOI\_4 und AOI\_1 im Vergleich zu den anderen AOIs größer. 50 % der Schüler\*innen blickten zum ersten Mal in AOI\_4 zwischen 0 s und 18 s und in AOI\_1 zwischen 22 und 43 Sekunden.

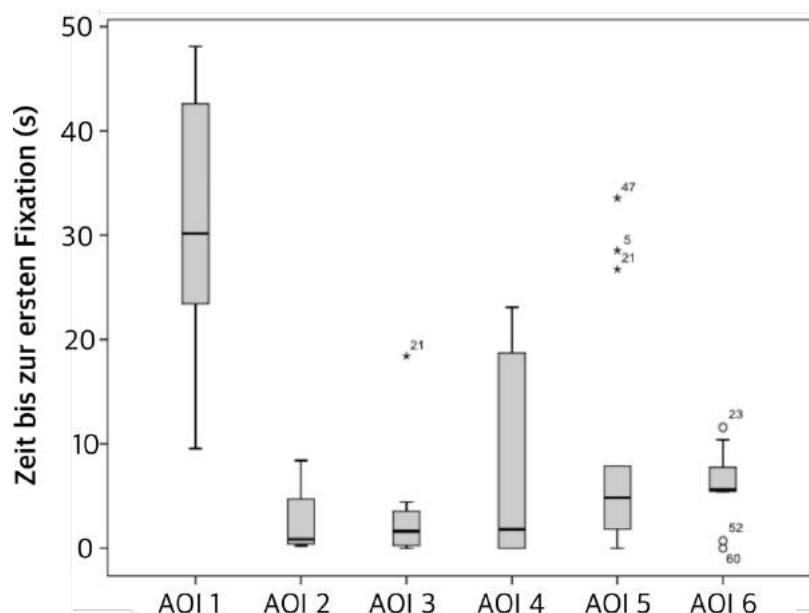


Abbildung 45: Zeit bis zur ersten Fixation innerhalb eines AOIs der Gesamtstichprobe beim Betrachten des Modellexperiments differenziert nach den Areas of Interest (Kreise und Sterne mit der jeweiligen Versuchspersonennummer stehen für einzelne Ausreißer, vgl. Anhang 12.13).

*Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse zum Aufmerksamkeitsfokus während der Informationsaufnahme*

Bei der Informationsaufnahme fällt deskriptiv auf, dass die Schüler\*innen die einzelnen Bereiche innerhalb der drei Sequenzen insgesamt unterschiedlich häufig und lang sowie in verschiedener Reihenfolge betrachtet haben. Im Mittel wurde in allen drei Sequenzen (Versuchsaufbau, Vorversuch und Modellexperiment) des Videos mit einer Betrachtung der Mitte des Bildschirms, in dem AOI\_2, der mittlere Bereich des Plexiglasrohrs, liegt, gestartet (vgl. *Zeit bis zur ersten Fixation* in Tabelle 24, Abbildung 42 und Abbildung 45).

Die erste Betrachtung des *Versuchsaufbaus* erfolgte im Mittel von rechts nach links. Dabei wurde der rechte Bereich des Bildschirms, wo sich die AOI um die Luftpumpe herum (AOI\_6) befindet, von den Schüler\*innen zuerst, am häufigsten sowie am längsten betrachtet. Nach dem Betrachten dieses Bereiches wurden erst die relevanten Bereiche das Plexiglasrohr folgend von oben nach unten betrachtet und abschließend die Stromquelle (AOI\_5) fixiert (vgl. Tabelle 24). Unter den relevanten Bereichen nahm die Fixationsanzahl von dem mittleren Bereich des Plexiglasrohres (AOI\_2) über den Bereich um die Glühwendel (AOI\_3) und dem Deckel des Plexiglasrohres (AOI\_1) ab. Bei der Fixationslänge gab es eine Abnahme von dem Bereich um die Glühwendel über die Mitte zum Deckel des Plexiglasrohres. Am wenigsten häufig und lang wurde der Bereich im unteren Bereich des Plexiglasrohres, in den der Glastiegel (AOI\_4) gestellt wird, fixiert.

Die Glühwendel wurde während der Präsentation des *Vorversuchs* ausgehend von der Mitte als erstes, am längsten und am häufigsten betrachtet (vgl. Abbildung 40, Abbildung 41 und Abbildung 42). Gleichzeitig wurde die Stromquelle häufiger und länger im Vergleich zu den anderen Bereichen (abgesehen von der Glühwendel und der Mitte) fixiert. Der untere Bereich des Plexiglasrohres, in den der Glastiegel hineingestellt wurde, wurde von den Schüler\*innen zuletzt und insgesamt weniger häufig fixiert. Im Vergleich wurden die Bereiche um die Luftpumpe sowie den Deckel des Plexiglasrohres am seltensten und kürzesten fixiert.

Während der Präsentation des *Modellexperiments* wurden zwei für den Prozess der Explosion relevante Bereiche zu Beginn dieser dritten Sequenz sowie am häufigsten und längsten betrachtet (vgl. Abbildung 43, Abbildung 44 und Abbildung 45). Neben der Glühwendel (15 Fixationen, 11 Sekunden), die schon im Vorversuch am häufigsten und längsten sowie zuerst fixiert wurde, kam beim Betrachten des Modellexperiments auch der Glastiegel (17

Fixationen, 8 Sekunden) hinzu. Dabei wurden beide direkt zu Beginn, ausgehend von der Mitte, am häufigsten und längsten betrachtet. Anschließend wurden die Stromquelle und Luftpumpe betrachtet (Zeit bis zur ersten Fixation, Fixationsanzahl und Fixationsdauer). Weniger häufig und lang wurde der mittlere Bereich des Plexiglasrohres sowie der Deckel betrachtet. Im Mittel wurde von den Schüler\*innen 0-mal in den Bereich des Deckels des Plexiglasrohres (AOI\_1) geblickt (Median = 0). Wenn der Bereich des Deckels betrachtet wurde, dann im Mittel zum ersten Mal nach 30 s.

Somit wurde während der experimentellen Prozesse (Vorversuch und Modellexperiment) der Deckel weniger fixiert als während des Betrachtens des Versuchsaufbaus (Zeit bis zur ersten Fixation, Fixationsanzahl und Fixationsdauer).

*Die in dieser Zwischenzusammenfassung dargestellten Ergebnisse werden auf S. 207 ff. diskutiert.*

### **Prozesshafte Betrachtung des Explosionsprozesses**

*(Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse auf S. 139)*

Mit Hilfe von Abbildung 46 ist eine Betrachtung des Prozessverhaltens der Schüler\*in-Blickbewegung möglich. In dieser Abbildung sind die einzelnen Fixationen einer ausgewählten Versuchsperson beim Betrachten des unmittelbaren Explosionsprozesses in einer Bildabfolge dargestellt. In den ersten beiden Bildern, welche den Beginn der Aufwirbelung darstellen, ist der Fokus auf die Glühwendel (AOI\_3) gelegt. Mit der Entzündung (Bild 3 & 4) liegt der Fokus weiterhin auf der Glühwendel (AOI\_3). Erst mit dem Abklingen der Flamme (Bild 5) wird der Fokus verändert und auf den oberen Bereich des Plexiglasrohres gelegt. Anschließend geht der Fokus zurück auf die Glühwendel (Bild 6).

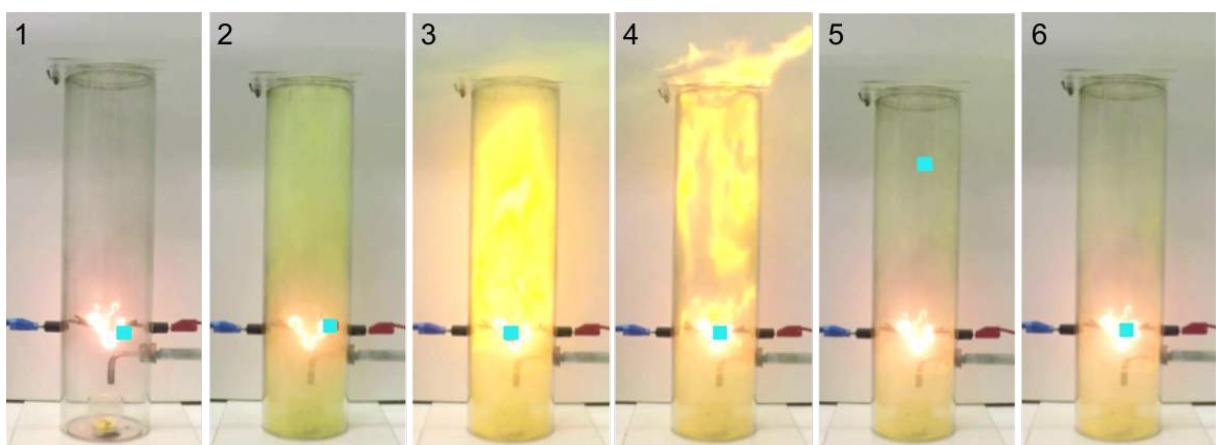


Abbildung 46: Einzelne Fixationen beim Betrachten des Explosionsprozesses einer Versuchsperson in sechs Bildern.

Zur Betrachtung der Gesamtstichprobe sind in Abbildung 47 mit Hilfe einer Heat Map die zeitpunktspezifischen Fixationen aller Versuchspersonen gemeinsam dargestellt.

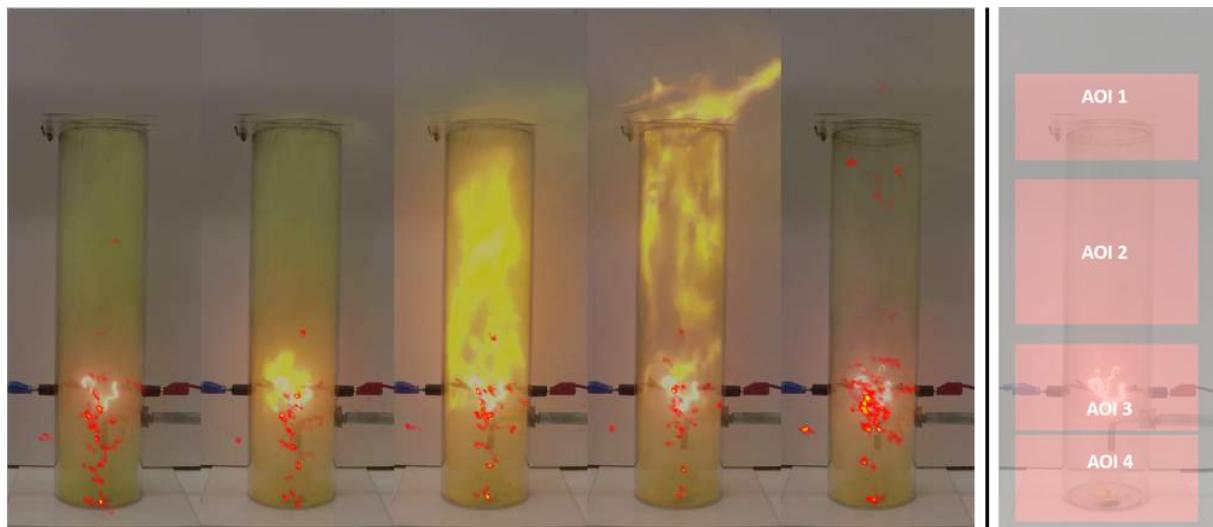


Abbildung 47: Heat Map der Fixationen beim Betrachten des Explosionsprozesses der Gesamtstichprobe mit den definierten AOIs zum Vergleich.

Die rote Farbgebung bedeutet, dass diese Punkte von einzelnen Versuchspersonen betrachtet wurden, gelb bedeutet, dass mehrere Versuchspersonen einen spezifischen Punkt betrachten. Es ist gut zu erkennen, dass der Fokus beim Betrachten des Explosionsprozesses auf der Glühwendel (AOI\_3) und dem Glastiegel (AOI\_4) gelegen hat. Erst nach Abklingen der Flamme haben ein paar Versuchspersonen in den oberen Bereich des Plexiglasrohres geblickt. Bei der Mehrheit der Probanden hat der Fokus weiterhin auf Höhe der Glühwendel (AOI\_3) und dem Glastiegel (AOI\_4) gelegen.

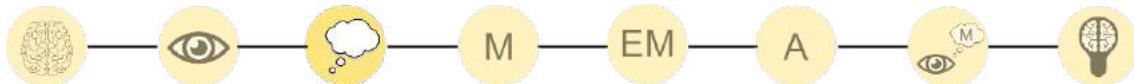
#### *Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse zur Prozessbetrachtung während der Informationsaufnahme*

Beim Betrachten des Explosionsprozesses im zeitlichen Verlauf haben die Schüler\*innen ihren Fokus zunächst auf die Glühwendel und den Glastiegel mit der erhaltenen Substanz gelegt. Erst nach dem Abklingen der Flamme haben einzelne Schüler\*innen in den mittleren und oberen Bereich des Plexiglasrohres geblickt. Bei der Mehrheit der Probanden hat der Fokus zu diesem Zeitpunkt weiterhin auf Höhe der Glühwendel und des Glastiegels gelegen.

*Die in dieser Zwischenzusammenfassung dargestellten Ergebnisse werden auf S. 207 ff. diskutiert).*

### **Ergebnis der Informationsverarbeitung**

(Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse auf S. 145 ff.)



### **Analyse der Versuchsprotokoll**

Im Folgenden werden die Ergebnisse bzgl. der ersten Verarbeitung der aufgenommenen Informationen beim Betrachten des Modellexperiments zur Staubexplosion in Videoform dargestellt. Sie beziehen sich auf die unabhängige Stichprobe ( $N = 36$ ) aller der Probanden, welche die Versuchsprotokolle (mit den Teilen Beobachtung und Auswertung) sowie die geschlossenen Fragebögen nach der Betrachtung des Modellexperiments in Videoform bearbeitet haben.

Im Folgenden werden die erreichten Punktzahlen in den Protokollen für die jeweiligen Beobachtungen sowie Auswertungen über jene Schüler\*innen in prozentualen Häufigkeiten tabellarisch bzw. graphisch dargestellt und beschrieben:

- Mittelwerte, Standardabweichung, Minimum- und Maximumwerte sowie Verteilung der gesamten Punktzahl für jeweils die Beobachtung und Auswertung basierend auf dem Versuchsprotokoll: Tabelle 25,
- semantische Analyse der einzelnen, durch die Schüler\*innen protokollierten Beobachtungen,
- semantische Analyse der einzelnen, durch die Schüler\*innen protokollierten Auswertungen.

### **Analyse der Beobachtung und Auswertung basierend auf dem Versuchsprotokoll**

Im Versuchsprotokoll waren bei vollständiger Nennung der Beobachtungen maximal 11 Punkte zu erreichen. Wurde die Auswertung, orientiert an den Beobachtungen und dem stattfindenden Prozess, detailliert notiert, konnten nochmals 12 Punkte vergeben werden (vgl. Abschnitt 4.3.3.1). Im Zusammenhang mit den Beobachtungen wurde ein Mittelwert von 5,1 Punkten ( $SD = 1,8$ ) erreicht. Bezuglich der Auswertung ist der Mittelwert geringer und lag bei 2,2 Punkten ( $SD = 2,1$ ) (siehe Tabelle 25).

Tabelle 25: Mittelwerte, Standardabweichung sowie Minimum- und Maximumwerte für die erreichte Punktzahl bzgl. der Beobachtungen und Auswertungen auf dem Versuchsprotokoll.

	<b>Beobachtung</b>	<b>Auswertung</b>
<b>Mittelwert</b>	5,1111	2,1765
<b>Standardabweichung</b>	1,81703	2,05191
<b>Minimum</b>	0,00	0,00
<b>Maximum</b>	8,00	9,00

Um tiefergehende Erkenntnisse zu einzelnen Aspekten der Beobachtungen der Schüler\*innen und dem Verständnis des Modellexperiments zu erhalten, werden im Folgenden die einzelnen Beobachtungen und Auswertungen differenziert nach den einzelnen inhaltlich relevanten Aussagen betrachtet.

### ***Semantische Analyse der jeweiligen Beobachtungen und Auswertungen***

#### ***Beobachtung***

Im Zusammenhang mit den protokollierten Beobachtungen des Modellexperiments sind die Inhalte *Stoffe als reagierende Substanz*, *Aufglühen der Glühwendel* (Auswirkung des Stromanschaltens), *Aufwirbelung* (basierend auf der Funktion der Luftpumpe), *Entzündung* und *Deckelöffnung* relevant. Die absoluten und prozentualen Anteile der kategorisierten Antworten zu den jeweiligen Inhalten sind in Anhang 12.15 in Tabelle 44 – Tabelle 47 dargestellt.

Von insgesamt 88,9 % der Schüler\*innen ( $n = 32$ ) wurde ein *Stoff als reagierende Substanz* bei der Durchführung des Modellexperiments beobachtet (vgl. Tabelle 44). Von diesen 32 Schüler\*innen haben 22 Schüler\*innen (68,8 %) die Pulverförmigkeit des Stoffes während ihrer Beobachtung explizit genannt.

Zudem konnten 22 Schüler\*innen (61,1 %) die phänomenologisch wahrnehmbare Beobachtung, dass die *Glühwendel aufglüht bzw. leuchtet*, machen (vgl. Tabelle 45). Dass die Glühwendel neben der phänomenologischen Beobachtung sogar heiß wird, beschrieben 5 Schüler\*innen (13,9 %). Das Ergebnis der Interpretation der phänomenologischen Beobachtung, die Wärmeentwicklung der Glühwendel, gab ein\*e Schüler\*in an (2,8 %).

Dass das Pulver durch das Herunterdrücken des Luftpumpenkolbens *aufgewirbelt* wurde, haben zwei Drittel der Schüler\*innen ( $n = 24$ , 66,7 %) beschrieben (vgl. Tabelle 46).

Als abschließende Auswirkung, welche auf dem anschließenden Zusammenwirken der Aufwirbelung des pulverigen Stoffes mithilfe der Luftpumpe und der Wärmeentwicklung im Zusammenhang mit dem Strom basieren, nannten mehr als jede\*r Vierte ( $n = 10$ , 27,8 %) die Entstehung einer *Feuererscheinung*, welche die Verbrennung phänomenologisch beschreibt (vgl. Tabelle 47). Ein\*e Schüler\*in wies selbstständig auf die Öffnung des Deckels hin (2,8 %).

#### ***Auswertung***

Im Zusammenhang mit der Auswertung sind die Inhalte *Verbrennungsreaktion*, *Brennstoff*, die *Funktion der Luftpumpe*, der *Sauerstoff als Reaktionspartner*, die *Glühwendel* und die *Druckentstehung* relevant. Die absoluten und prozentualen Anteile

der kategorisierten Antworten zu den jeweiligen Inhalten sind in Anhang 12.15 in Tabelle 48 – Tabelle 53 dargestellt.

Die *Art der Reaktion* (Verbrennungsreaktion, Explosion) wurde von einem Viertel aller Schüler\*innen genannt ( $n = 9$ , 25,0 %, vgl. Tabelle 48).

Dass für diese Reaktion ein Stoff notwendig ist, der *brennbar* ist, wurde von etwas mehr als jedem\*r fünfte\*n ( $n = 8$ , 22,2 %) Schüler\*in genannt (vgl. Tabelle 49). Die restlichen 28 Schüler\*innen (77,8 %) nannten keine erschließbare Aussage, die im Zusammenhang mit dem Stoff und dessen Brennbarkeitseigenschaft stehen könnte.

Bei der *Glühwendel als Zündquelle*, dem Vorliegen des *Sauerstoffs als Reaktionspartner* und der *Funktion der Luftpumpe zur Aufwirbelung* konnte ein ähnlicher Trend nachgewiesen werden (vgl. Tabelle 50 – Tabelle 52). Dort haben 61,1 % (bzgl. Glühwendel), 72,2 % (bzgl. Sauerstoff) bzw. 75,0 % (bzgl. Luftpumpe) keine erschließbaren Aussagen getroffen.

Der *Druck* als Auswirkung der Explosionsreaktion wurde von zwei Schüler\*innen (5,6 %) genannt (vgl. Tabelle 53). Die restlichen 94,4 % ( $n = 34$ ) nannten keine erschließbare Aussage in diesem thematischen Zusammenhang. Zudem wurden in der Beschreibung der Auswertung keine Aussagen zur Funktion der *Oberflächenvergrößerung* des Stoffes, welcher auf dem Zerteilungsgrad des Stoffes und der Aufwirbelung basiert, von den Schüler\*innen getätigt ( $n = 0$ ).

### ***Fragebögen zum Versuchsaufbau, dem Vorversuch und dem Modellexperiment***

Um die Daten zu den Elementen und dem Prozess der Informationsaufnahme, die mithilfe der Methode Eye-Tracking erhalten wurden, zu legitimieren, wurden detaillierte Informationen mit Hilfe von geschlossenen Fragebögen zu den aufgenommenen Informationen erhoben (vgl. Abschnitt 4.3.3.1 und Anhang 12.8).

Im Folgenden werden die erreichten Punktzahlen in den Fragebögen vorgestellt. Dazu werden die Punktzahlen für die Items im Zusammenhang mit den Beobachtungen und Auswertungen in prozentualen Häufigkeiten graphisch dargestellt und beschrieben:

- Beobachtungen bzgl. des Versuchsaufbaus: Abbildung 48,
- Beobachtungen bzgl. des Modellexperiments ohne Substanz (Vorversuch),
- Beobachtungen bzgl. des Modellexperiments mit Substanz (Modellexperiment): Abbildung 49,
- Auswertungen bzgl. des Modellexperiments (Modellexperiment): Abbildung 50.

Nur die vollständigen korrekten Antworten wurden mit einem Punkt kodiert. Korrekte, aber nicht vollständige Antworten wurden mit null Punkten bepunktet.

### **Versuchsaufbau**

In dem geschlossenen Fragebogenformat waren grundsätzlich alle Schüler\*innen in der Lage, Elemente des Versuchsaufbaus zu nennen. Die erreichte Mindestpunktzahl betrug fünf Punkte und die maximale Punktzahl betrug 16 von 18 Punkten (vgl. Abbildung 48). 15 Schüler\*innen (41,8 %) erreichten eine überdurchschnittliche Punktzahl ( $M = 12,08$ ,  $SD = 2,22$ ). Die durchschnittliche Punktzahl von genau 12 Punkten haben ein Viertel aller Schüler\*innen erreicht ( $n = 9$ , 25,0 %).

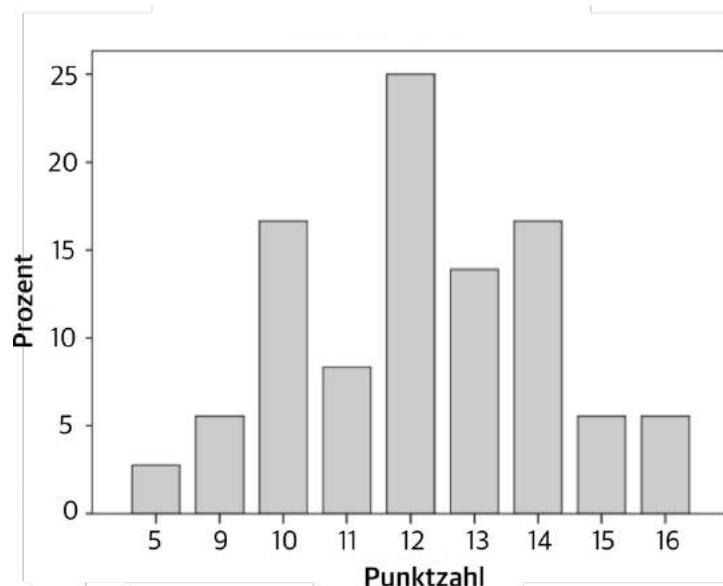


Abbildung 48: Prozentuale Häufigkeit der Punktzahl Beobachtung Versuchsaufbau.

### **Vorversuch**

Im Zusammenhang mit dem Vorversuch, bei dem das Modellexperiment ohne Substanz durchgeführt wurde, war es möglich, durch das korrekte Beantworten zweier Aufgaben zwei Punkte zu erreichen (vgl. Anhang 12.8). Aufgabe 1, in der es inhaltlich um die Offenheit des Plexiglasrohres ging, wurde von jedem\*r fünften Schüler\*in ( $n = 8$ , 22,2 %) korrekt beantwortet. Aufgabe 2, welche thematisch die fehlende Öffnung des Plexiglasrohres thematisierte, wurde von jedem\*r dritten Schüler\*in korrekt beantwortet ( $n = 14$ , 38,9 %). Insgesamt hatte die Hälfte aller Schüler\*innen eine Frage von zwei Fragen korrekt beantwortet ( $n = 18$ , 50 %). Zwei Schüler\*innen ( $n = 2$ ; 5,6 %) beantworteten beiden Fragen korrekt.

### Modellexperiment

Die Summe der einzelnen **Beobachtungsitems** betrug fünf Punkte. Ungefähr die Hälfte der Schüler\*innen ( $n = 19$ , 52,8 %) hat drei Fragen richtig beantwortet (vgl. Abbildung 49). Ein Fünftel der Schüler\*innen ( $n = 8$ , 22,2 %) hat vier Fragen richtig beantwortet. Jedoch wurden von keinem\*keiner Schüler\*in alle Fragen korrekt beantwortet.

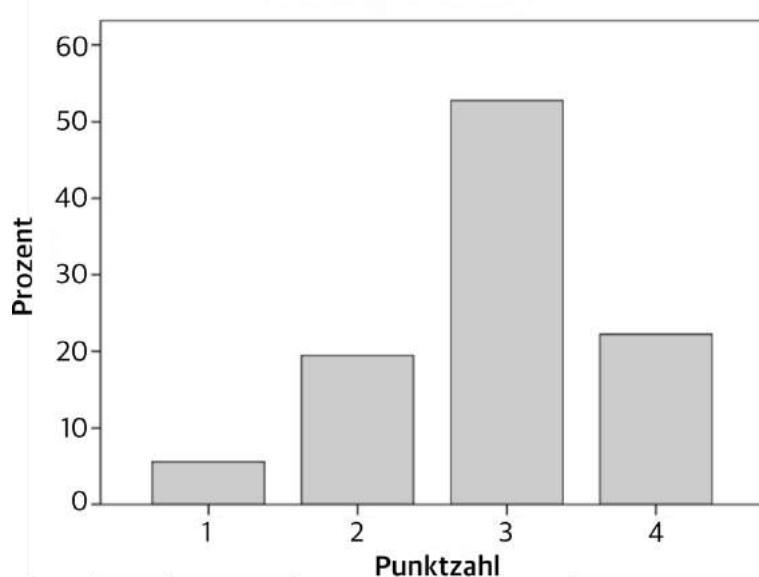


Abbildung 49: Prozentuale Häufigkeit der Punktzahl Beobachtung des Modellexperiments.

Im Zusammenhang mit den **Auswertungsitems** wurden am häufigsten zwei von fünf Punkten von der Hälfte aller Schüler\*innen erreicht ( $n = 18$ , 50,0 %) (vgl. Abbildung 50). Ein Viertel der Schüler\*innen ( $n = 9$ , 25,0 %) hat drei Punkte erhalten. Zwei Schüler\*innen erreichten vier Punkte (5,6 %) und ein\*e Schüler\*in erreichte die maximale Punktzahl von fünf Punkten (2,8 %).

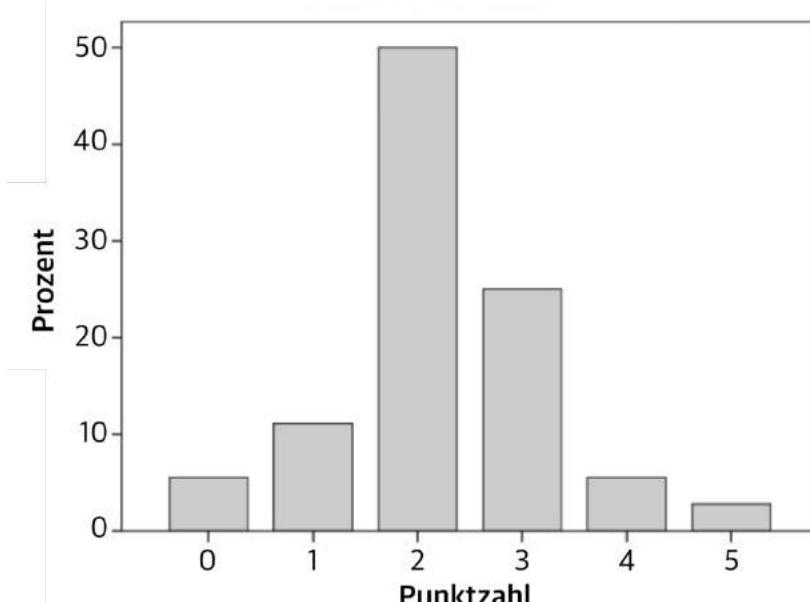


Abbildung 50: Prozentuale Häufigkeit der Punktzahl Auswertung des Modellexperiments.

### *Differenzierung der Items nach thematischen Schwerpunkten*

Beim Betrachten der Mittelwerte der Punktzahlen differenziert nach den einzelnen Items des Fragebogens über alle Schüler\*innen hinweg fällt auf, dass es einige Items gibt, die häufiger korrekt beantwortet wurden als andere (Abbildung 51).

Im Zusammenhang mit den **Beobachtungsitems** (maximale Punktzahl pro Item ist 1) wurden besonders häufig die Items zur Erscheinungsform des Stoffes ( $M = 0,97$ ,  $SD = 0,17$ ), Beschreibung der Entzündung ( $M = 0,78$ ,  $SD = 0,42$ ) und Aufwirbelung ( $M = 0,75$ ,  $SD = 0,44$ ) korrekt beantwortet. Die Items in Bezug auf die Flammenausbreitung ( $M = 0,35$ ,  $SD = 0,49$ ) und den Deckel ( $M = 0,11$ ,  $SD = 0,32$ ) wurden seltener korrekt beantwortet.

Bei der **Auswertung** wurden die Items zu den Gründen für die Entzündung ( $M = 0,74$ ,  $SD = 0,45$ ) und die Notwendigkeit eines abgeschlossenen Raumes ( $M = 0,60$ ,  $SD = 0,50$ ) häufiger korrekt beantwortet. Ähnlich wie bei der Beantwortung der Beobachtungsitems wurde das Item zur Drucköffnung des Deckels von den Schüler\*innen seltener korrekt beantwortet ( $M = 0,25$ ,  $SD = 0,44$ ). Auch die Items bzgl. der Eigenschaften des Stoffes ( $M = 0,31$ ,  $SD = 0,47$ ) und des entstehenden Staub-Luft-Gemisches ( $M = 0,40$ ,  $SD = 0,50$ ) wurden seltener korrekt beantwortet.

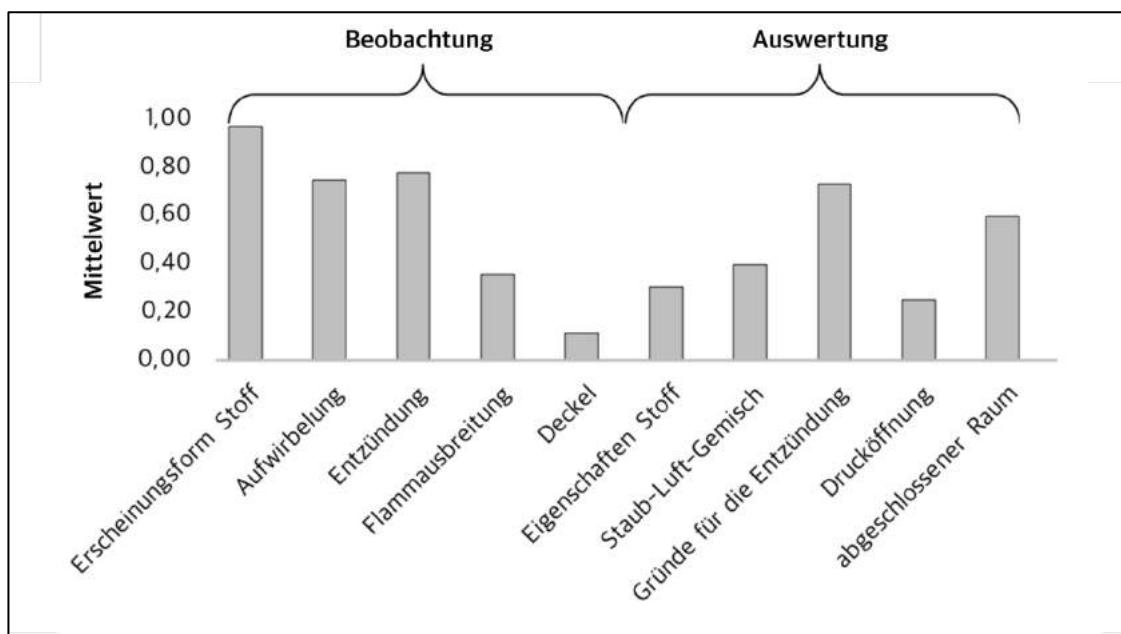


Abbildung 51: Beobachtung und Auswertung des Fragebogens differenziert nach den einzelnen Items mit ihren thematischen Schwerpunkten.

### *Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse zur Informationsverarbeitung*

In Bezug auf das Ergebnis der Informationsverarbeitung nach dem Betrachten des Modellexperiments zur Staubexplosion wurden mehrere Aspekte analysiert. Zum einen wurden schriftlich ausgeführte Beobachtungen und Auswertungen basierend auf Versuchsprotokollen der Schüler\*innen

analysiert und zum anderen geschlossene Items innerhalb der Fragebögen ausgewertet.

Grundsätzlich waren alle Schüler\*innen bei der Beantwortung der Fragebögen in der Lage, Elemente des *Versuchsaufbaus* zu nennen (vgl. Abbildung 48). Die durchschnittlich Punktzahl betrug 12,08 von 18 Punkten ( $SD = 2,22$ ).

Im Zusammenhang mit dem *Vorversuch*, bei dem das Modellexperiment ohne Substanz durchgeführt wurde, wurde die relevante Frage bzgl. der fehlende Öffnung des Deckels beim Betätigen der Luftpumpe von mehr als jedem\*r dritten Schüler\*in korrekt beantwortet (Aufgabe 2,  $n = 14$ , 38,9 %).

Im Zusammenhang mit den **Beobachtungen** des *Modellexperiments* erreichten die Schüler\*innen insgesamt bei der Analyse der Versuchsprotokolle einen Mittelwert von 5,1 Punkten ( $SD = 1,8$ ) von 11 Punkten (vgl. Tabelle 25). Im geschlossenen Fragebogen wurden von ungefähr der Hälfte der Schüler\*innen ( $n = 19$ , 52,8 %) drei von fünf Fragen korrekt beantwortet (vgl. Abbildung 49).

Bezogen auf die einzelnen Items wurden bestimmte Items häufig beobachtet und entsprechende Fragen im geschlossenen Fragebogen häufig korrekt beantwortet. Dazu zählen der *Stoff als reagierende Substanz* (88,9 %) mit seiner *Pulverförmigkeit* (61,1 %, Fragebogen:  $M = 0,97$ ,  $SD = 0,17$ ), die *Aufwirbelung* des Pulvers (66,7 %, Fragebogen:  $M = 0,75$ ,  $SD = 0,44$ ) und das *Aufglühen der Glühwendel* (61,1 %). Seltener wurde die Ausbreitung der Flamme und die Öffnung des Deckels korrekt beobachtet und verarbeitet (Versuchsprotokoll: relative Häufigkeit jeweils < 30 %, Fragebogen: Mittelwert < 0,40).

Bezüglich der **Auswertung** war der Mittelwert und der Anteil der korrekt beantworteten Items im Versuchsprotokoll und im Fragebogen geringer als im Zusammenhang mit den **Beobachtungen**. Der Mittelwert im Versuchsprotokoll lag bei 2,2 Punkten ( $SD = 2,1$ ) von 13 Punkten (siehe Tabelle 25). Im Fragebogen wurden zwei von fünf Punkten von der Hälfte aller Schüler\*innen erworben ( $n = 18$ , 50,0 %) und ein Viertel der Schüler\*innen ( $n = 9$ , 25,0 %) haben drei Punkte erhalten. Somit liegt im Format des Fragebogens eine prozentual höhere Antwortqualität vor als bei den Versuchsprotokollen.

Bezogen auf die jeweiligen Items wurden die Gründe für die schnelle Verbrennungsreaktion (Explosion) im Fragebogen häufiger korrekt genannt ( $M = 0,74$ ,  $SD = 0,45$ ) als in den Versuchsprotokollen (25 %). Die Frage nach der Brennbarkeit und des Zerteilungsgrad des Stoffes ( $M = 0,31$ ,  $SD = 0,47$ ) wurde ebenfalls häufiger im Fragebogen korrekt beantwortet als eine Nennung in den Versuchsprotokollen ( $n = 8$ , 22,2 %). Eine Auffälligkeit gibt es

bei den Items zum entstehenden Staub-Luft-Gemisch ( $M = 0,40$ ,  $SD = 0,50$ ) und zur Notwendigkeit eines abgeschlossenen Raumes zum Druckaufbau ( $M = 0,60$ ,  $SD = 0,50$ ) sowie die Ursache zur Öffnung des Deckels ( $M = 0,25$ ,  $SD = 0,44$ ), die innerhalb des Fragebogens häufiger korrekt benannt wurden als in den Versuchsprotokollen. So wurden in Bezug auf das entstehende Staub-Luft-Gemisch von 72,2 % (bzgl. Sauerstoff) bzw. 75 % (bzgl. Aufwirbelung) keine erschließbaren Aussagen getroffen und die Ursache über die Entstehung des Drucks lediglich von zwei Schüler\*innen (5,6 %) selbstständig genannt.

*Die in dieser Zwischenzusammenfassung dargestellten Ergebnisse werden auf S. 207 ff. diskutiert.*

### 5.2.1 Zusammenhang zwischen Informationsaufnahme und -verarbeitung

*(Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse auf S. 148 f.)*

Um zu analysieren, ob es einen Zusammenhang zwischen der Art und Weise der Fixationen während des Betrachtens des *Modellexperiments* und den Informationen bzgl. der *verarbeiteten Beobachtungen und Auswertungen* beim Prozess der Staubexplosion gibt, wurden Korrelationen zwischen den Variablen der Informationsaufnahme (Fixationsvariablen) und der -verarbeitung (geschlossene Items) berechnet. Die im Folgenden präsentierten Ergebnisse beziehen sich auf diejenigen verbundenen Datensätze einer jeden Schülerin und eines jeden Schülers der Video-Gruppe, die vollständig vorliegen ( $N = 28$ ).

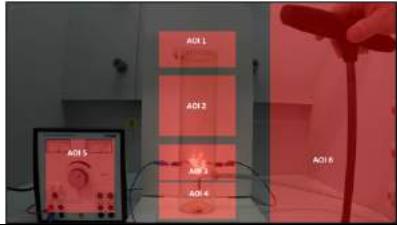
Der Kolmogorov-Smirnov-Test offenbarte, dass die vorliegenden Daten der Informationsverarbeitung (geschlossene Items) signifikant nicht normalverteilt sind ( $p_{\text{items\_Kolmogorov-Smirnov-Test}} < .05$ ) (vgl. Bühl, 2010, S. 368 f.). Einige der Fixationsvariablen sind signifikant normalverteilt ( $p_{\text{Fixationsanzahl AOI\_2,4,5,6}} = p_{\text{Fixationslänge AOI\_1,2,3,4,5,6}} = p_{\text{l. Fixation AOI\_1}} > .05$ ) (vgl. Bühl, 2010, S. 368 f.). Da mindestens eine der Variablen, deren Korrelationen untersucht werden sollten, signifikant nicht normalverteilt waren, wurde der non-parametrische Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman für die weiteren Analysen eingesetzt. Die signifikanten Korrelationen sind in Tabelle 26 dargestellt. Es existieren positive sowie negative Zusammenhänge zwischen einzelnen Variablen der Informationsaufnahme und der Informationsverarbeitung.

Im Zusammenhang mit den Beobachtungsitems besteht ein positiver Zusammenhang zwischen der Fixationsanzahl und -dauer innerhalb des AOI\_4 (Glastiegel mit Substanz) und dem Item E3b, bei dem es inhaltlich um die Aufwirbelung geht. So mit wurde das geschlossene Item häufiger korrekt beantwortet (hoher Wert in der Anzahl erreichter Punkte), wenn der Bereich um den Glastiegel häufiger und länger fixiert wurde (hoher Wert in der Fixationsanzahl und -länge).

## 5 Ergebnisse

---

Tabelle 26: Signifikante Korrelationen nach Spearman zwischen den Variablen der Informationsaufnahme und -verarbeitung. \*  
 $p < .05$ , \*\*  $p < .01$ .

	Beobachtung	Auswertung
	E3b (Aufwirbelung/ Verteilung des Staubes)	E3c (Entzündung des Stoffes)
Fixationsanzahl AOI_3		.374*
Fixationsanzahl AOI_4	.481**	-.504**
Fixationsdauer AOI_4	.445*	-.431*
I. Fixation AOI_2		.486**
I. Fixation AOI_3		-.548**
I. Fixation AOI_4		.444*
I. Fixation AOI_6		.396*

Weiter besteht ein positiver Zusammenhang zwischen dem Item E3c, das inhaltlich den Schritt der Entzündung fokussiert, und den Zeiten bis zur ersten Fixation innerhalb der AOIs 2 (mittlerer Bereich des Plexiglasrohrs), 4 (Glastiegel mit Substanz) und 6 (Luftpumpe). Im Gegensatz dazu besteht ein negativer Zusammenhang zwischen demselben Item E3c und der Zeit bis zur ersten Fixation in der AOI\_3 (Glühwendel). Somit geht bei diesen beiden Variablen ein hoher Wert bei dem geschlossenen Item mit einem niedrigen Wert in der genannten Fixations-Variablen einher. Ein weiterer negativer Zusammenhang besteht zwischen der Fixationsanzahl und -dauer innerhalb des AOI\_4 und dem Item E3e, in dem es um die Öffnung des Deckels geht. Gleichzeitig besteht zwischen dem Item E3e und der Fixationsanzahl in der AOI\_3 ein positiver Zusammenhang.

Im Zusammenhang mit den Auswertungsitems gibt es zwei signifikante Zusammenhänge. So bestehen zwischen dem Item E3f, das die Erklärung der Stoffeigenschaften beinhaltet, und der Zeit bis zur ersten Fixation in der AOI\_2 und AOI\_3 ein negativer Zusammenhang.

### *Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse zum Zusammenhang zwischen Informationsaufnahme und -verarbeitung*

Zwischen den Beobachtungs- und Auswertungsitems sowie den verschiedenen Fixationsvariablen während des Betrachtens des Modellexperiments konnten einige Zusammenhänge identifiziert werden.

Bei den **Beobachtungsitems** konnte ein positiver Zusammenhang zwischen der Fixationsanzahl und -dauer innerhalb des Bereiches, in dem sich der Glastiegel mit der Substanz befindet, und dem Item, das die Aufwirbelung thematisiert, identifiziert werden (Fixationsanzahl:  $r = .481^{**}$ ; Fixationsdauer:

$r = .445^*$ ). Das bedeutet, dass der Prozess der Aufwirbelung umso häufiger korrekt von Schüler\*innen beobachtet wurde, je häufiger und länger in den Bereich um den Glastiegel geblickt wurde.

Zudem wurde die Entzündung häufiger korrekt beobachtet, wenn die Zeit bis zur ersten Fixation innerhalb des mittleren Bereichs des Plexiglasrohres ( $r = .486^{**}$ ), des Bereiches um den Glastiegel mit der Substanz ( $r = .444^*$ ) und den Bereich um die Luftpumpe ( $r = .396^*$ ) höher war. Gleichzeitig haben die Schüler\*innen, die den Bereich um die Glühwendel zum ersten Mal relativ früh fokussiert haben, die Entzündung korrekt beobachtet (negativer Zusammenhang,  $r = -.548^{**}$ ).

Darüber hinaus wurde das Item, dem das Beobachten der Öffnung des Deckels zugrunde liegt, umso häufiger korrekt beantwortet, je häufiger in den Bereich um die Glühwendel geschaut wurde ( $r = .374^*$ ). Gleichzeitig wurde dasselbe Item umso häufiger korrekt beantwortet, je seltener und kürzer in den Bereich um den Glastiegel geblickt wurde (Fixationsanzahl:  $r = -.504^{**}$ ; Fixationsdauer:  $r = -.431^*$ ).

Im Zusammenhang mit den **Auswertungsitems** konnten zwei signifikante Zusammenhänge identifiziert werden. Die Stoffeigenschaften wurden umso besser erklärt, je eher der mittlere Bereich des Plexiglasrohres ( $r = -.363^*$ ) und der Bereich um die Glühwendel ( $r = -.374^*$ ) betrachtet wurden.

*Die in dieser Zwischenzusammenfassung dargestellten Ergebnisse werden auf S. 207 ff. diskutiert.*

## 5.2.2 Ergebnis der Informationsverarbeitung differenziert nach Probandengruppen

*(Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse auf S. 151 f.)*

Sowohl die Schüler\*innen, die das Modellexperiment in Form eines Videos gesehen haben, als auch die Schüler\*innen, die das Modellexperiment selbstständig durchgeführt haben, haben in ihren Versuchsprotokollen die Beobachtung und die Auswertung notiert. Es soll geprüft werden, ob sich die Ergebnisse der Informationsverarbeitung abhängig von der Präsentationsform (Schüler\*innenexperiment und Video) zwischen den Probandengruppen unterscheiden. Daher werden die zuvor vorgestellten Ergebnisse der Versuchsprotokolle von den Schüler\*innen, die das Modellexperiment in Videoform gesehen haben, noch einmal mit denen der Schüler\*innen, die das Modellexperiment selbstständig durchgeführt haben, verglichen:

- Versuchsprotokoll zum Modellexperiment Staubexplosion (analog zu Anhang 12.7).

### **Versuchsprotokoll zum Modellexperiment Staubexplosion der Probandengruppen**

In Abbildung 52 (a) – (c) sind die Ergebnisse der Auswertung des Versuchsprotokolls zum Modellexperiment Staubexplosion differenziert nach den beiden Probandengruppen abgebildet.

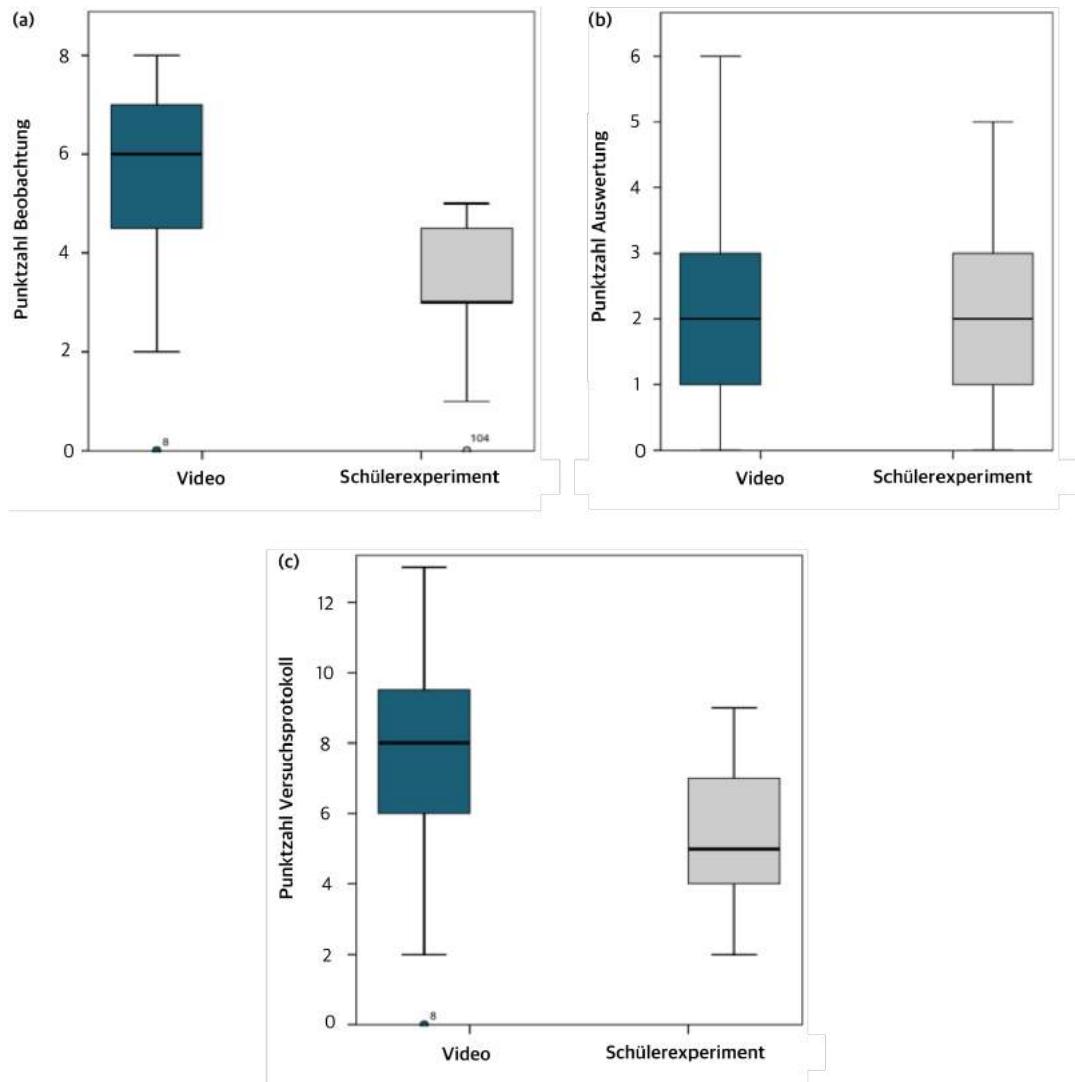


Abbildung 52: Punktzahl (a) Beobachtung, (b) Auswertung und (c) des gesamten Versuchsprotokolls der Schüler\*innen differenziert nach Video und Schüler\*innenexperiment-Gruppe (Kreise mit der jeweiligen Versuchspersonennummer stehen für einzelne Ausreißer, vgl. Anhang 12.13).

Im Hinblick auf die Beschreibung der Beobachtung im Versuchsprotokoll kann anhand der Boxplot-Diagramme erkannt werden, dass die Mediane der beiden Probandengruppen zwischen 6 (Video) und 3 (Schüler\*innenexperiment) liegen (vgl. Abbildung 52 (a)). Im Gegensatz dazu sind die Mediane bei der Beschreibung der Auswertung im Versuchsprotokoll identisch ( $\text{Median}_{\text{Auswertung}} = 2,00$ ) (vgl. Abbildung 52 (b)). Folglich unterscheiden sich die Gesamtergebnisse des Versuchsprotokolls (Summe der Punktzahl der Beobachtung und Auswertung) voneinander (vgl. Abbildung 52 (c)). Die Mediane des Gesamtergebnisses der Versuchsprotokolle wiesen Werte zwischen 8,00 (Video) und 5,00 (Schüler\*innenexperiment) auf. Kleine

Unterschiede lassen sich in den Punkteintervallen, in denen die Werte von 50 % der Versuchspersonen der jeweiligen Gruppe erhalten sind, feststellen. Beim Gesamtergebnis des Versuchsprotokolls liegen 50 % der Versuchspersonen, die das Video gesehen haben, zwischen 6,00 und 9,75 Punkten. Im Vergleich dazu liegen 50 % der Versuchspersonen, die das Schüler\*innenexperiment durchgeführt haben, zwischen 4,00 und 7,00 Punkten.

Zur statistischen Überprüfung möglicher Unterschiede zwischen den beiden Probandengruppen wurde zunächst der Kolmogorov-Smirnov-Test eingesetzt. Der Test zeigte für alle drei Variablen, dass die vorliegenden Daten des Versuchsprotokolls signifikant nicht normalverteilt sind (für X = Beobachtung, Auswertung sowie gesamtes Versuchsprotokoll:  $p_{X\_Kolmogorov-Smirnov-Test} = .000$ ;  $p < .001$ ) (vgl. Bühl, 2010, S. 368 f.).

Eine Anwendung des Mann-Whitney U-Tests auf die Ergebnisse des Versuchsprotokolls führte dazu, dass zwischen den beiden Probandengruppen in Bezug auf das gesamte Versuchsprotokoll und die Beobachtung ein signifikanter Unterschied identifiziert werden konnte,  $U = 521.500$ ,  $z = -4.830$ ,  $p = .000$  (Gesamtes Versuchsprotokoll) und  $U = 345.500$ ,  $z = -6.152$ ,  $p = .000$  (Beobachtung). Die Effektstärke nach Cohen (1988) liegt beim gesamten Versuchsprotokoll bei  $r = .47$  und entspricht einem mittleren Effekt. Bei der Beobachtung liegt die Effektstärke nach Cohen (1988) bei  $r = .60$  und entspricht einem starken Effekt. Jedoch gibt es in Bezug auf die Auswertung keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Probandengruppen,  $U = 1048.000$ ,  $z = -1.122$ ,  $p = .262$ .

#### *Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse zur Abhängigkeit der Informationsverarbeitung von der Präsentationsform*

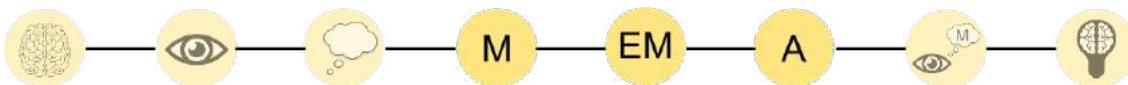
Um zu prüfen, ob die Schüler\*innen aufgrund der unterschiedlichen Präsentationsform (Video bzw. Schüler\*innenexperiment) unterschiedliche Beobachtungen und Auswertungen beschrieben haben, wurden die Ergebnisse der offenen Versuchsprotokolle der Video- und Schüler\*innenexperimente-Gruppe miteinander verglichen. Dabei zeigte sich, dass die Mediane deskriptiv bei der Beschreibung der Beobachtungen im Versuchsprotokoll der beiden Probandengruppen zwischen 6 (Video) und 3 (Schüler\*innenexperiment) lagen (vgl. Abbildung 52 (a)). Bei der Beschreibung der Auswertung sind die Mediane hingegen identisch ( $Median_{Auswertung} = 2,00$ ) (vgl. Abbildung 52 (b)).

Somit konnte in Bezug auf die Auswertung statistisch kein signifikanter Unterschied identifiziert werden,  $U = 1048.000$ ,  $z = -1.122$ ,  $p = .262$ . Einen signifikanten Unterschied gibt es bei der Beobachtung sowie dem Ergebnis des

gesamten Versuchsprotokolls (Summe der Ergebnisse von Beobachtung und Auswertung) zwischen der Video- und Schüler\*innenexperimente-Gruppe,  $U = 345.500$ ,  $z = -6.152$ ,  $p = .000$  (Beobachtung) und  $U = 521.500$ ,  $z = -4.830$ ,  $p = .000$  (Gesamtes Versuchsprotokoll). Die Effektstärke nach Cohen (1988) liegt bei der Beobachtung bei  $r = .60$  und entspricht einem starken Effekt. Bei dem gesamten Versuchsprotokoll liegt die Effektstärke nach Cohen (1988) bei  $r = .47$  und entspricht einem mittleren Effekt.

*Die in dieser Zwischenzusammenfassung dargestellten Ergebnisse werden auf S. 212 ff. diskutiert.*

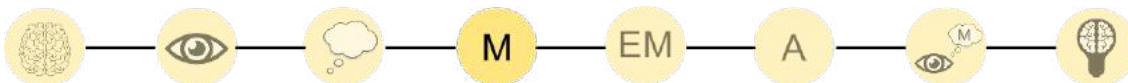
### 5.3 Denken in Analogien



#### Ziel III. Identifizierung von Denkmustern beim Umgang mit Modellexperimenten während des Denkens in Analogien

Im Folgenden werden die Denkmuster der Schüler\*innen, welche während des Denkens in Analogien an dem chemischen Gegenstand Staubexplosion erhalten wurden, vorgestellt und gemeinsam nach ihrer Makro-, Meso- und Mikroebene analysiert (vgl. Abschnitt 4.3.2.3). Die Ergebnisse beziehen sich auf zwei Teilstichproben. Zum einen auf die Schüler\*innen, die das Modellexperiment durchgeführt haben (Schüler\*innenexperiment, abgek. SE; nse = 67) und zum anderen auf die Schüler\*innen, die das Modellexperiment als Video geschaut haben (abgek. V; nv = 36) (vgl. Abschnitt 4.4). Insgesamt konnte ein Denkweg (von den insgesamt 67 Schüler\*innen der SE-Gruppe) beim Mapping von 52 Schüler\*innen und bei der Anwendung von 55 Schüler\*innen identifiziert werden. Von den Schüler\*innen der Video-Gruppe (nv = 36) war von 31 Schüler\*innen ein Denkweg beim Mapping identifizierbar und von 33 Schüler\*innen bei der Anwendung.

#### 5.3.1 Mapping von Schüler\*innen beim Umgang mit Modellexperimenten



Bevor die Denkwege der Schüler\*innen nach ihrer Makro-, Meso- und Mikroebene gemeinsam dargestellt werden, soll zunächst beispielhaft ein Einblick in die Komplexität und Individualität der Denkwege von Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe während des *Vergleichens (Mapping)* beim Denken in Analogien am chemischen Gegenstand Staubexplosion vorgestellt werden. Daher werden im Folgenden drei ausgewählte Denkwege und Verknüpfungen zwischen einzelnen Phrasen

vorgestellt und erläutert. Bei der Auswahl der Beispiele wurden Denkwege ausgewählt, die mehr als eine Analogieoperation beinhalten, einen ausgeglichenen Komplexitätsgrad aufweisen. Damit sollen typische Wege und Verknüpfungen auf den unterschiedlichen Ebenen veranschaulicht werden.

### **Ansatz 1:**

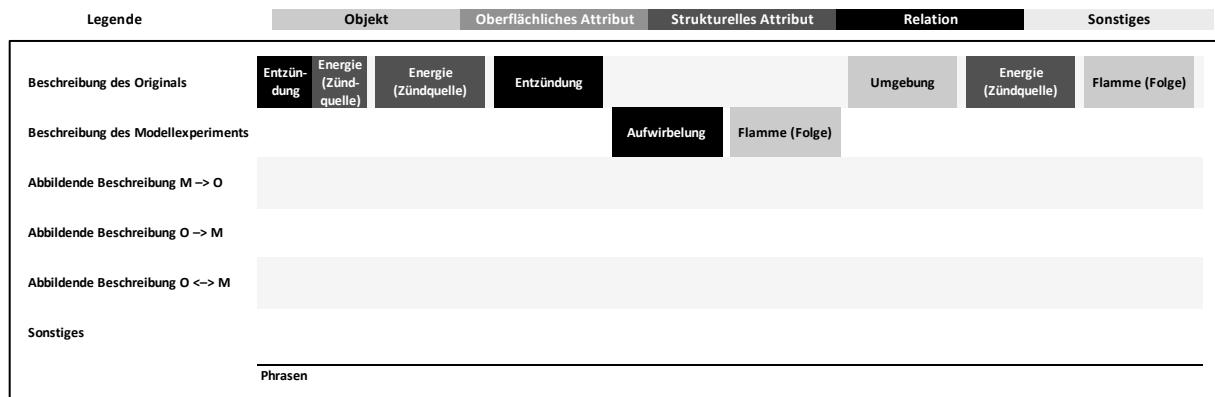


Abbildung 53: Denkgraph ohne expliziten Vergleich (z.B. LM1307).

In Ansatz (I) wurden das Original und das Modellexperiment getrennt voneinander beschrieben und kein expliziter Vergleich der beiden Bereiche durchgeführt (vgl. Abbildung 53). Zuerst wurde das Original und dann das Modellexperiment beschrieben, bevor der Denkprozess mit der Beschreibung des Originals abgeschlossen wurde. Auffällig ist, dass bei der Beschreibung des Originals zunächst die Relation *Entzündung* genannt wurde. Bei ihr trifft der Stoff mit der Zündquelle zusammen und es kommt zu einer Entzündung. Gleichzeitig wurde das für eine Explosion relevante Objekt *Zündquelle* direkt mit dem strukturellen Attribut *Energie* verknüpft. Anschließend wurde die entscheidende Relation *Aufwirbelung*, die auf einer Interaktion des Stoffes mit der Luft basiert, im Modellexperiment erkannt. Jedoch wurde sie nicht auf das Original übertragen. Vielmehr wurde die Mühle als Umgebung erkannt und die Energie der Zündquelle wiederholt erwähnt. Abschließend wurde die Flamme als Folge – nachdem sie auch im Modellexperiment als mitteilungsrelevant erachtet wurde – auch im Original genannt. Sie stellt eine Ähnlichkeit zwischen dem Modellexperiment und dem Original dar.

## 5 Ergebnisse

### Ansatz 2:

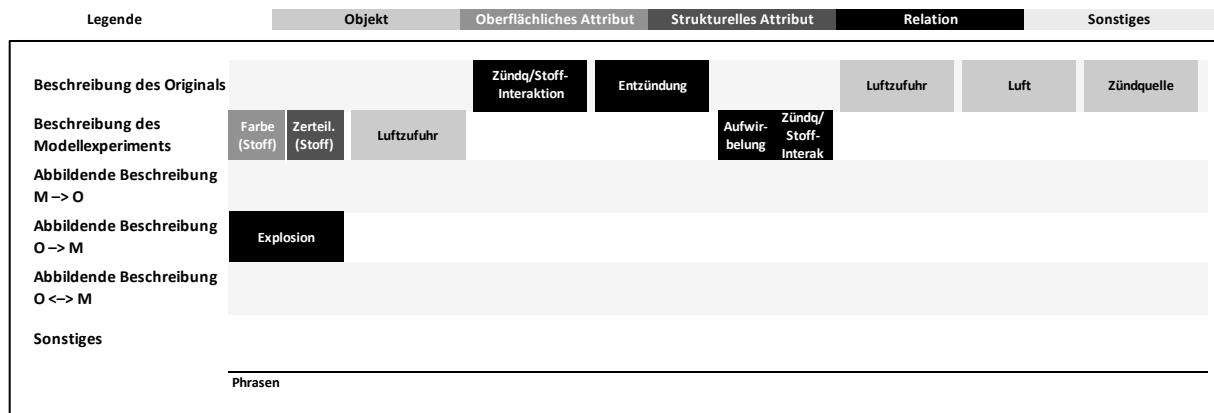


Abbildung 54: Denkgraph mit explizitem Vergleich (z. B. PA1006).

Bei Ansatz (2) wurde vom Original mit vertiefender Beschreibung des Modellexperiments ausgehend immer wieder zwischen Original und Modellexperiment hin- und hergewechselt (vgl. Abbildung 54). Dabei wurde zunächst die Relation *Explosion* von dem Original auf das Modellexperiment abgebildet, d.h. explizit übertragen. Diese Relation wurde durch das oberflächliche Attribut der Farbe des Stoffes und das strukturelle Attribut *Pulver* in Verbindung mit dem Stoff, der im Modellexperiment eingesetzt wurde, näher charakterisiert. Im Verlauf des Denkprozesses wurde die *Luftzufuhr* (Objekt), welche im Modellexperiment wahrgenommen wurde, auch während der Beschreibung des Originals aufgegriffen. Im Gegensatz dazu wurde die *Zündquellen/Stoff-Interaktion* zunächst während der Beschreibung des Originals genannt und während der Beschreibung des Modellexperiments aufgegriffen und mit der *Aufwirbelung* verknüpft.

### Ansatz 3:

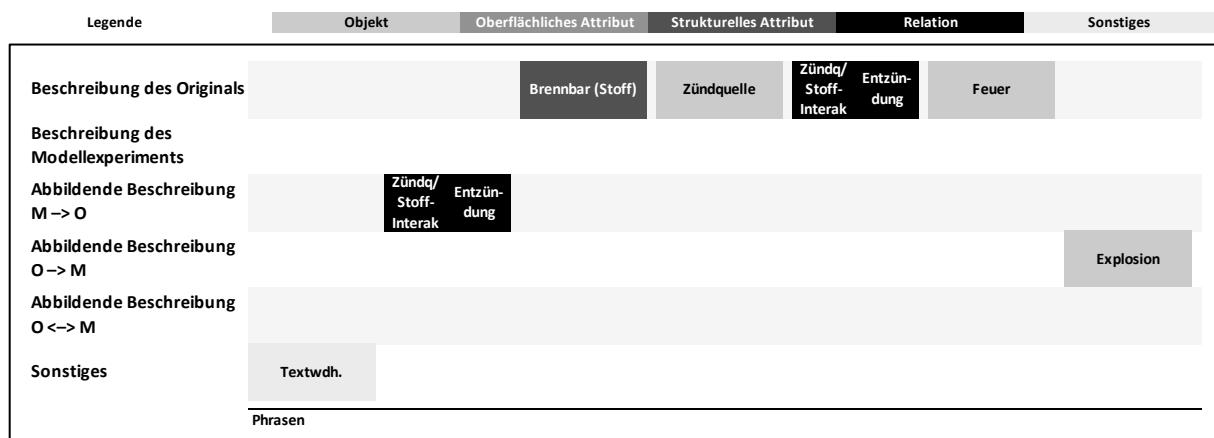


Abbildung 55: Mit einem expliziten Vergleich startender und abschließender Denkgraph (z.B. LO1607).

Im Gegensatz zu den vorherigen Ansätzen wurde teilweise auch ausgehend vom Modellexperiment direkt mit einer Abbildung vom Modellexperiment zum

Original, einem expliziten Vergleich, gestartet (vgl. Abbildung 55). In dem beispielhaften Ansatz 3 wurden die Relationen *Zündquellen-Stoff-Interaktion* und *Entzündung* explizit verglichen und dabei vom Modellexperiment auf das Original abgebildet. Daran knüpfte eine nähere Beschreibung des Stoffes mit dem Attribut *Brennbarkeit* im Original an. Auch die Zündquelle wurde als Objekt bei der Beschreibung des Originals wiederholt genannt. Anschließend wurde das Original durch Objekte (z.B. Zündquelle) und weitere bzw. wiederholende Relationen näher beschrieben. Abschließend wurde das Objekt *Explosion* von dem Original zum Modellexperiment abgebildet.

Anhand der beispielhaft vorgestellten Wege fällt auf, dass eine allgemeine Beschreibung der Denkmuster aufgrund der Individualität der einzelnen Denkwege bei gleichzeitig hoher Informationsdichte und simultaner Betrachtung aller Ebenen schwierig ist. Um trotzdem Erkenntnisse über die Ähnlichkeiten der Denkwege der Schüler\*innen erhalten zu können und die Wege vergleichend zu beschreiben, wurden die Denkwege im Hinblick auf die drei Ebenen, Makro- (Analogieoperationen), Meso- (Analogiearten) und Mikroebene (themenbezogene Inhalte), analysiert (vgl. Abschnitt 4.3.4.3, Abbildung 9). Diese entsprechend kategorisierten Denkwege werden im Folgenden vergleichend dargestellt.

### ***Makroebene der Denkwege mit der zeitlichen Abfolge der Analogieoperationen beim Mapping***

(*Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse auf S. 163 f.*)

Die erhaltenen Denkgraphen erlauben Aussagen darüber, auf welche Art und Weise Schüler\*innen das Mapping innerhalb eines eigenständigen Denkprozesses realisieren konnten und inwiefern es Ähnlichkeiten zwischen den einzelnen Denkprozessen gibt.

Dazu sind die in den einzelnen Denkwegen genutzten Analogieoperationen (Mikroebene) und deren Veränderungen in einem zeitabhängigen Linien-Graphen dargestellt (vgl. Abschnitt 4.3.4.3). Insgesamt können die Schüler\*innen maximal fünf verschiedene Analogieoperationen nutzen. Davon beschreiben zwei Operationen (Beschreibung des Originals, Beschreibung des Modellexperiments) einen Bereich, drei Operationen führen eine direkte Abbildung, d.h. einen expliziten Vergleich, durch (vgl. Abschnitt 4.3.4.3). Da die von den Schüler\*innen bearbeitete Aufgabe auf einen Vergleich von Modellexperiment und Original abzielte, wäre eine abbildende Beschreibung eines Merkmals (Zeilen 3–5 des Denkgraphen), welches von den Schüler\*innen als Ähnlichkeiten identifiziert wird, zur Lösung der Aufgabe am zielführendsten gewesen.

Zusätzlich lässt sich auch eine Aussage über die Anzahl der Phrasen während der Denkprozesse treffen. Dabei ist eine Phrase ein inhaltsrelevanter Abschnitt und ist definiert durch die Analogieoperation, Analogieart und den konkreten Inhalt (vgl. Abschnitt 4.3.4.3).

### **Gruppierung nach der Anzahl genutzter Analogieoperationen**

Während des Mappings gibt es Schüler\*innen, die in ihren Denkwegen ausschließlich eine Analogieoperation nutzten ( $nv = 5$ ,  $nse = 18$ ), und Schüler\*innen, die zwei oder mehr Analogieoperationen nutzten ( $nv = 23$ ,  $nse = 32$ ).

Doppelt so viele Schüler\*innen der SE-Gruppe sind im Vergleich zur V-Gruppe während ihres Denkweges ausschließlich in **einer Analogieoperation** geblieben ( $nv = 5$ , 18 %;  $nse = 18$ , 36 %; vgl. Abbildung 56). Unabhängig von der Präsentationsform wurde von diesen Schüler\*innen schwerpunktmäßig das *Original* ausschließlich beschrieben ( $nv = 4$ , 80,0 %;  $nse = 15$ , 83,3 %), sodass auch hauptsächlich mit der Beschreibung des Originals geendet wurde ( $nv = 5$ , 100,0 %;  $nse = 16$ , 88,9 %). Im Mittel haben die Schüler\*innen der beiden Gruppe ähnlich viele Phrasen genutzt ( $MSE = 3,07$  Phrasen,  $SDSE = 1,97$ ;  $Mv = 2,25$  Phrasen,  $SDv = 0,71$ ).

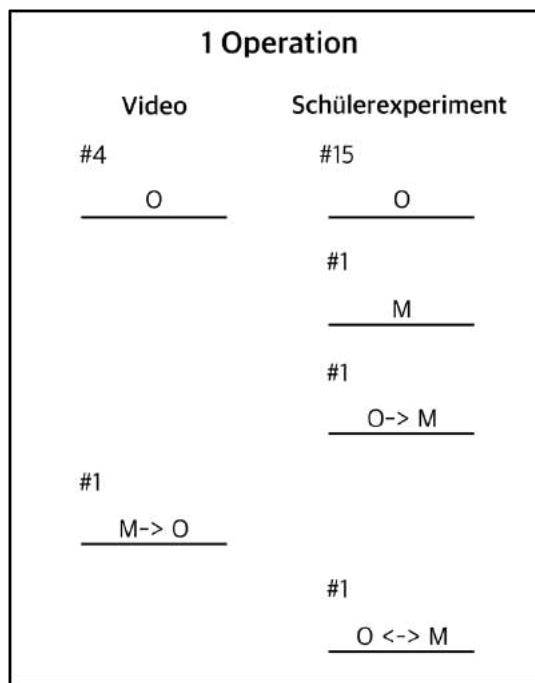


Abbildung 56: Denkwege mit **einer Analogieoperation** differenziert nach der Präsentationsform des Modellexperiments und deren absoluter Häufigkeit.

**Zwei verschiedene Operationen** wurden während des Vergleiches von den Schüler\*innen der V-Gruppe etwas häufiger genutzt als von den Schüler\*innen der SE-Gruppe ( $nv = 11$ , 39 %;  $nse = 16$ , 32 %; vgl. Abbildung 57-Abbildung 59). Unabhängig von den Präsentationsformgruppen konnten die Schüler\*innen, die zwei Operationen nutzten, in zwei gruppenübergreifende Klassen aufgeteilt werden: zum

einen die Schüler\*innen, die nur Beschreibungen der Bereiche durchgeführt haben (Abbildung 57) und zum anderen die Schüler\*innen, die zusätzlich abbildende Beschreibungen verwendeten (Abbildung 58 - Abbildung 59).

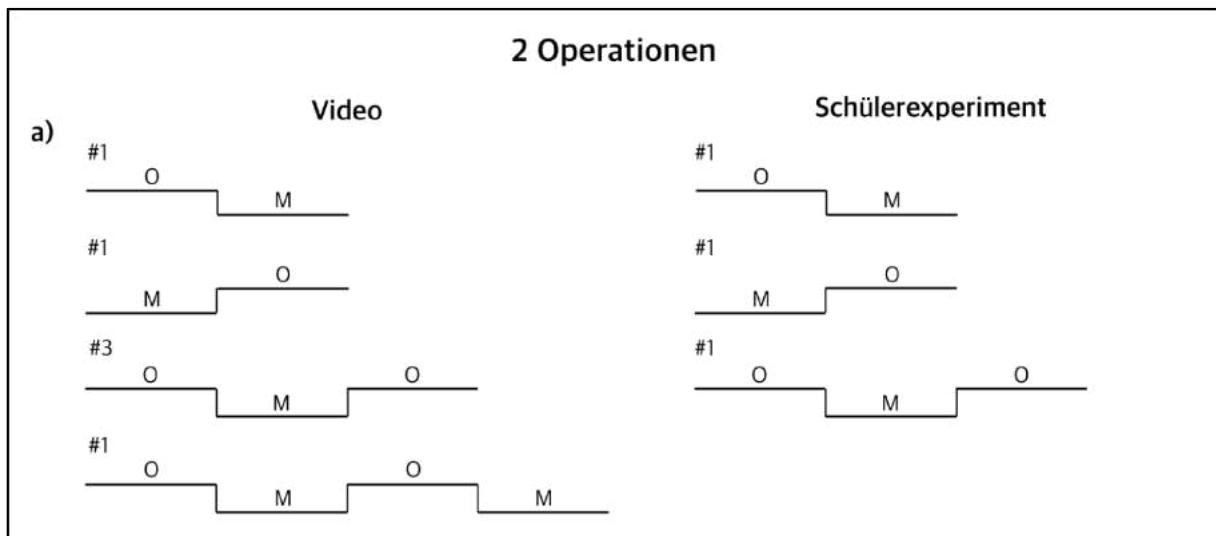


Abbildung 57: Denkwege mit zwei Analogieoperationen (Beschreibung) differenziert nach der Präsentationsform des Modellexperiments und deren absoluter Häufigkeit.

Insgesamt wurde bei den Denkweegen der Schüler\*innen, die lediglich die Bereiche Original und Modellexperiment beschrieben haben, häufiger das Original als das Modellexperiment als Ausgangspunkt genutzt (O: 7, ME: 2). Innerhalb der Denkwege haben die Schüler\*innen der V-Gruppe häufiger mehr als einmal den Bereich gewechselt als die SE-Gruppe (nv = 4, 36,4 %; nSE = 1, 6,3 %). Geendet haben die Schüler\*innen beider Stichprobengruppen hauptsächlich auf der Beschreibung des Originals (O: nv = 4, 36,4 %; nSE = 2, 12,5 %; ME: nv = 2, 18,2 %; nSE = 1, 6,3 %). Auch wenn die Schüler\*innen der V-Gruppe ( $M_v = 5,33$ ;  $SD_v = 2,80$ ) und der SE-Gruppe ( $M_{SE} = 5,67$ ;  $SD_{SE} = 0,58$ ) im Mittel ähnlich viele Phrasen genutzt haben, variierte die Anzahl der Phrasen zwischen 2 und 10 in der V-Gruppe sowie zwischen 5 und 6 in der SE-Gruppe.

Bei den Denkweegen der Schüler\*innen, die zusätzlich abbildende Beschreibungen verwendeten, konnten die folgenden Verknüpfungen der Analogieoperationen identifiziert und kategorisiert werden:

In Abbildung 58 b) sind die Denkwege, die die *Beschreibung des Modellexperiments* und *Abbildende Beschreibung M → O* miteinander verknüpfen, gezeigt. Abbildung 58 c) zeigt die Denkwege, die die *Beschreibung des Originals* und *Abbildende Beschreibung O ↔ M* miteinander verknüpfen.

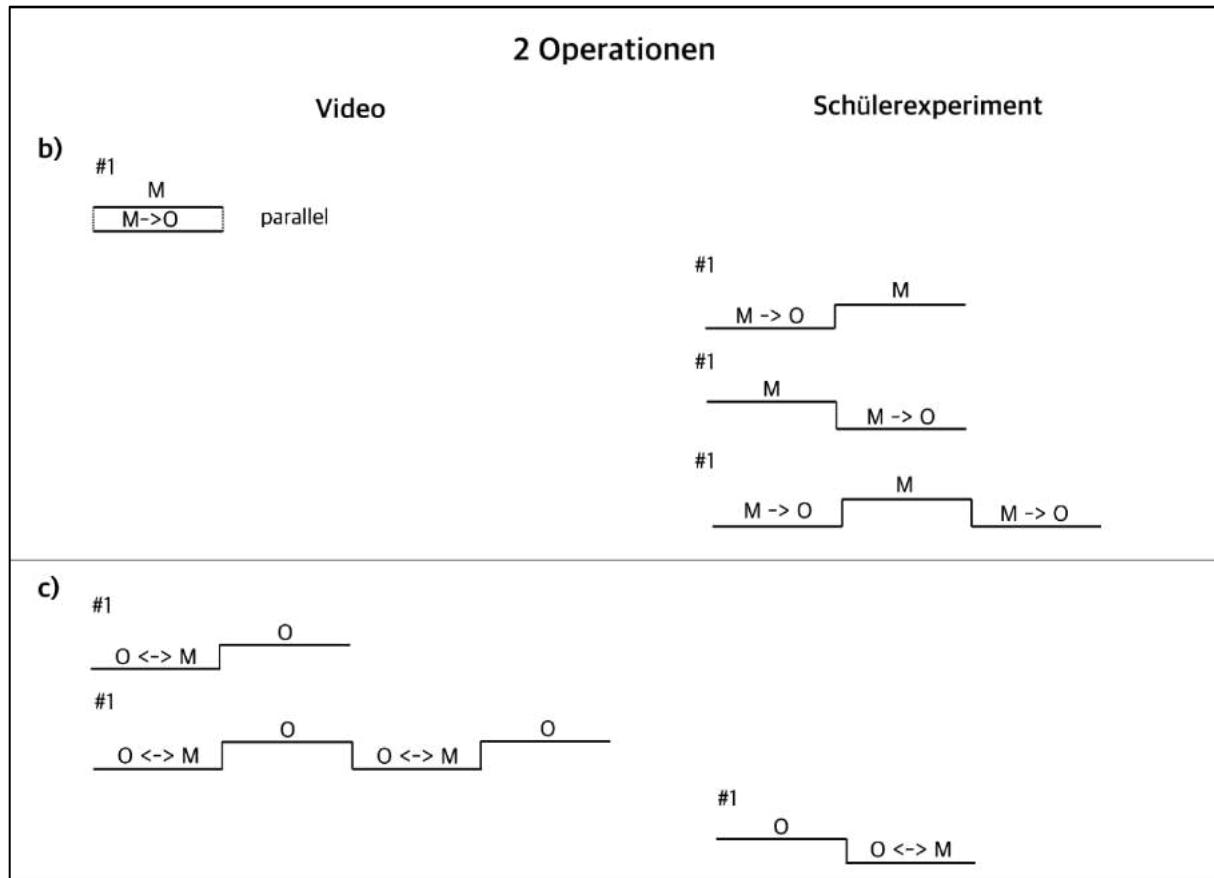


Abbildung 58: Denkwege mit zwei Analogieoperationen (*Beschreibung und abbildende Beschreibung*) differenziert nach der Präsentationsform des Modellexperiments und deren absoluter Häufigkeit.

Weiterhin sind in

- Abbildung 59 d) Denkwege, die die *Beschreibung des Modellexperiments* und *Abbildende Beschreibung*  $O \leftrightarrow M$  miteinander verknüpfen,
- Abbildung 59 e) Denkwege, die die *Beschreibung des Originals* und *Abbildende Beschreibung*  $M \rightarrow O$  miteinander verknüpfen,
- Abbildung 59 f) Denkwege, die die *Beschreibung des Originals* und *Abbildende Beschreibung*  $O \rightarrow M$  miteinander verknüpfen,
- Abbildung 59 g) Denkwege, die die *Abbildende Beschreibung*  $M \rightarrow O$  und *Abbildende Beschreibung*  $O \leftrightarrow M$  miteinander verknüpfen,
- Abbildung 59 h) *Abbildende Beschreibung*  $O \rightarrow M$  und *Abbildende Beschreibung*  $O \leftrightarrow M$  miteinander verknüpfen,

gezeigt. Die Verknüpfungen der Analogieoperationen in Abbildung 58 b) und c) konnten bei beiden Stichprobengruppen identifiziert werden. Die Verknüpfungen der Analogieoperationen in Abbildung 59 d), e), f), g) und h) wurden jeweils entweder nur von den Schüler\*innen der V-Gruppe oder den Schüler\*innen der SE-Gruppe innerhalb der Denkprozesse genutzt.

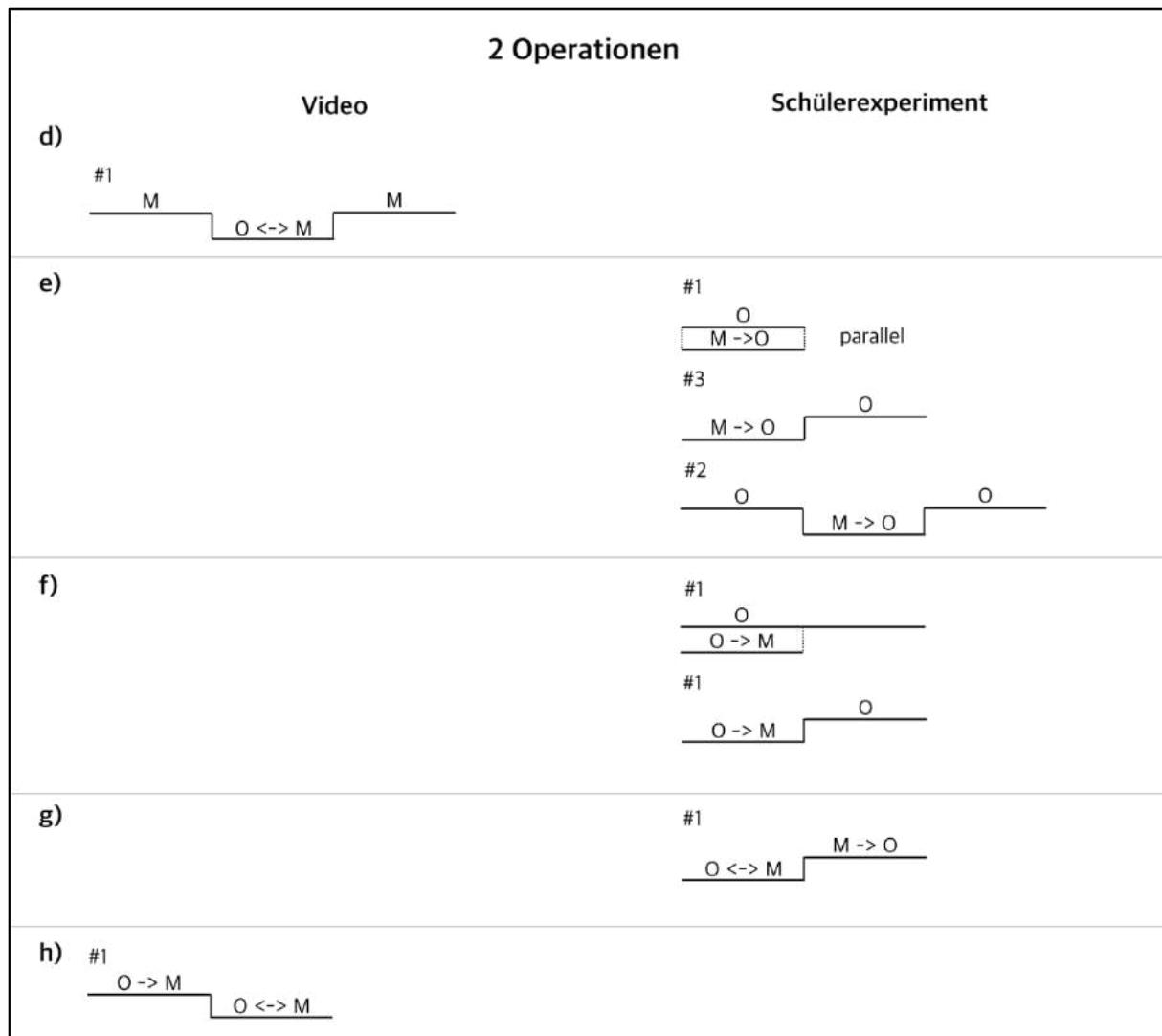


Abbildung 59: Denkwege mit zwei Analogieoperationen (Beschreibung und abbildende Beschreibung, zwei abbildende Beschreibungen) differenziert nach der Präsentationsform des Modellexperiments und deren absoluter Häufigkeit.

Insgesamt nahm bei den Schüler\*innen, die eine Beschreibung mit einer abbildende Beschreibung verknüpft haben, das Modellexperiment an Präsenz zu (vgl. Abbildung 58 b) & c) und Abbildung 59 d) – f)). Das Modellexperiment war in 13 von 16 Fällen der Ausgangspunkt. Das Original war ausschließlich in 3 von 16 Fällen alleiniger Ausgangspunkt. Gleichwohl endeten die Denkwege weiterhin schwerpunktmäßig auf dem Original (O: nv = 4, 80,0%; nse = 12, 92,3%; ME: nv = 1, 20,0%; nse = 1, 7,7%).

**Drei verschiedene Operationen** wurden vergleichbar häufig von beiden Stichprobengruppen genutzt (nv = 6, 21%; nse = 12, 24%; Abbildung 60 – Abbildung 62). In den Denkweegen der Schüler\*innen, die innerhalb ihrer drei Analogieoperationen eine abbildende Beschreibung nutzten, konnten die folgenden vier Verknüpfungen der Analogieoperationen identifiziert werden:

- I Beschreibung des Originals, Beschreibung des Modellexperiments und richtungsabhängige abbildende Beschreibung  $M \rightarrow O$  (Abbildung 60 a)),

- 2 Beschreibung des Originals, Beschreibung des Modellexperiments und *richtungsabhängige abbildende Beschreibung*  $O \rightarrow M$  (Abbildung 61 b)),
- 3 Beschreibung des Originals, Beschreibung des Modellexperiments und *richtungsunabhängige abbildende Beschreibung*  $O \leftrightarrow M$  (Abbildung 61 c)),
- 4 Beschreibung des Originals bzw. des Modellexperiments und zwei *abbildende Beschreibungen* (Abbildung 62 d) – f)).

Die Verknüpfungen der Analogieoperationen unter (1) und (2) konnten bei beiden Stichprobengruppen identifiziert werden. Die Verknüpfung der Analogieoperationen unter (1) wurde von den Schüler\*innen der SE-Gruppe häufiger genutzt als von den Schüler\*innen der V-Gruppe ( $nv = 1, 16,7\%$ ;  $nse = 5, 41,7\%$ ). Die Anzahl der dabei genutzten Phrasen ist bei der V-Gruppe höher ( $Mv = 11$ ) als bei der SE-Gruppe ( $Minse = 5$ ,  $Maxse = 9$ ,  $Mse = 6,2$ ,  $SDse = 1,64$ ). Die Verknüpfungen der Analogieoperationen in (3) und (4) wurden innerhalb der Denkprozesse jeweils entweder nur von den Schüler\*innen der V-Gruppe oder nur von den Schüler\*innen der SE-Gruppe genutzt.

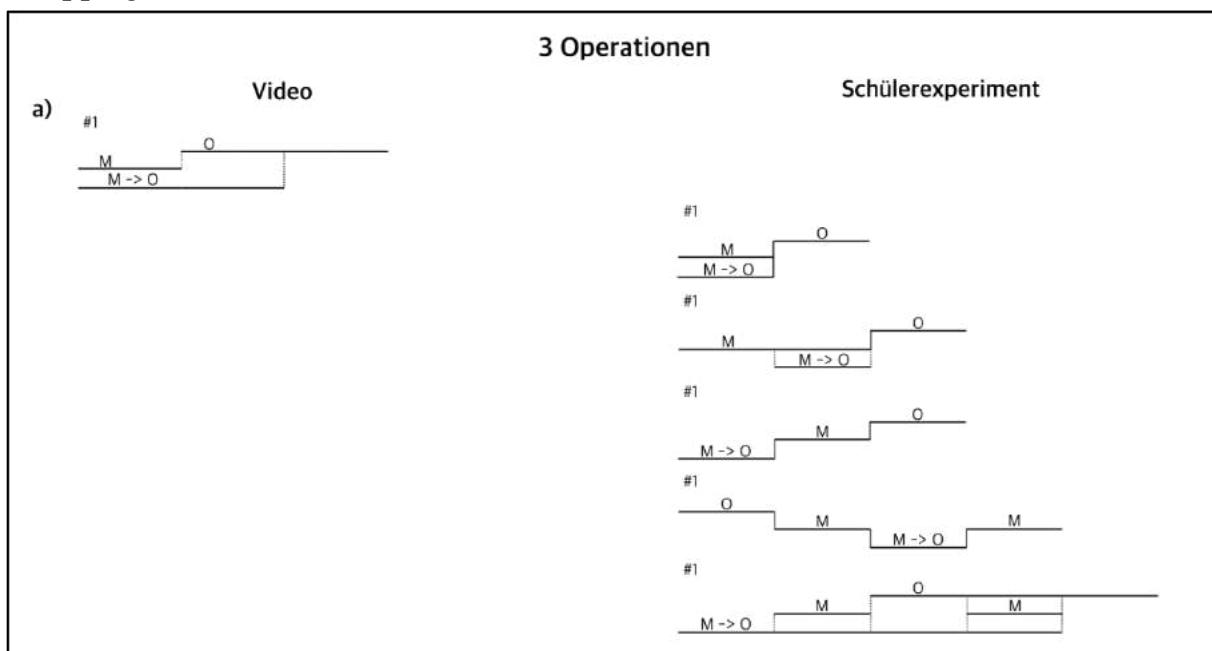


Abbildung 6o: Denkwege mit drei Analogieoperationen (Beschreibung und abbildende Beschreibung  $M \rightarrow O$ ) differenziert nach der Präsentationsform des Modellexperiments und deren absoluter Häufigkeit.

Insgesamt wurden bei den beiden Verknüpfungstypen in Abbildung 61 die Denkwege häufiger mit einer Abbildung entweder ausgehend vom Original oder Modellexperiment begonnen ( $n_{\text{Abbildung\_gesamt}} = 4$ ;  $n_{\text{Beschreibung\_gesamt}} = 2$ ), bei denen der Schwerpunkt auf dem Original lag (Beschreibung bzw. abbildende Beschreibung) ( $O$ :  $nv = 3, 100,0\%$ ;  $nse = 4, 80,0\%$ ; ME:  $nv = 0$ ;  $nse = 1, 20,0\%$ ). Wurde der Denkweg jedoch mit einer Beschreibung (Original/Modellexperiment) gestartet, so schloss sich eine abbildende Beschreibung direkt an.

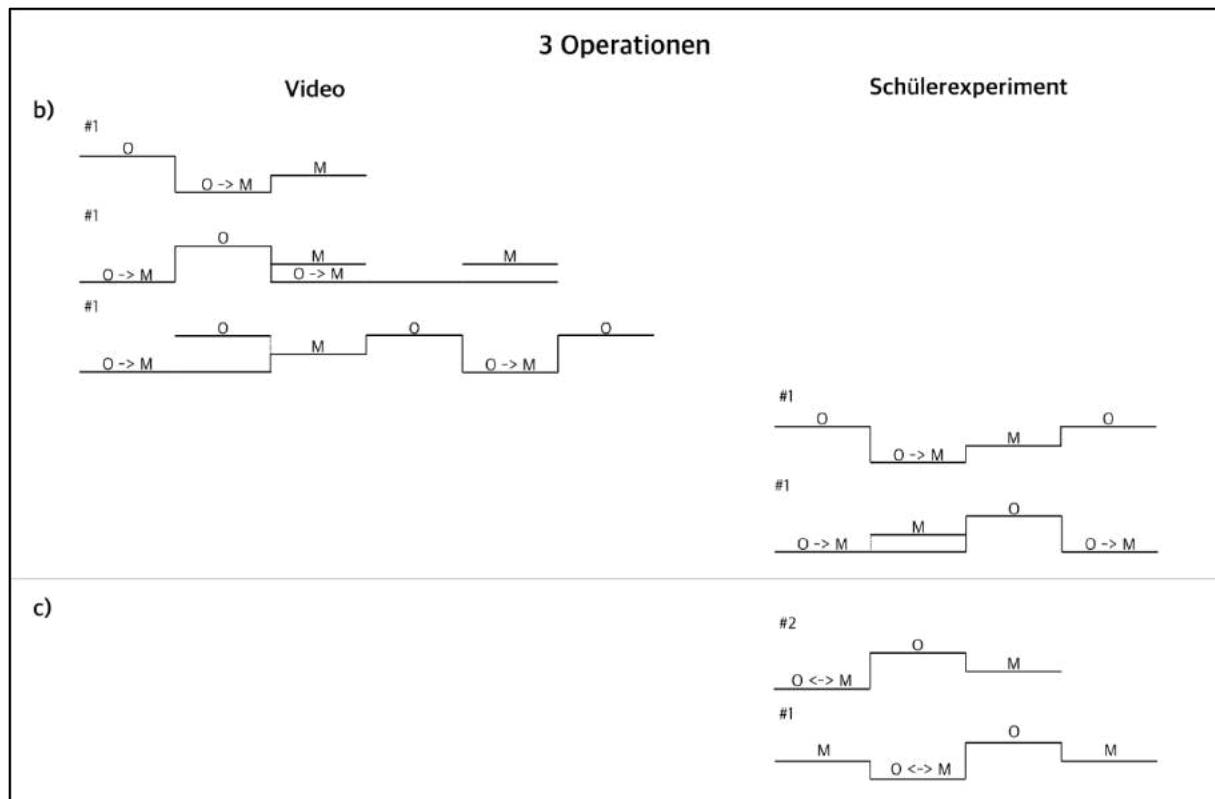


Abbildung 61: Denkwege mit drei Analogieoperationen (Beschreibung und abbildende Beschreibung  $O \rightarrow M$  bzw.  $O \leftrightarrow M$ ) differenziert nach der Präsentationsform des Modellexperiments und deren absoluter Häufigkeit.

Insgesamt haben die Denkwege in beiden Stichprobengruppen bei der Verknüpfung von drei Analogieoperationen gleich häufig mit der Beschreibung des Originals bzw. des Modellexperiments geendet ( $O$ : nv = 3, 50,0 %; nSE = 6, 50,0 %; ME: nv = 3, 50,0 %; nSE = 6, 50,0 %).

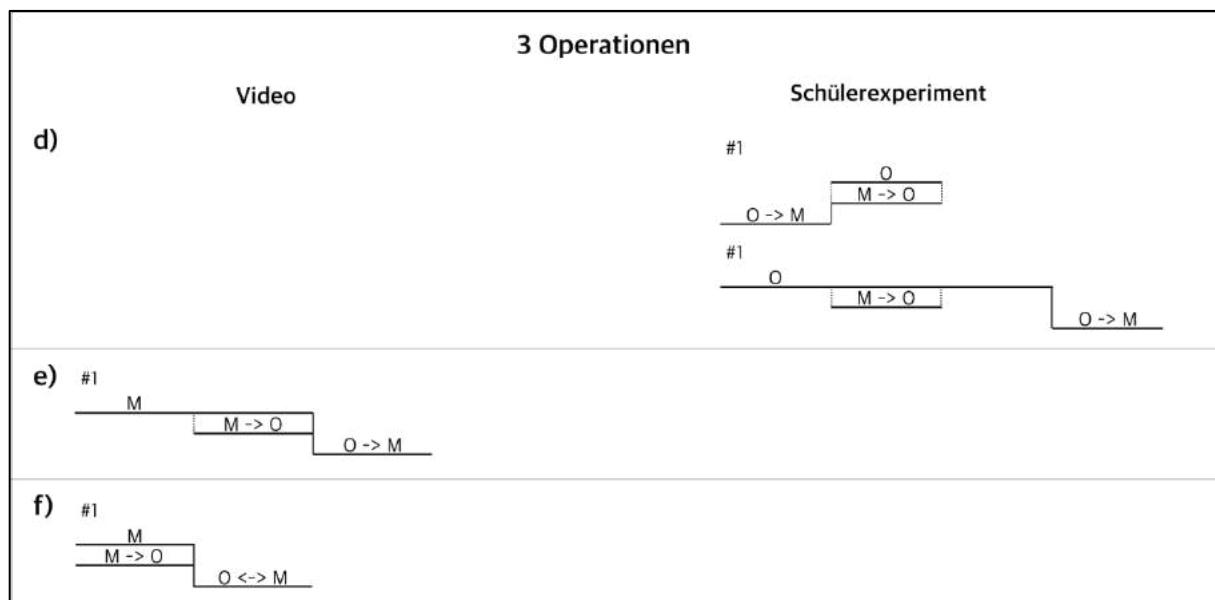


Abbildung 62: Denkwege mit drei Analogieoperationen (Beschreibung und zwei abbildende Beschreibungen  $O$ ) differenziert nach der Präsentationsform des Modellexperiments und deren absoluter Häufigkeit.

Beim Einsatz von **vier verschiedenen Operationen** wurde die Kombination der Analogieoperationen *Beschreibungen des Originals bzw. Modellexperiments*, und den beiden richtungsabhängigen abbildenden Beschreibungen vom Modellexperiment zum Original und umgekehrt vom Original zum Modellexperiment von den Schüler\*innen der V-Gruppe ( $nv = 3, 10,7\%$ ) häufiger genutzt als von den Schüler\*innen der SE-Gruppe ( $nse = 3, 6,0\%$ ; Abbildung 63 a)). Die Anzahl der Phrasen ist bei der SE-Gruppe ( $Minse = 8, Maxse = 12, Mse = 10,67, Sdse = 2,31$ ) etwas höher als bei der V-Gruppe ( $Minv = 6, Maxv = 10, Mv = 7,33, SDv = 2,31$ ). Insgesamt bildet das Modellexperiment bei beiden Stichprobengruppen den Hauptausgangspunkt (ME-gesamt: 5; Ogesamt: 2). Dabei gehen alle Schüler\*innen unterschiedliche Wege mit 4 bis 6 Veränderungen der Operationen. Die Schüler\*innen der V-Gruppe enden ausschließlich mit dem Original, die Schüler\*innen der SE-Gruppe enden gleich häufig mit dem Original bzw. Modellexperiment (O:  $nv = 3, 100,0\%$ ;  $nse = 2, 50,0\%$ ; ME:  $nv = 0, nse = 2, 50,0\%$ ).

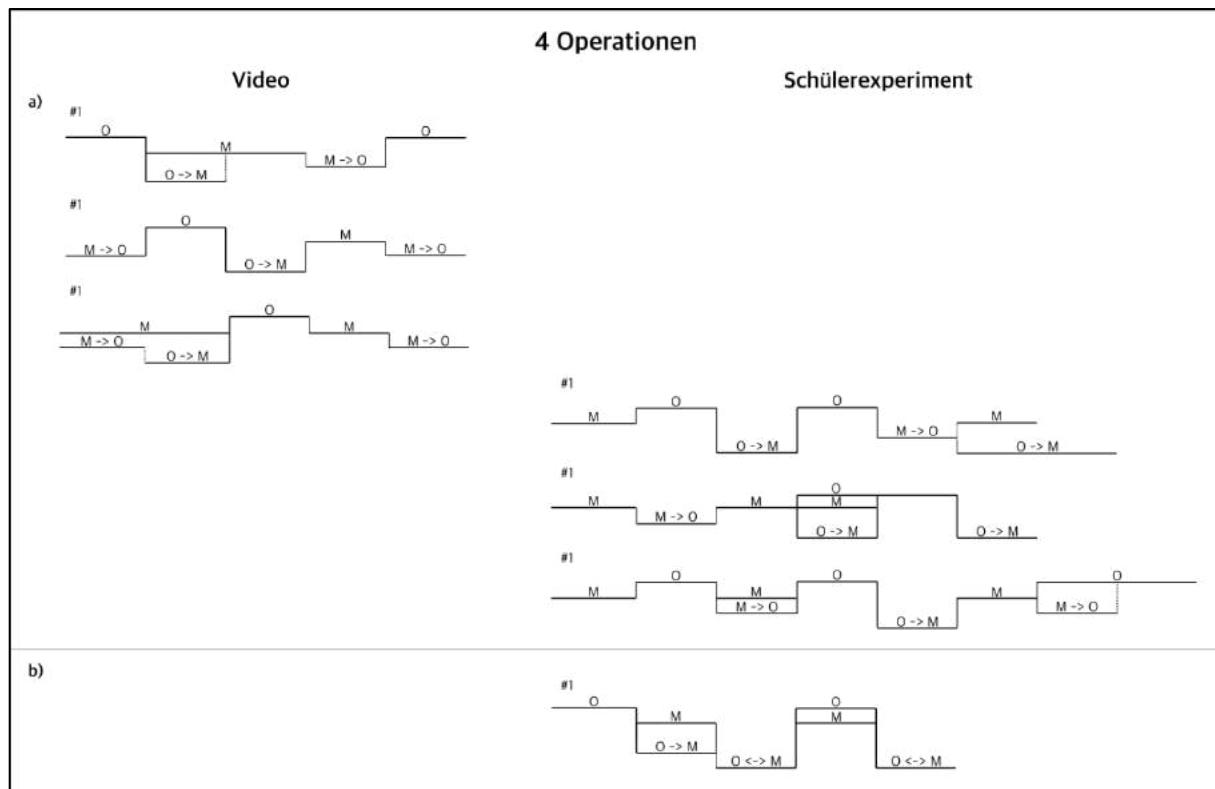


Abbildung 63: Denkwege mit vier Analogieoperationen differenziert nach der Präsentationsform des Modellexperiments und deren absoluter Häufigkeit.

Alle **fünf verschiedenen Operationen** wurden lediglich von drei Schüler\*innen der V-Gruppe genutzt und auf unterschiedlichen Wegen miteinander verknüpft (Abbildung 64). Bei allen Denkwegen bildet die richtungsunabhängige abbildende Beschreibung den Ausgangspunkt. Die Denkwege enden mit dem Original (Beschreibung bzw. abbildende Beschreibung mit Endpunkt Original).

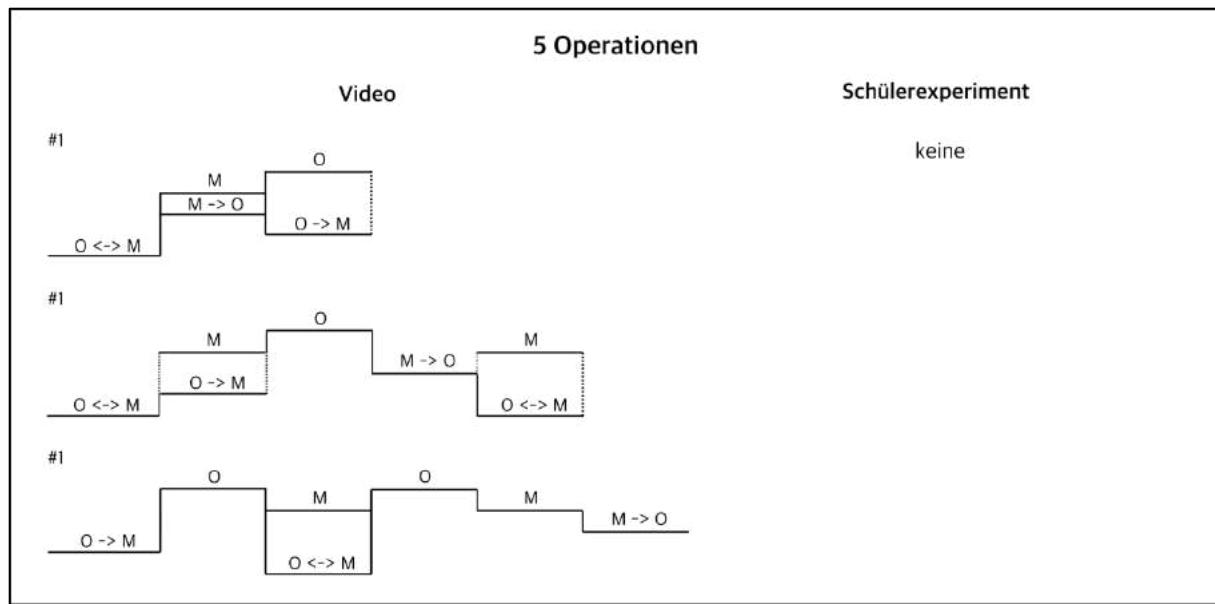


Abbildung 64: Denkwege mit fünf Analogieoperationen differenziert nach der Präsentationsform des Modellexperiments und deren absoluter Häufigkeit.

#### Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse zur **Makroebene** beim Mapping

In Bezug auf das Mapping haben nahezu alle Schüler\*innen der beiden Probandengruppen während ihrer Denkprozesse Phrasen mit relevanten Inhalten genannt ( $nv = 28$ ,  $nse = 50$ ). Dabei wurden von den Schüler\*innen beider Gruppe insgesamt ähnlich viele Phrasen genutzt.

Die zeitliche Abfolge der in den Denkwegen genutzten Analogieoperationen wurde auf der **Makroebene** zusammengefasst. Unter den erhobenen Denkwege konnten Verknüpfungen von einer bis fünf Analogieoperationen identifiziert werden.

Dabei gab es Schüler\*innen, die in ihren Denkwegen ausschließlich eine Analogieoperation nutzten ( $nv = 5$ ,  $17,9\%$ ;  $nse = 18,36,0\%$ ), und Schüler\*innen, die zwei oder mehr Analogieoperationen nutzten ( $nv = 23$ ,  $82,1\%$ ,  $nse = 32,64,0\%$ ). Insgesamt wurde von den Schüler\*innen der SE-Gruppe am häufigsten eine Operation genutzt (36%). Bei den Schüler\*innen der V-Gruppe lag der Schwerpunkt auf der Nutzung von zwei Operationen (39%). Alle fünf Operationen wurden ausschließlich von Schüler\*innen der V-Gruppe genutzt ( $nv = 5$ , 11%).

Auf der Makroebene konnten teilweise Verknüpfungsmuster der Analogieoperationen in beiden Stichprobengruppen identifiziert werden. Es gab jedoch auch Verknüpfungen von Operationen, die entweder nur in der V-Gruppe oder der SE-Gruppe auftraten. Insgesamt ist beim Betrachten der Abfolge der einzelnen Analogieoperationen innerhalb der verschiedenen Verknüpfungsmuster aufgefallen, dass die Denkwege sehr individuell sind. Daher

konnten ausschließlich bei *einer Operation* und der Verknüpfung der beiden Beschreibungen (*zwei Operationen*) bei der V- und SE-Gruppe ähnliche Muster in der konkreten Abfolge der Operationen identifiziert werden (vgl. Abbildung 56, Abbildung 57).

Wurden ausschließlich die beschreibenden Operationen innerhalb der Denkwege genutzt, so bildete das Original unabhängig von der Präsentationsform den schwerpunktmaßen Ausgangspunkt. Wurde eine Beschreibung mit einer abbildenden Beschreibung verknüpft, nahm die Präsenz des Modellexperiments zu. Jedoch endeten die Denkwege weiterhin hauptsächlich mit dem Original, wenn ein, zwei, vier oder fünf Operationen innerhalb des Denkweges genutzt wurden.

*Die in dieser Zwischenzusammenfassung dargestellten Ergebnisse werden auf S. 215 ff. diskutiert.*

### Mesoebene der Denkwege mit der zeitlichen Abfolge der Analogiearten beim Mapping

(Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse auf S. 166)

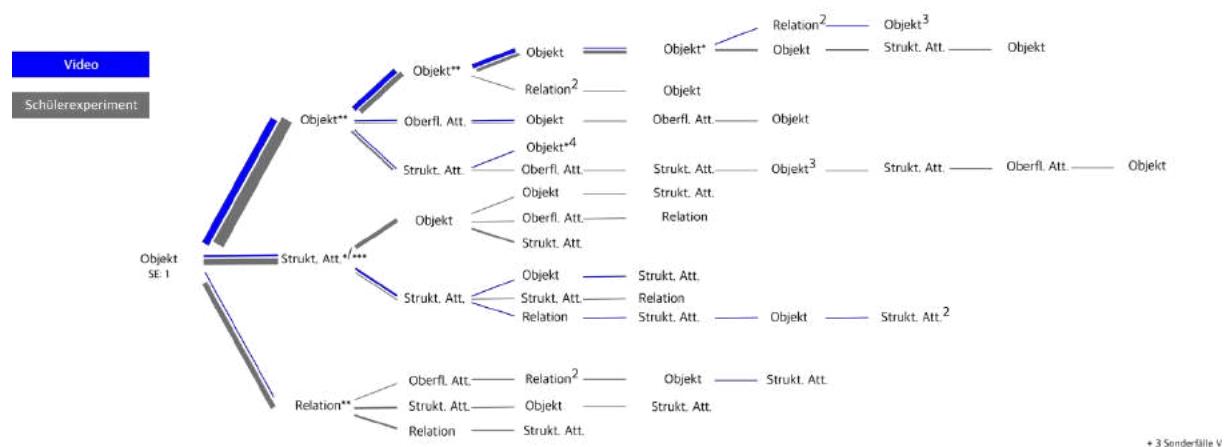


Abbildung 65: Gemeinsame Roadmap der Schüler\*innen der V-Gruppe und der SE-Gruppe während des Vergleiches von Modellexperiment und Original ausgehend von einem Objekt.

Während des Vergleiches von Modellexperiment und Original wurde von den Schüler\*innen der SE-Gruppe am häufigsten mit der Nennung eines *Objektes* begonnen (NSE = 23,46,0 %, vgl. Abbildung 65). Das Nennen eines Objektes war für die Schüler\*innen der V-Gruppe der zweithäufigste Startpunkt (nv = 13,41,9 %). Dabei fällt auf, dass, wenn mit einem Objekt begonnen wurde, am häufigsten auch weitere Objekte genannt wurden (vgl. Abbildung 65, oberster Arm). Beendet wurden die Denkprozesse insgesamt am häufigsten mit einem Objekt.



Abbildung 66: Gemeinsame Roadmap der Schüler\*innen der V-Gruppe und der SE-Gruppe während des Vergleiches von Modellexperiment und Original ausgehend von einem oberflächlichen Attribut (Vergrößerung in der Onlineversion möglich).

Der Ausgangspunkt *oberflächliches Attribut* wurde von lediglich drei Schüler\*innen, die das Schüler\*innenexperiment durchgeführt haben, als Ausgangspunkt für ihren Vergleich verwendet (Abbildung 66). Diese Vergleiche blieben nicht auf einer oberflächlichen Ebene, da es im Verlauf von allen drei Denkprozessen zu jeweils mindestens einer Nennung einer Relation kam.

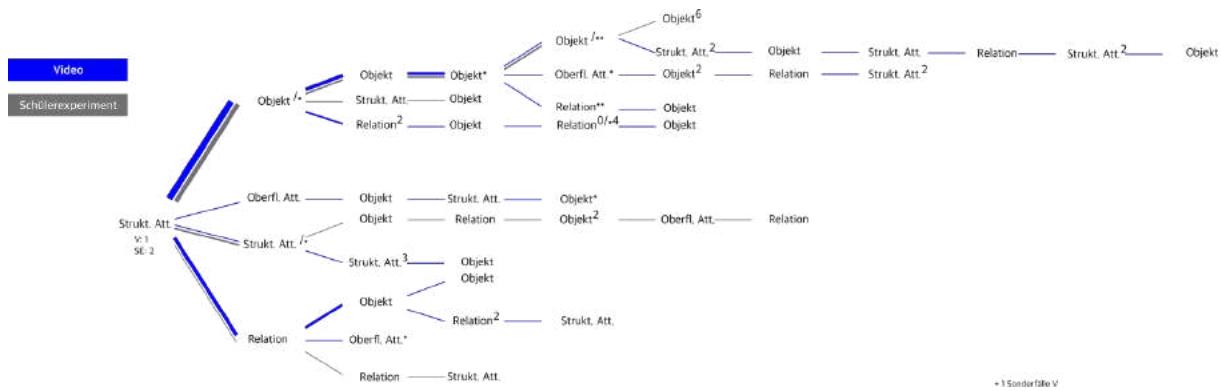


Abbildung 67: Gemeinsame Roadmap der Schüler\*innen der V-Gruppe und der SE-Gruppe während des Vergleiches von Modellexperiment und Original ausgehend von einem strukturellen Attribut.

Der Ausgangspunkt *strukturelles Attribut* war für die Schüler\*innen der V-Gruppe der häufigste Startpunkt ( $nv = 15, 48,4\%$ ) (vgl. Abbildung 67), bei den Schüler\*innen der SE-Gruppe nur der dritthäufigste Startpunkt ( $nse = 9, 18,0\%$ ). Nach der ersten Nennung eines strukturellen Attributs folgte hauptsächlich entweder ein Objekt ( $nv = 7/13 = 54\%$ ;  $nse = 5/8 = 63\%$ ) oder bei der SE-Gruppe ein strukturelles Attribut ( $nse = 1/4 = 25\%$ ) sowie bei der V-Gruppe eine Relation ( $nv = 4/13 = 31\%$ ).

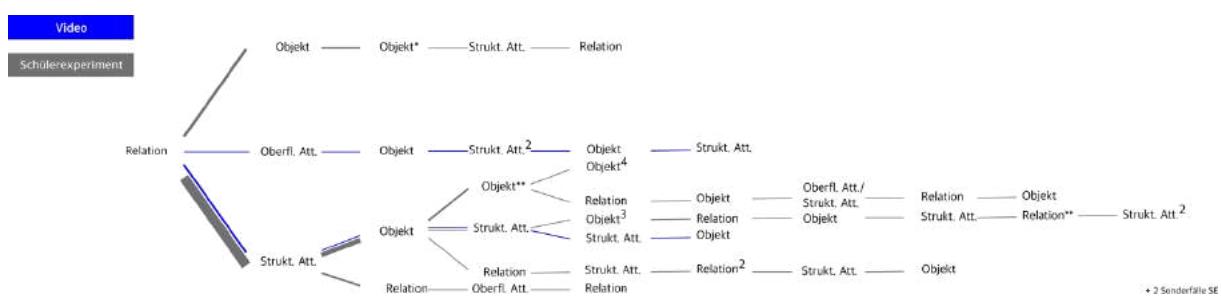


Abbildung 68: Gemeinsame Roadmap der Schüler\*innen der V-Gruppe und der SE-Gruppe während des Vergleiches von Modellexperiment und Original ausgehend von einer Relation.

Der Ausgangspunkt *Relation* war bei der SE-Gruppe der zweithäufigste Startpunkt ( $n_{SE} = 15, 30,0\%$ ) (vgl. Abbildung 68). Wenn zu Beginn eine Relation genannt wurde, wurde häufig auch ein strukturelles Attribut angeknüpft ( $nv = 2/3 = 67\%$ ;  $n_{SE} = 10/13 = 77\%$ ).

### *Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse zur Mesoebene beim Mapping*

Auf der **Mesoebene**, welche die Analogiearten zeitabhängig zusammenfasst, wurde während des Mappings unabhängig von der Präsentationsform sehr häufig von den Schüler\*innen mit der Nennung eines *Objektes* begonnen ( $nv = 13, 41,9\%$ ;  $n_{SE} = 23, 46,0\%$ , vgl. Abbildung 65). Im Gegensatz zu den Schüler\*innen der SE-Gruppe starteten die Schüler\*innen der V-Gruppe jedoch am häufigsten mit einem strukturellen Attribut ( $nv = 15, 48,4\%$ ; vgl. Abbildung 67). Der zweithäufigste Startpunkt war für die V-Gruppe ein Objekt und für die SE-Gruppe eine Relation ( $n_{SE} = 15, 30,0\%$ ; vgl. Abbildung 68). Beim weiteren Vorgehen konnte identifiziert werden, dass am häufigsten weitere Objekte genannt wurden, wenn mit einem Objekt begonnen wurde (vgl. Abbildung 65, oberster Arm). Weiter folgte ein Objekt auch am häufigsten auf ein strukturelles Attribut als Ausgangspunkt. Wenn als komplexer Ausgangspunkt eine Relation genannt wurde, wurde am häufigsten ein strukturelles Attribut angeknüpft ( $nv = 2/3 = 67\%$ ;  $n_{SE} = 10/13 = 77\%$ , vgl. Abbildung 68).

Insgesamt wurde jedoch unabhängig von der Analogieart, mit der die einzelnen Denkprozesse gestartet wurden, am häufigsten mit einem Objekt geendet.

*Die in dieser Zwischenzusammenfassung dargestellten Ergebnisse werden auf S. 215 ff. diskutiert.*

### ***Mikroebene der Denkwege mit den konkreten themenbezogenen Inhalten differenziert nach den Analogiearten beim Mapping***

*(Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse auf S. 169 f.)*

Prinzipiell können im Zusammenhang mit dem Konzept der Staubexplosion auf inhaltlicher Ebene (Mikroebene) 10 Objekte, 6 oberflächliche Attribute, 7 strukturelle Attribute und 8 Relationen von den Schüler\*innen genannt werden. Sie sind in Tabelle 27 aufgelistet.

Tabelle 27: Relevante Inhalte der Denkwege aller Schüler\*innen beim Vergleich differenziert nach den einzelnen Analogiearten (\* gibt die fünf Bedingungen des Explosionspentagons im engeren Sinne an).

	Inhalte
<b>Objekte</b>	<u>Stoff</u> <u>Explosion (Folge)</u> <u>Zündquelle (Beispiel)*</u> <u>Luftzufuhr</u> <u>Umgebung*</u> <u>Druck (Folge)</u> <u>Sauerstoff/Luft*</u> <u>Zerstörung (Folge)</u> <u>Luftdruck</u> <u>Flamme (Folge)</u>
<b>Oberflächliche Attribute</b>	<u>Farbe</u> <u>Ablagerung (Stoff)</u> <u>Leitfähigkeit</u> <u>Beschädigt (Zündquelle)</u> <u>Aktiv</u> <u>Metallisch</u>
<b>Strukturelle Attribute</b>	<u>Zerteilung (Stoff)</u> <u>Energie (Zündquelle)</u> <u>Brennbarkeit (Stoff)*</u> <u>Geschlossen (Umgebung)</u> <u>Zerstörung (Umgebung)</u> <u>Verbrennung (Umgebung)</u> <u>Zerteilung (Stoff)</u>
<b>Relationen</b>	<u>Aufwirbelung*</u> <u>Explosion</u> <u>Stoff-Luft-Gemisch</u> <u>Entzündung</u> <u>Branderhaltung (<math>O_2</math>)</u> <u>Zündquelle-Stoff-Interaktion</u> <u>Brandübertragung (Umgebung)</u> <u>Zündquelle-Stoff-Luft-Interaktion</u>

Um zu prüfen, ob die Schüler\*innen die relevanten Inhalte genannt haben, wird sich zunächst auf die Nennung der fünf Bedingungen, die im Explosionspentagon (vgl. Abbildung 5) enthalten sind, beschränkt (vgl. Abbildung 69). So kann beurteilt werden, ob die Schüler\*innen das Explosionskonzept verstanden haben bzw. ihr Wissen durch Nennung der Bedingungen des Explosionspentagons mitgeteilt haben.

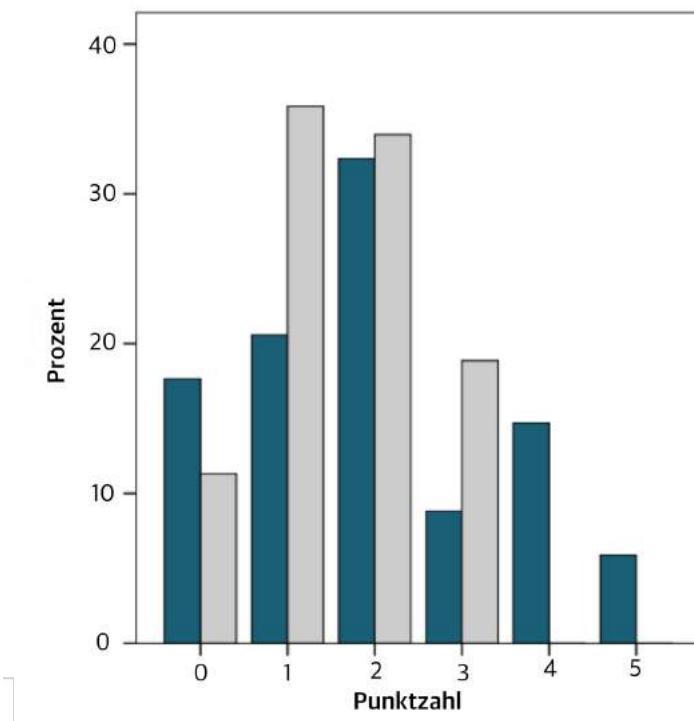


Abbildung 69: Prozentuale Häufigkeit der genannten Bedingungen des Explosionspentagons während des Mappings differenziert nach Probandengruppen (blau: Video, grau: Schüler\*innenexperimente).

Dabei zeigt sich, dass fünf bzw. vier Bedingungen ausschließlich in den Denkprozessen von Schüler\*innen der V-Gruppe genannt wurden (5 Bedingungen: 5,9 %; 4 Bedingungen: 14,7 %). Weniger als vier Bedingungen wurden von den Schüler\*innen beider Gruppen genannt. Dabei haben die Schüler\*innen der SE-Gruppe häufiger drei Bedingungen während ihres Denkprozesses genannt als die Schüler\*innen der V-Gruppe ( $n_{SE} = 10$ , 18,2 %;  $n_V = 3$ , 8,8 %). Bei beiden Gruppen lag der Median der genannten Bedingungen bei 2 ( $SD_{SE} = 1,0$ ;  $SD_V = 1,5$ ). Dieser Median wurde von 18 Schüler\*innen (32,7 %) der SE-Gruppe und 11 Schüler\*innen (32,4 %) der V-Gruppe erreicht.

Die Häufigkeit der Nennung einzelner Bedingungen ist in Tabelle 28 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Schüler\*innen diese Bedingungen des Explosionspentagon als mitteilungsrelevant erachtet haben und es daher wahrscheinlich ist, dass sie diese verstanden haben.

Von den Bedingungen wurden die Objekte *Stoff* und *Zündquelle* am häufigsten genannt (Stoffgesamt: 76,4 %; Zündquellen gesamt: 77,5 %). Der *Stoff* wurde dabei prozentual häufiger von der V-Gruppe im Vergleich zu der SE-Gruppe genannt. Ähnlich häufig wurde die *Zündquelle* von beiden Gruppen genannt. Als Attribute wurden der Zerteilungsgrad im Zusammenhang mit dem Stoff ( $n = 38$ , 42,7 %) sowie die Energie der Zündquelle ( $n = 32$ , 36,0 %) von fast jedem\*jeder dritten Schüler\*in genannt. Die Relationen Aufwirbelung und Entzündung wurden jeweils von etwas weniger als jeder\*jedem Dritten genannt ( $n = 25$ , 28,1 %). Der prozentuale Anteil

der Nennungen des Zerteilungsgrads und der Aufwirbelung war bei der V-Gruppe höher als bei der SE-Gruppe. Nur wenige Schüler\*innen nannten das Oxidationsmittel (Luft bzw. Sauerstoff) ( $n = 8, 9,0\%$ ) als Objekt und die Geschlossenheit der Umgebung ( $n = 6, 6,7\%$ ) als Attribut.

Tabelle 28: Häufigkeit der genannten Bedingungen des Explosionspentagons während des Mappings (\* gibt die fünf Bedingungen des Explosionspentagons im engeren Sinne an).

	Häufigkeit		
	Gesamtstichprobe (n = 89)	V-Gruppe (n = 34)	SE-Gruppe (n = 55)
<b>Brennstoff*</b>	<b>23 (25,8 %)</b>	<b>12 (35,3 %)</b>	<b>11 (20,0 %)</b>
Stoff	68 (76,4 %)	28 (82,4 %)	40 (72,7 %)
Brennbarkeit	23 (25,8 %)	12 (35,3 %)	11 (20,0 %)
<b>Oxidationsmittel*</b>	<b>8 (9,0 %)</b>	<b>5 (14,7 %)</b>	<b>3 (5,5 %)</b>
<b>Umgebung*</b>	<b>28 (31,5 %)</b>	<b>12 (35,3 %)</b>	<b>16 (29,1 %)</b>
Geschlossene Umgebung	6 (6,7 %)	6 (17,6 %)	0 (0 %)
<b>Zündquelle*</b>	<b>69 (77,5 %)</b>	<b>26 (76,5 %)</b>	<b>43 (78,2 %)</b>
Energie der Zündquelle	32 (36,0 %)	11 (32,4 %)	21 (38,2 %)
<b>Aufwirbelung*</b>	<b>25 (28,1 %)</b>	<b>13 (38,2 %)</b>	<b>12 (21,8 %)</b>
Luftzufuhr	11 (12,4 %)	4 (11,8 %)	7 (12,7 %)
Zerteilungsgrad	38 (42,7 %)	19 (55,9 %)	19 (34,5 %)
Entzündung	25 (28,1 %)	10 (29,4 %)	15 (27,3 %)
Explosion	10 (11,2 %)	4 (11,8 %)	6 (10,9 %)

#### *Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse zur Mikroebene beim Mapping*

In der **Mikroebene** der Denkwege, d.h. der Ebene des konkreten Inhaltes bezogen auf das dem Modellexperiment zugrundeliegende Explosionspentagon, haben 29,4 % der Schüler\*innen der V-Gruppe und 18,2 % der Schüler\*innen der SE-Gruppe mehr als die Hälfte der Bedingungen des Explosionspentagons genannt.

Am häufigsten wurden von beiden Gruppen zwei der fünf Bedingungen genannt ( $MSE = Mv = 2, SDSE = 1,0; SDv = 1,5$ ). Alle fünf sowie vier Bedingungen wurden ausschließlich in den Denkprozessen von Schüler\*innen der V-Gruppe genannt (5 Bedingungen: 5,9 %; 4 Bedingungen: 14,7 %).

Unter den während der Denkprozesse von den Schüler\*innen genannten Bedingungen wurden am häufigsten die Objekte *Stoff*, *Zündquelle*, die Attribute *Zerteilungsgrad* im Zusammenhang mit dem Stoff sowie die *Energie der Zündquelle* und als Relationen *Aufwirbelung* und *Entzündung* wiedergegeben. Nur

wenige Schüler\*innen (6,7 % bis 9,0 %) nannten das *Oxidationsmittel* (Luft bzw. Sauerstoff) als Objekt und die *Geschlossenheit der Umgebung* als Attribut.

*Die in dieser Zwischenzusammenfassung dargestellten Ergebnisse werden auf S. 215 ff. diskutiert.*

### Zusammenhänge zwischen den einzelnen Ebenen der Denkwege

(*Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse auf S. 175 f.*)

Weiterhin sollten die Zusammenhänge zwischen den von den Schüler\*innen genannten einzelnen Bedingungen des Explosionspentagons differenziert nach den Analogiearten, der Länge (*Anzahl genutzter inhaltsrelevanter Phrasen*) und der Komplexität (*Anzahl der genutzten Analogieoperationen*) der Denkprozesse untersucht werden. Daher wurden zwischen diesen Variablen die entsprechenden Korrelationen berechnet.

Tabelle 29: Signifikante Korrelationen nach Spearman zwischen den Variablen „Anzahl der Analogieoperationen“ bzw. „Anzahl inhaltsrelevanter Phrasen“ und den Bedingungen des Explosionspentagons während des Mappings. \*  $p < .05$ , \*\*  $p < .01$ .

	Anzahl inhaltsrelevanter Phrasen	Anzahl der Analogieoperationen
<b>Brennstoff</b>	.279**	
Stoff	.529**	.514**
Brennbarkeit	.279**	
<b>Oxidationsmittel</b>	.292**	.238*
<b>Umgebung</b>	.511**	
Geschlossene Umgebung		.329**
<b>Zündquelle</b>	.384**	.389**
Energie der Zündquelle		.224*
<b>Aufwirbelung</b>	.420**	.285**
Luftzufuhr	.264*	.256*
Zerteilungsgrad	.428**	.621**

Der Kolmogorov-Smirnov-Test offenbarte, dass die vorliegenden Daten bezüglich der Bedingungen des Explosionspentagons signifikant nicht normalverteilt sind ( $p_{\text{Elemente\_Kolmogorov-Smirnov-Test}} < .05$ ) (vgl. Bühl, 2010, S. 368 f.). Daher wurde der non-parametrische Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman für die weiteren Analysen eingesetzt. Die signifikanten Korrelationen sind in Tabelle 29 und Tabelle 30 dargestellt.

Zwischen der Länge des Denkprozesses während des Vergleiches, d.h. der Anzahl inhaltsrelevanter Phrasen (vgl. Makroeben), und den einzelnen Bedingungen des Explosionspentagons konnten einige Korrelationen identifiziert werden. Die Anzahl inhaltsrelevanter Phrasen korreliert signifikant mit der Benennung nahezu aller Bedingungen (Objekten, Attributen und Relationen). Das bedeutet, dass eine

große Anzahl inhaltsrelevanter Phrasen mit der Benennung der verschiedenen Bedingungen einhergeht. Insbesondere der Zusammenhang zwischen der Anzahl inhaltsrelevanter Phrasen und dem *Stoff* bzw. der *Umgebung* wurde dabei als signifikant eingestuft. Es handelt sich nach Cohen (1988) um jeweils starke Effekte. Ausschließlich die Attribute *Geschlossene Umgebung* und *Energie der Zündquelle* korrelieren nicht mit der Anzahl inhaltsrelevanter Phrasen.

Die Komplexität der Denkprozesse, welche über die Anzahl der genutzten Analogieoperationen (vgl. Tabelle 29 – Makroebene) ausgedrückt wird, korrelierte signifikant mit der Nennung des *Stoffes*, der *Geschlossenen Umgebung*, der *Zündquelle*, der *Aufwirbelung* sowie dem *Zerteilungsgrad* ( $p < .01$ ). Diese Zusammenhänge sind positiv. Bei den Variablen *Stoff* bzw. *Zerteilungsgrad* handelt es sich nach Cohen (1988) um starke Effekte und bei den Variablen *Geschlossene Umgebung* bzw. *Zündquelle* um einen mittleren Effekt. Lediglich zwischen der Anzahl genutzter Analogieoperationen und dem *Brennstoff*, der *Brennbarkeit* sowie der *Umgebung* konnte kein signifikanter Zusammenhang nachgewiesen werden.

Die Korrelationen zwischen den einzelnen Bedingungen innerhalb der Denkwege sind in Tabelle 30 dargestellt. Die Korrelationen, die aufgrund der inhaltlichen Zusammengehörigkeit einzelner Bedingungen bestimmt sind, sind beispielsweise *Brennstoff* und *Brennbarkeit* ( $rs = 1.00$ ). Dabei ist die Nennung der einen Bedingung nicht ohne eine Nennung der anderen möglich. Auch zwischen der Nennung des *Stoffes* und der stoffbezogenen, relevanten Eigenschaften *Brennbarkeit* und *Zerteilungsgrad* sowie der *Umgebung* und der Eigenschaft der *Geschlossenheit* besteht jeweils ein hoch signifikanter positiver Zusammenhang. Nach Cohen (1988) handelt es sich dabei um mittlere Effekte. Unabhängig von diesen Zusammengehörigkeiten korreliert das Nennen der *Umgebung* mit dem Nennen der *Aufwirbelung* signifikant ( $rs = .32, p < .01$ ) und die geschlossene *Umgebung* mit dem *Zerteilungsgrad* ( $rs = .31, p < .01$ ) hoch signifikant. Es handelt sich auch dabei um mittlere Effekte nach Cohen (1988).

## 5 Ergebnisse

---

Tabelle 30: Signifikante Korrelationen nach Spearman zwischen den einzelnen Elementen des Explosionspentagons während des Mappings. \*  $p < .05$ , \*\*  $p < .01$ . Es ist zu beachten, dass die Bedingungen mit den Nummern 1 und 4 auf der Seite einer Variable ausgelassen wurden, da dort keine Korrelationen identifiziert werden konnten.

	2	3	5	6	7	8	9	10	11
<b>1 Brennstoff</b>	.32**	1.00**						.24*	
2 Stoff		.32**	.25*		.35**		.34**		.47**
3 Brennbarkeit								.24*	
<b>4 Oxidationsmittel</b>						.25*		.24*	
<b>5 Umgebung</b>				.40**			.32**		
6 Geschlossene Umgebung									.31**
<b>7 Zündquelle</b>						.39**			
8 Energie der Zündquelle									
<b>9 Aufwirbelung</b>								.31**	
10 Luftzufuhr									
11 Zerteilungsgrad									

Weitere Besonderheiten können zwischen den Variablen Stoff und Zündquelle ( $rs = .35$ ,  $p < .01$ ), Stoff und Aufwirbelung ( $rs = .34$ ,  $p < .01$ ) sowie der Aufwirbelung und dem Zerteilungsgrad ( $rs = .31$ ,  $p < .01$ ) identifiziert werden. Sie korrelieren jeweils hoch signifikant miteinander und weisen nach Cohen mittlere Effekte auf. Darüber hinaus gibt es zwischen dem Stoff und der Umgebung ( $rs = .25$ ,  $p < .05$ ), der Brennbarkeitseigenschaft des Stoffes (auch Brennstoff) und der Luftzufuhr ( $rs = .24$ ,  $p < .05$ ) sowie dem Oxidationsmittel (Luft bzw. Sauerstoff) und der Energie der Zündquelle ( $rs = .25$ ,  $p < .05$ ) signifikante Zusammenhänge, bei denen es sich nach Cohen (1988) jeweils um schwache Zusammenhänge handelt.

Um weitere Zusammenhänge zwischen dem konkreten Vorgehen während des Denkprozesses und der Nennung möglichst aller fünf relevanten Bedingungen des Explosionspentagons herzustellen, werden im Folgenden zwei Denkwege von Schüler\*innen als Einzelfälle detaillierter betrachtet. Lediglich diese zwei Schüler\*innen haben alle fünf Bedingungen des Explosionspentagons genannt.

**BA2810 (VP 7)** hat beim Mapping alle fünf Operationen und 12 inhaltsrelevante Phrasen genutzt (Abbildung 70). Der zugehörige Denkweg ist in Abbildung 71 dargestellt.

Um die gesamten Elemente des Explosionspentagons zu nennen, fanden insgesamt vier Veränderungen der Analogieoperationen statt. Dabei wurde von einer abbilden den Beschreibung ausgegangen und dann das Original beschrieben. Weiter fand

wieder eine direkte Abbildung statt und abschließend wurden das Original und das Modellexperiment beschrieben.

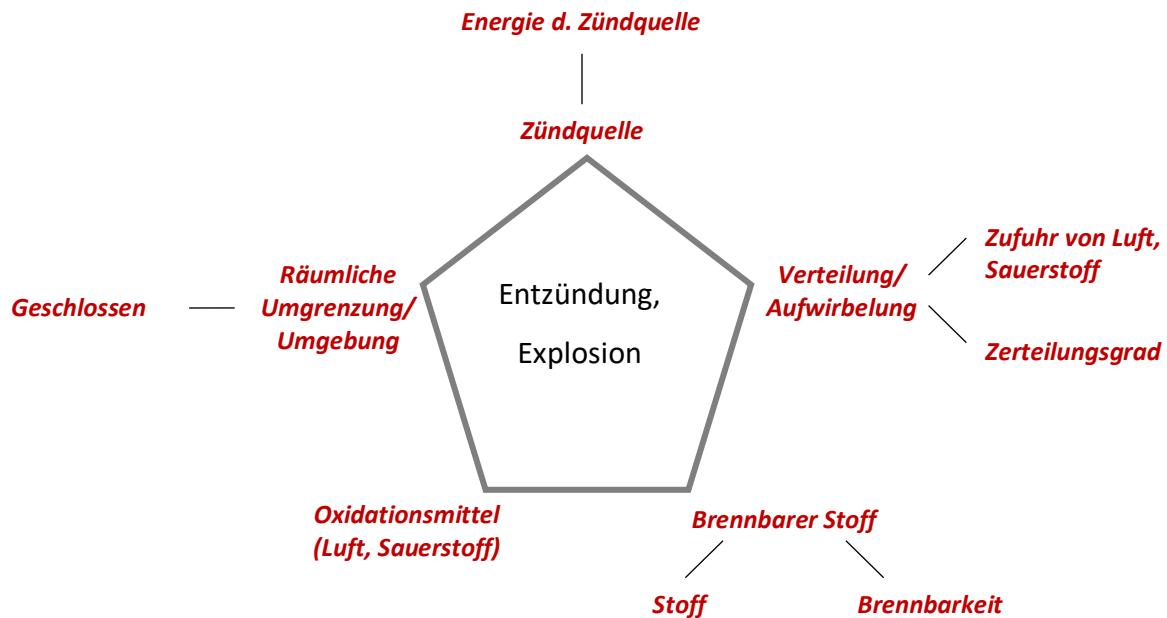


Abbildung 70: Beispielhaftes Explosionspentagon von BA2810 (VP 7) (die während des Mappings genannten Bedingungen sind rot markiert).

Legende	Objekt	Oberflächliches Attribut	Strukturelles Attribut	Relation	Sonstiges
Beschreibung des Originals		Luft	Umgebung		Zündquelle (Beispiel) Energie (Zündquelle)
Beschreibung des Modellexperiments				Energie (Zündquelle)	
Abbildende Beschreibung M → O					
Abbildende Beschreibung O → M	Geschlossen (Umgebung)				
Abbildende Beschreibung O <→ M				Zündquelle (Beispiel)	
Sonstiges				Frage	
Phrasen					

Brennbarkeit (Stoff)	Luftzufuhr	Energie (Zündquelle)	Aufwirbelung	Brennb. Zerteil.	Geschlossen (Umgebung)	Explosion (Folge)
Fehlvorstellung	Fehlvorstellung				Fehlvorstellung	

Abbildung 71: Denkweg während des Mappings von BA2810 (VP 7). Der obere Teil beschreibt den Anfang und der untere Teil die Fortsetzung des Denkwegs.

Auf der Mesoebene wurde der Denkweg mit einem strukturellen Attribut begonnen und einem Objekt beendet. Während des Denkweges werden die Analogiearten Objekt, strukturelles Attribut und Relation genutzt. Insgesamt werden Objekte und strukturelle Attribute ähnlich häufig genannt. Besonders ist, dass ein strukturelles Attribut mit einer – der einzigen genannten – Relation verknüpft wird. Inhaltlich werden die Objekte *Luft* und *Zündquelle* sowie die strukturellen Attribute *Energie der Zündquelle* und *Geschlossenheit der Umgebung* in beiden Bereichen, dem Modellexperiment und dem Original, als mitteilungsrelevant im Denkprozess angesehen.

**SO24II (VP 49)** hat beim Mapping drei Operationen und 11 inhaltsrelevante Phrasen genutzt (Abbildung 72).

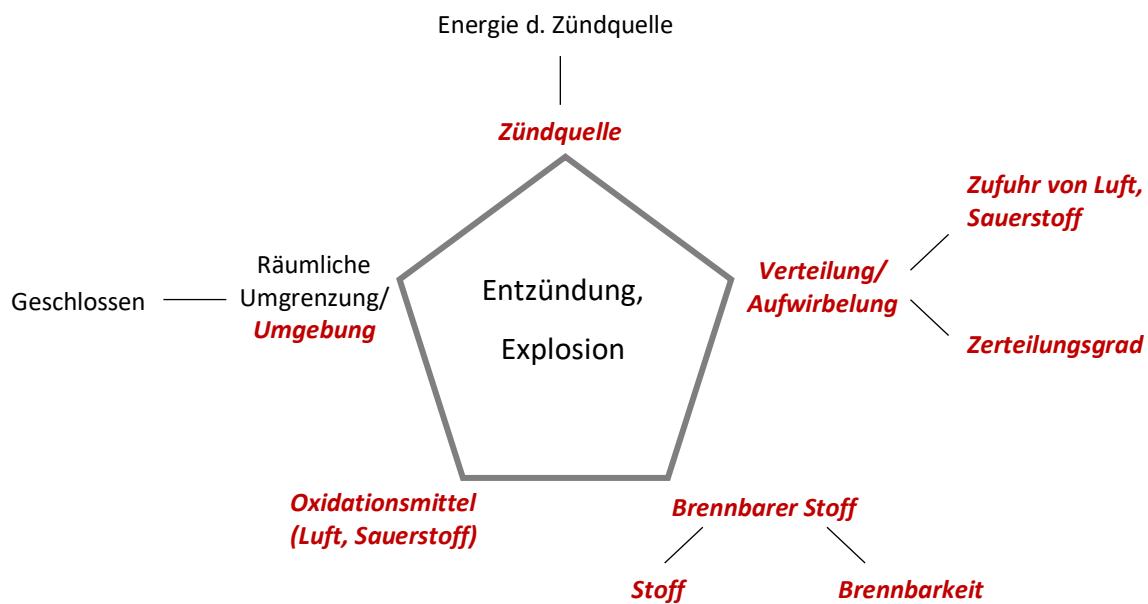


Abbildung 72: Beispielhaftes Explosionspentagon von SO24II (VP 49) (die während des Mappings genannten Bedingungen sind rot markiert).

Der zugehörige Denkweg ist in Abbildung 73 dargestellt. Um die gesamten Elemente des Explosionspentagons zu nennen, wurden die Analogieoperationen zweimal verändert. So hat zunächst eine Abbildung mit der Beschreibung des Modell-experiments stattgefunden und anschließend wurde wieder – nur diesmal mit der Beschreibung des Originals – abgebildet (vgl. Abbildung 73 – Phrase 1 und 2). Abschließend wurde das Original ausführlich beschrieben.

Während des Denkprozesses wurden auch hier die Analogiearten Objekt, strukturelles Attribut und Relation genutzt. Es wurde mit einem strukturellen Attribut begonnen. Die strukturellen Attribute bezogen sich ausschließlich auf den Stoff. Besonders ist auch hier, dass ein strukturelles Attribut mit einer der vier genannten Relationen verknüpft wurde. Inhaltlich wurde das Objekt *Stoff* und die Relation *Stoff-Luft-Gemisch* in beiden Bereichen, dem Modellexperiment und dem Original, genannt.

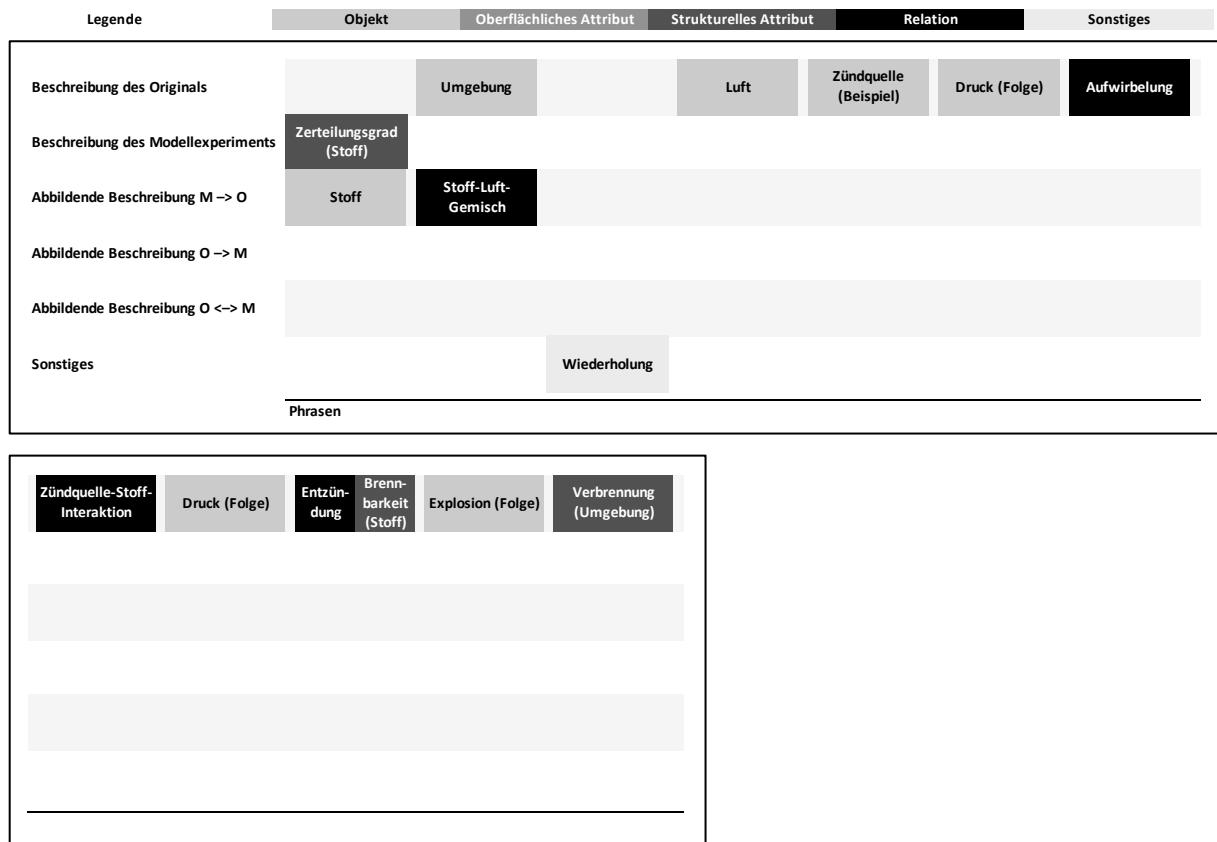


Abbildung 73: Denkweg während des Mappings von SO2411 (VP 49).

Die beiden Einzelfälle zeigen Gemeinsamkeiten. Zum Beispiel fällt auf, dass beide Schüler\*innen eine hohe Anzahl inhaltsrelevanter Phrasen (mehr als 10 Phrasen) nennen, um das gesamte Explosionskonzept zu erfassen. Dabei wurden nicht ausschließlich das Original oder das Modellexperiment im Blick behalten, sondern beide Bereiche betrachtet. Zudem sind bei diesen beispielhaften Denkwegen die Hälfte aller Phrasen Objekte. Beide nennen dabei die Objekte *Luft*, *Umgebung* und *Zündquelle*, jedoch in unterschiedlicher Reihenfolge. Gleichzeitig verknüpfen beide Schüler\*innen eine Relation mit strukturellen Attributen, sodass hauptsächlich Objekte, strukturelle Attribute und Relationen thematisiert wurden.

Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse zu den Zusammenhängen zwischen den einzelnen Ebenen beim Mapping

In den vorliegenden Denkgraphen aller Schüler\*innen (vgl. Tabelle 29) und bei der Betrachtung zweier Einzelfälle (Abbildung 70 - Abbildung 73) konnte ein Zusammenhang zwischen der Länge und Komplexität der Denkwege und der Artikulation der meisten relevanten Bedingungen, die inhaltlich das Explosionskonzept aufspannen, ermittelt werden.

- Je länger ein Denkweg war, umso häufiger wurden die meisten relevanten Bedingungen als Gedanken von den Schüler\*innen artikuliert (vgl. Tabelle 29). Bei den beiden Einzelfällen wurden mehr als

zehn inhaltsrelevante Phrasen benötigt, um alle Bedingungen des Explosionspentagons zu artikulieren.

- Je komplexer der Denkweg war, d.h. je mehr Analogieoperationen genutzt wurden, umso häufiger wurden die fünf relevanten Bedingungen für das Auftreten einer Staubexplosion genannt (vgl. Tabelle 29). Dabei scheint es wichtig zu sein, nicht ausschließlich das Original bzw. das Modellexperiment im Blick zu haben, sondern beide Bereiche zu betrachten.

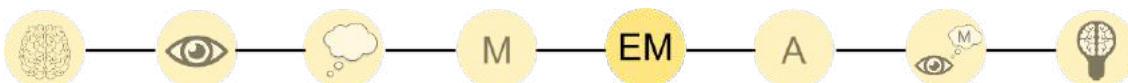
Innerhalb der Denkwege wurden die Analogiearten Objekte, strukturelle Attribute und Relationen thematisiert und miteinander in Zusammenhang gebracht. So korrelierten Objekte mit Objekten, Objekte mit strukturellen Attributen, Objekte mit Relationen, strukturelle Attribute mit strukturellen Attributen und strukturelle Attribute mit Relationen.

Auf inhaltlicher Ebene konnten Zusammenhänge zwischen einzelnen Bedingungen ermittelt werden, die sich bezogen auf den Prozess der Staubexplosion ergeben. In Bezug auf die Aufwirbelung gab es folgende Zusammenhänge: Stoff – Aufwirbelung, Zerteilungsgrad des Stoffes – Aufwirbelung, Stoff – Umgebung, Zerteilungsgrad des Stoffes – geschlossene Umgebung, Umgebung – Aufwirbelung. Weitere Zusammenhänge konnten die Entzündung betreffend identifiziert werden: Stoff – Zündquelle, Brennbarkeit des Stoffes (auch Brennstoff) – Luftzufuhr, Oxidationsmittel (Luft bzw. Sauerstoff) – Energie der Zündquelle.

*Die in dieser Zwischenzusammenfassung dargestellten Ergebnisse werden auf S. 215 ff. diskutiert.*

### 5.3.2 Beschreibung des Originals als Ergebnis des Mappingprozesses (Ergebnis Mapping)

*(Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse auf S. 179 f.)*



Die Laut Denk-Protokolle der Schüler\*innen erlauben nicht nur Aussagen zum Mapping, sondern auch Aussagen darüber, welche Elemente aus dem Vergleich von Modellexperiment und Original von den Schüler\*innen zur Erklärung des chemischen Gegenstandes Staubexplosion im Kontext des Originals genutzt wurden (vgl. Abbildung 23 – Aufgabe 2). So war in Aufgabe 2 des Aufgabenleitfadens gefordert, die gefundenen Ähnlichkeiten und Unterschiede zur detaillierten Erklärung des

originalen Unfalls, der Mehlstaubexplosion in der Bremer Rolandmühle, zu nutzen (Ergebnis des Mappings).

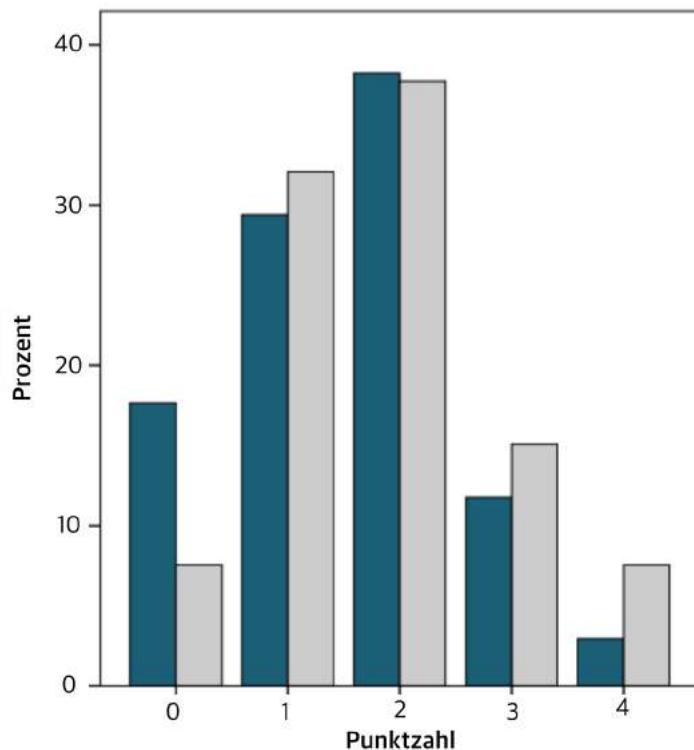


Abbildung 74: Prozentuale Häufigkeit der genannten Elemente des Explosionspentagons beim Ergebnis des Mappings.

Zur Erklärung des originalen Unfalls nach der Durchführung des Mappings wurden im Mittel von beiden Stichprobengruppen zwei Bedingungen genannt ( $SD_{SE} = SD_V = 1$ ; vgl. Abbildung 74). Dieser Median wurde von 13 Schüler\*innen (38,2 %) der V-Gruppe und 20 Schüler\*innen (36,4 %) der SE-Gruppe erreicht. Mehr als die Hälfte der Bedingungen einer Staubexplosion wurden von fünf Schüler\*innen der V-Gruppe und zwölf Schüler\*innen der SE-Gruppe genannt (3 Bedingungen:  $nv = 4$ , 11,8 %;  $nse = 8$ , 14,5 %; 4 Bedingungen:  $nv = 1$ , 2,9 %;  $nse = 4$ , 7,3 %). Jedoch wurde von keinem\*r Schüler\*in alle fünf Elemente des Explosionspentagons genannt.

Welche konkreten Bedingungen die Schüler\*innen von dem Explosionspentagon zur Beschreibung des Originals als relevant gesehen haben, ist in Tabelle 31 dargestellt. Bei den Schüler\*innen-Nennungen lag der Schwerpunkt auf den Objekten *Stoff* und *Zündquelle* (*Stoff*gesamt: 67,4 %; *Zündquelle*gesamt: 71,9 %). Der *Stoff* und die *Zündquelle* wurden dabei von beiden Gruppen prozentual ähnlich häufig genannt. Als Attribut wurde die *Energie der Zündquelle* ( $n = 26$ , 29,2 %) von fast jedem\*jeder dritten Schüler\*in genannt. Die Relationen *Aufwirbelung* und *Entzündung* wurden jeweils von ungefähr jeder\*jedem Vierten genannt (*Aufwirbelung*:  $n = 25$ , 28,1 %; *Entzündung*:  $n = 24$ , 27,0 %).

## 5 Ergebnisse

---

Tabelle 31: Häufigkeit der genannten Elemente des Explosionspentagons während des Ergebnis des Mappings.

	Häufigkeit		
	Gesamtstichprobe (n = 89)	V-Gruppe (n = 34)	SE-Gruppe (n = 55)
<b>Brennstoff</b>	<b>18 (20,2 %)</b>	<b>4 (11,8 %)</b>	<b>14 (25,5 %)</b>
Stoff	60 (67,4 %)	22 (64,7 %)	38 (69,1 %)
Brennbarkeit	18 (20,2 %)	4 (11,8 %)	14 (25,5 %)
<b>Oxidationsmittel</b>	<b>11 (12,4 %)</b>	<b>4 (11,8 %)</b>	<b>7 (12,7 %)</b>
<b>Umgebung</b>	<b>31 (34,8 %)</b>	<b>11 (32,4 %)</b>	<b>20 (36,4 %)</b>
Geschlossene Umgebung	4 (4,5 %)	4 (11,8 %)	0 (0 %)
<b>Zündquelle</b>	<b>64 (71,9 %)</b>	<b>24 (70,6 %)</b>	<b>40 (72,7 %)</b>
Energie der Zündquelle	26 (29,2 %)	11 (32,4 %)	15 (27,3 %)
<b>Aufwirbelung</b>	<b>25 (28,1 %)</b>	<b>9 (26,5 %)</b>	<b>16 (29,1 %)</b>
Luftzufuhr	9 (10,1 %)	3 (8,8 %)	6 (10,9 %)
Zerteilungsgrad	17 (19,1 %)	6 (17,6 %)	11 (20,0 %)
Entzündung	24 (27,0 %)	11 (32,4 %)	13 (23,6 %)
Explosion	12 (13,5 %)	4 (11,8 %)	8 (14,5 %)

Das Objekt *Luftzufuhr* und das strukturelle Attribut *Geschlossenheit der Umgebung* wurden hingegen relativ selten bei der Beschreibung des Originals genutzt (Luftzufuhr: n = 9, 10,1 %; Geschlossenheit: n = 4, 4,5 %).

### **Zusammenhänge zwischen den genannten Bedingungen während des Mappings und des Ergebnis Mapping**

Es ist zu prüfen, welche Bedingungen aus dem Vergleich von Modellexperiment und Original von den Schüler\*innen zur Beschreibung des chemischen Gegenstandes Staubexplosion im Kontext des Originals genutzt wurden. Dazu wurden die Zusammenhänge zwischen den Nennungen während des Vergleiches (Mapping) und dem in diesem Abschnitt vorgestellten Beschreibungen des Originals als Ergebnis des Mappingprozesses ermittelt.

Der Kolmogorov-Smirnov-Test offenbarte, dass die vorliegenden Daten bezüglich der Elemente des Explosionspentagons signifikant nicht normalverteilt sind ( $p_{\text{Elemente\_Kolmogorov-Smirnov-Test}} < .05$ ) (vgl. Bühl, 2010, S. 368 f.). Daher wurde der non-parametrische Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman für die weiteren Analysen eingesetzt.

Welche konkreten Zusammenhänge zwischen den einzelnen Nennungen während des Mappings und dem Ergebnis des Mappings identifiziert werden konnten, ist in Tabelle 32 dargestellt.

Tabelle 32: Signifikante Korrelationen nach Spearman zwischen den einzelnen Elementen des Explosionspentagons beim Mapping und beim Ergebnis Mapping. \*  $p < .05$ , \*\*  $p < .01$ .

		Ergebnis Mapping										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Mapping	1 Brennstoff		.23*									
	2 Stoff									.21*		
	3 Brennbarkeit			.23*								
	4 Oxidationsmittel				.24	*		.31				
	5 Umgebung					.26	*					
	6 Geschlossene Umgebung						.3					
	7 Zündquelle							.40		**		
	8 Energie der Zündquelle	-.21*		-.21*				.30	.34			
	9 Aufwirbelung									.33*	.37*	
	10 Luftzufuhr					.2			.22	.21*		
	11 Zerteilungsgrad					5*						.33**

Insgesamt haben die Schüler\*innen bei der Beschreibung des Originals als Ergebnis des Mappingprozesses die meisten Bedingungen wiederholt als mitteilungsrelevant erachtet, die sie vorab schon während des Mappings genannt haben. Die Zusammenhänge weisen nach Cohen (1988) schwache bis mittlere Effekte auf. Bei der Bedingung Brennstoff konnte kein Zusammenhang zwischen der Nennung während des *Mappings* und des *Ergebnis Mapping* identifiziert werden.

Wurde beim Mapping das Oxidationsmittel, die Luftzufuhr bzw. der Zerteilungsgrad des Stoffes genannt, wurde zur abschließenden Beschreibung des Originals die geschlossene Umgebung genannt. Darüber hinaus konnten Zusammenhänge zwischen dem Nennen der Luftzufuhr während des Mappings und der Aufwirbelung während des Ergebnis Mapping und dem Nennen des Stoffes (Mapping) und der Aufwirbelung (Ergebnis Mapping) identifiziert werden.

#### Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse zum *Ergebnis des Mappings*

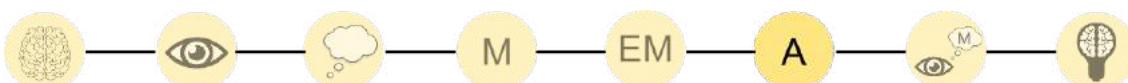
Zur an das Mapping anknüpfenden, detaillierten Beschreibung des Originals wurde von beiden Stichprobengruppen am häufigsten zwei der fünf Bedingungen des Explosionspentagons genannt ( $MSE = Mv = 2$ ,  $SDSE = SDv = 1$ ). Am häufigsten wurden dabei die Objekte *Stoff*, *Zündquelle*, die Attribute

*Energie der Zündquelle* und als Relationen *Aufwirbelung* und *Entzündung* wiedergegeben. Nur wenige Schüler\*innen nannten die *Luftzufuhr* als Objekt und die *Geschlossenheit der Umgebung* als Attribut.

Eine Vielzahl der Bedingungen aus dem Vergleich von Modellexperiment und Original wurden von den Schüler\*innen zur Beschreibung des chemischen Gegenstandes Staubexplosion im Kontext des Originals abermals genutzt (vgl. Tabelle 32): Oxidationsmittel, Luftzufuhr, Zündquelle, Energie der Zündquelle, Umgebung, geschlossene Umgebung, Aufwirbelung und Zerteilungsgrad des Stoffes. Wurde beim Mapping das Oxidationsmittel, die Luftzufuhr bzw. der Zerteilungsgrad des Stoffes genannt, wurde zur abschließenden Beschreibung des Originals auch die geschlossene Umgebung genannt. Zudem wurde die Aufwirbelung zur abschließenden Beschreibung des Originals genutzt, wenn beim Mapping die Luftzufuhr bzw. der Stoff genannt wurde.

*Die in dieser Zwischenzusammenfassung dargestellten Ergebnisse werden auf S. 220 f. diskutiert.*

### 5.3.3 Anwendung von Erkenntnissen aus dem Mapping auf ein neues Original



Bei dem Schritt der *Anwendung* im Kontext *Denken mit Analogien* werden Erkenntnisse von einem vorherigen Analogievergleich (vgl. Abbildung 23 – Aufgaben 1 und 2) auf ein weiteres, neues Original übertragen. In dieser Intervention diente als weiteres, neues Original die Beschreibung einer Aluminium-Staubexplosion bei einem Laptop-Hersteller (vgl. Abbildung 23 – Aufgaben 3). Bei dieser Aufgabe sollte auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse *erläutert* werden, warum es bei diesem, neuen Original zu einer Explosion kommt.

Die bei diesem Schritt erhaltenen Denkgraphen erlauben Aussagen darüber, auf welche Art und Weise Schüler\*innen diese *Anwendung* innerhalb eines eigenständigen Denkprozesses durchführen und inwiefern es Ähnlichkeiten zwischen den einzelnen Denkprozessen gibt.

Im Folgenden werden die verschiedenen Denkwege der Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe während der *Anwendung* beim Denken in Analogien am chemischen Gegenstand Staubexplosion dargestellt. Dazu wurden die Denkwege im Hinblick auf die drei Ebenen, der Makro-, Meso- und Mikroebene, analysiert und verglichen (vgl. Abbildung 9). Bei der Darstellung der Ergebnisse wird wieder zwischen den Schüler\*innen, die das Modellexperiment selbstständig als

Schüler\*innenexperiment durchgeführt haben ( $n = 55$ ), und den Schüler\*innen, die das Experiment als Video präsentiert bekommen haben ( $n = 33$ ), differenziert.

### **Makroebene der Denkwege mit der zeitlichen Abfolge der Analogieoperationen bei der Anwendung**

(Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse auf S. 185 f.)

Die in den einzelnen Denkwegen genutzten Analogieoperationen (Makroebene) und deren Veränderungen sind in einem zeitabhängigen Linien-Graphen reduziert dargestellt (vgl. Abschnitt 4.3.4.3).

In der von den Schüler\*innen bearbeiteten Aufgabe (vgl. Abbildung 23 – Aufgabe 3) wurde explizit nach einer Beschreibung von Original 2 auf der Basis des vorab durchgeföhrten Mappings gefragt. In diesem Fall wäre eine Beschreibung eines vorher erarbeiteten Merkmals im Zusammenhang mit dem Original 2 oder eine abbildende Beschreibung eines Merkmals zwischen Original 1 bzw. Modellexperiment und Original 2 naheliegend.

### **Gruppierung nach der Anzahl genutzter Analogieoperationen**

Während der Anwendung der erworbenen Erkenntnisse auf ein weiteres Original (Original 2) konnten Schüler\*innen identifiziert werden, die in ihren Denkwegen ausschließlich nur eine Analogieoperation nutzten ( $nv = 17, 58,62\%$ ;  $nse = 38, 71,7\%$ ), und Schüler\*innen, die zwei oder mehr Analogieoperationen nutzten ( $nv = 12, 41,38\%$ ;  $nse = 15, 28,3\%$ ).

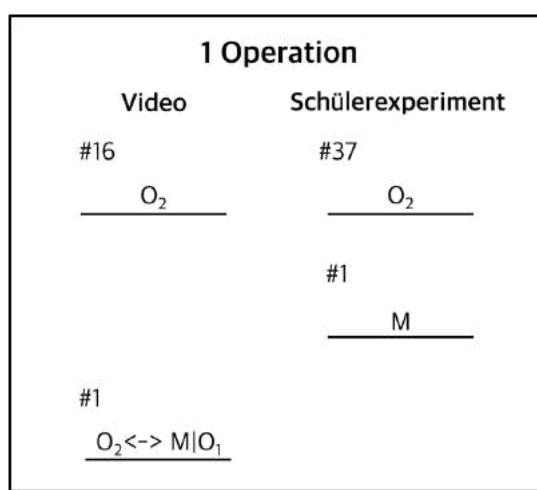


Abbildung 75: Denkwege mit *einer* Analogieoperation differenziert nach der Präsentationsform des Modellexperiments und deren absolute Häufigkeit.

Damit sind im Vergleich zwischen beiden Gruppen 13 % mehr Schüler\*innen der SE-Gruppe während ihres Denkweges ausschließlich in *einer* Analogieoperation geblieben (vgl. Abbildung 75). Im Mittel haben die Schüler\*innen der beiden Stichprobengruppen ähnlich viele Phrasen genutzt ( $Mv = 3,5$  Phrasen,  $SDv = 1,9$ ;

$MSE = 3,7$  Phrasen,  $SDSE = 1,9$ ). Unabhängig von der Präsentationsform wurde von diesen Schüler\*innen schwerpunktmäßig das *Original 2* ausschließlich beschrieben ( $nv = 16, 94,12\%$ ;  $nse = 37, 97,4\%$ ).

**Zwei verschiedene Operationen** wurden wiederum von den Schüler\*innen der V-Gruppe etwas häufiger genutzt als von den Schüler\*innen der SE-Gruppe ( $nv = 10, 34,48\%$ ;  $nse = 10, 18,87\%$ ; vgl. Abbildung 76 - Abbildung 78). Unabhängig von den Präsentationsformgruppen können die Schüler\*innen, die zwei Operationen genutzt haben, in zwei gruppenübergreifende Klassen aufgeteilt werden: Zum einen die Schüler\*innen, die nur Beschreibungen der Bereiche durchgeführt haben (Abbildung 76) und zum anderen die Schüler\*innen, die zusätzlich auch abbildende Beschreibungen verwendet haben (Abbildung 77 - Abbildung 78). Die Schüler\*innen der V-Gruppe ( $Mv = 5,1$  Phrasen,  $SDv = 2,8$ ) haben dabei im Mittel mehr Phrasen als die Schüler\*innen der SE-Gruppe ( $MSE = 3,6$  Phrasen,  $SDSE = 2,2$ ) genutzt. Dabei haben innerhalb der Denkwege ein bis drei interne Änderungen der Operationen stattgefunden.

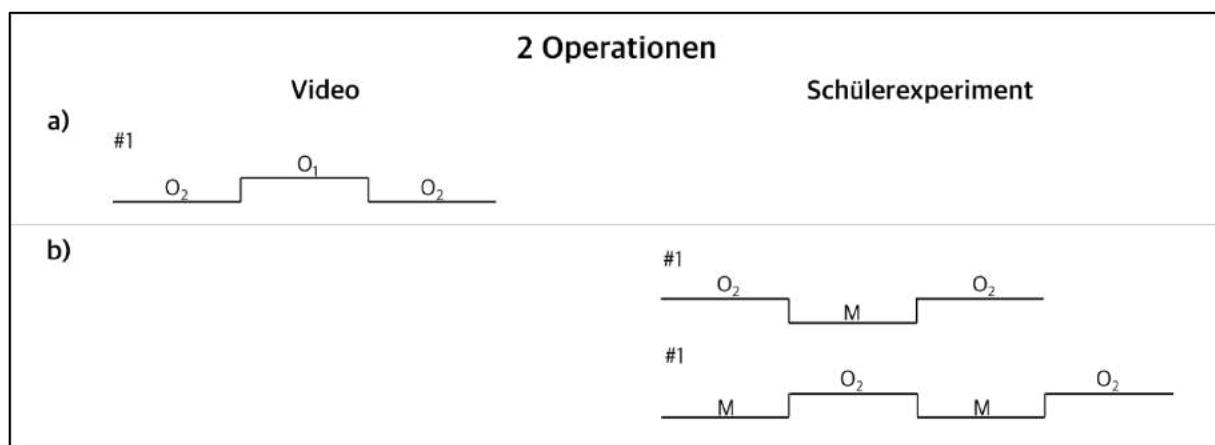


Abbildung 76: Denkwege mit zwei Analogieoperationen (Beschreibung) differenziert nach der Präsentationsform des Modellexperiments und deren absolute Häufigkeit.

Unter den Schüler\*innen, die lediglich die Bereiche Original und Modellexperiment beschrieben haben, wurden in der V-Gruppe beide Originale (Mehlstaubexplosion und Aluminiumstaubexplosion) (Abbildung 76 a)) beschrieben und in der SE-Gruppe das Modellexperiment und das Original 2 beschrieben (Abbildung 76 b)).

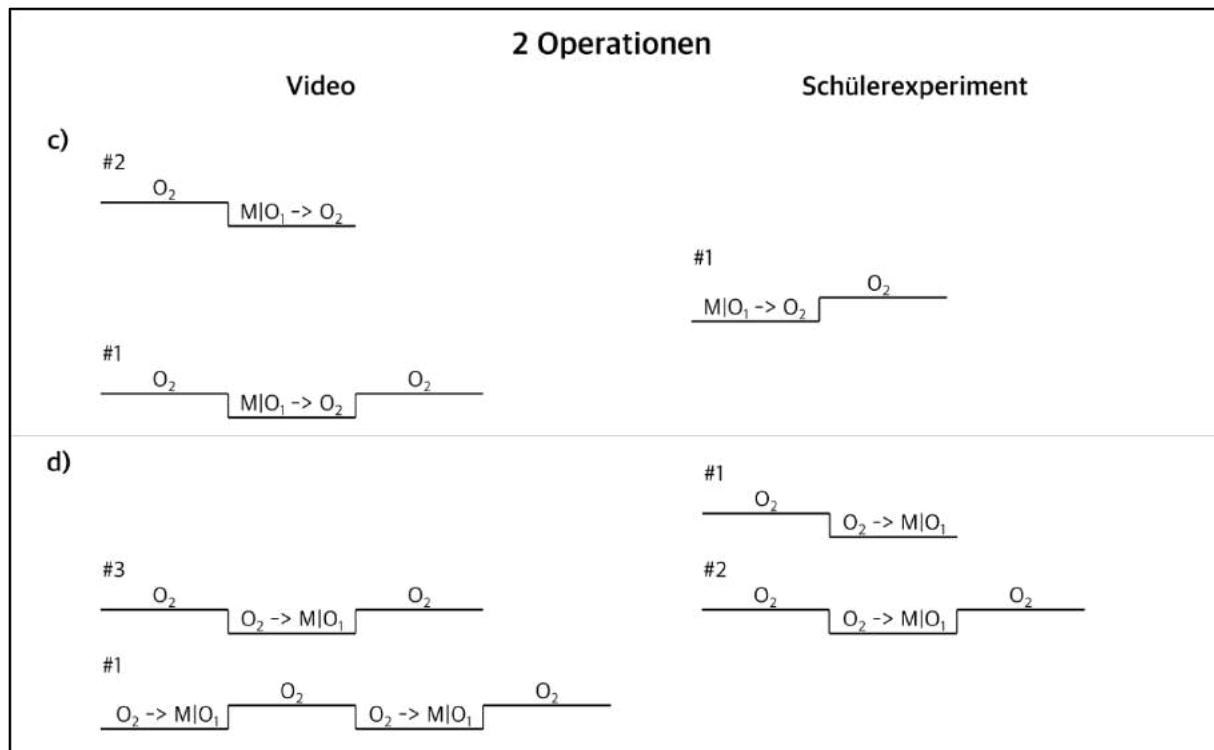


Abbildung 77: Denkwege mit zwei Analogieoperationen (*Beschreibung und abbildende Beschreibung*) differenziert nach der Präsentationsform des Modellexperiments und deren absolute Häufigkeit.

Bei den Denkweegen der Schüler\*innen, die innerhalb ihrer zwei Analogieoperationen eine abbildende Beschreibung genutzt haben, können die folgenden Verknüpfungen der Analogieoperationen identifiziert und kategorisiert werden:

Beispielsweise sind in Abbildung 77 c) die Denkwege, die die Analogieoperationen *Beschreibung des Originals 2* und *Abbildende Beschreibung  $M|O_1 \rightarrow O_2$*  miteinander verknüpft, dargestellt. In Abbildung 77 d) sind die Denkwege, die die *Beschreibung des Originals 2* und *Abbildende Beschreibung  $O_2 \rightarrow M|O_1$*  miteinander verknüpfen, dargestellt. Weiterhin sind in Abbildung 78 e) die Denkwege, die die *Beschreibung des Modellexperiments* und *Abbildende Beschreibung  $O_2 \rightarrow M|O_1$*  miteinander verknüpfen, dargestellt. Diese zuvor aufgeführten Verknüpfungen können in beiden Stichprobengruppen identifiziert werden. In Abbildung 78 f) sind jeweils nicht kategorisierbare Einzelfälle dargestellt. Dabei handelt es sich z.B. um die Verknüpfung der Analogieoperationen *Beschreibung des Originals 2* und *richtungsunabhängige abbildende Beschreibung  $O_2 \leftrightarrow M|O_1$* .

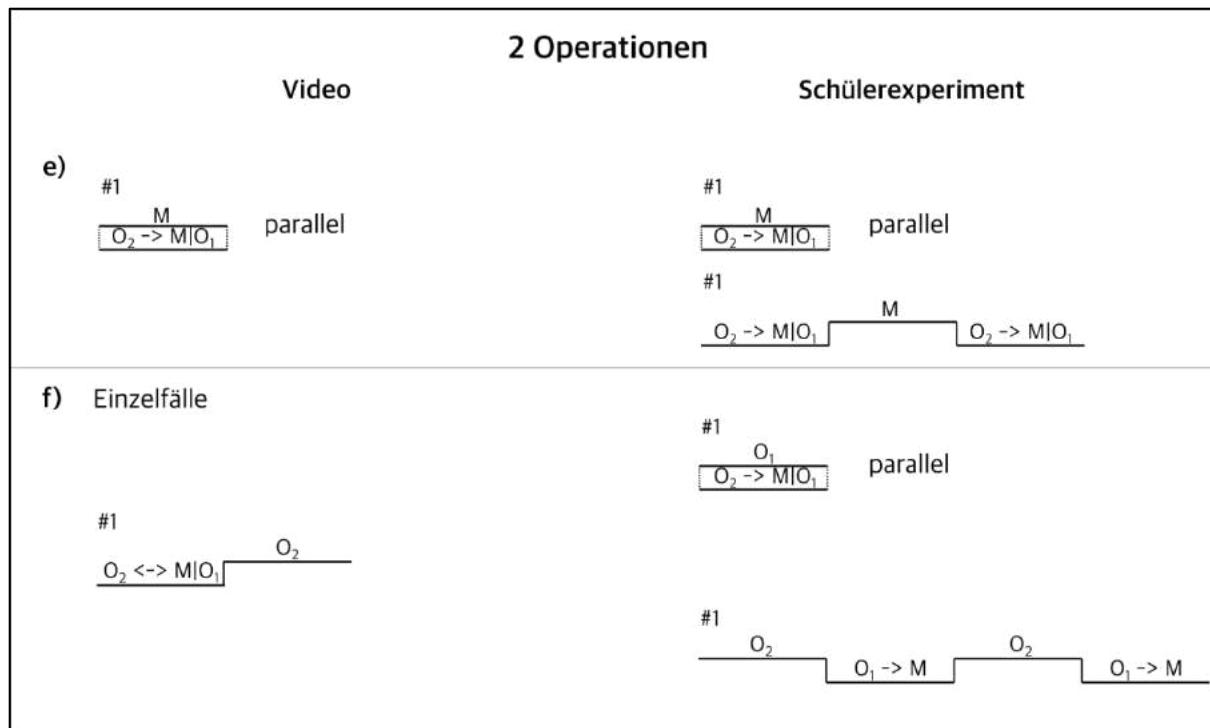


Abbildung 78: Denkwege mit zwei Analogieoperationen (Beschreibung und abbildende Beschreibung) differenziert nach der Präsentationsform des Modellexperiments und deren absolute Häufigkeit.

Insgesamt haben die Denkwege bei den Schüler\*innen, die zwei Operationen miteinander verknüpft haben, am häufigsten mit dem Original 2 (beschreibend und abbildend) gestartet und geendet (Start: nv = 10, 100 %; nSE = 8, 80 %; Ende: nv = 9, 90 %; nSE = 5, 50 %). Wurde gruppenübergreifend der Denkweg mit einer Beschreibung (Original 2) gestartet, so hat sich meist eine abbildende Beschreibung direkt angeschlossen (ausgenommen Denkwege in Abbildung 76; nv = 6, 85,71 %; nSE = 4, 66,67 %). Das bedeutet, dass innerhalb der Denkwege mit zwei Operationen Erkenntnisse aus dem vorher durchgeföhrten Mapping zwischen Modellexperiment und Original 1 zur Beschreibung von Original 2 angewendet worden sind.

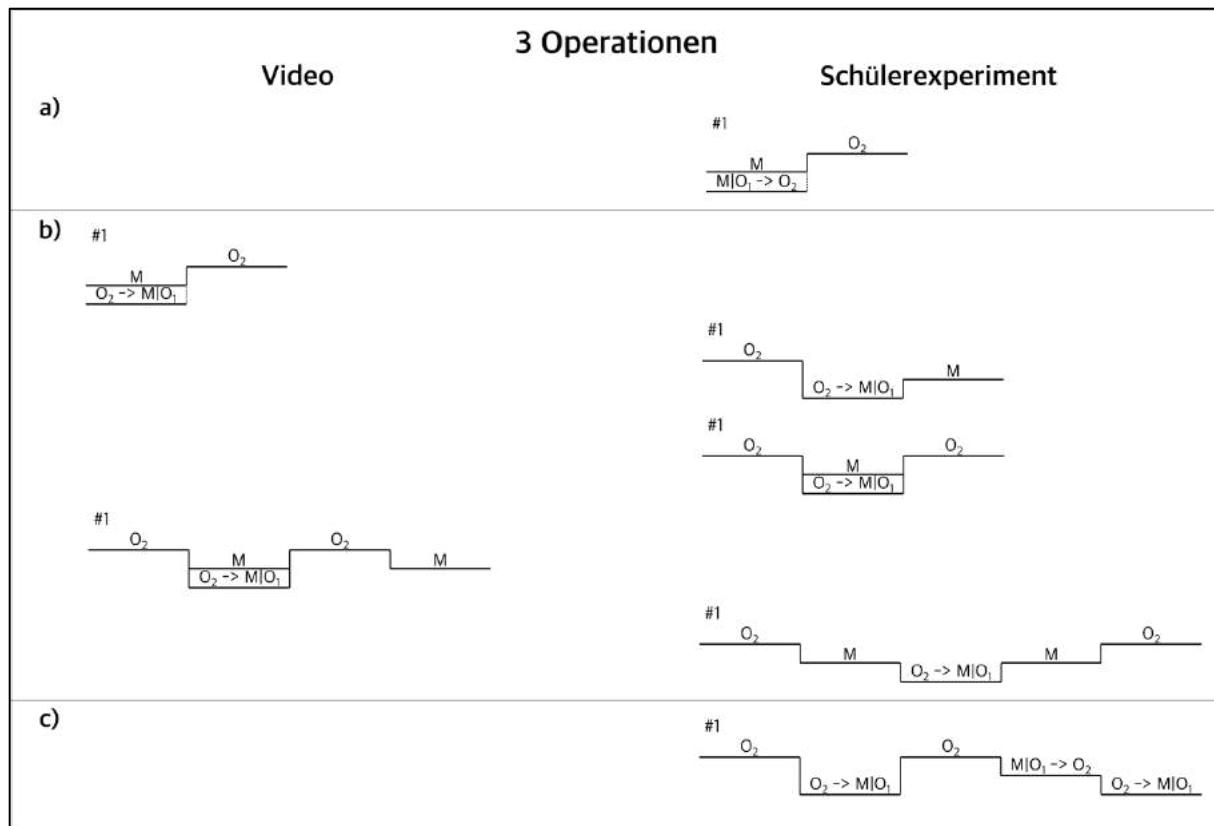


Abbildung 79: Denkwege mit drei Analogieoperationen differenziert nach der Präsentationsform des Modellexperiments und deren absolute Häufigkeit.

**Drei verschiedene Operationen** wurden von beiden Stichprobengruppen am seltens-ten genutzt ( $nv = 2, 6,9\%$ ;  $nse = 5, 9,4\%$ ; vgl. Abbildung 79).

Im Mittel haben die Schüler\*innen der SE-Gruppe dabei mehr Phrasen als die Schüler\*innen der V-Gruppe ( $MSE = 6$  Phrasen,  $SDSE = 3,7$ ;  $Mv = 3,5$  Phrasen,  $SDv = 2,1$ ) genutzt. Unabhängig von der Präsentationsform haben die Schüler\*innen ausschließlich die Analogieoperationen *Beschreibung des Originals 2* und *Beschreibung des Modellexperiments* sowie die *richtungsabhängige abbildende Beschreibung vom Original 2 zum Modellexperiment bzw. Original 1* miteinander verknüpft (vgl. Abbil-dung 79 b)).

Jedoch haben sich die Wege voneinander unterschieden und es haben zwischen einer bis vier Änderungen stattgefunden. Insgesamt wurden die Denkwege am häu-figsten mit dem Original 2 gestartet ( $nv = 2, 100\%$ ;  $nse = 4, 80\%$ ). Geendet haben die Denkwege unabhängig von der Präsentationsform ähnlich häufig mit dem Ori-ginal 2 wie auch mit dem Modellexperiment bzw. Original 1 (Original 2:  $nv = 1, 50\%$ ;  $nse = 3, 60\%$ ).

**Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse zur Makroebene bei der Anwendung**  
Die zeitliche Abfolge der in den Denkwegen genutzten Analogieoperationen wurde auf der **Makroebene** zusammengefasst. Unter den erhobenen

Denkwege konnten Verknüpfungen von ein bis drei Analogieoperationen identifiziert werden.

Der Schwerpunkt der Denkwege der Schüler\*innen lag auf dem Nutzen einer Analogieoperation ( $nv = 17, 58,62\%$ ;  $nse = 38, 71,7\%$ ). Dabei nutzte die SE-Gruppe häufiger eine Operation als die V-Gruppe. Dennoch nutzten die Schüler\*innen in ihren Denkwegen auch zwei oder drei Analogieoperationen ( $nv = 12, 41,38\%$ ;  $nse = 15, 28,3\%$ ).

Auf der Makroebene konnten bestimmte Verknüpfungsmuster der Analogieoperationen in jeweils beiden Stichprobengruppen identifiziert werden. Dennoch gab es auch Verknüpfungen von Operationen, die entweder nur in der V-Gruppe oder der SE-Gruppe auftraten. Darüber hinaus ist bei der Analyse der Abfolge der einzelnen Analogieoperationen aufgefallen, dass die Denkwege sehr individuell sind und insgesamt 17 verschiedene Verknüpfungsmuster identifiziert werden konnten. Somit konnten ausschließlich bei *einer Operation* und teilweise auch bei der Verknüpfung der Operationen *Beschreibung des Originals 2* und *Abbildende Beschreibung  $O_2 \rightarrow M|O_1$*  sowie *Beschreibung des Modellexperiments* und *Abbildende Beschreibung  $O_2 \rightarrow M|O_1$*  (zwei Operationen) bei der V- und SE-Gruppe ähnliche Muster in der konkreten Abfolge der Operationen identifiziert werden (vgl. Abbildung 75, Abbildung 77 d), Abbildung 78 e)).

Insgesamt lag der Fokus der artikulierten Gedanken auf dem Original 2: 81 von 82 Schüler\*innen der Gesamtstichprobe, welche relevante Inhalte genannt haben, beschrieben das Original 2 ausschließlich beschreibend oder abbildend. So bildete die Operation *Beschreibung des Originals 2* unabhängig von der Präsentationsform des Modellexperiments und der Komplexität der Denkwege (Anzahl genutzter Analogieoperation) den häufigsten Ausgangs- und Endpunkt. Darüber hinaus wurden ab zwei verwendeten Operationen die Erkenntnisse aus dem Mapping von Original 1 und Modellexperiment auf das Original 2 angewendet und artikuliert.

*Die in dieser Zwischenzusammenfassung dargestellten Ergebnisse werden auf S. 222 ff. diskutiert.*

### **Mesoebene der Denkwege mit der zeitlichen Abfolge der Analogiearten bei der Anwendung**

(Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse auf S. 188 f.)

Unabhängig von der Präsentationsform wurde während der Anwendung von den Schüler\*innen hauptsächlich mit der Nennung eines *Objektes* begonnen ( $nv = 13, 46,4\%$ ;  $nse = 23, 45,1\%$ ). Daran wurde ein strukturelles Attribut oder eine Relation

angeknüpft. Am häufigsten wurde dabei als zweite Analogieart eine Relation genannt ( $nv = 5, 38,5\%$ ;  $nse = 9, 39,1\%$ ) (vgl. Abbildung 80, unterer Arm). Beendet wurden die Denkprozesse der V-Gruppe am häufigsten mit einem Objekt und die Denkwege der SE-Gruppe mit einer Relation ( $nv_{\text{Objekt}} = 7/10, 70,0\%$ ;  $nse_{\text{Relation}} = 10/22, 45,5\%$ ).

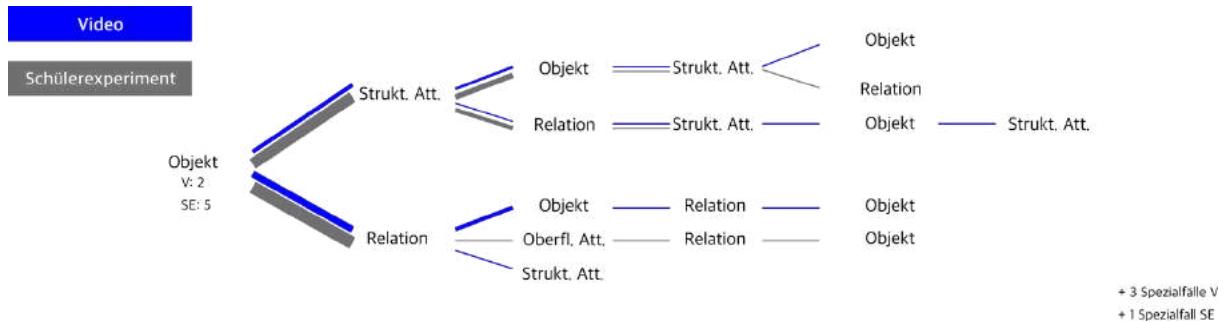


Abbildung 80: Gemeinsame Roadmap der Schüler\*innen der V-Gruppe und der SE-Gruppe während der Anwendung ausgehend von einem Objekt.

Der Ausgangspunkt *oberflächliches Attribut* wurde von lediglich zwei Schüler\*innen der SE-Gruppe als Ausgangspunkt für die Anwendung genutzt (3,9 %, vgl. Abbildung 81). Dabei blieben die Schüler\*innen bei ihren kurzen Denkprozessen (2-3 Phrasen) größtenteils auf einer oberflächlichen Ebene. Eine Relation wird genannt.

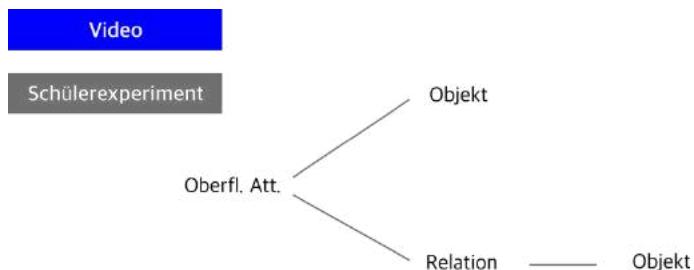


Abbildung 81: Gemeinsame Roadmap der Schüler\*innen der V-Gruppe und der SE-Gruppe während der Anwendung ausgehend von einem oberflächlichen Attribut.

Der Ausgangspunkt *strukturelles Attribut* war für die Schüler\*innen der V-Gruppe der zweit häufigste Startpunkt ( $nv = 11, 39,3\%$ ) (vgl. Abbildung 82), bei den Schüler\*innen der SE-Gruppe der dritthäufigste Startpunkt ( $nse = 11, 21,6\%$ ). Nach der ersten Nennung eines strukturellen Attributs folgte unabhängig von der Präsentationsform des Modellexperiments hauptsächlich ein Objekt ( $nv = 8, 72,7\%$ ;  $nse = 7, 63,6\%$ ).

## 5 Ergebnisse

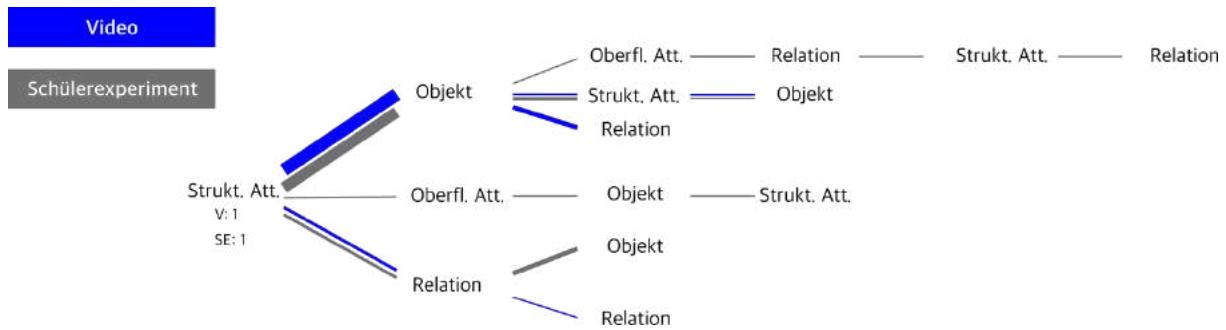
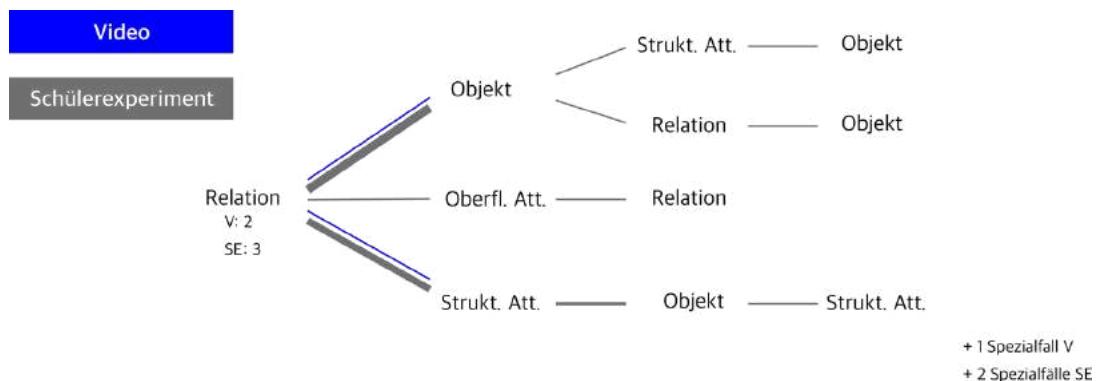


Abbildung 82: Gemeinsame Roadmap der Schüler\*innen der V-Gruppe und der SE-Gruppe während der Anwendung ausgehend von einem strukturellen Attribut.

Der Ausgangspunkt *Relation* war bei der SE-Gruppe der zweit häufigste Startpunkt ( $n_{SE} = 15, 29,4\%$ ) (vgl. Abbildung 83). Wenn zu Beginn eine Relation genannt wurde, wurde am häufigsten ein Objekt ( $nv = 2/4 = 50,0\%$ ;  $n_{SE} = 5/15 = 33,3\%$ ) oder ein strukturelles Attribut ( $nv = 2/4 = 50,0\%$ ;  $n_{SE} = 4/15 = 26,7\%$ ) angeknüpft.



*Abbildung 83: Gemeinsame Roadmap der Schüler\*innen der V-Gruppe und der SE-Gruppe während der Anwendung ausgehend von einer Relation.*

Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse zur **Mesoebene** bei der Anwendung Auf der **Mesoebene**, welche die Analogiearten zeitabhängig zusammenfasst, wurde unabhängig von der Präsentationsform während der Anwendung von den Schüler\*innen hauptsächlich mit der Nennung eines *Objektes* begonnen (nv = 13, 46,4 %; nSE = 23, 45,1 %; vgl. Abbildung 80). Im zweithäufigsten Ausgangspunkt unterscheiden sich die beiden Stichprobegruppen: Die V-Gruppe startete am zweit häufigsten mit einem strukturellen Attribut (nv = 11, 39,3 %; vgl. Abbildung 82) und die SE-Gruppe mit einer Relation (nSE = 15, 29,4 %; vgl. Abbildung 83).

Beim weiteren Vorgehen konnte identifiziert werden, dass am häufigsten ein strukturelles Attribut oder eine Relation genannt wurden, wenn mit einem Objekt begonnen wurde (vgl. Abbildung 80). Weiter folgte ein Objekt am häufigsten auf ein strukturelles Attribut als Ausgangspunkt ( $nv = 8/II = 72,7\%$ ;  $nse = 7/II = 63,6\%$ ).

Wenn zu Beginn von den Schüler\*innen der SE-Gruppe eine Relation genannt wurde, wurde häufig ein Objekt ( $n_{SE} = 5/15 = 33,3\%$ ) oder ein strukturelles Attribut ( $n_{SE} = 4/15 = 26,7\%$ ) angeknüpft.

Insgesamt konnte eine starke Verknüpfung zwischen den Analogiearten Objekt und strukturelles Attribut identifiziert werden. Oberflächliche Attribute wurden hingegen kaum genutzt.

*Die in dieser Zwischenzusammenfassung dargestellten Ergebnisse werden auf S. 222 ff. diskutiert.*

### **Mikroebene der Denkwege mit den konkreten themenbezogenen Inhalten differenziert nach den Analogiearten bei der Anwendung**

*(Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse auf S. 191)*

Um zu untersuchen, welche relevanten Inhalte (Mikroebene) bei der Übertragung der Erkenntnisse auf ein weiteres Original zur Staubexplosion von den Schüler\*innen genannt wurden, wurde sich auf die fünf Bedingungen, die im Explosionspentagon enthalten sind, beschränkt (vgl. Abbildung 84).

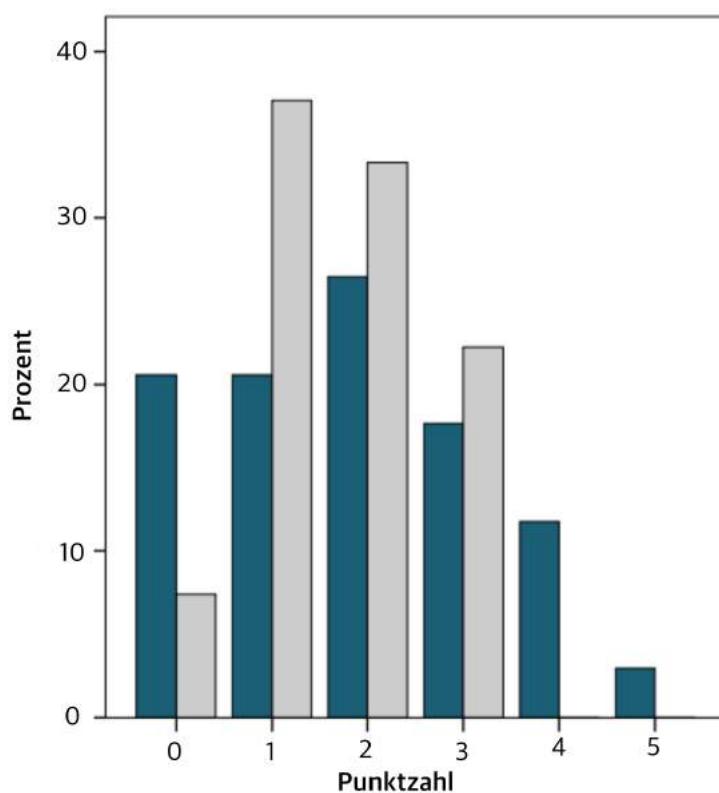


Abbildung 84: Prozentuale Häufigkeit der genannten Bedingungen des Explosionspentagons während der Anwendung differenziert nach Probandengruppen (blau: Video, grau: Schüler\*innenexperimente).

Dabei zeigt sich, dass fünf bzw. vier Bedingungen ausschließlich in den Denkprozessen von Schüler\*innen der V-Gruppe genannt wurden (5 Bedingungen: 2,9 %; 4 Bedingungen: 11,8 %). Weniger als vier Bedingungen wurden von den Schüler\*innen beider Gruppen genannt. Dabei haben prozentual ähnlich viele Schüler\*innen

der SE- und der V-Gruppe drei Bedingungen während ihres Denkprozesses genannt ( $n_{SE} = 12, 21,8\%$ ;  $n_V = 6, 17,6\%$ ).

Bei beiden Gruppen lag der Median der genannten Bedingungen bei 2 ( $SD_{SE} = 0,9$ ;  $SD_V = 1,4$ ). Dieser Median wurde von 18 Schüler\*innen (32,7 %) der SE-Gruppe und 9 Schüler\*innen (26,5 %) der V-Gruppe erreicht.

Die Häufigkeit der Nennung einzelner Bedingungen ist in Tabelle 33 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Schüler\*innen diese Bedingungen des Explosionspentagon als mitteilungsrelevant erachtet haben und es daher wahrscheinlich ist, dass sie diese verstanden haben.

Tabelle 33: Häufigkeit der genannten Elemente des Explosionspentagons während der Anwendung (\* gibt die fünf Elemente des Explosionspentagons im engeren Sinne an).

	Häufigkeit		
	Gesamtstichprobe (n = 89)	V-Gruppe (n = 34)	SE-Gruppe (n = 55)
<b>Brennstoff*</b>	20 (22,5 %)	10 (29,4 %)	10 (18,2 %)
Stoff	71 (79,8 %)	28 (82,4 %)	43 (78,2 %)
Brennbarkeit	20 (22,5 %)	10 (29,4 %)	10 (18,2 %)
<b>Oxidationsmittel*</b>	24 (27,0 %)	9 (26,5 %)	15 (27,3 %)
<b>Umgebung*</b>	20 (22,5 %)	10 (29,4 %)	10 (18,2 %)
Geschlossene Umgebung	3 (3,4 %)	3 (8,8 %)	0 (0 %)
<b>Zündquelle*</b>	58 (65,2 %)	21 (61,8 %)	37 (67,3 %)
Energie der Zündquelle	25 (28,1 %)	7 (20,6 %)	18 (32,7 %)
<b>Aufwirbelung*</b>	34 (38,2 %)	14 (41,2 %)	20 (36,4 %)
Luftzufuhr	18 (20,2 %)	9 (26,5 %)	9 (16,4 %)
Zerteilungsgrad	22 (24,7 %)	9 (26,5 %)	13 (23,6 %)
Entzündung	12 (13,5 %)	5 (14,7 %)	7 (12,7 %)
Explosion	15 (16,9 %)	7 (20,6 %)	8 (14,5 %)

Von den Bedingungen wurden die Objekte *Stoff* und *Zündquelle* am häufigsten genannt (Stoffgesamt: 79,8 %; Zündquellen gesamt: 65,2 %) genannt. Dabei wurden diese beiden Objekte ähnlich häufig von beiden Gruppen genannt. Das *Oxidationsmittel* wurde von mehr als jedem\*jeder vierten Schüler\*in genannt (27,0 %).

Als Attribute wurden der *Zerteilungsgrad* ( $n = 22, 24,7\%$ ) und die *Brennbarkeit* ( $n = 20, 22,5\%$ ) im Zusammenhang mit dem Stoff sowie die *Energie der Zündquelle* ( $n = 25, 28,1\%$ ) von nahezu jedem\*jeder vierten Schüler\*in genannt. Der prozentuale Anteil der Nennungen des *Brennstoffs*, der *Brennbarkeit* und der *Umgebung* war bei der V-Gruppe höher als bei der SE-Gruppe. Demgegenüber war der prozentuale Anteil der Nennungen der *Energie der Zündquelle* bei der SE-Gruppe höher als bei der V-Gruppe. Die Relation *Aufwirbelung* wurde von 38,2 % der Schüler\*innen genannt

(n = 34). Nur wenige Schüler\*innen nannten die *Geschlossenheit der Umgebung* (n = 3, 3,4 %) als Attribut.

*Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse zur Mikroebene bei der Anwendung*  
Auf der **Mikroebene**, d.h. der Ebene des konkreten Inhaltes bezogen auf das dem Modellexperiment zugrundeliegenden Explosionspentagons, haben 32,3 % der Schüler\*innen der V-Gruppe und 21,8 % der Schüler\*innen der SE-Gruppe mehr als die Hälfte der Bedingungen des Explosionspentagons genannt. Am häufigsten wurden von beiden Gruppen zwei der fünf Bedingungen genannt ( $MSE = Mv = 2$ ,  $SDSE = 0,9$ ;  $SDv = 1,4$ ). Alle fünf sowie vier Bedingungen wurden ausschließlich in den Denkprozessen von Schüler\*innen der V-Gruppe genannt (5 Bedingungen: 2,9 %; 4 Bedingungen: 11,8 %). Unter den während der Denkprozesse von den Schüler\*innen genannten Bedingungen wurden am häufigsten die Objekte *Stoff*, *Zündquelle*, die Attribute *Zerteilungsgrad* und *Brennbarkeit* im Zusammenhang mit dem Stoff sowie die *Energie der Zündquelle* und als Relation die *Aufwirbelung* wiedergegeben. Nur wenige Schüler\*innen nannten die *Geschlossenheit der Umgebung* als Attribut.

*Die in dieser Zwischenzusammenfassung dargestellten Ergebnisse werden auf S. 222 ff. diskutiert.*

### **Zusammenhänge zwischen den einzelnen Ebenen der Denkwege**

*(Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse auf S. 194 f.)*

Zur Identifikation von möglichen Zusammenhängen zwischen den einzelnen Ebenen der Denkwege wurden Korrelationen berechnet. Konkret wurden diese Korrelationen zwischen den von den Schüler\*innen genannten einzelnen Bedingungen des Explosionspentagons und der Länge (Anzahl genutzter inhaltsrelevanter Phrasen) sowie der Komplexität (Anzahl der genutzten Analogieoperationen) der Denkprozesse berechnet.

Der Kolmogorov-Smirnov-Test offenbarte, dass die vorliegenden Daten bezüglich der Bedingungen des Explosionspentagons signifikant nicht normalverteilt sind ( $p_{\text{Elemente\_Kolmogorov-Smirnov-Test}} = .000 < .05$ ) (vgl. Bühl, 2010, S. 368 f.). Daher wurde der non-parametrische Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman für die weiteren Analysen eingesetzt. Die signifikanten Korrelationen sind in Tabelle 34 und Tabelle 35 dargestellt.

## 5 Ergebnisse

---

Tabelle 34: Signifikante Korrelationen nach Spearman zwischen den Variablen „Anzahl der Operationen“ bzw. „Anzahl inhaltsrelevanter Phrasen“ und den Elementen des Explosionspentagons während des Transfers. \*  $p < .05$ , \*\*  $p < .01$ .

	Anzahl inhaltsrelevanter Phrasen	Anzahl der Operationen
Brennstoff	.238*	
Stoff	.488**	.377**
Brennbarkeit	.238*	
Oxidationsmittel	.337**	
Umgebung	.415**	
Geschlossene Umgebung		.232*
Zündquelle	.350**	
Energie der Zündquelle		
Aufwirbelung	.225*	
Luftzufuhr	.252*	
Zerteilungsgrad		.237*

Zwischen der Länge des Denkprozesses während der Anwendung, d.h. der Anzahl inhaltsrelevanter Phrasen (vgl. Makroeben), und den einzelnen Bedingungen des Explosionspentagons konnten einige Korrelationen identifiziert werden. Es zeigt sich, dass die Anzahl inhaltsrelevanter Phrasen signifikant mit nahezu allen Objekten, Attributen und Relationen, welche die Bedingungen des Explosionspentagons darstellen korreliert. Dabei wurden die Korrelationen mit u.a. dem *Stoff*, dem *Oxidationsmittel*, der *Umgebung* und der *Zündquelle* als hoch signifikant eingestuft. Dabei handelt es sich nach Cohen (1988) um jeweils mittlere Effekte. Ausschließlich die Attribute *Geschlossene Umgebung*, *Energie der Zündquelle* und *Zerteilungsgrad des Stoffes* korrelieren nicht mit der Anzahl inhaltsrelevanter Phrasen.

Die Komplexität der Denkprozesse, welche über die Anzahl der während der Anwendung genutzten Analogieoperationen (vgl. Anhang 12.17 – Makroebene) ausgedrückt wird, korrelierte hoch signifikant mit der Nennung des *Stoffes* ( $p < .01$ ). Dieser Zusammenhang ist positiv und es handelt sich nach Cohen (1988) um einen mittleren Effekt. Zudem korreliert die Anzahl der Operationen mit der Variable *Geschlossene Umgebung* bzw. dem *Zerteilungsgrad des Stoffes*. Nach Cohen (1988) weisen diese eine schwache Effektstärke auf.

### **Zusammenhänge zwischen den genannten Bedingungen während der Anwendung**

Auch zwischen den einzelnen Bedingungen, die während der Anwendung innerhalb des Denkprozesses genannt wurden, konnten Zusammenhänge nachgewiesen werden (vgl. Anhang 12.18 – Tabelle 57).

Die Korrelationen, die aufgrund der inhaltlichen Zusammengehörigkeit einzelner Bedingungen bestimmt sind, sind beispielsweise Brennstoff und Brennbarkeit (rs 192

= 1.00). Dabei ist die Nennung der einen Bedingung nicht ohne eine Nennung der anderen möglich. Auch zwischen der Nennung des Stoffes und der Nennung der stoffbezogenen, relevanten Eigenschaften *Brennbarkeit* und *Zerteilungsgrad* sowie der Umgebung und der Eigenschaft der *Geschlossenheit* besteht jeweils ein signifikanter positiver Zusammenhang. Nach Cohen (1988) handelt es sich dabei um schwache bis mittlere Effekte. Unabhängig von diesen Zusammengehörigkeiten korreliert das Nennen des Stoffs mit dem Nennen des Oxidationsmittels signifikant ( $rs = .24, p < .05$ ). Nach Cohen (1988) handelt es sich dabei um einen schwachen Effekt. Hoch signifikant korreliert das Oxidationsmittel mit der Luftzufuhr ( $rs = .64, p < .01$ ) und die Zündquelle mit der Aufwirbelung ( $rs = .37, p < .01$ ). Dabei weist der Zusammenhang zwischen dem Oxidationsmittel und der Luftzufuhr nach Cohen (1988) einen starken Effekt auf, der zwischen der Zündquelle und der Aufwirbelung ist ein mittlerer Effekt.

### ***Zusammenhänge zwischen den während des Mappings und der Anwendung genannten Bedingungen***

Ob bestimmte inhaltliche Bedingungen aus dem Vergleich von Modellexperiment und Original 1 (Mapping) von den Schüler\*innen bei der Übertragung der Erkenntnisse auf das weitere Original 2 zur Staubexplosion angewandt wurden, wurden mithilfe der Korrelationen zwischen den Nennungen während des *Mappings* (vgl. Abschnitt 5.3.1) und den Nennungen während der *Anwendung* geprüft (vgl. Abschnitt 5.3.3). Die signifikanten Korrelationen sind in Tabelle 35 dargestellt.

Insgesamt konnten vierzehn Zusammenhänge zwischen den während des *Mappings* bzw. der *Anwendung* in den Denkwegen genannten einzelnen Bedingungen des Explosionspentagons identifiziert werden. Zum einen konnten Korrelationen zwischen denselben Elementen identifiziert werden. Beispielsweise korrelierten das Nennen des Objektes *Luftzufuhr* während des *Mappings* und das Nennen desselben Objektes bei der *Anwendung* signifikant ( $rs = .23, p < .05$ ). Je häufiger ein\*e Schüler\*in die *Luftzufuhr* beim *Mapping* nannte, desto häufiger wurde das Objekt *Luftzufuhr* auch während der *Anwendung* genannt, oder je häufiger dieses Objekt während der *Anwendung* genannt wurde, desto häufiger wurde es auch beim *Mapping* genannt. Dabei handelt es sich nach Cohen (1988) um einen schwachen Effekt. Dies ist bei den Attributen *Geschlossenheit der Umgebung*, *Energie der Zündquelle* und *Zerteilungsgrad des Stoffes* sowie der Relation *Aufwirbelung* analog. Die Zusammenhänge weisen nach Cohen (1988) schwache bis mittlere Effekte auf.

Zum anderen korrelierten das Nennen des Objektes *Oxidationsmittel* beim *Mapping* und die *Umgebung* ( $rs = .23, p < .05$ ) bzw. *Energie der Zündquelle* ( $rs = .24, p < .05$ ) bei der *Anwendung* jeweils signifikant mit schwacher Effektstärke. Weiter konnten

zwischen dem *Stoff* beim Mapping und der *Aufwirbelung* bei der Anwendung ( $r_s = .32$ ,  $p < .01$ ) sowie dem *Zerteilungsgrad des Stoffes* während des Mappings und der *Aufwirbelung* bei der Anwendung ( $r_s = .29$ ,  $p < .01$ ) hoch signifikante Korrelationen nachgewiesen werden. Ein weiterer signifikanter Zusammenhang schwacher Effektstärke besteht zwischen der *Aufwirbelung* beim Mapping und der *Zündquelle* bei der Anwendung (vgl. Cohen, 1988).

Tabelle 35: Signifikante Korrelationen nach Spearman zwischen den einzelnen Elementen des Explosionspentagons während des Mappings und der Anwendung. \*  $p < .05$ , \*\*  $p < .01$ . Es ist zu beachten, dass bei der „Anwendung“ die Bedingungen mit den Nummern 1-3 ausgelassen wurden, da dort keine Korrelationen identifiziert werden konnten.

	Anwendung							
	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>1 Brennstoff</b>								
2 Stoff					.23*		.32*	
							*	
<b>3 Brennbarkeit</b>								
<b>4 Oxidationsmittel</b>			.23*			.24*		
<b>5 Umgebung</b>								
6 Geschlossene Umgebung				.45*				
				*				
<b>7 Zündquelle</b>								
8 Energie der Zündquelle						.27*		
<b>9 Aufwirbelung</b>					.23*		.43*	
							*	
10 Luftzufuhr		.31*			.27*		.42*	
	*						*	
<b>11 Zerteilungsgrad</b>				.21*		.29*		.23
							*	

#### *Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse zu den Zusammenhängen zwischen den Ebenen bei der Anwendung*

In den vorliegenden Denkgraphen aller Schüler\*innen konnte ein Zusammenhang zwischen der Länge und Komplexität der Denkwege während der Anwendung und der Artikulation relevanter Bedingungen für das Explosionskonzept ermittelt werden.

- Je länger der Denkweg war, umso häufiger wurden die meisten relevanten Bedingungen als Gedanken von den Schüler\*innen artikuliert (vgl. Tabelle 34).
- Je komplexer der Denkweg war, d.h. je mehr Analogieoperationen genutzt wurden, umso häufiger wurden die drei Bedingungen *Stoff*, *Zerteilungsgrad des Stoffes* und *Geschlossenheit der Umgebung* für das

Auftreten einer Staubexplosion genannt (vgl. Anhang 12.18 – Tabelle 57).

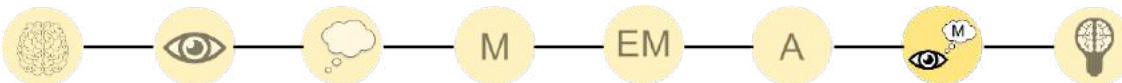
Auf inhaltlicher Ebene konnten in den Denkprozessen während der Anwendung Zusammenhänge zwischen einzelnen Bedingungen ermittelt werden, die sich bezogen auf den Prozess der Staubexplosion ergeben. In Bezug auf die Aufwirbelung und der anschließenden Entzündung des Stoff-Luft Gemisches gab es folgende Zusammenhänge: Stoff – Oxidationsmittel, Oxidationsmittel – Luftzufuhr, Zündquelle – Aufwirbelung.

Weiter konnten Zusammenhänge zwischen den Nennungen einzelner Bedingungen während des *Mappings* und der *Anwendung* identifiziert werden. Dabei wurden das Objekt *Luftzufuhr*, die Attribute *Geschlossenheit der Umgebung*, *Energie der Zündquelle* und *Zerteilungsgrad des Stoffes* sowie die Relation *Aufwirbelung* umso häufiger während der *Anwendung* genannt, je häufiger sie vorab während des *Mappings* genannt wurden. Bei weiteren Zusammenhängen konnte eine Zunahme der Komplexität der Analogieart vom *Mapping* zur *Anwendung* identifiziert werden: Je häufiger das Objekt *Stoff* während des *Mappings* genannt wurde, umso häufiger wurde der *Zerteilungsgrad des Stoffes* als strukturelles Attribut und die *Aufwirbelung* als Relation bei der *Anwendung* genannt. Je häufiger das Objekt *Oxidationsmittel* während des *Mappings* genannt wurde, umso häufiger wurde die *Umgebung* und die *Energie der Zündquelle* als strukturelles Attribut bei der *Anwendung* genannt.

*Die in dieser Zwischenzusammenfassung dargestellten Ergebnisse werden auf S. 221 f. diskutiert.*

## 5.4 Wahrnehmung und Denkmuster beim Mapping

(Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse auf S. 198 f.)



**Ziel IV.** Identifizierung eines Zusammenhangs zwischen der Wahrnehmung und den Denkmustern während des Denkens in Analogien beim Umgang mit Modellexperimenten

Dieser Abschnitt zielt auf die Triangulation der Informationsaufnahme, der ersten Informationsverarbeitung und dem Mapping beim Denken in Analogien ab. Dazu wird ausschließlich die Stichprobe eingesetzt, die das Video während des Eye-Trackings präsentiert bekommen hat, da lediglich von diesen Schüler\*innen die Daten zur Informationsaufnahme und zur Informationsverarbeitung vorliegen ( $N = 28$ ).

### **Informationsaufnahme und Denkprozess**

Im Folgenden werden die Zusammenhänge zwischen der Informationsaufnahme mit den genannten Bedingungen einer Staubexplosion beim *Mapping* dargestellt. Dabei werden die Anzahl der Operationen und die Anzahl inhaltsrelevanter Phrasen beim Mapping mit den Variablen der Informationsaufnahme korreliert. Im Anschluss werden die einzelnen Bedingungen getrennt voneinander betrachtet.

Jedoch korreliert die Anzahl genannter Bedingungen mit einigen Variablen während der Betrachtung des *Vorversuchs*. Konkret korreliert die Anzahl genannter Bedingungen beim *Mapping* signifikant mit der Fixationsanzahl in der AOI\_4 ( $r = -.412^*$ ,  $p = .029$ , Glastiegel) und der Fixationsdauer in der AOI\_6 ( $r = .416^*$ ,  $p = .028$ , Luftpumpe). Weitergehend korreliert die Variable Fixationsanzahl in der AOI\_6 signifikant mit der Anzahl genannter Bedingungen beim *Mapping* ( $r = -.596^{**}$ ,  $p = .001$ ).

Tabelle 36: Signifikante Korrelationen nach Spearman zwischen den Variablen der Informationsaufnahme in Sequenz 3 und den genannten Bedingungen einer Staubexplosion (orientiert am Explosionspentagon) beim *Mapping*. \*  $p < .05$ , \*\*  $p < .01$ .

	Fixati- onsan- zahl AOI_2	Fixati- onsan- zahl AOI_5	Fixa- tions- dauer AOI_5	Fixa- tions- dauer AOI_6	i. Fixa- tion AOI_1	i. Fixa- tion AOI_2	i. Fixa- tion AOI_6
<b>Anzahl der Operationen</b>							
Anzahl in- haltsrelevan- ter Phrasen				.504**	.417*		.506**
Brennstoff	.460*		.577**				
Stoff			.463*				.420*
Brennbarkeit	.460*		.577**				
<b>Oxidations- mittel</b>						.404*	.442*
<b>Umgebung</b>							
Geschlos- sene Umge- bung							
<b>Zündquelle</b>							
Energie der Zündquelle						.742**	.397*
<b>Aufwirbe- lung</b>							
Luftzufuhr	-.422*		.493**	.479**			
Zerteilungs- grad							

Zudem korreliert die Anzahl genannter Bedingungen beim *Mapping* signifikant mit der Fixationsdauer innerhalb der Sequenz, in der das *Modellexperiment* stattfindet, in AOI\_5 ( $r = .480^{**}$ ,  $p = .010$ , Stromquelle) sowie der Zeit bis zur ersten Fixation in der AOI\_6 ( $r = .480^{**}$ ,  $p = .010$ ). Weitere Korrelationen sind in Tabelle 36 aufgeführt.

Hoch-signifikante positive Zusammenhänge mit starkem Effekt nach Cohen (1988) können zwischen den folgenden Variablen festgestellt werden: Anzahl inhaltsrelevanter Phrasen und Fixationsdauer AOI\_5, Brennstoff und Fixationsdauer AOI\_5, Brennbarkeit und Fixationsdauer AOI\_5 sowie Anzahl inhaltsrelevanter Phrasen und der Zeit bis zur ersten Fixation in AOI\_6. Ein negativer, hoch-signifikanter Zusammenhang hoher Effektstärke kann zwischen der Energie der Zündquelle und der Zeit bis zur ersten Fixation in AOI\_1 (Deckel) identifiziert werden (vgl. Cohen, 1988). Darüber hinaus sind keine Korrelationen zwischen den Fixationsvariablen und der Anzahl der Operationen, der Umgebung, der Zündquelle und der Aufwirbelung als enge Elemente des Explosionspentagons nachweisbar.

### ***Informationsverarbeitung und Denkprozess***

Das Ergebnis der Informationsverarbeitung (mentales Modell) nach dem Betrachten des Modellexperiments bildet einen grundlegenden Baustein für den Denkprozess während des Mappings, bei dem es zum Vergleich zwischen Modellexperiment und Original kommt. Zwischen der ersten Verarbeitung der aufgenommenen Informationen und den genannten Bedingungen einer Staubexplosion beim *Mapping* konnten einige Zusammenhänge festgestellt werden. Die identifizierten Korrelationen sind in Tabelle 37 aufgelistet.

Ein signifikanter positiver Zusammenhang kann zwischen der Gesamtpunktzahl der Auswertungsitems und dem Nennen der Energie der Zündquelle während des Mappings festgestellt werden ( $rs = .387$ ,  $p < .05$ ). Weiter hängt die korrekte Beantwortung des Items E3j (Funktion des Plexiglasrohres) signifikant positiv mit der Anzahl der beim *Mapping* genannten Operationen zusammen ( $rs = .368$ ,  $p < .05$ ). Nach Cohen (1988) weisen beide Zusammenhänge mittlere Effekte auf.

## 5 Ergebnisse

---

Tabelle 37: Signifikante Korrelationen nach Spearman zwischen der ersten Verarbeitung der aufgenommenen Informationen und den genannten Bedingungen einer Staubexplosion (orientiert am Explosionspentagon) beim Mapping.\*  $p < .05$ , \*\*  $p < .01$ .

	Items des Fragebogens zur Informationsverarbeitung			
	Beobachtung der Pulverför- migkeit des Stoffes (E3a)	Gesamt- punktzahl Auswertung	Relevante Eigenschaf- ten der Sub- stanz (E3f)	Funktion des Plexi- glasrohres (E3j)
Mapping	Anzahl der Operatio- nen			.368*
	Anzahl inhaltsrelevan- ter Phrasen			
	Stoff			
	Oxidationsmittel	-.419*		
	Geschlossene Umge- bung	-.376*		
	Zündquelle			-.426*
	Energie der Zünd- quelle		.387*	
	Luftzufuhr	-.477**		

### Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse zum Einfluss der Informationsaufnahme und -verarbeitung auf das Mapping

In der Studie konnte gezeigt werden, dass die **Aufnahme von Informationen** während der experimentellen Prozesse (Vorversuch, Modellexperiment) das *Mapping* in Teilen beeinflusst. Ausgehend vom Explosionspentagon wurden während des Mappings dabei umso mehr kennzeichnende Bedingungen des Explosionsprozesses genannt, je häufiger während des Vorversuchs der Bereich um die Glühwendel ( $r = -.412^*$ ,  $p = .029$ ) und je häufiger ( $r = -.596^{**}$ ,  $p = .001$ ) sowie länger ( $r = .416^*$ ,  $p = .028$ ) der Bereich um die Luftpumpe fixiert wurden.

Bei der Informationsaufnahme während des Betrachtens des *Modellexperiments* konnten weitere Zusammenhänge zwischen den Blickbewegungsvariablen und den Inhalten der Denkprozesse beim Mapping identifiziert werden (vgl. Tabelle 36). Insbesondere scheinen die Denkprozesse durch die Betrachtung der für den reinen phänomenologisch wahrnehmbaren Prozess irrelevante Bereiche (Stromquelle, Luftpumpe) zum Teil stark beeinflusst zu werden.

Je länger die sogenannten irrelevanten Bereiche Stromquelle und Luftpumpe und je später die Luftpumpe fixiert wurden, umso mehr inhaltsrelevante Phrasen wurden während des Denkprozesses genannt. Unter diesen inhaltsrelevanten Phrasen waren umso mehr den Explosionsprozess kennzeichnende Bedingungen, je später die Luftpumpe und je länger die Stromquelle

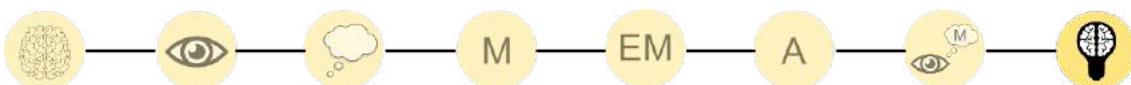
fixiert wurden. Unter diesen Bedingungen wurden der Stoff, das Oxidationsmittel und die Energie der Zündquelle umso häufiger genannt, je später die Luftpumpe fixiert wurde. Gleichzeitig wurde die Brennbarkeit des Stoffes umso häufiger erkannt und während des Denkprozesses beim Mapping genutzt, je länger und häufiger die Stromquelle fixiert wurde.

In Bezug auf die **Verarbeitung der Informationen** und den Denkprozessen während des Mappings konnte gezeigt werden, dass, je besser das Modellexperiment mit den explosionsrelevanten Aspekten ausgewertet wurde, umso häufiger wurde die Energie der Zündquelle während des Mappings genannt (vgl. Tabelle 37). Jedoch wurde die Energie der Zündquelle während des Mappings umso seltener genannt, wenn die Eigenschaften, Brennbarkeit und hoher Zerteilungsgrad, des Stoffes korrekt verarbeitet wurden. Wurde die Funktion des Plexiglasrohres zur Bildung eines abgeschlossenen Raumes besser verstanden, umso mehr Operationen wurden während des Mappings genutzt. Konnte hingegen die Pulverförmigkeit des Stoffes schon im Modellexperiment korrekt beobachtet werden, wurden während des Denkprozesses seltener das Oxidationsmittel, die geschlossene Umgebung und die Luftzufuhr genannt.

*Die in dieser Zwischenzusammenfassung dargestellten Ergebnisse werden auf S. 224 ff. diskutiert.*

## 5.5 Wissenszuwachs

*(Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse auf S. 202 f.)*



### Ziel V. Identifizierung des Wissenszuwachs über die Bedingungen für eine Staubexplosion infolge der Intervention

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse bezüglich des Post-Tests und somit der Bedingungen für das Auftreten einer Staubexplosion dargestellt, die nach der Intervention von den Schüler\*innen genannt wurden. Indem die Daten nach der Intervention in Bezug zu den Daten des Vorwissenstests gesetzt werden, kann analysiert werden, ob es zu einem Wissenszuwachs gekommen ist. Im Folgenden werden die Ergebnisse zunächst deskriptiv betrachtet und Unterschiede anschließend statistisch abgesichert.

In Abbildung 85 (Post-Test) sind a) die Gesamtleistungen der Gesamtstichprobe und b) der einzelnen Probandengruppen in Boxplot-Diagrammen dargestellt. Der

## 5 Ergebnisse

---

Median der Gesamtstichprobe liegt bei 1, der Median der V-Gruppe bei 2 Punkten und der Median der SE-Gruppe bei 1 Punkt.

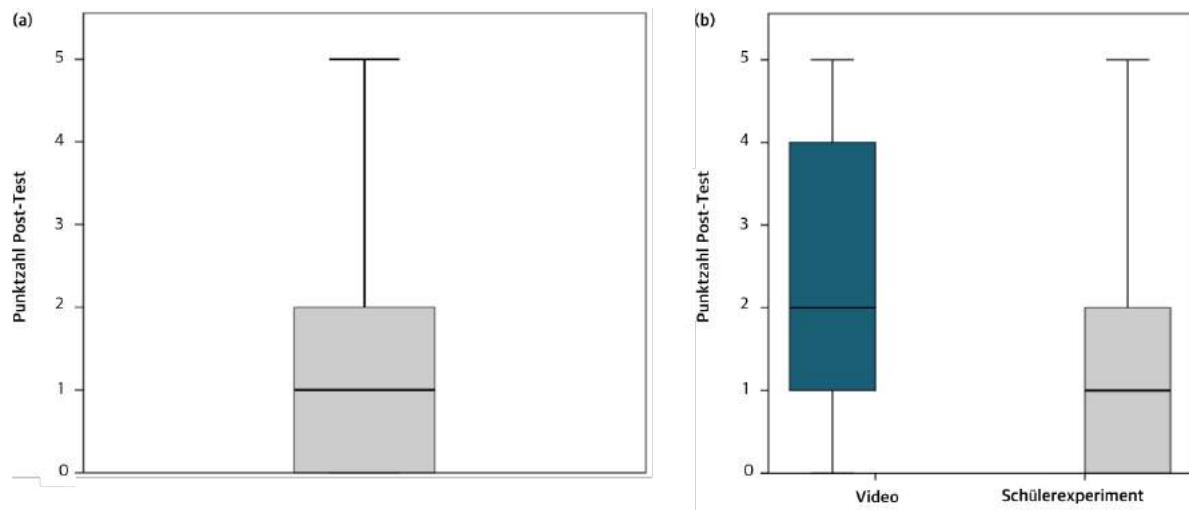


Abbildung 85: Verteilung der Punktzahl beim Post-Test a) der Gesamtstichprobe und b) der Probandengruppen Video und Schüler\*innenexperiment.

Im Vergleich dazu lag der Median der erzielten Punktzahl des Vorwissenstests (Pre-Tests) in der V-Gruppe bei 0 Punkten (vgl. Abbildung 86), in der SE-Gruppe war er aufgrund der geringen Anzahl kodierter Antworten nicht berechenbar. Das bedeutet, dass auch in der SE-Gruppe der Wert mit 0 Punkten angenommen werden kann. Somit konnten von den Schüler\*innen in beiden Probandengruppen im Post-Test höhere Gesamtleistungen als im Vorwissenstest (Pre-Test) erreicht werden (vgl. Abbildung 85 mit Abbildung 86).

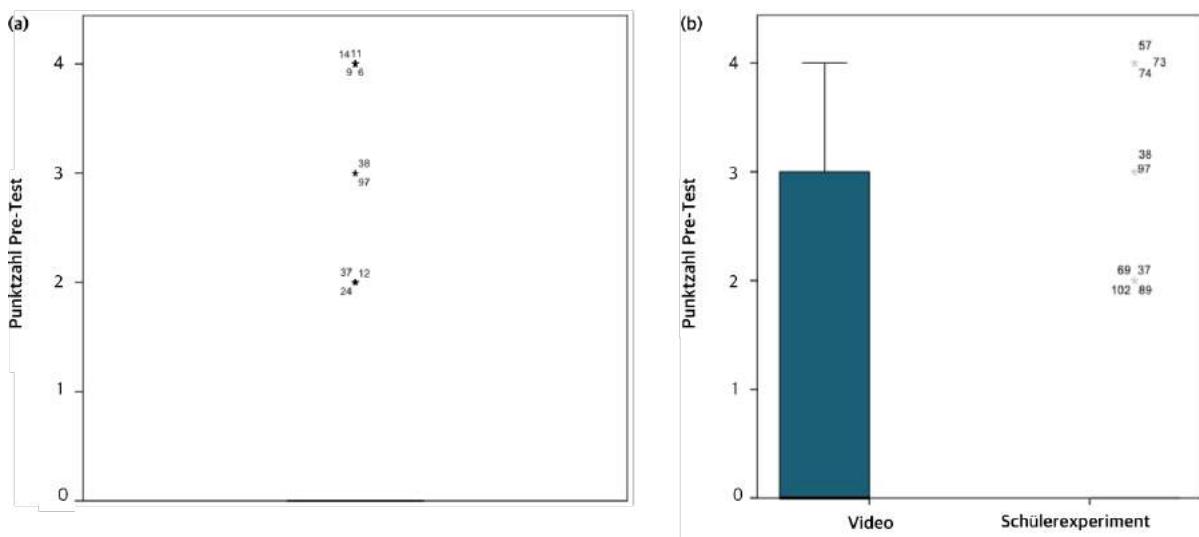


Abbildung 86: Verteilung der Punktzahl beim Pre-Test a) der Gesamtstichprobe und b) der Probandengruppen Video und Schüler\*innenexperiment.

Weiter wurde analysiert, welche konkreten Bedingungen basierend auf dem Explosionspentagon für das Auftreten einer Staubexplosion von den Schüler\*innen nach der Intervention als relevant genannt wurden und wie diese Ergebnisse mit den

Ergebnissen des Pre-Tests in Beziehung stehen. Auch bei der Betrachtung der einzelnen Bedingungen, die für das Eintreten einer Staubexplosion relevant sind, konnte der deskriptive Trend zur Steigerung der Gesamtleistung identifiziert werden. Denn auch in den meisten einzelnen Bedingungen erzielten die Schüler\*innen im Post-Test höhere Gesamtleistungen als im Pre-Test (vgl. Abbildung 87). Wenn Bedingungen für das Eintreten einer Staubexplosion von den Schüler\*innen genannt wurden, konnten analog zum Pre-Test auch im Post-Test am häufigsten die Bedingungen Stoff ( $n = 64$ ) und Zündquelle ( $n = 57$ ) identifiziert werden.

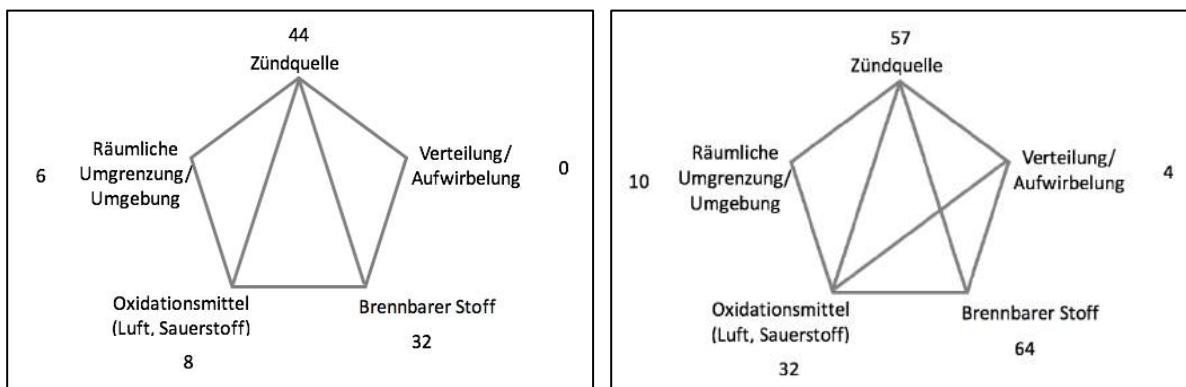


Abbildung 87: Von den Schüler\*innen genannte Bedingungen für eine Staubexplosion im Pre-Test (links) und im Post-Test (rechts) und deren absolute Häufigkeiten mit erkannten Beziehungen.

Die Anzahl der Nennungen zwischen dem Pre- und Post-Test steigt bei den Bedingung *Brennbarer Stoff* um das Doppelte an und bei den Bedingung *Zündquelle* um mehr als ein Viertel (*Brennbarer Stoff*: Pre = 32, Post = 64; *Zündquelle*: Pre = 44, Post = 57). Das *Oxidationsmittel* wird viermal so häufig von den Schüler\*innen genannt (Pre = 8, Post = 32). Die räumliche Umgrenzung/Umgebung wird im Post-Test von mehr als der Hälfte der Schüler\*innen, die es im Pre-Test genannt haben, genannt (Pre = 6, Post = 10). Die Bedingung *Verteilung/ Aufwirbelung* wird zum Post-Testzeitpunkt von den Schüler\*innen erstmals genannt (Pre = 0, Post = 4).

Zur Feststellung der Signifikanz dieser Unterschiede zwischen den beiden Testzeitpunkten wurden weitere statistische Analysen der Ergebnisse durchgeführt. Zunächst wurde mithilfe des Kolmogorov-Smirnov-Test geprüft, ob die Daten signifikant normalverteilt sind. Der Kolmogorov-Smirnov-Test offenbarte, dass die vorliegenden Daten des Pre- und Post-Tests signifikant nicht normalverteilt sind ( $p_{\text{Kolmogorov-Smirnov-Test}} = .000$ ;  $p < .001$ ) (vgl. Bühl, 2010, S. 368 f.). Entsprechend wurden für die weitere Analyse des non-parametrischen Vergleichs zweier abhängiger Stichproben zu den zwei unterschiedlichen Testzeitpunkten der Wilcoxon-Test eingesetzt, der dem t-Test bei normalverteilten Variablen äquivalent ist (vgl. Field, 2009; Bühl, 2010, S. 354 f.). Mit diesem Test kann getestet werden, ob es signifikante Änderungen der ordinalskalierten abhängigen Variable zwischen den beiden Stichproben gibt, die aus denselben Probanden bestehen. Die Stichproben sind abhängig.

Die Gesamtleistung bezogen auf die Gesamtstichprobe ist nach der Intervention signifikant höher (Median = 2) als davor (Median = 1; asymptotischer Wilcoxon-Test:  $z = -4.943$ ,  $p = .000$ ,  $n = 105$ ). Die Effektstärke nach Cohen (1988, S. 80) liegt bei  $r = .48$  und entspricht einem mittleren Effekt.

Gleichzeitig konnten auch bezogen auf die einzelnen Bedingungen für das Eintreten einer Staubexplosion zu den beiden Messzeitpunkten einige signifikante Unterschiede identifiziert werden (vgl. Tabelle 38). Da mit Hilfe des Wilcoxon-Tests die gerichtete Hypothese – Vom Pre- zum Posttestzeitpunkt kommt es zu einer Steigerung der Testleistung – überprüft werden sollte, musste das Signifikanzniveau durch zwei geteilt werden und 0.025 als neues Signifikanzniveau gelten.

Tabelle 38: Wilcoxon-Test Ergebnisse differenziert nach den einzelnen Bedingungen mit Effektstärken ( $N = 104$ ).

	Brennstoff	Oxidationsmittel	Umgebung	Zündquelle	Verteilung/Aufwirbelung
<b>Z</b>	-4.106	-4.382	-1.069	-1.852	-2.000
<b>Asymptotische Signifikanz (2-seitig)</b>	0.000	0.000	0.285	0.064	0.046
<b>Effektstärke r</b>	0.40	0.43	0.10	0.18	0.20

Die Gesamtleistung aller Schüler\*innen bezogen auf die einzelnen Bedingungen *Brennstoff* (Median<sub>Pre</sub> = 0; Median<sub>Post</sub> = 1) und *Oxidationsmittel* (Median<sub>Pre</sub> = 0; Median<sub>Post</sub> = 0) sind jeweils nach der Intervention signifikant höher als davor (asymptotischer Wilcoxon-Test:  $z_{\text{Brennstoff}} = -4.106$ ,  $z_{\text{Oxidationsmittel}} = -4.382$ ,  $p = .000$ ,  $n = 104$ ). Die Effektstärken nach Cohen (1988) liegen jeweils bei  $r > .40$  und entsprechen daher einem mittleren Effekt. Bei den Bedingungen *Umgebung*, *Zündquelle* und *Verteilung/Aufwirbelung* konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen dem Pre- und Post-Testzeitpunkt identifiziert werden ( $p > 0.046$ ).

Somit zeigt die deskriptive Ergebnisdarstellung insgesamt, dass die Gesamtleistungen der Schüler\*innen bezüglich der Bedingungen für eine Staubexplosion im Post-Test höher waren als im Pre-Test. Zudem konnte mithilfe des statistischen Wilcoxon-Tests gezeigt werden, dass diese Veränderung signifikant ist ( $p < .000$ ) und eine mittlere Effektstärke aufweist ( $r = .48$ ). Gleichzeitig konnte gezeigt werden, dass diese Effekte auch bei einigen der einzelnen Bedingungen einer Staubexplosion auftreten. Ein signifikanter Lernzuwachs konnte bei den Bedingungen *Brennstoff* und *Oxidationsmittel* festgestellt werden.

#### *Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse zum Wissenszuwachs*

Deskriptiv konnte gezeigt werden, dass die Gesamtleistungen bezüglich der einzelnen Bedingungen für eine Staubexplosion der Schüler\*innen in beiden

Probandengruppen im Post-Test höher war als im Pre-Test (vgl. Abbildung 85 mit Abbildung 86). Zudem konnte mithilfe des statistischen Wilcoxon-Tests bezogen auf die Gesamtleistung gezeigt werden, dass diese Veränderung signifikant ist (asymptotischer Wilcoxon-Test:  $z = -4.943$ ,  $p = .000$ ,  $n = 105$ ) und nach Cohen (1988, S. 80) eine mittlere Effektstärke aufweist ( $r = .48$ ).

Auch bei der Betrachtung der einzelnen Bedingungen, die für das Eintreten einer Staubexplosion relevant sind, konnte der deskriptive Trend der Steigerung der Gesamtleistung identifiziert werden, da die Schüler\*innen auch in den meisten einzelnen Bedingungen im Post-Test deskriptiv höhere Gesamtleistungen erzielten als im Pre-Test (vgl. Abbildung 87). Wenn Bedingungen für das Eintreten einer Staubexplosion von den Schüler\*innen genannt wurden, konnten analog zum Pre-Test auch im Post-Test am häufigsten die Bedingungen Brennbarer Stoff ( $n = 64$ ) und Zündquelle ( $n = 57$ ) identifiziert werden. Dabei stieg die Anzahl der Nennungen zwischen dem Pre- und Post-Test bei der Bedingung *Brennbarer Stoff* um das Doppelte und bei der Bedingung *Zündquelle* um mehr als ein Viertel deskriptiv an (Brennbarer Stoff: Pre = 32, Post = 64; Zündquelle: Pre = 44, Post = 57). Das *Oxidationsmittel* wurde viermal so häufig von den Schüler\*innen genannt (Pre = 8, Post = 32). Einige dieser deskriptiven Trends sind auch statistisch bedeutsam. Die Leistungen bezogen auf die Bedingungen *Brennbarer Stoff* (Median<sub>Pre</sub> = 0; Median<sub>Post</sub> = 1) und *Oxidationsmittel* (Median<sub>Pre</sub> = 0; Median<sub>Post</sub> = 0) sind jeweils nach der Intervention signifikant höher als zum Pre-Test Zeitpunkt (asymptotischer Wilcoxon-Test:  $z_{\text{Brennstoff}} = -4.106$ ,  $z_{\text{Oxidationsmittel}} = -4.382$ ,  $p = .000$ ,  $n = 104$ ). Die Effektstärken nach Cohen (1988) liegen jeweils bei  $r > .40$  und entsprechen daher einem mittleren Effekt.

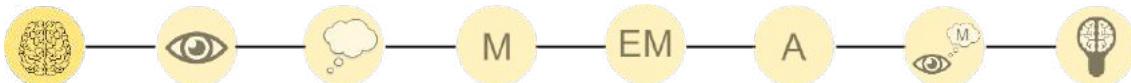
*Die in dieser Zwischenzusammenfassung dargestellten Ergebnisse werden auf S. 226 ff. diskutiert.*



## 6 Diskussion der vorliegenden Studie

### 6.1 Diskussion der Ergebnisse

#### Vorwissen



**Ziel I.** Identifizierung des Vorwissens zu den Bedingungen für das Auftreten einer Staubexplosion

**Forschungsfrage 1:** Welche fachlichen Voraussetzungen besitzen Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe im Bereich des Wissens über mögliche Bedingungen für eine Staubexplosion?

Die folgende Diskussion basiert auf den Ergebnissen, die auf S. 128 f. zusammengefasst sind.

Die Ergebnisse zu den fachlichen Voraussetzungen der Schüler\*innen im Bereich des Wissens über mögliche Bedingungen für eine Staubexplosion sind im Detail in Abschnitt 5.1 beschrieben.

Aufgrund der Untersuchungen von Steff (2015) sowie den Lehrplanvorgaben des MSW NRW (2008), welche dazu führten, dass bis zum Testzeitpunkt die Themen Verbrennungen und Explosionen nicht im Chemieunterricht der teilnehmenden Schulklassen behandelt wurden (vgl. Abschnitt 4.4), wurde erwartet, dass die Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe vor der Studie über ein **grundlegendes, alltagsgeprägtes Wissen** im Themengebiet der Verbrennungen verfügten. Das bedeutete konkret, dass der Begriff *Explosionen* aus dem Alltagskontext bekannt sein sollte, jedoch der Großteil der Schüler\*innen kein fundiertes Verständnis über die Bedingungen eines Brandes bzw. einer Staubexplosion und deren Zusammenhängen besitzt.

Die vorliegende Arbeit bestätigt diese Vermutung. Die Ergebnisse zeigen, dass vor der Intervention am häufigsten **sehr alltagsnahe, undifferenzierte Beispiele für das Eintreten einer Explosion** genannt werden (vgl. Tabelle 20, Zeile 2). Dies deckt sich mit den Erkenntnissen weiterer Studien, bei denen die Begriffe Verbrennungen und Explosionen im Zusammenhang mit Alltagsbeispielen zwar präsent waren, jedoch kein differenziertes, fachlich korrektes Wissen existierte (vgl. Barke, 2006; Brune, 2015).

Wenn in der vorliegenden Arbeit konkrete Bedingungen für eine Staubexplosion genannt wurden, dann wurden am häufigsten **zwei** auf dem Explosionspentagon

basierende konkrete Bedingungen für das Eintreten einer solchen Explosion genannt. Dabei wurden am häufigsten die Bedingungen **Brennbarer Stoff und Zündquelle** identifiziert (vgl. Tabelle 17).

Diese niedrige und erwartete Gesamtleistung wurde auch bei Steff (2015) nachgewiesen. Dabei konnten in den Schüler\*innenaussagen jedoch keine konkreten Aussagen zu den Bedingungen *Brennbares Stoffgemisch*, *Oberfläche/Zerteilungsgrad* und *Druckanstieg* im Zusammenhang mit dem Vorwissen identifiziert werden (vgl. ebd.). Es ist zu beachten, dass die Bedingung *Brennbares Stoffgemisch* bei Steff (2015) die beiden Komponenten, den Brennbaren Stoff und das Oxidationsmittel Sauerstoff, beinhaltete.

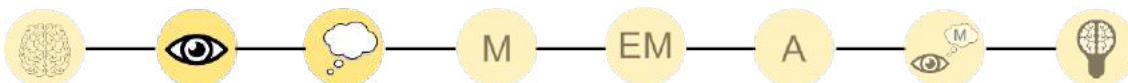
Im Gegensatz dazu wurden in der vorliegenden Arbeit diese beiden Komponenten einzeln betrachtet. Die Bedingung **Sauerstoff** wurde in der vorliegenden Arbeit insgesamt selten genannt. Die Erkenntnisse zur Nennung der Bedingung Sauerstoff im Zusammenhang mit Verbrennungen aus der Literatur sind ambivalent. In den Interviews der Studie von Haupt (1984), in denen es um das Thema Verbrennungen ging, wussten die Schüler\*innen bereits, dass Sauerstoff die wesentliche Rolle bei einem Verbrennungsvorgang spielt. Dabei wurde das Wort Luft verhältnismäßig wenig gebraucht, sondern direkt von Sauerstoff gesprochen (vgl. ebd.). Andere Studien zeigen jedoch, dass auch wenn teilweise die Schüler\*innen wissen, dass Sauerstoff für eine Verbrennung notwendig ist, Sauerstoff häufig nicht als Reaktionspartner in einer chemischen Reaktion angesehen wird (vgl. Petermann, Friedrich & Oetken, 2008; Steffensky, 2007). Solche gasförmigen Stoffe, wie beispielsweise Sauerstoff, sind insbesondere aufgrund ihrer Eigenschaften (geruchlos, farblos) über die Sinne nicht direkt wahrnehmbar. Dies kann zu Schwierigkeiten bei der Vorstellung von Sauerstoff bzw. Luft führen, was bereits für den schulischen Bereich beschrieben wurden (vgl. Collin, 2008; Stavy, 1990; Sére, 1986; Ross, 1991).

In Bezug auf die Einschätzung der **Explosivität** von zehn vorgegebenen Substanzen stuft die Mehrheit der Schüler\*innen **mehr als die Hälfte** der Stoffe **korrekt** ein. Dabei fällt insgesamt auf, dass **gasförmige Stoffe** (Ausnahme Wasserdampf) von der Mehrheit der Schüler\*innen als explosiv beurteilt wurden, während feste Stoffe (Ausnahme Schwarzpulver) hingegen als nicht explosiv einstuft wurden.

Dieses Ergebnis lässt sich damit erklären, dass mit gasförmigen Stoffen für einige Schüler\*innen nur *das Gas* assoziiert wird (vgl. Weerda, 1978; Collin, 2008). Diese Assoziation ist dabei häufig direkt mit Erdgas verbunden, sodass *dem Gas* vor allem gefährliche Eigenschaften (explosiv, brennbar und giftig) zugeordnet werden (vgl. Collin, 2008).

In Bezug auf **feste Stoffe** stellte Steff (2015) die Vermutung auf, dass gerade feste und flüssige Substanzen wie u.a. Weizenmehl und Toner aufgrund des Prinzips der Fasslichkeit (auch als Prinzip der Schülerangemessenheit bezeichnet) haptisch direkt erfahrbar sind und somit besser zugeordnet werden können (vgl. Kakoschke, 2018). Diesem Prinzip zu Folge muss „der Unterrichtsstoff für die einzelne Schülerin oder den [einzelnen] Schüler mit angemessener Anstrengung unter Einsatz seiner Fähigkeiten erfassbar sein“ (ebd.). Jedoch wurden in der vorliegenden Arbeit gerade die für die Schüler\*innen haptisch erfahrbaren und bekannten Substanzen Mehlstaub und Betonstaub nach ihrer Explosivität nicht korrekt eingestuft. Diese Einstufung kann kontextabhängig sein und könnte auf den Alltagserfahrungen basieren (vgl. Pfundt, 1981), was die unterschiedlichen Ergebnisse erklären würde. Zum Beispiel sind die Substanzen Mehl und Beton aus dem Alltag aus nicht explosiven Kontexten bekannt – Mehl im Kontext Backen und Beton in einer groben Form bei Gebäuden (vgl. Hank, 2018).

### *Informationsaufnahmeprozess und Verarbeitung*



**Ziel II.** Identifizierung der Informationsaufnahmeprozesse beim Betrachten eines Modellexperiments zur Staubexplosion und der Ergebnisse einer ersten Verarbeitung dieser Informationen

**Forschungsfrage 2:** Inwiefern nehmen Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe die relevanten Bedingungen des Prozesses der Staubexplosion während des Betrachtens eines Modellexperiments zur Staubexplosion in der Low Cost-Hartmann-Apparatur wahr?

*Die folgende Diskussion basiert auf den Ergebnissen, die auf S. 137f., 139, 145 ff. & 148 f. zusammengefasst sind.*

Die Ergebnisse zur Wahrnehmung, d.h. der Informationsaufnahme und -verarbeitung des Modellexperiments zur Staubexplosion in der Low Cost-Hartmann-Apparatur der Schüler\*innen sind im Detail in Abschnitt 5.2 beschrieben.

Aus der Literatur ist bekannt, dass eine allgemeine Tendenz besteht, in die Mitte eines Bildes zu blicken. Dabei ist diese Tendenz unabhängig von der Salienz des jeweiligen Bereiches (vgl. Tatler, 2007; Hloucal, 2010). Diese Tendenz konnte auch bei der Wahrnehmung des Modellexperiments in der vorliegenden Studie festgestellt werden. So wird in allen drei Sequenzen (Versuchsaufbau, Vorversuch und Modellexperiment) des Videos mit einer Betrachtung der **Mitte des Bildschirms**, in dem AOI\_2, der mittlere Bereich des Plexiglasrohrs, liegt, gestartet (vgl. Zeit bis zur

ersten Fixation in Tabelle 24, Abbildung 42 und Abbildung 45). Unter Umständen kann diese festgestellte Tendenz ein Artefakt sein, da in der vorliegenden Arbeit vor einer jeden Videosequenz ein schriftlicher Hinweis, welche Videosequenz (Beschrifteter Versuchsaufbau, Vorversuch, Modellexperiment) im Anschluss folgt, in der Mitte des Bildschirms zentral präsentiert wurde.

### Sequenz I: Versuchsaufbau

Insgesamt nehmen die Schüler\*innen die für die Wahrnehmung des reinen Explosionsprozesses **relevanten sowie irrelevanten Merkmale** des beschrifteten Versuchsaufbaus wahr, d.h. sie werden aufgenommen und verarbeitet. So waren alle Schüler\*innen in der Lage, Materialien des *Versuchsaufbaus* zu nennen (vgl. Abbildung 48).

Die erste Betrachtung des *Versuchsaufbaus* erfolgt in der vorliegenden Studie von **rechts nach links** (Tabelle 24). Dieses Ergebnis verhält sich entgegen der Vermutung, dass aufgrund der vorherrschenden abendländischen Kulturtechniken eine Betrachtung analog zur Leserichtung von links nach rechts erfolgen würde (vgl. Bader & Lühken, 2018). Dabei wird dem rechten Bereich des Bildschirms, in dem sich die AOI um die Luftpumpe befindet, von den Schüler\*innen insgesamt mehr Aufmerksamkeit zugewiesen (Fixationsdauer, vgl. Abbildung 39). Dies ermöglicht in diesem Bereich einen erhöhten Grad der Informationsaufnahme (vgl. Geise, 2011; Nehring & Busch, 2017).

Diese Aufmerksamkeitsallokation im rechten Bildschirmbereich basiert vermutlich darauf, dass in diesem Bereich bei der Betrachtung des beschrifteten Versuchsaufbaus einzelne Beschriftungen verortet waren (vgl. Abbildung 88).

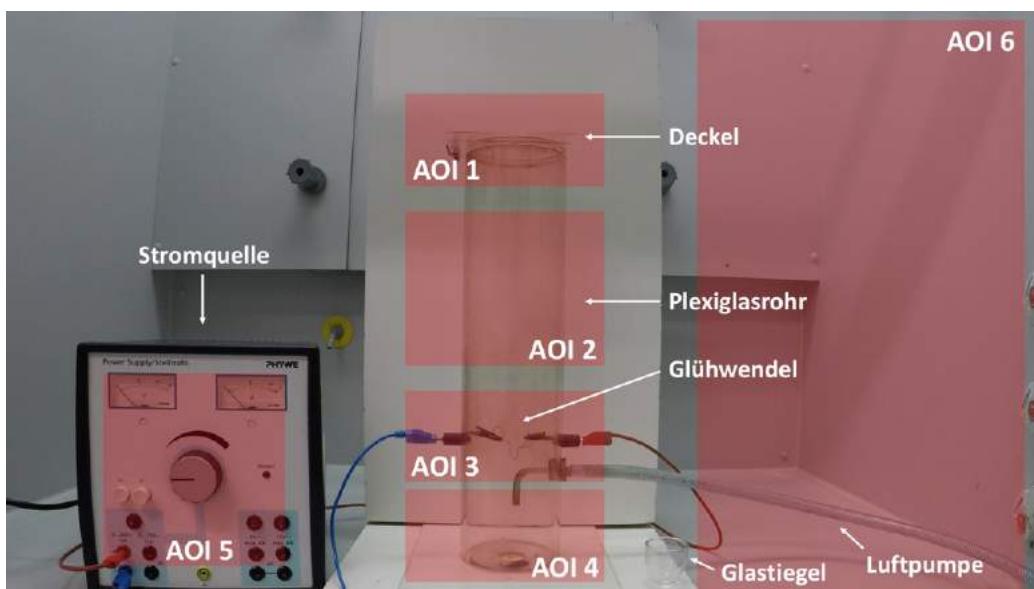


Abbildung 88: Areas of Interest zum Zeitpunkt der Präsentation des beschrifteten Versuchsaufbaus im Video.

Diese Beschriftungen weisen aufgrund ihrer farblichen Hervorhebung ein hohes Aktivierungspotential auf, sodass eine erste Betrachtung des Versuchsaufbaus von rechts nach links stattgefunden hat.

Diese Vermutung deckt sich mit den Erkenntnissen von Gnoyke (1997). Sie konnte eine höhere Fixationsdauer auf einzelnen chemischen Begriffen in Bildern mit chemischen Inhalten – vor allem bei Nichtchemikern – nachweisen. Besonders unbekannte Inhalte werden nach Gnoyke länger betrachtet. In der vorliegenden Studie sind für die Schüler\*innen im Zusammenhang mit chemischen Experimenten die Begriffe Plexiglasrohr, Glühwendel und Glastiegel unbekannt. Gleichzeitig könnte eine hohe Anzahl an Fixationen jedoch auch bedeuten, dass die Begriffe und Objekte während der Betrachtung des Versuchsaufbaus direkt zugeordnet werden. Dies wurde in der Studie von Gnoyke von den Chemikern gemacht, wohingegen viele Nichtchemiker die sprachlichen und grafischen Anteile getrennt wahrgenommen haben (vgl. ebd.).

### Sequenz II: Vorversuch

Im Vorversuch wurde demonstriert, dass beim Durchführen des Modellexperiments ohne Substanz der von der Luftpumpe erzeugte Luftstoß nicht zum Öffnen des Deckels führt (vgl. Abschnitt 4.3.2.2). Während des Betrachtens des Vorversuchs liegt die Aufmerksamkeit der Schüler\*innen im Mittel primär auf der für einen Explosionsprozess relevanten Glühwendel (vgl. Abbildung 40, Abbildung 41 & Abbildung 42). Auch Nehring und Busch (2017) konnten bei chemischen Demonstrationen, die wie in der vorliegenden Arbeit auch der Anwendung der Gestaltgesetze folgten, eine erhöhte Aufmerksamkeit (Höhere Fixationsanzahl und -dauer) auf den relevanten Materialien und Geräten feststellen. Dabei haben sie im Zusammenhang mit dem **Prinzip der Einfachheit** herausgefunden, dass Schüler\*innen die relevanten Materialien und Geräte leichter fokussieren, wenn keine weiteren Geräte und Materialien (wie z.B. Stative) die Wahrnehmung beeinflussten. Jedoch hat dies lediglich eine kleine Effektstärke aufweisen können. Auch andere Studien konnten zeigen, dass eine Vielzahl irrelevanter Materialien die Wahrnehmung schwächt (vgl. Bader & Lühken, 2018). Es ist jedoch zu beachten, dass die Studien unter dem Einsatz von **statischen** Bildern und nicht, wie in der vorliegenden Arbeit, an **dynamischen** Prozessen mit eingesetzten Chemikalien (bei beispielsweise Modellexperimenten) durchgeführt wurden (vgl. Nehring & Busch, 2017).

Neben den relevanten Areas of Interest wurden in dem vorgegebenen Modellexperiment in der LC-HA von den Schüler\*innen auch **irrelevante** Areas of Interest betrachtet. Insbesondere wurde die Stromquelle im Vergleich zu den anderen Bereichen häufiger und länger (abgesehen von der Glühwendel und der Mitte) fixiert (vgl.

Abbildung 40 & Abbildung 41). Ein möglicher Grund kann dabei sein, dass die Stromquelle und die Luftpumpe zwar irrelevant für die Wahrnehmung des reinen Explosionsprozesses mit seinen Auswirkungen sind, für die Durchführung des Prozesses jedoch sehr relevant sind.

Die Bereiche um die Luftpumpe und den Deckel des Plexiglasrohres werden von den Schüler\*innen zuletzt und am wenigsten betrachtet (vgl. Abbildung 42). Dabei wird jedoch die relevante Beobachtung der fehlenden Öffnung des Deckels von mehr als jedem\*r dritten Schüler\*in korrekt verarbeitet. Diese Beobachtung kann mit der Konstitution des Experiments erklärt werden, da die Luftpumpe und der Deckel im experimentellen Prozess auch erst gegen Ende der Videosequenz relevant werden. Bezuglich der geringen Betrachtung der Luftpumpe wird die vorherige Vermutung, dass diese in der ersten Sequenz aufgrund der Beschriftung stärker betrachtet wurde, weiter erhärtet.

### Sequenz III: Modellexperiment

Beim Betrachten des **Modellexperiments** liegt die Aufmerksamkeit hauptsächlich auf den beiden für den zeitlichen Verlauf des Explosionsprozesses relevanten Bereichen **Glühwendel und Glastiegel** in der Mitte des präsentierten Bildausschnittes (vgl. Abbildung 43, Abbildung 44 & Abbildung 45). Das zeigt, dass diese Bereiche ein hohes Aktivierungspotential aufweisen, sodass vermutlich ein höherer Grad der Informationsaufnahme möglich ist. Eine solche erhöhte Aufmerksamkeit auf relevante Objekte in der Mitte einer Abbildung konnten auch Nehring & Busch (2017) nachweisen. Sie haben in ihrer Studie für Materialien und Geräte in der Mitte einer Abbildung mehrere Fixationen und eine längere Gesamtfixationsdauer identifiziert als für die Materialien und Geräte, die am Rand der Abbildung der Demonstration standen.

Durch den Fokus der Aufmerksamkeit auf den Bereichen um den Glastiegel und die Glühwendel können folglich die relevanten phänomenologisch wahrnehmbaren Beobachtungen **Stoff als reagierende Substanz, Aufglühen bzw. Aufleuchten der Glühwendel und Aufwirbelung** gemacht werden (vgl. Tabelle 26). Das führte dazu, dass die Eigenschaften des Stoffes (Brennbarkeit und hoher Zerteilungsgrad) in der Auswertung besser erklärt werden konnten. Zusätzlich konnten die Schüler\*innen, die den Bereich um die Glühwendel zum ersten Mal relativ früh fokussieren, die **Entzündung** korrekt verarbeiten.

Im Zusammenhang mit dem experimentellen Prozess kommt es beim Modellexperiment induziert durch die Verbrennungsreaktion des aufgewirbelten brennbaren Stoff-Luft-Gemisches mit der Zündquelle zu einem Überdruck, der den Deckel öffnet (vgl. Steff, 2015). Steff (2015) äußerte im Zusammenhang mit diesem speziellen

Modellexperiment zur Staubexplosion die Vermutung, dass die Öffnung des Klappdeckels aufgrund der gleichzeitig stattfindenden Flammenausbreitung, welche einen prägnanteren visuellen Effekt darstellt, möglicherweise nicht wahrgenommen werden kann.

Diese Annahme konnte innerhalb dieser Studie mit konkreten Daten belegt werden. So blieb der Fokus der Schüler\*innen beim Entzünden sowie Abklingen der Flamme weiterhin auf der Höhe der Glühwendel und des Glastiegels, das eine korrekte Verarbeitung der Verbrennungsreaktion, welche sich phänomenologisch in der Feuererscheinung zeigt, ermöglichte (vgl. Abbildung 47). Erst nach dem Abklingen der Flamme blickten einzelne Schüler\*innen in den mittleren und oberen Bereich des Plexiglasrohres. Somit konnte die Ausbreitung der Flamme seltener korrekt beobachtet und gleichzeitig seltener korrekt verarbeitet werden, da dazu Fixationen im mittleren Bereich des Plexiglasrohres notwendig gewesen wären. Zusätzlich wurde die Öffnung des Deckels weniger häufig beobachtet, korrekt verarbeitet und ausgewertet, je länger der Bereich mit dem Glastiegel fixiert wurde (vgl. Tabelle 26). Insgesamt wurde in den Bereich des Deckels des Plexiglasrohres im Mittel von den Schüler\*innen 0-mal geblickt (Median = 0; vgl. Abbildung 43). Wenn der Bereich des Deckels betrachtet wird, dann zum ersten Mal nach 30 s (vgl. Abbildung 45).

Ein Grund für diese versetze Blickbewegung liegt vermutlich auch in der Schnelligkeit des Prozesses, die schon bei Steff (2015) als möglicher Grund für die Wahrnehmungslimitation gesehen wurde. Aufgrund der Schnelligkeit findet der Prozess in einem engen Zeitfenster statt. Dies kann dazu führen, dass ein Schweifen des Blickes in den Bereich des Deckels durch das Festhalten des Blickes auf den Bereich mit dem Glastiegel zeitlich nicht möglich zu sein scheint. Diese Vermutung unterstützen auch Ergebnisse aus dem schulischen Kontext naturwissenschaftlicher Experimente von Hilfert-Rüppel und Sieves (2017), die gezeigt haben, dass die Wahrnehmung schneller Prozesse insgesamt schwierig ist.

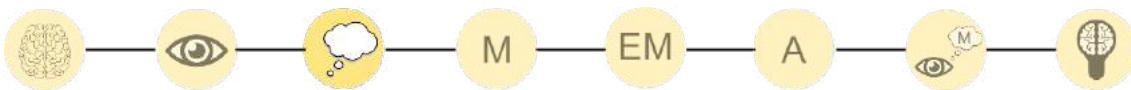
Wie auch bei Nehring und Busch (2017) wurden in der vorliegenden Studie neben den relevanten Areas of Interest auch die für die Wahrnehmung des reinen experimentellen Phänomens **irrelevanten** Areas of Interest betrachtet. Im Vergleich zu den beiden relevanten Areas of Interest, der Glühwendel und dem Glastiegel, jedoch weniger häufig und weniger lang (vgl. Abbildung 43 & Abbildung 44). Diese Betrachtung der relevanten und irrelevanten Bereiche kann zum einen in der Durchführung des Modellexperiments begründet sein, für die diese Bereiche wichtige Durchführungsschritte beinhalten. Beispielsweise führt das Erhöhen der Spannung an der Spannungsquelle zum Aufglühen der Glühwendel. Zum anderen können die irrelevanten Bereiche Informationen bereitstellen, die Assoziationen

## 6 Diskussion der vorliegenden Studie

---

hervorrufen. Beispielsweise können im Zusammenhang mit der Stromquelle die Assoziationen *Strom leitet* bzw. *Strom setzt Wärme frei* assoziiert werden (vgl. Barke, 2016). Dies könnte die Ausbildung eines komplexeren und vernetzteren mentalen Modells fördern. Zusätzlich wurden in der vorliegenden Studie im Vergleich zu Nehring und Busch (2017) Substanzen aktiv eingesetzt und der genaue experimentelle Prozess mit allen zusätzlich auftretenden Zustandsänderungen präsentiert, welche die Wahrnehmung zusätzlich beeinflussen können.

Obwohl die Aufwirbelung von den Schüler\*innen gut wahrgenommen wurde, werden im Zusammenhang mit dem Vorliegen von **Sauerstoff als Reaktionspartner** und der **Funktion der Luftpumpe zur Aufwirbelung** im Versuchsprotokoll von 72,2 % (bzgl. Sauerstoff) bzw. 75 % (bzgl. Luftpumpe) keine erschließbaren Aussagen getroffen. Auch das Item zur Entstehung des Staub-Luft-Gemischs wurde seltener korrekt beantwortet ( $M = 0,33$ ,  $SD = 0,32$ ). Dies ist konsistent mit den Beobachtungen, dass die Schüler\*innen im Alter von 14-15 Jahren häufig Sauerstoff nicht als Reaktionspartner innerhalb eines Verbrennungsprozesses ansehen, da dieser für sie unsichtbar ist (vgl. Stavy, 1990; Sére, 1986; Petermann, Friedrich & Oetken, 2008; Steffensky, 2021; Ross, 1991; Prieto, Watson & Dillon, 1992; Dunker, 2010). Vielmehr benötigen die Schüler\*innen einen wahrnehmbaren Beweis für die Existenz des für sie unsichtbaren Gases Sauerstoff (vgl. Collin, 2008). Vermutlich reichen die Assoziation einer Luftpumpe (Luft wird bei erhöhtem Druck stoßweise abgegeben) sowie die Auswirkung durch das Herunterdrücken des Luftpumpenkolbens in dem konkreten Modellexperiment (Aufwirbelung des Pulvers) nicht aus, um diesen Beweis zu liefern und den Sauerstoff als relevant an zu erkennen und korrekt zu verarbeiten.



**Forschungsfrage 2.1:** Inwiefern gibt es Unterschiede bei der Beschreibung der Beobachtungen und der Auswertung (Informationsverarbeitung) des Modellexperiments zur Staubexplosion in der Low Cost-Hartmann-Apparatur abhängig von der Präsentationsform?

Die folgende Diskussion basiert auf den Ergebnissen, die auf S. 151 f. zusammengefasst sind.

Die Ergebnisse zur Abhängigkeit der Informationsaufnahme des Modellexperiments zur Staubexplosion in der Low Cost-Hartmann-Apparatur der Schüler\*innen von der Präsentationsform (Video und Schüler\*innenexperiment) sind im Detail in Abschnitt 5.2 beschrieben.

In den Versuchsprotokollen zum selbstständig durchgeführten oder betrachteten Modellexperiment in der vorliegenden Studie haben die Schüler\*innen der **Video-Gruppe eine signifikant höhere Punktzahl** bei der Beschreibung ihrer **Beobachtungen** erhalten als die Schüler\*innenexperimente-Gruppe ( $U = 345.500$ ,  $z = -6.152$ ,  $p = .000$ ;  $M_v = 6$ ;  $M_{SE} = 3$ ) (vgl. Abbildung 52 (a)). Dabei weist dieser Unterschied nach Cohen (1988) einen starken Effekt auf ( $r = .60$ ).

Diese Ergebnisse stehen der für den naturwissenschaftlichen Unterricht hohen Bedeutung des Schüler\*innenexperiments zur Erkenntnisgewinnung auf den ersten Blick kontrovers gegenüber. Dem Schüler\*innenexperiment wird als wichtige Methode ein hohes Potential für einen Wissenszuwachs zugeschrieben (vgl. Bader, Lühken & Sommer, 2018; Wirth, Thillmann, Künsting, Fischer & Leutner, 2008). Jedoch wird die generelle Annahme eines hohen Potentials für Wissenszuwachs, den die Schüler\*innen durch das selbstständige Experimentieren erreichen, auch kontrovers diskutiert (vgl. Toczkowski & Ralle, 2017; Klos et al., 2008). So wurde in anderen Studien festgestellt, dass die Qualität und Quantität des Wissens auf Basis durchgeführter Schüler\*innenexperimente häufig geringer ist als es erwartet wurde (vgl. Wirth, Thillmann, Künsting, Fischer & Leutner, 2008; Hofstein & Lunetta, 1982; Hucke & Fischer, 2002).

Wenn es nur um die reine Wahrnehmung des experimentellen Prozesses geht, scheint es bei schnellen Experimenten, wie beispielsweise der Staubexplosion, sinnvoller zu sein, das Experiment demonstriert – als **Video oder als reales Experiment** – zu betrachten. Dies lässt sich mit der begrenzten Arbeitsgedächtniskapazität erklären. Denn die gleichzeitige Durchführung des Schüler\*innenexperiments und die Notwendigkeit einer zeitgleichen Wahrnehmung könnten das Arbeitsgedächtnis stärker überlasten als die reine Wahrnehmung einer Demonstration (vgl. Wirth, 2018).

Dennoch bleiben Schüler\*innenexperimente weiterhin sehr relevant für den Chemieunterricht. Im Gegensatz zu Videos schulen Experimente vor allem die Kompetenzen der fachspezifischen psychomotorischen Fertigkeiten und Fähigkeiten sowie die naturwissenschaftlichen Denk- und Arbeitsweisen (vgl. Sommer, 2008; Bader, Lühken & Sommer, 2018).

Somit sind die Ergebnisse in der vorliegenden Arbeit nicht als kontrovers zu werten, da der Fokus der Studie auf der korrekten Aufnahme und Verarbeitung von Informationen zu dem chemischen Prozess lag. Die Ergebnisse verdeutlichen jedoch, dass, abhängig von der Intention eines Experiments, Videoaufnahmen im Vergleich zu selbstständig durchgeführten Schüler\*innenexperimenten eine verbesserte

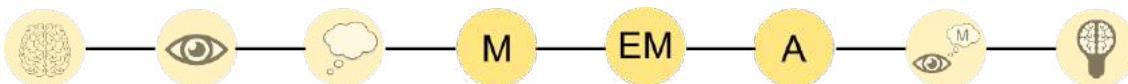
## 6 Diskussion der vorliegenden Studie

---

Aufnahme und Verarbeitung der relevanten Informationen eines chemischen Prozesses ermöglichen können.

Aufgrund der Ergebnisse im Zusammenhang mit den protokollierten Beobachtungen wurde auch in der Auswertung ein Unterschied zwischen den beiden Probandengruppe erwartet. Dennoch konnte bei der **Auswertung kein deskriptiver und signifikanter Unterschied** identifiziert werden (MedianAuswertung = 2,00 bei der V-Gruppe und der SE-Gruppe;  $U = 1048.000$ ,  $z = -1.122$ ,  $p = .262$ ) (vgl. Abbildung 52 (b)). Einerseits kann ein möglicher Grund für diese Diskrepanz darin liegen, dass die Schüler\*innen, die das Modellexperiment selbstständig durchgeführt haben, alle relevanten Beobachtungen, auf denen ihr entwickeltes korrektes und detaillierteres mental Modell des Modellexperiments basiert, machen konnten, aber in ihrem Versuchsprotokoll nicht notiert haben. Andererseits kann der fehlende Unterschied im Zusammenhang mit der Auswertung auch daran liegen, dass die Schüler\*innen der Video-Gruppe nicht in der Lage waren, ihre Beobachtungen detailliert genug zu erklären. Dies passt zu den Erkenntnissen, dass die Anfertigung eines Versuchsprotokolls durch das notwendige chemische Wissen zur Erklärung von Beobachtungen u.a. auch von den Sprach- und Schreibkompetenzen der Schüler\*innen abhängig ist (vgl. Bader, Lühken & Sommer, 2018).

### *Denken in Analogien*



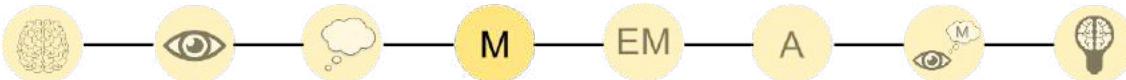
**Ziel III.** Identifizierung von Denkmustern beim Umgang mit Modellexperimenten während des Denkens in Analogien

Wie bereits in Abschnitt 2.1.3 beschrieben liegen bisher nur wenige Studien über das konkrete Vorgehen von Lernenden beim Umgang mit Analogien im Lehr-Lern-Kontext vor (vgl. Dudeck, 1997; Kleine, 1998; Sumfleth & Kleine, 1999; Wilbers, 2000; Paatz, 2002; Klein, Piacente-Cimini & Williams, 2007). Im Zusammenhang mit Modellexperimenten als Analogiebereich gibt es jedoch bereits Erkenntnisse zum Einfluss von Oberflächenmerkmalen verschiedener Modellsubstanzen auf den spontanen Abruf einer Analogie von Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe (vgl. Steff, 2015; Sommer et al., 2019). In der vorliegenden Studie werden diese Erkenntnisse um weitere Befunde zur zeitlichen Abfolge der eigenständigen Denkwege auf der Makro-, Meso- und Mikroebene beim Erkennen und Nutzen von Analogien erweitert (vgl. Sommer et al., 2019).

Dabei kann auf Basis der in der vorliegenden Arbeit erhobenen Denkwege gezeigt werden, dass durch die Verwendung einer Modellsubstanz mit einer geringen Ähnlichkeit in den Oberflächenmerkmalen zur Originalsubstanz das *Analogical*

*mapping* entgegen anderer Vermutungen von Steff (2015) trotzdem möglich ist und von den Schüler\*innen eigenständig eine Analogierelation definiert werden kann (vgl. Abschnitt 5.3). Ob oberflächliche Übereinstimmungen zwischen einem Ziel- und Analogiebereich einen Transfer erleichtern, wie sie bei Gentner (1985) nachgewiesen wurden, sollte in weiterführenden Studien untersucht werden.

### Mapping



**Forschungsfrage 3:** Welche Denkmuster können während des Denkens in Analogien bei dem Vergleich von Modellexperiment und Original auf der Makro-, Meso- und Mikroebene von Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe an dem chemischen Gegenstand Staubexplosion identifiziert werden?

Die folgende Diskussion basiert auf den Ergebnissen, die auf S. 163 f., 166, 169 f. & 175 f. zusammengefasst sind.

Die Ergebnisse zu den Denkmustern der Schüler\*innen bei dem Vergleich des Modellexperiments zur Staubexplosion in der Low Cost-Hartmann-Apparatur mit dem Original, der Mehlstaubexplosion in der Bremer Rolandmühle, sind im Detail in Abschnitt 5.3.1 beschrieben.

Die Ergebnisse zeigen, dass nahezu alle Schüler\*innen eigenständig analoge relevante Merkmale zwischen Modellexperiment und Original während des Mappings in ihren Denkwegen artikulierten. Dabei nutzen sie zwar Verknüpfungen von **einer bis fünf Analogieoperationen** (Makroebene), jedoch lag der Schwerpunkt auf einer ( $nv = 5, 17,9\%$ ;  $nse = 18, 36\%$ ) bzw. zwei Analogieoperationen ( $nv = 11, 39,3\%$ ;  $nse = 16, 32\%$ , vgl. Abbildung 56 – Abbildung 64).

Wurde *eine Analogieoperation* oder *zwei beschreibende Analogieoperationen* innerhalb der Denkwege genutzt, so wurde unabhängig von der Präsentationsform nahezu ausschließlich die **Beschreibung des Originals** als Zielbereich von den Schüler\*innen thematisiert ( $nv = 10, 90,9\%$ ;  $nse = 18, 85,7\%$ , vgl. Abbildung 56 & Abbildung 57). Dieser Befund unterstützt die im Teaching-with-Analogies Modell geforderte einführende Thematisierung des Zielbereichskonzeptes (vgl. Duit, 1991; Glynn et al., 1995). Denn auch die Schüler\*innen begannen ihre Denkwege eigenständig mit der Reflexion des Zielbereichskonzeptes. Gleichzeitig unterscheidet sich diese Erkenntnis grundlegend von den Erkenntnissen von Kleine (1998), bei der der

Schwerpunkt der Lernenden<sup>21</sup> auf Äußerungen im Analogiebereich lag. Dieser Unterschied könnte auf dem unterschiedlichen Grad der inhaltlichen und sprachlichen Ähnlichkeit des Analogiebereiches zum Zielbereich in den beiden Studien basieren. Im Gegensatz zur großen sprachlichen Ähnlichkeit zwischen den Begriffen, die das Modellexperiment und Original in der vorliegenden Arbeit charakterisieren, welche in der Genese des Modellexperiments liegt, wies der literarische Analogiebereich *Der Ball der einsamen Herzen* (Alltagssprache) zum chemischen Gleichgewicht (Fachsprache) bei Kleine (1998) eine ganz andere Sprache auf.

Bei den Denkwegen, in denen *mehr als eine Analogieoperation* genutzt wurde, fanden hauptsächlich **2-3 Änderungen** der Analogieoperationen statt. Dabei konnte häufig ein Wechsel zwischen **Beschreibungen und abbildenden Beschreibungen** identifiziert werden ( $nv = 16, 69,6\%$ ;  $nse = 28, 87,5\%$ , vgl. Abbildung 58 – Abbildung 64). Bei der Verknüpfung dieser Analogieoperationen nahm die **Präsenz des Modellexperiments** in den Denkwegen zu. Dabei wurden Erkenntnisse nicht ausschließlich vom Modellexperiment auf das Original abgebildet, sondern auch von dem Original auf das Modellexperiment übertragen. Somit kann die Abbildung als **symmetrischer Schritt** angesehen werden. Dieser Befund bestätigt die Erkenntnisse von verschiedenen Autoren, bei denen beide Bereiche als „potentielle Quellen und Empfänger von Informationen“ dienen können (Kurtz et al., 2001, S. 418; vgl. Kleine, 1998; Wilbers, 2000). Das ist vor allem der Fall, wenn zwei teilweise verstandene Situationen miteinander in Beziehung gesetzt werden.

Die Angabe des Bereiches, von dem das Mapping ausgeht, kann als Erweiterung der Kategorien von Klein, Piacente-Cimini und Williams (2007) angesehen werden. In dieser Studie wurde ausschließlich die abbildende Beschreibung zwischen Analogie- und Zielbereich kodiert, jedoch nicht die Richtung, von der die Abbildung ausgeht. Im Gegensatz zu Klein, Piacente-Cimini und Williams kann in den vorliegenden Daten jedoch kein Wechsel zwischen dem Abbilden von Beschreibungen und dem Abbilden von kausalen Erklärungen zwischen Modellexperiment und Original identifiziert werden. Es wurden ausschließlich Beschreibungen nachgewiesen. Dies kann einerseits auf dem unterschiedlichen Grad an methodischem und fachbereichsspezifischem Wissen sowie andererseits dem unterschiedlichen Untersuchungsgegenstand basieren. Der unterschiedliche Grad an methodischem und fachbereichsspezifischem Wissen, kann sich auf das Alter der Probanden zurückführen lassen. An der Studie von Klein, Piacente-Cimini und Williams haben Studierende ( $M(Alter) = 22.97$ ) teilgenommen, die im Durchschnitt zehn Jahre älter

---

<sup>21</sup>Bei den Lernenden handelt es sich um Studierende, die nicht näher charakterisiert werden (vgl. Kleine, 1998).

waren als die Schüler\*innen ( $M(\text{Alter}) = 12.60$ ) der vorliegenden Studie. Dabei sind die Studien zum Einfluss des methodischen und fachbereichsspezifischen Wissen auf das Denken in Analogien indessen ambivalent. Einerseits wird davon ausgegangen, dass das Denken in Analogien eine elaborierte Fähigkeit ist, die ab einem Alter von 11-12 Jahr vorliegt (vgl. Schwedes, 1996a). Gleichzeitig aktiviert das Denken in Analogien aber bereits existierendes, relevantes fachbereichsspezifisches Faktenwissen, das für das Identifizieren und Nutzen von Analogien unterstützend eingesetzt werden kann (vgl. Paatz, 2002; Brown & Kane, 1988). Aufgrund ihrer abgeschlossenen Schullaufbahn können die Studierenden über dieses fachbereichsspezifische Faktenwissen in höherem Maße verfügen als die Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe. Andererseits könnte der Unterschied aber auch auf der Konzeption der Demonstrationen basieren. Bei der Konzeption wurden nämlich kausale Zusammenhänge stärker in den Fokus der Intervention gestellt (vgl. Klein, Piacente-Cimini & Williams, 2007). Dies kann dazu geführt haben, dass diese kausalen Zusammenhänge von den Studierenden stärker thematisiert wurden.

Die erhobenen Denkwege der Schüler\*innen **endeten** hauptsächlich mit dem **Original**. Dieser Befund kann durch die Aufgabenstellung geleitet sein, welche den Schüler\*innen implizit deutlich machte, dass das Modellexperiment zur Erklärung des Originals genutzt werden sollte (vgl. Abbildung 23).

Zusätzlich zu den Analogieoperationen wurden auch die Analogiearten (Mesoebene) identifiziert, welche die Schüler\*innen während des Mappings genutzt haben. Diese wurden in bisherigen Studien nicht explizit dargestellt (vgl. u.a. Klein, Piacente-Cimini & Williams, 2007).

Aufgrund der Erkenntnisse der Literatur, dass besonders Menschen mit wenig Vorkenntnissen oberflächliche Attribute als Ankerpunkte nutzen und darüber zum Kern der komplexen Beziehungsstruktur innerhalb eines Bereiches hervordringen (vgl. Bearman, Ball & Ormerod, 2007; Kretz & Krawczyk, 2014), wurde erwartet, dass auch die Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe in der vorliegenden Studie zu Beginn ihrer Denkprozesse Merkmale auf der oberflächlichen Attributebene artikulieren, da sie erst kürzlich mit dem Chemieunterricht gestartet sind. Diese Erwartung konnte jedoch in der vorliegenden Arbeit für Modellexperimente nicht bestätigt werden. Insgesamt nennen nur sehr wenige Schüler\*innen **oberflächliche Attribute**. Wurden oberflächliche Attribute genannt, so handelte es sich meistens um die farbliche Bezeichnung des Stoffes. Dieser wurde dabei meist zur Unterscheidung zwischen dem eingesetzten Farbpulver und dem des Originals zugrundeliegenden Weizenmehls genutzt.

Insgesamt begannen die Denkwege unabhängig von der Präsentationsform hauptsächlich mit der Nennung eines **Objektes** (nv = 13, 41,9 %; nSE = 23, 46,0 %); vgl. Abbildung 65 - Abbildung 68). Diese Nennung der Objekte wurde häufig weitergeführt, sodass eine **Kette von genannten Objekten** entstand (vgl. Abbildung 65, oberster Arm). Diese Erkenntnisse decken sich mit den von Kleine (1998) identifizierten Ergebnissen im Zusammenhang mit Analogiegeschichten zur Erklärung eines chemischen Phänomens. Sie hat herausgefunden, dass Studierende beim Nutzen von Analogien mit Objektzuordnungen (Edukte und Produkte entsprechenden Objekten) beginnen. Danach folgen weitere Aussagen, die an Vernetzung und Komplexität zunehmen (vgl. Kleine, 1998, S. 114). Auf diese Vermutung deuten auch die Ergebnisse in der vorliegenden Studie im Zusammenhang mit Modellexperimenten hin. Wenn zunächst Objekte genannt werden, folgten darauf auch häufig die Nennungen von **strukturellen Attributen und Relationen**, sodass die Aussagen der Schüler\*innen über den weiteren Denkprozess an Vernetzung und Komplexität zunahmen (vgl. Kleine, 1998; Klein, Piacente-Cimini & Williams, 2007). Zusätzlich fällt im Zusammenhang mit den Modellexperimenten als Analogiebereich für ein Original auf, dass nicht immer mit dem Nennen von Objekten und damit dem Objektvergleich begonnen werden muss. Die Schüler\*innen beginnen auch relativ häufig entweder mit dem Nennen eines strukturellen Attributes oder einer Relation (vgl. Abbildung 67 & Abbildung 68). Jedoch kann im Gegensatz zu den bisherigen Erkenntnissen **nicht immer eine linear aufsteigende Komplexitätssteigerung** nachgewiesen werden: so folgt ein Objekt am häufigsten auf ein strukturelles Attribut als Ausgangspunkt und an eine Relation knüpft ein strukturelles Attribut an. Hauptsächlich **enden** die Denkwege, unabhängig von der Analogieart, mit der die einzelnen Denkprozesse gestartet sind, am häufigsten mit einem **Objekt**.

Somit kann insgesamt im Vergleich zu anderen Untersuchungen nicht gezeigt werden, dass „die Lernenden (...) eigenständig von zunächst oberflächlichen Merkmalen zu tiefergehenden Strukturen“ gelangen (Sumfleth & Kleine 1999, S. 53). Dieses Ergebnis ist positiv, bezogen auf einen erfolgreichen Transfer von Erkenntnissen aus dem Modellexperiment auf ein Original, da der Wissenstransfer besonders von den strukturellen Attributen und Relationen zwischen den Objekten abhängt (vgl. Sumfleth & Kleine 1999, S. 39 f.; Gentner, 1989).

Weiterhin kann festgestellt werden, dass die einzelnen Analogiearten Objekte, strukturelle Attribute und Relationen auf **inhaltlicher Ebene** miteinander in Zusammenhang gebracht wurden (vgl. Tabelle 30). So korrelieren bestimmte Objekte mit Objekten, Objekte mit strukturellen Attributen, Objekte mit Relationen, strukturelle Attribute mit strukturellen Attributen und strukturelle Attribute mit Relationen. Diese Ergebnisse zeigen, dass es wie in bisherigen Studien auch in der vorliegenden

Arbeit zu einer Vernetzung der einzelnen Bedingungen kommt (vgl. Kleine, 1998; Klein, Piacente-Cimini & Williams, 2007). Dabei ist zu beachten, dass die Objekte nicht immer nur mit komplexen Analogiearten in Beziehung gebracht werden, sondern auch mit weiteren Objekten in Beziehung gesetzt werden.

Es zeigte sich, dass das **Oxidationsmittel** (**Luft bzw. Sauerstoff**) als Objekt während des Mappings lediglich von wenigen Schüler\*innen genannt wurde. Dies kann auf dem mangelnden Vorwissen basieren, da das Denken in Analogien das bereits vorliegende, relevante Vorwissen aktiviert (vgl. Paatz, 2002; Brown & Kane, 1988). Bei der Erhebung des Vorwissens vor der Intervention konnte festgestellt werden, dass der Sauerstoff als Reaktionspartner von den Schüler\*innen selten genannt wurde. Somit ist anzunehmen, dass es den Schüler\*innen auch Schwierigkeiten bereitete, den Sauerstoff beim Mapping zu artikulieren. Dies kann darauf gründen, dass der Sauerstoff selten als relevante Bedingung für eine Verbrennung bzw. Explosion im Vorwissenstest genannt wurde, sodass in diesem inhaltlichen Zusammenhang kein Vorwissen vorlag, das während des Mappings aktiviert werden konnte (vgl. Abbildung 35). Daran würde sich die Vermutung anknüpfen, dass das experimentelle Phänomen, bei dem die Substanz mithilfe einer Luftpumpe aufgewirbelt wird, nicht ausreicht, um die Luft bzw. den Sauerstoff wahrzunehmen und als relevanten Reaktionspartner in einer chemischen Reaktion zu nennen (vgl. Séfé, 1986; Stavy, 1990; Ross, 1991; Barke, 2006; Collin, 2008; Petermann, Friedrich & Oetken, 2008; Steffensky, 2021).

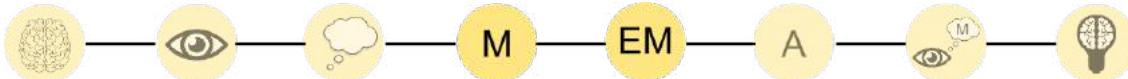
Insgesamt konnten weitere **Systematiken** des Denkens beim Vergleich zwischen Modellexperiment und Original (Mapping) aufgrund der Gemeinsamkeiten der Denkgraphen aller Schüler\*innen (vgl. Tabelle 29) und der Betrachtung zweier Einzelfälle (Abbildung 70 – Abbildung 73) durch die vergleichende qualitative und quantitative Darstellung ermittelt werden. Daraus können Tendenzen für **ideale Denkwege** abgeleitet werden.

So deuten die Ergebnisse der vorliegenden Denkgraphen aller Schüler\*innen (vgl. Tabelle 29) und zweier Einzelfälle (Abbildung 70 – Abbildung 73) zusammenfassend darauf hin, dass die Länge und die Komplexität der Denkwege (Makroebene) sowie das Nutzen verschiedener Analogiearten (Mesoebene) Voraussetzungen für einen erfolgreichen Transfer von Erkenntnissen aus dem Modellexperiment auf das Original sind. Dabei spiegelt sich ein erfolgreicher Transfer in der Nennung möglichst aller fünf relevanten Bedingungen des Explosionspentagons wieder. Konkret scheint es notwendig zu sein,

- eine relativ **hohe Anzahl inhaltsrelevanter Phrasen** zu nennen (mindestens 10 Phrasen).

- **beide Bereiche**, das Original und das Modellexperiment, zu betrachten und nicht ausschließlich das Original bzw. das Modellexperiment im Blick zu haben.
- die **Objekt-, strukturelle Attribut- und Relationsebene** zu fokussieren.

### *Beschreibung des Originals als Ergebnis des Mappingprozesses*



**Forschungsfrage 4:** Inwiefern werden die Bedingungen für das Auftreten einer Staubexplosion aus dem Vergleich von Modellexperiment und Original von Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe zur Erklärung des chemischen Gegenstandes Staubexplosion im Kontext des Originals genutzt?

*Die folgende Diskussion basiert auf den Ergebnissen, die auf S. 179 f. zusammengefasst sind.*

Die Ergebnisse zu den Bedingungen, welche von den Schüler\*innen aus dem Vergleich von Modellexperiment und Original zur Erklärung des chemischen Gegenstandes Staubexplosion im Kontext des Originals verwendet wurden, sind im Detail in Abschnitt 5.3.2 beschrieben.

Bei der an das Mapping anschließenden Beschreibung des Originals nennen die Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe **Objekte, strukturelle Attribute und Relationen**. Am häufigsten werden dabei die Objekte *Stoff*, *Zündquelle*, die Attribute *Energie der Zündquelle* und als Relationen *Aufwirbelung* und *Entzündung* wiedergegeben (vgl. Tabelle 31). Nur wenige Schüler\*innen nennen die *Luftzufuhr* als Objekt und die *Geschlossenheit der Umgebung* als Attribut.

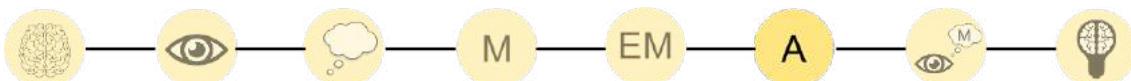
Weiterhin hat sich gezeigt, dass der Einsatz der im Sinne von Steff (2015; Sommer et al., 2019) *original-fernen* Modellsubstanz, welche wenige Oberflächenähnlichkeiten zur Originalsubstanz aufweist, in diesem Fall nicht dazu führte, dass die bereitgestellten Analogien als disanalog wahrgenommen wurden. Somit wurde die reibungslose Übertragung von neuen Erkenntnissen von dem Modellexperiment auf den originalen Sachverhalt durch die Verwendung *original-ferner* Modellsubstanzen nicht beeinträchtigt.

Die in dieser Arbeit erhobenen Daten deuten darauf hin, dass die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Vergleich von Modellexperiment und Original bzgl. der Bedingungen einer Explosion von Schüler\*innen auch zur Beschreibung des chemischen Gegenstandes Staubexplosion im Kontext des Originals **wiederholt genutzt** werden (vgl. Tabelle 32). Insbesondere sind hier die Bedingungen Oxidationsmittel, Luftzufuhr, Zündquelle, Energie der Zündquelle, Umgebung, geschlossene Umgebung, Aufwirbelung und Zerteilungsgrad des Stoffes zu nennen.

Darüber hinaus konnten die Schüler\*innen basierend auf dem Vergleich (Mapping), **neue Erkenntnisse** zu den stattfindenden Prozessen gewinnen, die mit den zuvor betrachteten Prozessen, beispielsweise der Aufwirbelung, in Verbindung stehen und auf das Original übertragen wurden. Diese Übertragung ist nicht nur auf Basis der strukturellen Attribute und Relationen (vgl. Sumfleth & Kleine, 1999, S. 39 f.; Gentner, 1989), sondern auch auf Basis von Objekten, die miteinander zu einer Relation verknüpft werden, möglich und erfolgreich.

Es gilt zu beachten, dass bisher zum Wissen über das Vorgehen und die Inhalte zu den einzelnen Zeitpunkten von Lernenden beim Umgang mit Analogien nur wenige Studien im Lehr-Lern-Kontext vorliegen (vgl. Dudeck, 1997; Kleine, 1998; Sumfleth & Kleine, 1999; Wilbers, 2000; Paatz, 2002; Klein, Piacente-Cimini & Williams, 2007). Somit stellen die in diesem Abschnitt diskutierten Ergebnisse erste Befunde dar, die weiter validiert werden müssen.

### *Anwendung von Erkenntnissen aus dem Mapping auf ein neues Original*



**Forschungsfrage 5:** Inwiefern werden die Bedingungen aus dem Vergleich von Modellexperiment und Original von Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe bei der Übertragung der Erkenntnisse auf ein weiteres Original zur Staubexplosion angewandt?

*Die folgende Diskussion basiert auf den Ergebnissen, die auf S. 194 f. zusammengefasst sind.*

Die Ergebnisse zu den Elementen, welche von den Schüler\*innen aus dem Vergleich von Modellexperiment und Original bei der Übertragung der Erkenntnisse auf ein weiteres Original zur Staubexplosion angewandt wurden, sind im Detail in Abschnitt 5.3.3 beschrieben.

Bei der konkret gestellten Aufgabe („Beschreibe detailliert, wie es bei diesem Unfall zu einer Explosion gekommen sein kann. Nutze dazu den Vergleich, den du beim vorherigen Unfall gemacht hast.“, vgl. Abbildung 23) sollte im Sinne der vier Lernzielstufen nach Roth (Deutscher Bildungsrat, 1970) ein Transfer<sup>22</sup> stattfinden. Das bedeutet, dass „Grundprinzipien des Gelernten [...] auf neue, ähnliche Aufgaben übertragen werden“ (Pfeifer et al., 2002, 126). Somit wurde bei der Anwendung das im Mapping erarbeiteten und erlernte **Wissen** auf ein neues, ähnliches Original

<sup>22</sup> In der vorliegenden Arbeit auch „Anwendung“ genannt.

**übertragen.** Konkret bedeutet das, dass ähnlich wie bei Kleine (1998) während der Anwendung ein Bezug zur Analogierelation, welche im Mapping zwischen dem Modellexperiment und Original 1 entwickelt wurde, hergestellt wurde. Da alle Schüler\*innen relevante Bedingungen nannten, scheint die Anwendung für die Schüler\*innen umsetzbar zu sein. Ein möglicher Grund für die gelungene Anwendung kann in dem Grad der inhaltlichen Ähnlichkeit zwischen den analogen Bereichen liegen, der für eine erfolgreiche Zuordnung verantwortlich ist (vgl. ebd.).

Konkret nannten die Schüler\*innen das Objekt *Luftzufuhr*, die Attribute *Geschlossenheit der Umgebung*, *Energie der Zündquelle* und *Zerteilungsgrad des Stoffes* sowie die Relation *Aufwirbelung* umso **häufiger während der Anwendung**, je häufiger diese **vorab während des Mappings** schon artikuliert wurden (vgl. Tabelle 35). Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass die Schüler\*innen, die den Schritt des Mappings detaillierter ausführen, auch einen erfolgreicheren Transfer durchführen.

Bei weiteren Zusammenhängen konnte eine **Zunahme der Vernetzung und Komplexität der Analogieart** vom Mapping zur Anwendung der theoretischen Grundlagen identifiziert werden: je häufiger das Objekt *Stoff* während des Mappings genannt wird, desto häufiger wird der *Zerteilungsgrad des Stoffes* als strukturelles Attribut und die *Aufwirbelung* als Relation bei der Anwendung genannt (vgl. Tabelle 35). Je häufiger das Objekt *Oxidationsmittel* während des Mappings genannt wird, umso häufiger wird die *Umgebung* und die *Energie der Zündquelle* als strukturelles Attribut bei der Anwendung genannt. Es lässt sich somit vermuten, dass neben dem erfolgreichen Transfer aufgrund der Zunahme der Vernetzung und Komplexität auch eine weitere interne Verarbeitung hin zu einem komplexeren mentalen Modell bei den Schüler\*innen stattgefunden hat (vgl. u.a. bei Kleine, 1998).

**Forschungsfrage 5.1:** Welche Denkmuster können auf der Makro-, Meso- und Mikroebene von Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe bei dieser Übertragung der Erkenntnisse auf ein weiteres Original während des Denkens in Analogien an dem chemischen Gegenstand Staubexplosion identifiziert werden?

*Die folgende Diskussion basiert auf den Ergebnissen, die auf S. 185 f., 188 f. & 191 zusammengefasst sind.*

Die Ergebnisse zu den Denkmustern der Schüler\*innen bei der Übertragung der Erkenntnisse aus dem Vergleich des Modellexperiments zur Staubexplosion in der Low Cost-Hartmann-Apparatur mit dem Original (*Original 1*), der Mehlstaubexplosion in der Bremer Rolandmühle, auf ein weiteres Original (*Original 2*) sind im Detail in Abschnitt 5.3.3 beschrieben.

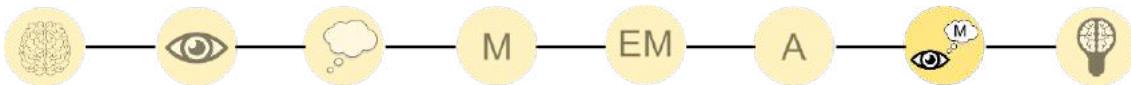
Während der Übertragung der Erkenntnisse auf das Original 2 lag der **Fokus** der artikulierten Gedanken nahezu aller Schüler\*innen auf dem **Original 2**. Dies verdeutlicht, dass das erarbeitete Wissen auf ein neues Original angewendet werden konnte.

Insgesamt sind die Denkwege bei der Anwendung der Erkenntnisse auf das Original 2 weniger komplex als bei dem Mapping. Die Schüler\*innen nutzen lediglich **eine bis drei Analogieoperationen** (**Mapping**: eine bis fünf Analogieoperationen). Dabei liegt der Schwerpunkt unabhängig von der Präsentationsform weiterhin auf einer genutzten Analogieoperation ( $nv = 17, 58,62\%$ ;  $nse = 38, 71,7\%$ , vgl. Abbildung 75). Ab zwei verwendeten Operationen wenden die Schüler\*innen die Erkenntnisse aus dem **Mapping von Original 1 und Modellexperiment** auf das Original 2 (**abbildende Analogieoperationen**) an. Diese Ergebnisse passen zu denen von Kleine (1998), bei der die Studierenden mit viel und wenig Vorwissen während der Anwendung der Erkenntnisse auf ein neues Beispiel Bezug zum Analogiebereich genommen haben.

Auf der *Mesoebene* wurde auch bei der Anwendung der Erkenntnisse auf ein weiteres Original unabhängig von der Präsentationsform von den Schüler\*innen hauptsächlich mit der Nennung eines **Objektes** begonnen ( $nv = 13, 46,4\%$ ;  $nse = 23, 45,1\%$ ). Im Gegensatz zu den Ergebnissen beim Mapping, deuten die Ergebnisse nun darauf hin, dass der **Komplexitätsgrad** bei der Anwendung der Erkenntnisse auf ein weiteres Original schneller steigt, indem an die Nennung des Objektes keine Nennung weiterer Objekte, sondern die Nennung eines **strukturellen Attributs oder einer Relation** anknüpfte (vgl. Abbildung 80). Dabei kann insgesamt eine starke Verknüpfung zwischen den Analogiearten Objekt und strukturelles Attribut identifiziert werden. Somit folgen Aussagen, die an Vernetzung und Komplexität zunehmen (vgl. Kleine, 1998; Sumfleth & Kleine, 1999; Klein, Piacente-Cimini & Williams, 2007). Zusätzlich fällt im Zusammenhang mit den Modellexperimenten als Analogiebereich für ein Original auf, dass nicht immer mit dem Nennen von Objekten begonnen werden muss. Die Schüler\*innen beginnen relativ häufig (*strukturelles Attribut*:  $nv: 39,3\%$ ,  $nse: 21,6\%$ ; *Relation*:  $nv: 14,3\%$ ,  $nse: 29,4\%$ , vgl. Abbildung 82 & Abbildung 83) entweder mit dem Nennen eines strukturellen Attributes oder einer Relation. Dabei werden insgesamt häufig Objekte mit strukturellen Attributen ergänzt. Dieses Fokussieren der strukturellen und relationalen Ebene während des Anwendungsprozesses kann im Sinne von Wilbers und Duit unter anderem daran liegen, dass das Modellexperiment als Analogiebereich „im assoziativen Umfeld des Zielanalogs“ liegt (2001, S. 102).

Unter den während der Denkprozesse von den Schüler\*innen genannten Bedingungen werden am häufigsten die Objekte *Stoff*, *Zündquelle*, die Attribute *Zerteilungsgrad* und *Brennbarkeit* im Zusammenhang mit dem Stoff sowie die *Energie der Zündquelle* und als Relation die *Aufwirbelung* wiedergegeben. Nur wenige Schüler\*innen nennen die **Geschlossenheit der Umgebung** als Attribut, jedoch kann bei der Nennung dieser Bedingung eine Abhängigkeit von der Komplexität der Denkwege identifiziert werden. Dies erscheint logisch, da die **Geschlossenheit der Umgebung** nicht direkt aus dem Vorwissen vorliegt (vgl. Abbildung 35) und folglich komplexere Denkwege nötig sind, um einen erfolgreichen Wissenszuwachs ohne assoziative Rückgriffe auf das Vorwissen zu generieren.

### **Zusammenhang zwischen Wahrnehmung und Denken in Analogien**



**Ziel VI.** Identifizierung eines Zusammenhangs zwischen der Wahrnehmung und den Denkmustern während des Denkens in Analogien beim Umgang mit Modellexperimenten

**Forschungsfrage 6:** Inwieweit hat die Wahrnehmung der relevanten Bedingungen des Modellexperiments bei Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe einen Einfluss auf das Denken in Analogien beim Umgang mit Modellexperiment und Original zum chemischen Gegenstandes Staubexplosion?

*Die folgende Diskussion basiert auf den Ergebnissen, die auf S. 198 f. zusammengefasst sind.*

Die Ergebnisse zu einem möglichen Zusammenhang zwischen der Wahrnehmung der relevanten Elemente des Modellexperiments und den Elementen während des Denkens in Analogien beim Umgang mit Modellexperiment und Original sind im Detail in Abschnitt 5.4 beschrieben.

In der Studie können Zusammenhänge zwischen einzelnen Variablen während der Informationsaufnahme bzw. -verarbeitung und Variablen beim Denken in Analogien während des Mappings identifiziert werden. Diese Ergebnisse legen die Vermutung nahe, dass eine komplexe und detaillierte Aufnahme und somit ein besseres Verständnis des experimentellen Prozesses (Vorversuch, Modellexperiment) zu einer detaillierteren und komplexeren Betrachtung des Phänomens beim Denken in Analogien während des Mappings führt. Insbesondere zeigt sich dies an der erhöhten Anzahl genutzter Analogieoperationen, bei denen das Modellexperiment sowie das Original relevant sind. Diese Vermutung unterstützen die bisherigen Erkenntnisse der Literatur, dass sensorische Informationen in mentale Modelle

umgewandelt werden. Diese mentalen Modelle bilden dann die Grundlage für das Verstehen und Lernen eines gesehenen Prozesses (vgl. Zacks et al., 2007).

Zunächst wurde davon ausgegangen, dass die Schüler\*innen mehr relevante Bedingungen während des Mappings artikulieren, wenn sie die relevanten Bereiche innerhalb des experimentellen Prozesses (Vorversuch und Modellexperiment) betrachten und diese korrekt verarbeiten. Diese Vermutung konnte in Teilen bestätigt werden. Die Schüler\*innen nennen während des Mappings mehr kennzeichnende Bedingungen des Explosionsprozesses, wenn sie dem für den reinen Explosionsprozess relevanten Bereich um die Glühwendel ( $r = -.412^*$ ,  $p = .029$ ) eine höhere Relevanz als den anderen Bereichen zugewiesen haben (vgl. Tabelle 36).

Es scheint jedoch, als wäre nicht nur die Wahrnehmung der für den reinen Prozess der Explosion relevanten Bedingungen während der Betrachtung des experimentellen Prozesses (Vorversuch, Modellexperiment) notwendig, um ein ausführliches Mapping durchzuführen. Vielmehr muss ein ausführliches und korrektes, mentales Modell ausgebildet werden, da es ziemlich schwierig ist, ein einmal etabliertes mentales Modell zu ändern (vgl. Renker, 2017).

Zusätzlich scheint die Ausbildung des mentalen Modells auch durch die Betrachtung der für den reinen phänomenologisch wahrnehmbaren Prozess irrelevanten Bereiche (Stromquelle, Luftpumpe) beeinflusst zu werden. Die erhöhte Zuweisung der Aufmerksamkeit auf diese irrelevanten Bereiche führt dazu, dass mehr den Explosionsprozess kennzeichnende Bedingungen innerhalb einer höheren Anzahl inhaltsrelevanter Phrasen genannt werden. Dies erscheint logisch, da diese irrelevanten Bereiche die Bedingungen und den Ablauf des Prozesses im Modellexperiment indirekt mitsteuern und somit indirekt relevant sind. So wird der in der Luft enthaltene Sauerstoff (Oxidationsmittel) umso häufiger während des Mappings genannt, je mehr Relevanz der Luftpumpe während des Betrachtens des Modellexperiments beigemessen wird. Dies liegt daran, dass beim häufigeren und längeren Betrachten eines Bereiches mehr Informationen aufgenommen werden können (vgl. Geise, 2011; Nehring & Busch, 2017). Diese Beziehung kann im Zusammenhang mit der Luft und Luftpumpe direkt sein, oder aber auch indirekt. Im Fall der Stromquelle werden die zugrundeliegenden Entzündungsprozesse, bei denen der Stoff erst aufgrund seiner Brennbarkeitseigenschaft entzündet wird, indirekt assoziiert.

Es gilt jedoch zu beachten, dass das auf der Basis dieser sensorischen Informationen basierende mentale Modell eine Replikation der Realität ist, die je nach Wahrheitsgehalt und Umfang der erhaltenen Informationen auch falsch sein kann (vgl. Zacks et al., 2007; Johnson-Laird, 2010).

## 6 Diskussion der vorliegenden Studie

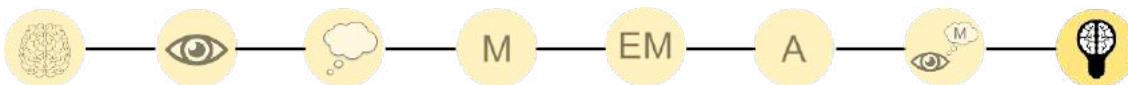
---

Die in der vorliegenden Studie erhaltenen Daten führen jedoch zu der Vermutung, dass die Bedingungen, die nicht korrekt verarbeitet werden, nicht direkt dazu führen, dass die damit in Beziehung stehenden relevanten Bedingungen und Materialien während des Mappings nicht genannt werden. Beispielsweise werden die im Zusammenhang mit der Aufwirbelung des Stoffes stehenden Bedingungen *Oxidationsmittel*, *Luftzufuhr* und *geschlossene Umgebung* häufiger während des Mappings genannt, auch wenn der Zerteilungsgrad vorab nicht korrekt verarbeitet wird (vgl. Tabelle 37).

Dieser vorteilhafte Zusammenhang könnte auf der Ebene der Erhebung des Wissens mithilfe des Fragebogens sowie auf der Ebene des Prozesses beim Denken in Analogien begründet sein. Einerseits könnte das mentale Modell Informationen enthalten, die bei der Bearbeitung eines Fragebogens nicht direkt abgerufen werden können. Andererseits können solche Bedingungen auch erst durch eine detaillierte Auseinandersetzung mit dem zugrundeliegenden Prozess während des Mappings verstanden worden sein (vgl. Gentner, 1983; 1989; Holyoak, 1985; Holyoak & Thagard, 1989; 1997). Zusätzlich kann relevantes Vorwissen auch erst durch das Denken in Analogien aktiviert worden sein (vgl. Paatz, 2002; Brown & Kane, 1988).

Somit kann auf Grundlage dieser Ergebnisse vermutet werden, dass neben der Aufnahme der sensorischen Informationen, die in ein mentales Modell umgewandelt werden, das Vorwissen sowie der Lernzuwachs während des Mappings einen Einfluss auf das Mapping selbst haben können, welches insgesamt die Grundlage für das Verstehen und Lernen des gesehenen Prozesses der Staubexplosion bildet (vgl. Zacks et al., 2007).

### Wissenszuwachs



**Ziel V.** Identifizierung des Wissenszuwachs über die Bedingungen für eine Staubexplosion infolge der Intervention

**Forschungsfrage 7:** Inwieweit nimmt das Fachwissen zu den Bedingungen für eine Staubexplosion von Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe durch den Umgang mit einem Modellexperiment und Original zur Staubexplosion in der Low Cost-Hartmann-Apparatur innerhalb der Intervention zu?

*Die folgende Diskussion basiert auf den Ergebnissen, die auf S. 202 f. zusammengefasst sind.*

Die Ergebnisse zu dem Fachwissenszuwachs durch den Umgang mit einem Modellexperiment und Original zur Staubexplosion in der Low Cost-Hartmann-Apparatur innerhalb der Intervention sind im Detail in Abschnitt 5.5 beschrieben.

Im Zusammenhang mit dem Wissen zu den Themen Verbrennungen und Explosionen wurde erwartet, dass die Schüler\*innen zum Pre-Testzeitpunkt niedrige Werte erreichen, da die Themen Verbrennungen und Explosionen bis zum Projekttag von den Schulklassen nicht behandelt wurden. Dieses Wissen sollte durch die Beschäftigung mit diesen Themen in Folge der Intervention ansteigen. Diese Erwartung wurde erfüllt. Die Ergebnisse der Studie belegen, dass die Gesamtleistungen beider Probandengruppen bezüglich der einzelnen Bedingungen für das Eintreten einer Staubexplosion im Post-Test signifikant höher waren als im Pre-Test (Wilcoxon-Test:  $z = -4.943$ ,  $p = .000$ ,  $n = 105$ ,  $r = .48$ ) und nach Cohen (1988, S. 80) eine mittlere Effektstärke aufweisen ( $r = .48$ ). Der Befund über die Zunahme des Wissenszuwachs deckt sich mit den Ergebnissen von Steff (2015), bei denen ebenfalls das Modellexperiment zur Staubexplosion in der Low-Cost Hartmann-Apparatur innerhalb einer Intervention genutzt wurde und ein Wissenszuwachs infolge der Intervention nachgewiesen wurde.

Die steigende Tendenz der Gesamtleistung konnte ebenfalls bei der Betrachtung der fünf einzelnen Bedingungen, die für das Eintreten einer Staubexplosion relevant sind, deskriptiv identifiziert werden. So nannten die Schüler\*innen im Pre-Test größtenteils Aussagen, die in den Kategorien *Brennbarer Stoff/Brennstoff* und *Zündquelle* eingeordnet werden konnten. Im Post-Test nahmen die Häufigkeiten der Nennungen des *Brennbaren Stoffs/Brennstoffs* und der *Zündquelle* weiter zu. Dabei konnte analog zu den Ergebnissen von Steff (2015) ein signifikanter Lernzuwachs bei den Bedingungen *Brennbarer Stoff* und *Oxidationsmittel* zwischen dem Pre- und dem Post-Testzeitpunkt festgestellt werden (asymptotischer Wilcoxon-Test:  $z_{Brennstoff} = -4.106$ ,  $z_{Oxidationsmittel} = -4.382$ ,  $p = .000$ ,  $n = 104$ , vgl. Tabelle 38). Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Steff (2015) wird in der vorliegenden Studie der Wissenszuwachs in der Bedingung *Zündquelle* nicht statistisch bedeutsam. Diese Abweichung gründet vermutlich darauf, dass diese relevante Bedingung für das Auftreten einer Staubexplosion schon zum Pre-Testzeitpunkt häufig genannt wird.

Im Post-Test wird die *Aufwirbelung/Verteilung* erstmals als ein relevantes Element zum Eintreten einer Staubexplosion von den Schüler\*innen wahrgenommen und genannt, jedoch mit niedrigen Werten. Ein möglicher Grund dieser niedrigen Werte kann – wie bei Steff (2015) – in den experimentellen Effekten gesehen werden. So ist es möglich, dass das Aufwirbeln und Ausbilden eines homogen verteilten Staub-Luft-Gemisches im gesamten Plexiglasrohr sowie das Vorliegen eines

durchsichtigen Plexiglasrohres mit beweglichem Deckel als geschlossene Umgebung von den Schüler\*innen nicht ausreichend wahrgenommen werden kann und deswegen auch nicht erkannt und zur Beantwortung der Frage genannt wird (vgl. ebd.). Diese Vermutung wird durch die Daten zur Informationsaufnahme mit Hilfe der Eye-Tracking Methode (vgl. Forschungsfrage 2) unterstützt, da die Schüler\*innen zum relevanten Zeitpunkt des Explosionsprozesses selten in den mittleren Bereich des Plexiglasrohres sowie auf Höhe des Deckels blicken. Somit können aus dieser Einschränkung bei der Informationsaufnahme, welche auf der Schnelligkeit des Prozesses basieren kann (vgl. Steff, 2015; Hilfert-Rüppel & Sieve, 2017), die negativen Auswirkungen auf das Nennen der *Aufwirbelung/Verteilung* und der *Umgebung* bei der Bearbeitung des Post-Test-Items resultieren.

Zur Beantwortung der Forschungsfrage sieben muss darüber hinaus berücksichtigt werden, dass sich Pre-Test-Item („Erkläre, was eine Explosion ist.“) und Post-Test-Item („Nenne, welche Bedingungen gegeben sein müssen, damit es zu einer Explosion kommt.“), die zum Vergleich der Testleistungen herangezogen wurden, im Wortlaut voneinander unterscheiden. Der unterschiedliche Wortlaut ergibt sich aus der Testkonstruktion und der unterschiedlichen Zielsetzung. Mithilfe des Pre-Test-Items sollte das allgemeine Vorwissen der Schüler\*innen bezüglich des Phänomens Explosion identifiziert werden. Das Item des Post-Tests thematisierte konkrete Bedingungen, d.h. die Ursachen, die zu einer Explosion führen. Die Beachtung der Formulierungsunterschiede zwischen den Testitems im Pre-Test und Post-Test muss somit berücksichtigt werden. Dieses Vorgehen ist jedoch legitimiert, da bei beiden Testitems das Phänomen der Explosion im Mittelpunkt steht und ein identisches Auswertungsinstrument auf die Daten beider Testitems angewandt wurde. Trotz der unterschiedlichen Formulierungen der Items kann ein Wissenszuwachs in Folge der Intervention identifiziert werden.

### 6.2 Diskussion des Erhebungsdesigns und der Erhebungsmethodik

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Mixed-Methods-Ansatz verwendet (vgl. Cresswell, 2014, S. 219–223). Dabei wurde die Entscheidung für diesen Ansatz und somit die Verknüpfung von qualitativen und quantitativen Methoden und Daten auf der Basis des fachdidaktischen Forschungsinteresses und unter Berücksichtigung der mit dem Forschungskontext einhergehenden Limitationen getroffen (vgl. Johnson, Onwuegbuzie & Turner, 2007; Tashakkori & Teddlie, 2010; Cresswell, 2014, S. 43 ff.).

Das Ziel der vorliegenden Studie war es, den Umgang von Schüler\*innen mit Modellexperimenten mit einem besonderen Fokus auf der Wahrnehmung und dem Denken in Analogien innerhalb einer Lehr-Lern-Umgebung zu untersuchen. Damit

der Umgang mit Modellexperimenten in einer realistischen, schulähnlichen Lehr-Lern-Umgebung erhoben werden konnte, konnte die Datenerhebung nur unter teilweise kontrollierbaren Bedingungen durchgeführt werden. Daher wurde der hier verwendete Mixed-Methods-Ansatz mit einer Erhebung verschiedener Datenformate, einer Kombination von textanalytischen und statistischen Methoden und auf der Kombination dieser Daten beruhenden Interpretationen als zulässig und zielführend betrachtet (vgl. Cresswell, 2014, S. 219–223). Die Datenerhebung beruhte prinzipiell auf drei Erhebungsmethoden: Eye-Tracking, Fragebögen und Lautes Denken. Dabei kamen fünf Erhebungsinstrumente zum Einsatz: *Fragebogen\_Vorwissen*, *Video\_Informationsaufnahme*, *Versuchsprotokoll\_Verarbeitung* und *Fragebogen\_Verarbeitung*, *Aufgabenleitfaden\_Analogiedenken* inklusive Mapping, Anwendung und Wissen zur Explosion. Der *Fragebogen\_Vorwissen* mit besonderem Fokus auf dem Vorwissen zur Explosion erwies sich als geeignetes Instrument zur Erfassung der soziodemographischen Daten und zur Erfassung des Vorwissens sowie möglicher Wissensunterschiede zwischen den Schüler\*innen. Das Vorwissen wurde, wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben, auf Grundlage bestehender Erhebungsinstrumente für die Erhebung von Wissen zu Verbrennungen mit Explosionen im Speziellen von Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe entwickelt (vgl. Steff, 2015). Die Antworten wurden mithilfe eines Erwartungshorizonts ausgewertet, der sich an bestehenden Auswertungsinstrumenten orientiert (vgl. ebd.). Dabei beinhaltete der Erwartungshorizont die möglichen, fachlich korrekten Aussagen. Mit ihm konnten alle inhaltlich relevanten Aussagen der Schüler\*innen identifiziert und bewertet werden. Somit erwies sich der in dieser Arbeit verwendete Fragebogen in Kombination mit dem Erwartungshorizont als geeignet, um dieses Vorwissen zu erfassen. Dabei fiel auf, dass nur wenige Aussagen vor allem zu den Explosionen genannt wurden. Dies wurde allerdings nicht als Problem der Validität des Fragebogens oder Erwartungshorizonts gesehen, sondern vielmehr in der Nichtbearbeitung des Themengebietes vor der Intervention und damit in einem erwartbar gerin- gem Vorwissen (vgl. Riese & Reinholt, 2014, S. 263 ff.).

Das stationäre Eye-Tracking System erwies sich als geeignetes Instrument zur quantitativen Erfassung der Wahrnehmung. Der Vorteil dieses stationären Systems lag darin, dass qualitativ hochwertige Daten mit hoher Messgenauigkeit und Wiederholfrequenz erhoben werden konnten (vgl. Abschnitt 4.3.2.2). Dies ist besonders bei schnellen Prozessen als präsentiertem Stimulus, wie es bei der Staubexplosion vorliegt, notwendig. Die Datenauswertung mithilfe des Sakkadenerkennungsalgorithmus von SR Research ermittelt zur Erfassung der Wahrnehmung war insgesamt hilfreich, um Daten darüber zu generieren, welche Bereiche von Schüler\*innen besonders intensiv wahrgenommen wurden und zu welchem Zeitpunkt diese Wahrnehmung erfolgte (vgl. Tatler, 2007, S. 3). Weiter eignete sich die Definition von

sechs Bereichen (Areas of Interest, vgl. Abbildung 21) und die Analyse der zugehörigen Standard-Augenbewegungsvariablen *Fixationsanzahl*, *Fixationsdauer* und *Zeit bis zur ersten Fixation* für die Erhebung der Aufmerksamkeit innerhalb der drei Sequenzen des vorgestellten Modellexperiments. Um noch detailliertere Aussagen im Zusammenhang mit den einzelnen experimentellen Prozessschritten während des Betrachtens des Modellexperiments zu erhalten, wäre es sinnvoll, kürzere Zeitintervalle für einzelne Sequenzen zu definieren. Gleichzeitig könnte auch die weiterführende Analyse von Blickpfaden genaue Informationen zu der zeitlichen Passung von Aufmerksamkeitsfokus und experimentellen beobachtbaren Inhalten ermöglichen. Erste Informationen zu dieser Passung konnten bereits anhand der Heat-Map-Darstellung ermöglicht werden (vgl. Abbildung 47).

Weiter gilt jedoch zu beachten, dass das Modellexperiment in Lehr-Lern-Umgebungen typischerweise den Schüler\*innen nicht mithilfe eines Videos im Chemieunterricht präsentiert, sondern entweder als Demonstrationsexperiment vorgeführt oder von den Schüler\*innen selbstständig als Schüler\*innenexperiment durchgeführt wird. Bei der Demonstration und eigenständigen Durchführung lernen die Schüler\*innen im dreidimensionalen Raum, real, das Modellexperiment kennen. Dennoch ist eine Vergleichbarkeit zwischen den Blickbewegungsdaten einzelner Schüler\*innen auch bei einer realen Demonstration oder selbstständiger Durchführung erschwert, da weitere äußere Einflüsse die Wahrnehmung zusätzlich beeinflussen können. So kann bei einem Demonstrationsexperiment die Beobachtung u.a. durch die handelnde Person beeinflusst werden, die die Schüler\*innen beispielsweise von dem eigentlichen experimentellen Prozess ablenkt. Bei der Durchführung eines Schüler\*innenexperiments ist auch eine Ablenkung möglich, da die Konzentration besonders bei den durchführenden Schüler\*innen auf zwei Handlungen liegt: der Durchführung und der Beobachtung. Im Hinblick auf den Einsatz im Lehr-Lern Kontext ist zusätzlich zu beachten, dass die Relevanz der Präsentationsform Video in den letzten Monaten bedingt durch die Corona-Pandemie in Lehr-Lern-Kontexten stark zugenommen hat. Mit Hilfe von Videos ist es möglich, einen experimentellen Prozess zeit- und ortsunabhängig zu beobachten.

Die Datenerhebung zur Erfassung des Denkens in Analogien beim Umgang mit Modellexperimenten durch Audioaufnahmen erwies sich ebenfalls als geeignetes Instrument. Die Audioaufnahme mithilfe eines Diktiergerätes wurde von den Schüler\*innen nicht als unangenehm und beeinflussend wahrgenommen. Dies hat sich sowohl durch informelle Gespräche mit den Schüler\*innen als auch durch einzelne Äußerungen auf den Audioaufnahmen belegen lassen. Obwohl Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe generell in der Lage sind, ihre Gedanken bei der Durchführung der Methode *Lautes Denken* zu artikulieren (vgl. Mackensen-Friedrichs, 2004),

konnte nicht vollständig überprüft werden, ob wirklich alle Gedanken artikuliert wurden. Es gibt ausschließlich Indikatoren, die darauf hindeuten, wie beispielsweise sehr wenige kurze bis keine Sprechpausen in den einzelnen Denkprotokollen (vgl. Sandmann, 2014; Konrad, 2010). Dies spricht gleichzeitig gegen eine Überforderung und für die Erhebung valider Daten. Um Informationen über eventuell unartikuliertes Wissen zu erhalten, wurden mit einigen Schüler\*innen Reflexionsinterview durchgeführt. Diese zeigten, dass weiteres Wissen nur durch Nachfragen nach konkreten Inhalten artikuliert wurde. Jedoch lag der Fokus der vorliegenden Arbeit auf dem eigenständig artikulierten Wissen. Insgesamt waren im Rahmen des vorliegenden Forschungsinteresses somit die rein sprachlichen und vereinzelt anderweitig akustischen Daten ausreichend inhaltstragend, um die Auswertungsverfahren anwenden zu können. Daher können die verbalen Daten der Probanden auf den Aufnahmen insgesamt als authentisch betrachtet werden, was für die Eignung des Verfahrens spricht.

Auch der in dem Aufgabenleitfaden *Analogiedenken* integrierte Post-Test bezüglich des Konzeptes Explosion erwies sich mit wenigen Einschränkungen als geeignetes Instrument zur Erfassung des Wissens zur Explosion nach der Auseinandersetzung der Probanden mit dem Modellexperiment zur Staubexplosion als Untersuchungsgegenstand. Die wenigen Einschränkungen zur Messung eines Wissenszuwachses resultieren aus der unterschiedlichen Formulierung der Testitems und der unterschiedlichen Bearbeitungsart der Testitems zum Pre- und Post-Testzeitpunkt. Pre-Test-Item („Erkläre, was eine Explosion ist.“) und Post-Test-Item („Nenne, welche Bedingungen gegeben sein müssen, damit es zu einer Explosion kommt.“), die zum Vergleich der Testleistungen herangezogen wurden, unterscheiden sich im Wortlaut voneinander. Der unterschiedliche Wortlaut ergibt sich aus der Testkonstruktion und der unterschiedlichen Zielsetzung (Vorwissen und konkrete Bedingungen einer Staubexplosion vermittelt durch das Modellexperiment). Gleichzeitig wurde das Pre-Test-Item schriftlich beantwortet, das Post-Test-Item sprachlich mithilfe der Methode *Lautes Denken*. Legitimiert werden kann es, da bei beiden Testitems das Phänomen der Explosion im Mittelpunkt steht und ein identisches Auswertungsinstrument auf die Daten beider Testitems angewandt wurde. Somit können Aussagen darüber getroffen werden, inwiefern der Fachwissenszuwachs über das Phänomen Explosion durch die Intervention vermittelt wird.

Die Analyse der Denkprozesse der Probanden während der Bearbeitung des Instruments *Aufgabenleitfaden Analogiedenken* beruht überwiegend auf der deduktiven qualitativen Inhaltsanalyse von Audioaufnahmen mittels der unter 4.3.4.3 vorgestellten Kategoriensysteme zum Denken in Analogien. Diese Kategoriensysteme erwiesen sich in der Anwendung auf die hier vorliegenden Daten als valide und

reliabel. Dabei gliederte sich die Kodierung mithilfe der Kategoriensysteme an eine klassische Transkription an. Dies erlaubte eine tiefgehende Kodierung. Gleichzeitig war die Interkoderreliabilität bei den Kategoriensystemen deutlich  $> 0,8$ . Die weitere Analyse der durch die qualitative Inhaltsanalyse an der Audioaufnahme erhaltenen prozessbezogenen Kodierungen und die Visualisierung mittels Denkgraphen, welche mithilfe eines Excel-Skriptes mit Visual Basic durchgeführt werden konnte, war effizient. Hierzu mussten lediglich die Kodierungsdaten aus MAXQDA im Tabellenformat exportiert und in Excel aufgerufen werden. Dies ermöglichte, die Denkgraphen im Gegensatz zu vorherigen Anwendungen im Bereich der Naturwissenschaftsdidaktik auf eine größere Anzahl an Fällen und eine größere Anzahl an unterschiedlichen Kodierungen pro Fall anzuwenden (vgl. Lehesvuori et al., 2013). Zusätzlich konnte durch die Graustufen-Darstellung der Niveaus einer Kodierung innerhalb eines Kategoriensystems mehr Informationen über die Mesostruktur eines artikulierten Denkprozesses abgebildet werden als bisher. Darüber hinaus wurden diese Graustufenkodierungen durch inhaltstragende Begriffe innerhalb der einzelnen Kästchen, welche die einzelnen Phrasen darstellten, ergänzt. Jedoch führte diese detaillierte und vielfältige Datengrundlage auch dazu, dass zum Erkennen von Systematiken die Denkgraphen wiederum stark reduziert werden mussten. Diese Reduktion wurde in der vorliegenden Arbeit anhand der Makro-, Meso- und Mikroebene durchgeführt. Weitere Möglichkeiten der Reduzierung sind denkbar.

Auch die Stichprobe der vorliegenden Studie muss diskutiert werden, da sie nach der Verfügbarkeit von Probanden für die Intervention gebildet wurde. Damit ist die Grundlage für eine Generalisierung der aus dieser Studie gebildeten Interpretationen nicht in dem Maße gegeben, wie es bei einer anderen Stichprobenziehung, beispielsweise einer Zufallsauswahl, der Fall gewesen wäre (vgl. Krathwohl, 2009, S. 179). Allerdings war eine andere Stichprobenziehung unter den gegebenen Bedingungen nicht möglich, da für die Datenerhebung aufgrund der zeitlichen Passung zwischen den Schulklassen und Terminen im Alfried Krupp-Schülerlabor terminliche Einschränkungen vorlagen. Betrachtet man die Größe der vorliegenden Stichprobe, so ist sie für die Forschungsinteressen und -methoden der vorliegenden Studie angemessen. Die Datengrundlage von  $N = 105$  Probanden ist ausreichend groß, um eine Vielzahl an möglichen Variationen beim Denken in Analogien abzubilden. Sie ist außerdem groß genug, um deskriptive statistische Verfahren und einige inferentiell statistische Verfahren sinnvoll anzuwenden. Gleichzeitig war der Umfang der erhobenen Daten mit den notwendigen Analyseverfahren im Rahmen der zur Verfügung stehenden Ressourcen zu bewältigen. Werden die beiden Treatmentgruppen (Video-Gruppe & Schüler\*innenexperimente-Gruppe) jedoch einzeln betrachtet, fällt auf, dass die Anzahl der Schüler\*innen variiert. Um abschließend die

Denkwege der beiden Treatmentgruppen miteinander vergleichen zu können und Aussagen zur Abhängigkeit der Denkwege von der Präsentationsform machen zu können, müssten die beiden Treatmentgruppen vergleichbar groß sein.

Schließlich muss im Hinblick auf die Methodik in dieser Studie auch die Anwendung der inferentiell statistischen Verfahren zur Ermittlung von Zusammenhängen im Rahmen der Forschungsfragen 1 bis 7 diskutiert werden. Die nicht-parametrischen Verteilung mehrerer Variablen führte dazu, dass ausschließlich Tests für nicht normalverteilte Daten angewandt wurden. Diese Tests zeigten zwar Trends für mögliche Zusammenhänge, allerdings sind diese Zusammenhänge teilweise nicht signifikant. Jedoch ist dies unter Umständen kein Hinweis auf eine mangelnde Datenqualität oder nicht vorhandene Zusammenhänge, sondern eine Auswirkung der Stichprobengröße. Daher werden diese statistischen Analysen in der vorliegenden Arbeit bewusst als explorativ präsentiert und diskutiert (vgl. Krathwohl, 2009, S. 394–395).

Die aus der vorliegenden Studie ableitbaren Implikationen für schulische Lehr-Lern-Prozesse werden im Folgenden unter Abschnitt 7 vorgestellt.

## 6 Diskussion der vorliegenden Studie

## 7 Schulische Implikationen

Modellexperimente werden in verschiedenen Lehr-Lern-Prozessen in der schulischen Bildung, der Ausbildung und der Hochschulbildung eingesetzt, um komplexe originale chemische Prozesse zu verstehen. Wenn zunächst ein Verständnis von dem Modellexperiment entwickelt wurde, kann ausgehend davon eine Brücke zu einem noch unbekannten Original geschlagen werden (vgl. Sumfleth & Kleine, 1996). Dabei müssen die Lernenden die Analogien zwischen Modellexperiment und Original wahrnehmen, verstehen und die Grenzen des Modellexperiments einschätzen.

Um den Umgang mit Modellexperimenten im Detail zu erheben und gleichzeitig schulische Implikationen abzuleiten, wurde in dieser Studie der Fokus auf ein Modellexperiment gelegt, das einen Unterrichtsbezug aufweist.

### 7.1 Wahrnehmung

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie deuten darauf hin, dass Lernenden Aufbauten gezeigt werden sollten, die helfen, Aufmerksamkeit auf die relevanten und fundamentalen Teile eines Experiments zu legen. Gleichzeitig sollte besonders bei schnellen Prozessen beachtet werden, dass die Beobachtung aller wichtigen Informationen zum relevanten Zeitpunkt durch die Geschwindigkeit nicht erschwert wird.

Damit die Wahrnehmung besonders bei diesen schnellen naturwissenschaftlichen Prozessen unterstützt werden kann, können digitale Lernwerkzeuge eingesetzt werden. Beispielsweise kann der Prozess als Zeitlupenaufnahme präsentiert werden, um die Wahrnehmung zu den relevanten Zeitpunkten auf die wichtigen Informationen zu steuern. Darüber hinaus können interaktive Videos eingesetzt werden. Der Vorteil interaktiver Videos ist, dass die Schüler\*innen selbst die Geschwindigkeit steuern und so oft stoppen und zurückgehen können, bis sie alle relevanten Informationen wahrnehmen konnten (vgl. Schwan & Riempp, 2004).

Darüber hinaus kann das Blickverhalten der Lernenden auf verschiedene Arten auf die relevanten Informationen gelenkt werden. Eine mögliche Lenkung haben Boucheix & Lowe (2010) über Pfeile bzw. Highlights geprüft. Jedoch haben sie herausgefunden, dass die Pfeile ein derart hohes Maß an Aufmerksamkeit auf sich zogen, da sie von den betrachtenden Personen häufig zuerst betrachtet wurden. Erst im Anschluss haben die Personen dann den Bereich betrachtet, auf den über den Pfeil der Blick gelenkt werden sollte. Eine weitere Modifikationsmöglichkeit von Videos zur Unterstützung der Aufmerksamkeit auf relevante Informationen schlagen Jarodzka et al. (2013) vor. Sie nutzten die Augenbewegungen eines Experiments und

projizierten diese mit Hilfe von Spotlights in ein Video. So konnten die Blickbewegungen eines\* einer Lernenden auf die zu einem bestimmten Zeitpunkt relevanten Informationen gelenkt werden.

### 7.2 Denken in Analogien

Analogien sind sehr komplexe Konstrukte. Sie können in Lehr-Lern-Kontexten als Lernhilfen eingesetzt werden. Dabei fördern sie das Lernen, wenn sie wirksam eingesetzt werden. Besonders hilfreich sind sie nach Duit (1992, S. 247), um den Lernenden schwere und abstrakte Begrifflichkeiten verständlich zu machen. Jedoch können sie gleichzeitig auch das Lernen behindern und Fehlkonzepte hervorrufen. Daher werden sie in der Literatur auch als doppelschneidiges Schwert bezeichnet („double-edged sword“, Duit & Glynn, 1995; Glynn, 2008). Aus diesem Grund sollten Analogien im Lehr-Lern-Kontext nur eingesetzt werden, wenn sie vorab von den Lehrkräften reflektiert wurden und Nutzen sowie Risiken abgewägt wurden (vgl. Glynn, 2008, S. 118). Damit Lehrkräfte diese Reflexion zielorientiert durchführen können, sollten Lehrende über das effektive Nutzen von Analogien in Lehr-Lern-Prozessen – als Teil des pädagogischen Inhaltswissens – Bescheid wissen (vgl. ebd.).

Weiter zeigen die Ergebnisse der vorliegenden, empirischen Arbeit trotz der in Abschnitt 6 beschriebenen Limitationen Implikationen für die Anwendung von Analogien zum Einsatz im Chemieunterricht – einem schulischen Lehr-Lern-Kontext. Es zeigt sich, dass die Denkprozesse von Schüler\*innen sehr individuell sind. Daher würden die Schüler\*innen besonders von unterschiedlich konzipiertem Unterrichtsmaterial profitieren. Jedoch fällt auf, dass schon Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe die relevanten Objekte, strukturellen Attribute und Relationen bewusst nennen können und damit als relevant für einen Vergleich zwischen Modellexperiment und Original erkennen. Damit dieses Erkennen möglich ist, müssen die Schüler\*innen vorab sowohl das Modellexperiment als Analogiebereich als auch das Original als Zielbereich (rudimentär) kennengelernt haben. Dieses Kennenlernen von Modellexperiment und Original ist in zwei aufeinander folgenden Schritten im Konzept *Unterrichten mit Analogien* in Anlehnung an das Teaching-With-Analogies-Modell von Glynn (vgl. Glynn, 2008; Toschka & Sommer, 2019) enthalten. Das Konzept dient als Strukturierungshilfe, um das Denken in Analogien besonders effektiv und systematisch im Unterricht einzuführen. Mit diesem Schritt-für-Schritt-Vorgehen kann zum einen die Arbeit mit Analogien im Unterricht strukturiert werden. Es mag deshalb für die Planung von Unterricht genutzt werden. Zum anderen dient es den Schüler\*innen als themenunabhängige Handlungsanweisung für die eigenständige Arbeit mit Analogien.

*„In einer Getreidemühle der Stadt Bremen hat sich im Jahre 1979 eine schwere Explosion ereignet, welche große Teile des Gebäudes vollständig zerstörte. In dieser Mühle wurden unter anderem Weizenkörner zu Weizenmehl verarbeitet. Als Grund für den Unfall konnte einige Zeit später ein Kabelbrand identifiziert werden.“*

- 1) Der obere Text schildert einen realen Unfall. Lies ihn dir sorgfältig durch.
- 2) Dieser Text enthält Begriffe, die den Begriffen des abgebildeten Experiments zugeordnet werden können. Schreibe die entsprechenden Begriffe auf die nummerierten Linien. (**Hinweis:** Es lassen sich nicht alle Begriffe zuordnen).

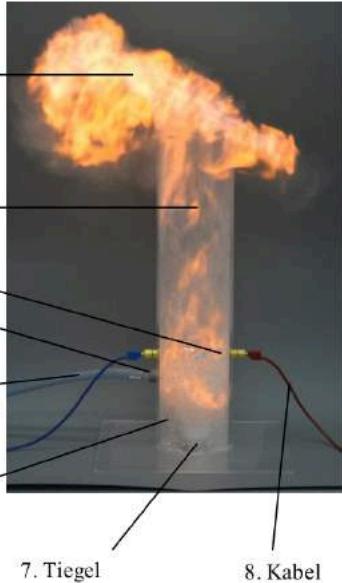
<b>Experiment:</b>  <ul style="list-style-type: none"> <li>1. Schnelle Verbrennung</li> <li>2. Plexiglasrohr</li> <li>3. Glühwendel</li> <li>4. Stopfen mit Loch</li> <li>5. Luftpumpe mit Schlauch und Glasrohr</li> <li>6. Weizenmehl</li> <li>7. Tiegel</li> <li>8. Kabel</li> </ul>	<b>Sachverhalt:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>1. _____</li> <li>2. _____</li> <li>3. _____</li> <li>4. _____</li> <li>5. _____</li> <li>6. _____</li> <li>7. _____</li> <li>8. _____</li> </ul>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Abbildung 89: Zuordnungsaufgabe Modellexperiment „Mehlstaubexplosion“ (vgl. Steff, 2015).

Um das Erkennen von relevanten und irrelevanten Elementen eines Modellexperiments für einen Analogievergleich zu einem Original zu unterstützen, kann ein Lehrmaterial unterschiedlich gestaltet werden. Ein vorstrukturiertes Lehrmaterial, welches die relevanten und irrelevanten Bestandteile zwischen Modellexperiment und Original auf inhaltlicher Ebene thematisiert, wird im Folgenden beispielhaft erläutert. Als Beispiel dient hier das in der vorliegenden Arbeit genutzte Lehrmaterial zur Staubexplosion (Abbildung 89), das wie folgt in dem Unterricht eingesetzt werden könnte:

Zunächst führen die Lernenden das Modellexperiment selbstständig durch. Anschließend wird den Lernenden in Textform ein zugehöriges Original, beispielsweise die Mehlstaubexplosion der Bremer Rolandmühle, präsentiert. Auf dessen Basis kann wie in Abbildung 89 dargestellt, die Reflexion ausgewählter Bestandteile begünstigt werden, in dem auf diesem Arbeitsblatt einzelne Bestandteile des Modellexperiments markiert sind. Im Hinblick für das Eintreten einer Staubexplosion

und somit auch für die Analogiebildung ist es für die Lernenden wichtig, zwischen relevanten und irrelevanten Bestandteilen zu unterscheiden. Relevant sind die Begriffe Plexiglasrohr, Glühwendel, Luftpumpe, Weizenmehl und schnelle Verbrennung. Um den Analogiebildungsprozess zu unterstützen sollen in der Aufgabe zu diesen Bestandteilen die Begriffe aus dem Text zugeordnet werden. Dabei fällt auf, dass nicht zu allen aufgeführten Bestandteilen ein analoger Bestandteil im Text explizit genannt wird.

Die Zuordnungsaufgabe (vgl. Abbildung 89) wurde in der Studie von Steff (2015) eingesetzt, an der 212 Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe teilgenommen haben. Dabei wurden die relevanten analogen Bestandteile und Chemikalien *Plexiglasrohr* (75,9 %), *Glühwendel* (74,1 %) und *Weizenmehl* (90,1 %) und der Prozess der *schnellen Verbrennung* von mehr als zwei Dritteln der Schüler\*innen erkannt. Zu den anderen Bestandteilen *Stopfen mit Loch*, *Luftpumpe mit Schlauch und Glasrohr*, *Tiegel* und *Kabel* wurden von den Schüler\*innen keine zugehörigen analogen Bestandteile im Original zugewiesen. Anknüpfend an diese Schwierigkeiten bei der Zuordnung bestimmter einzelner Bestandteile kann mit den Lernenden thematisiert werden, dass die Existenz einzelner Analoga schwer erkennbar sein kann sowie nicht zu allen Bestandteilen eines modellierten Sachverhaltes Analoga im Original existieren müssen. Denn häufig werden im Sinne von Steinbuch (1977) irrelevante Zutaten wie Stativmaterial und Klebematerial benötigt, um einen originalen Sachverhalt zu modellieren. Sie weisen jedoch bezüglich des Originals keine Abbildungsfunktion auf. Somit kann mit den Lernenden anhand dieser Zuordnungsaufgabe und insbesondere der Bestimmung von relevanten Merkmalen des Originals bewertet werden, welche Aussagekraft der Analogiebereich hat und wo die Grenzen liegen.

Weiterhin könnte das Aufgabenmaterial erweitert werden. Zum einen könnten die im Aufgabenbogen thematisierten reinen Bestandteile des experimentellen Aufbaus durch einzelne Prozessschritte während der Explosion ergänzt werden. Zum anderen könnte die Eigenständigkeit der Schüler\*innen, die aufgrund der vorliegenden Ergebnisse gegeben ist, durch ein noch offener gestaltetes Material erhöht werden. Eine weitere Möglichkeit für ein Lehrmaterial, mithilfe dessen neben den Bestandteilen auch relevante Eigenschaften und Prozessschritte betrachtet werden können, ist in Abbildung 90 dargestellt. Dort sind keine Bestandteile des Modellexperiments vorgegeben. Die Schüler\*innen müssen selbstständig überlegen, welche Bestandteile und Prozesse relevant sind.

Gleichzeitig gibt diese Variante aber auch die Möglichkeit, dass die Schüler\*innen orientiert an den Analogiearten relevante Eigenschaften (z.B. die Brennbarkeit des Stoffes) sowie Beziehungen zwischen verschiedenen Elementen (Staub-Luft-Gemisch) identifizieren und auflisten können. Des Weiteren führen die Ergebnisse

der folgenden Arbeit dazu, dass die Position des Modellexperiments und des Originals beispielsweise in Tabellen (siehe Abbildung 90) variiert werden könnte, um den Fokus der Schüler\*innen, welche nur einen Bereich beschreiben, auch auf den jeweils anderen Bereich zu lenken, da solche Tabellen aufgrund der Leserichtung von links nach rechts betrachtet werden.

Schaut euch das Modellexperiment zur Staubexplosion ganz genau an. Anhand der folgenden Kriterien sollt ihr beurteilen, warum es sich um ein Modellexperiment handelt und welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen dem Modellexperiment und dem Original\* existieren.

- Wird bei dem Modellexperiment eine typische experimentelle Tätigkeit durchgeführt, die euch aus dem Chemieunterricht bekannt ist? Notiert diese experimentelle Tätigkeit.
- 
- 

- Gibt es ein Original zu dem Modellexperiment?

Original: \_\_\_\_\_

Falls ja, notiert es und vergleicht die einzelnen Bestandteile, Eigenschaften und Beziehungen untereinander.

Original		Modellexperiment
	entspricht	

- Bewertet, wie gut das Modellexperiment zur Erklärung des Originals ist. Notiert dazu Vorteile und Grenzen des Modellexperiments.

---



---



---



---

\**Zusatzinformationen zum Original:* „In der Getreidemühle der Stadt Bremen hat sich im Jahre 1979 eine schwere Explosion ereignet, welche große Teile des Gebäudes vollständig zerstörte. In dieser Mühle wurden unter anderem Weizenkörner zu Weizengrundmehl verarbeitet. Als Grund für den Unfall konnte einige Zeit später ein Kabelbrand identifiziert werden.“

Abbildung 90: Analogiebetrachtung am Beispiel des Modellexperiments „Staubexplosion“ mit erhöhter Eigenständigkeit.

## 7 Schulische Implikationen

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

### 8.1 Zusammenfassung

Die Gewinnung von Erkenntnissen über chemische Sachverhalte und Prozesse (Originale), die in der Natur oder Industrie vorkommen, ist für den naturwissenschaftlichen Unterricht zentral. Jedoch sind diese Originale für Lernende häufig nicht direkt zugänglich. Daher werden insbesondere für schwer zugängliche Originale (allgemein: Bereiche) häufig Analogien zu anderen Bereichen, welche weniger komplex und den Lernenden vertrauter oder sogar bereits bekannt sind, hergestellt (vgl. Duit, Roth, Komorek & Wilbers, 2001). Häufig werden dazu Modellexperimente eingesetzt. Somit ist der Umgang mit Modellexperimenten ein wichtiger Bestandteil der naturwissenschaftlichen Grundbildung (vgl. MSW NRW, 2008). Dabei haben u.a. das Vorwissen, die bekannten rudimentären Informationen zum Original sowie die Wahrnehmung des Modellexperiments einen signifikanten Einfluss auf die Lernwirksamkeit einer Analogie (vgl. Mayer, 1996).

#### *Grundlagen und Stand der Forschung*

Das dieser Arbeit zugrundeliegende theoretische Konstrukt basiert auf Theorien, Modellen und empirischen Erkenntnissen der Chemie- und Naturwissenschaftsdidaktik sowie der Kognitions- und Neurowissenschaft (vgl. Abschnitt 2). Dabei liegen die Schwerpunkte thematisch auf:

- (a) dem Denken in Analogien bei vorgegeben Analogie- und Zielbereichen (vgl. Abschnitt 2.1),
- (b) Modellexperimenten als Analogiebereiche zu Originalen (vgl. Abschnitte 2.2 & 2.3) und
- (c) der visuellen Wahrnehmung von dynamischen Prozessen wie beispielsweise Modellexperimenten (vgl. Abschnitt 2.4).

Für das **Denken in Analogien** wurde in der vorliegenden Arbeit insbesondere das Modell des Analogiedenkprozesses (vgl. Abbildung 2, Falkenhainer et al., 1989; Kalogerakis, 2010) und das Teaching-with-Analogies Modell betrachtet (vgl. Glynn, 2008; Toschka & Sommer, 2019). Damit ein erfolgreicher Transfer von Erkenntnissen beim Denken in Analogien möglich ist, ist besonders das Betrachten von strukturellen Attributen und Relationen relevant (vgl. Kleine, 1998). Es gibt allerdings bisher kaum Studien, die das detaillierte Denkverhalten beim Umgang mit Analogien auf der Mikroebene betrachtet haben (vgl. u.a. Wilbers, 2000; Kleine, 1998; Paatz, 2002; Klein, Piacente-Cimini & Williams, 2007). Die vorhandenen Studien

deuten darauf hin, dass die Aussagen von Lernenden während des Denkprozesses an Vernetzung und Komplexität zunehmen und charakteristische Schritte beim analogieorientierten Lernen identifiziert werden können (vgl. Kleine, 1998; Paatz, 2002; Klein, Piacente-Cimini & Williams, 2007).

**Modellexperimente** weisen aufgrund ihrer Genese Analogien zu einem originalen Phänomen auf (vgl. Sommer et al., 2017). Insbesondere stellen sie einen Analogiebereich dar. Dabei können sie irrelevante und relevante Merkmale beinhalten (vgl. Steinbuch, 1977). Allerdings gibt es bisher kaum Studien zum Prozess des Erkenntnisgewinns beim Umgang mit Modellexperimenten. Empirische Erkenntnisse zu der Wirksamkeit von Modellexperimenten heben hervor, dass eine erhöhte Ähnlichkeit in den Oberflächenmerkmalen von Modellsubstanzen zur Originalsubstanz einen spontanen Abruf unterstützen (vgl. Steff, 2015; Sommer, Toschka, Steff & Wirth, 2019).

Neben dem Denken in Analogien und die Verwendung von Modellexperimenten im naturwissenschaftlichen Unterricht ist die visuelle Wahrnehmung der Modellexperimente ein zentraler Aspekt dieser Arbeit. Insgesamt ist die **visuelle Wahrnehmung** eines Reizes (beispielsweise eines Modellexperiments) ein komplexer, dynamischer Prozess, der das Produkt aus der Informationsaufnahme und -verarbeitung bildet (vgl. Becker-Carus & Wendt, 2017). Welche Informationen von einem betrachtenden Subjekt aus der Vielzahl an Reizen als relevant angesehen, wahrgenommen, verarbeitet und im Gedächtnis gespeichert werden, wird durch die Aufmerksamkeit gesteuert (vgl. Gnoyke, 1997), insbesondere durch das Vorwissen sowie der Salienz (Auffälligkeit) bestimmter Reize eines präsentierten Stimulus (vgl. Wolfe & Horowitz, 2017). Um die Wahrnehmung auf der Ebene der Gestaltung eines Experiments als Stimulus zu unterstützen, hat Schmidkunz (1983) die von Metzger 1953 entwickelten Gesetze des Sehens auf die Gestaltung von Demonstrationsexperimenten übertragen. Dabei stellen vor allem dynamische Stimuli besondere Anforderungen an das betrachtende Subjekt. Für die Wahrnehmung dynamischer Prozesse gilt, dass das betrachtende Subjekt zu einem ganz bestimmten Zeitpunkt (dem richtigen) seine Aufmerksamkeit auf die relevanten Informationen legen muss, um diese aufnehmen zu können. Daran schließt die Entwicklung eines korrekten mentalen Modells des Prozesses an, das dann für weitere Denk- und Lernprozesse zur Verfügung steht (vgl. Arnheim, 1972). Diese mentalen Modelle bilden die Grundlage für das Verstehen und Lernen eines gesehenen Prozesses (vgl. Zacks et al., 2007). In bisherigen fachdidaktischen Studien wurde jedoch nur selten ein direkter Zusammenhang zwischen Blickbewegungen und Lernerfolg untersucht (vgl. Madsen et al., 2012; Susac et al., 2017; Klein, Küchemann & Kuhn, 2020).

### ***Zielsetzung der Arbeit und Forschungsfragen***

Mithilfe der vorliegenden Arbeit sollte das Lernverhalten von Lernenden beim Umgang mit vorgegebenen Modellexperimenten untersucht werden. Dabei sollten vor allem Erkenntnisse über die Wahrnehmung, den genauen zeitlichen Ablauf des individuellen Prozesses des Denkens in Analogien, den Zusammenhang zwischen Wahrnehmung und Denken in Analogien sowie den Lernerfolg beim Umgang mit Modellexperimenten anhand einer empirischen Untersuchung gewonnen werden. Als Untersuchungsgenstand diente das Modellexperiment zur Staubexplosion in der Low Cost-Hartmann Apparatur (vgl. Schröder et al., 2015a; 2015b; Steff et al., 2016). Folgende Ziele wurden dazu mit untergeordneten Forschungsfragen gestellt (detaillierte Darstellung vgl. Abschnitt 3):

- I. Identifizierung des Vorwissens zu den Bedingungen für das Auftreten einer Staubexplosion
- II. Identifizierung der Informationsaufnahmeprozesse beim Betrachten eines Modellexperiments zur Staubexplosion und der Ergebnisse einer ersten Verarbeitung dieser Informationen
- III. Identifizierung von Denkmustern beim Umgang mit Modellexperimenten während des Denkens in Analogien
- IV. Identifizierung eines Zusammenhangs zwischen der Wahrnehmung und den Denkmustern während des Denkens in Analogien beim Umgang mit Modellexperimenten
- V. Identifizierung des Wissenszuwachs über die Bedingungen für eine Staubexplosion infolge der Intervention

### ***Methode***

Die Studie, welche insgesamt in zwei Teilstudien differenziert werden kann (vgl. Tabelle 16, Abschnitt 4.4), ist in Form eines Mixed-Methods-Ansatzes konzipiert. Dabei wurden verschiedene Datenformate, textanalytische und statistische Methoden, miteinander kombiniert und verknüpfend interpretiert (vgl. Abschnitt 4.3, Creswell, 2014, S. 219–223). Dieser Ansatz war zielführend, da aufgrund der geringen empirischen Grundlage für Studien zur Wahrnehmung und zum Denken in Analogien beim Umgang mit Modellexperimenten keine a priori-Hypothesen entwickelt werden konnten.

Die Stichprobe (vgl. Abschnitt 4.4) wurde aufgrund der Ziele der vorliegenden Arbeit in zwei Stichprobengruppen (Schüler\*innenexperimente-Gruppe, Video-Gruppe) aufgeteilt. Die Video-Gruppe (Teilstudie zur Wahrnehmung) umfasste N = 31 Probanden (Alter(MEAN) = 12,71 Jahre, SD = 0,64, weiblich = 64,5 %, männlich = 35,5 %). An der Teilstudie zum Denken in Analogien

(Schüler\*innenexperimente-Gruppe, Video-Gruppe) nahmen insgesamt N = 90 Schüler\*innen (Alter(MEAN) = 12,46 Jahre, SD = 0,57, weiblich = 44,4 %, männlich = 54,4 %) teil. Die Probanden wurden im Rahmen einer Tagesintervention mit dem Namen *Feuer(löschen)* im *Schülerlabor* im Alfried Krupp-Schülerlabor der Ruhr-Universität Bochum nach Verfügbarkeit rekrutiert. Die Teilnahme war freiwillig und die Probanden und ihre Erziehungsberechtigten wurden über die Erhebung und Verwendung der Daten aufgeklärt. Die Daten wurden anonymisiert behandelt.

Die Daten wurden von 2017 bis 2019 erhoben. Die Datenerhebung (vgl. Abschnitt 4.3, Abbildung 10) erfolgte mit fünf Testinstrumenten. Zunächst wurde das Vorwissen der Probanden zu den Themen Verbrennung und Explosionen mithilfe eines Fragebogens (*Fragebogen\_Vorwissen*, vgl. Abschnitt 4.3.1, Anhang 12.3) mit offenen und geschlossenen Testitems erhoben.

Mithilfe der Eye-Tracking Methodik wurden Daten zur Aufnahme der Informationen während des Betrachtens eines Videos, in dem das Modellexperiment zur Staubexplosion in der LC-HA präsentiert wurde, erfasst (*Video\_Informationsaufnahme*, vgl. Abschnitt 4.3.2).

Die Verarbeitung des Modellexperiments, konkret die Beobachtung und Auswertung, wurde mithilfe eines experimentellen Versuchsprotokolls, das semi-strukturiert war, erhoben (*Versuchsprotokoll\_Verarbeitung*, vgl. Abschnitt 4.3.3). Zur Erhebung weiterer, detaillierter Daten zur Verarbeitung des gesehenen Modellexperiments und gleichzeitig zur Legitimation der Eye-Tracking Blickdaten wurden dazu Daten anhand eines Fragebogens mit geschlossenem Antwortformat erhoben (*Fragebogen\_Verarbeitung*, vgl. Abschnitt 4.3.3). Die Items des Fragebogens wurden auf der Basis der zentralen Beobachtungen des experimentellen Explosionsprozesses und den Bedingungen für das Eintreten einer Staubexplosion, die im Explosionspentagon (Abbildung 5) zusammengefasst sind, entwickelt und validiert (vgl. Abschnitt 4.3.3.1).

Das Denken in Analogien im Anschluss an die Durchführung bzw. videographische Betrachtung des Modellexperiments und dem dazu analogen Original (Mehlstaubexplosion in der Bremer Rolandmühle) in Textform wurde anhand eines Aufgabenleitfadens erhoben (*Aufgabenleitfaden\_Analogiedenken*, vgl. Abschnitt 4.3.4). Der Aufgabenleitfaden wurde auf der Basis von bestehenden Items und der Literatur zum Denken in Analogien entwickelt und validiert (vgl. u.a. Falkenhainer et al., 1989; Vosniadou & Ortony, 1989; Klein, Piacente-Cimini & Williams, 2007; Totschka & Sommer, 2020). Die artikulierten Gedanken während des Denkens in Analogien beim Mapping und der Anwendung der Erkenntnisse aus dem Mapping auf ein neues Original wurden audiographiert (Laut-Denk Protokolle). Zudem wurde

das allgemeine Wissen zur Explosion innerhalb des Aufgabenleitfadens als Post-Test erhoben.

Die Daten wurden mit verschiedenen Verfahren analysiert (vgl. Abschnitt 4.5; Abbildung 91). Das Vorwissen der Probanden zum Pre-Testzeitpunkt (*Fragebogen\_Vorwissen*) wurden qualitativ ausgewertet. Dabei wurde sich an dem Kategoriensystem *Explosion* von Steff (2015) orientiert und auf die veränderten Inhalte angepasst sowie durch Musterlösungen zu weiteren Items ergänzt (siehe Anhang 12.4). Dieses Auswertungsinstrument wurde auch zur Auswertung des Post-Tests verwendet.

Für die Blickbewegungsanalyse im Zusammenhang mit der Informationsaufnahme beim Betrachten des Modellexperiments (*Video\_Informationsaufnahme*) wurden zunächst die Fixationen (minimale Fixationsdauer: 50 ms) und Sakkaden mit einem Sakkadenerkennungsalgorithmus von SR Research ermittelt (vgl. Tatler, 2007, S. 3). Auf Basis von sechs definierten Areas of Interest (vgl. Abbildung 21) wurden die Standard-Augenbewegungsvariablen *Fixationsanzahl*, *Fixationsdauer* und *Zeit bis zur ersten Fixation* berechnet und für die weitere Analyse verwendet.

Konstrukte	Instrumente	Auswertungsmethoden mit eingesetzter Software
Vorwissen	Fragebogen_Vorwissen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kodierung der soziodemographische Daten</li> <li>▪ Auswertung mittels eines Erwartungshorizontes zu den Themengebieten Brände, Brandbekämpfung und der Explosion im Speziellen</li> </ul> <b>SPSS</b>
Wahrnehmung	Video_Informationsaufnahme Versuchsprotokoll_Verarbeitung Fragebogen_Verarbeitung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Auswertung mittels eines Algorithmus</li> <li>▪ Auswertung mittels eines Erwartungshorizontes</li> <li>▪ Auswertung mittels eines Erwartungshorizontes</li> </ul> <b>SPSS</b>
Denken in Analogien	Aufgabenleitfaden_Analogiedenken	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Deduktive qualitative Inhaltsanalyse der Analogieoperationen inkl. -arten</li> <li>▪ Zusammenfassende inhaltliche Analyse orientiert an dem Erwartungshorizont zur Explosion</li> </ul> <b>Max QDA</b>
Wahrnehmung & Denken in Analogien	Video_Informationsaufnahme; Fragebogen_Verarbeitung; Aufgabenleitfaden_Analogiedenken	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Statistische Analysen der vorab ausgewerteten Daten</li> </ul> <b>SPSS</b>
Wissenszuwachs	Fragebogen_Vorwissen; Aufgabenleitfaden_Analogiedenken	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Auswertung mittels eines Erwartungshorizontes zur Explosion (Post-Test analog zum Pre-Test)</li> </ul> <b>Max QDA</b>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Darstellung mittels Denkgraphen</li> <li>▪ Excel-Skript</li> <li>▪ Typisierung der Denkprozesse</li> <li>▪ Weitere Analysen</li> </ul> <b>SPSS</b>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ SPSS</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Weitere statistische Analysen (Pre- &amp; Post-Test)</li> </ul> <b>SPSS</b>

Abbildung 91: Übersicht der Datenauswertungsinstrumente mit softwarebezogenen Datenauswertungsschritten und der Zugehörigkeit zu den einzelnen Konstrukten (entspricht Abbildung 34).

Das *Versuchsprotokoll\_Verarbeitung* wurde qualitativ anhand eines Erwartungshorizontes mit Bewertungsschlüssel ausgewertet. Die Items im *Fragebogen\_Verarbeitung* wurden anhand eines Erwartungshorizontes mitsamt Bewertungsschlüssel im Zusammenhang mit den drei thematischen und videobasierten Bereichen (1) beschrifteter Versuchsaufbau, (2) Modellexperiment ohne Substanz und (3) Modellexperiment mit Substanz ausgewertet.

Die Laut-Denk Protokolle wurden transkribiert und mittels zusammenfassender deduktiver qualitativer Inhaltsanalyse analysiert (vgl. Mayring, 2010). Dazu wurden

Kategoriensysteme auf Basis der Literatur zum Denken in Analogien entwickelt (Abschnitt 4.3.4.3; Toschka & Sommer, 2020). Die fünf Kategoriensysteme umfassen die fünf Analogieoperationen, Beschreibung des Originals, Beschreibung des Modellexperiments, abbildende Beschreibung  $O \rightarrow M$ , abbildende Beschreibung  $M \rightarrow O$  und richtungsunabhängige abbildende Beschreibung  $O \leftrightarrow M$ . Für jede dieser Analogieoperationen wurden jeweils in einem Kategoriensystem die vier Analogiearten (Objekt, oberflächliches und strukturelles Attribut sowie Relation) als Ebenen genutzt. Die Audioaufnahmen wurden transkribiert und mittels qualitativer Inhaltsanalyse kodiert/analysiert. Die Kodierungen wurde anschließend mittels eines Excel-Skripts in Denkgraphen überführt. Sie dienten dazu, die Denkstruktur zu typisieren (vgl. Lehesvuori et al., 2013; Stripel, 2017). Damit konnten die Denkwege der Probanden beim Denken in Analogien am Gegenstand *Staubexplosion* auf der Makroebene (Abfolge der Analogieoperationen innerhalb des gesamten Denkprozesses), Mesoebene (Analogiearten innerhalb der einzelnen Analogieoperationen) und Mikroebene (inhaltlicher Fokus einzelner Phrasen) beschrieben werden. Dabei wurden die fachlichen Inhalte in Bezug auf die Bedingungen, die eine Staubexplosion kennzeichnen, mittels induktiver qualitativer Inhaltsanalyse erfasst (vgl. Mayring, 2010).

Im Hinblick auf Ziel IV (Forschungsfrage 6, vgl. Abschnitt 4.5) wurden die einzelnen Variablen zur Informationsaufnahme und -verarbeitung ausgewählt und explorativ auf Zusammenhänge mit ausgewählten, die Denkwege während des Mappings kennzeichnenden, Variablen (Anzahl inhaltsrelevanter Phrasen, Anzahl genutzter Analogieoperationen, einzelne am Explosionskonzept orientierte Inhalte) getestet.

Das methodische Vorgehen wurde ausführlich in Abschnitt 6.2 diskutiert.

### **Ergebnisse**

#### **I. Identifizierung des Vorwissens zu den Bedingungen für das Auftreten einer Staubexplosion (vgl. Abschnitt 5.1)**

Die Analyse des Vorwissenstests (Pre-Test) im Hinblick auf das Wissen zu Verbrennungen und Explosionen zeigt, dass die Schüler\*innen hauptsächlich ( $n = 72$ , 68,6 %) keine bis lediglich sehr undifferenzierte Beispiele für das Eintreten einer Explosion nennen (vgl. Tabelle 20, Zeile 2). Trotzdem konnten 70,5 % aller Schüler\*innen ( $n = 74$ ) ein überdurchschnittliches Ergebnis in Bezug auf die Einschätzung der Explosivität von zehn vorgegebenen Stoffen vorweisen. Von den sechs **explosiven** Stoffen (Betonstaub, Mehlstaub, Schwarzpulver, Benzindampf, Erdgas und Oldampf) wurden vier Stoffe (Schwarzpulver, Benzindampf, Erdgas, Oldampf) von der Mehrheit der Schüler\*innen richtig erkannt. Nicht als explosiv beurteilt und

damit nicht richtig erkannt wurden dabei die Stoffe Mehlstaub und Betonstaub. Dabei fiel auf, dass gasförmige Stoffe (Ausnahme Wasserdampf) von der Mehrheit der Schüler\*innen als explosiv beurteilt werden, feste Stoffe mit der Ausnahme von Schwarzpulver hingegen als nicht explosiv einstuft werden.

## **II. Identifizierung der Informationsaufnahmeprozesse beim Betrachten eines Modellexperiments zur Staubexplosion und der Ergebnisse einer ersten Verarbeitung dieser Informationen (vgl. Abschnitt 5.2)**

Während der Präsentation des *Modellexperiments* wurden zwei für den Prozess der Explosion relevante Bereiche (Glühwendel und Glastiegel) aus der Mitte zu Beginn der dritten Video-Sequenz sowie am häufigsten und längsten betrachtet (vgl. Abbildung 43, Abbildung 44 und Abbildung 45). Anschließend wurden die Stromquelle und Luftpumpe betrachtet (Zeit bis zur ersten Fixation, Fixationsanzahl und Fixationsdauer). Weniger häufig und lang wurde der mittlere Bereich des Plexiglasrohres sowie der Deckel betrachtet. Im Mittel wurde von den Schüler\*innen 0-mal in den Bereich des Deckels des Plexiglasrohres (AOI\_1) geblickt (Median = 0). Wenn der Bereich des Deckels betrachtet wurde, dann zum ersten Mal nach 30 s. Sodass erst nach dem Abklingen der Flamme einzelne Schüler\*innen in den mittleren und oberen Bereich des Plexiglasrohres blickten.

Der **Stoff als reagierende Substanz, das Aufglühen bzw. Aufleuchten der Glühwendel und die Aufwirbelung** wurden von den Schüler\*innen am häufigsten korrekt beobachtet. Das führte gleichzeitig dazu, dass die Eigenschaften des Stoffes (Brennbarkeit und hoher Zerteilungsgrad) in der Auswertung besser erklärt werden konnten. Im Zusammenhang mit dem Vorliegen von **Sauerstoff als Reaktionspartner** und der **Funktion der Luftpumpe zur Aufwirbelung** im Versuchsprotokoll von 72,2 % (bzgl. Sauerstoff) bzw. 75 % (bzgl. Luftpumpe) konnten keine erschließbaren Aussagen getroffen werden. Auch das Item zur Entstehung des Staub-Luft-Gemischs wurde seltener korrekt beantwortet ( $M = 0,33$ ,  $SD = 0,32$ ). Zudem wurde die Öffnung des Deckels weniger häufig beobachtet, korrekt verarbeitet und ausgewertet, vor allem, je länger der Bereich mit dem Glastiegel fixiert wird.

## **III. Identifizierung von Denkmustern beim Umgang mit Modellexperimenten während des Denkens in Analogien (vgl. Abschnitt 5.3)**

Auf der Makroebene nutzten die Schüler\*innen mehr Analogieoperationen beim Mapping (eine bis fünf Analogieoperationen) als bei der Anwendung (eine bis drei Analogieoperationen). Der Schwerpunkt lag auf einer bzw. zwei Analogieoperationen (vgl. Abschnitt 5.3.1 & Abschnitt 5.3.3). Wurde während des Mappings *eine Analogieoperation oder zwei beschreibende Analogieoperationen* innerhalb der Denkwege

genutzt, so wurde unabhängig von der Präsentationsform nahezu ausschließlich die **Beschreibung des Originals** von den Schüler\*innen thematisiert ( $nv = 10$ , 90,9 %;  $nse = 18$ , 85,7 %). Beim Nutzen von mehr als einer Analogieoperation wurden **Beschreibungen und abbildende Beschreibungen** miteinander verknüpft. Dabei nahm die **Präsenz des Modellexperiments** in den Denkwegen zu. Auf der Messoebene konnte identifiziert werden, dass nur sehr wenige Schüler\*innen **oberflächliche Attribute** nannten. Die Denkwege der Schüler\*innen der SE-Gruppe begannen hauptsächlich mit der Nennung eines **Objektes** ( $nse = 23$ , 46,0 %; vgl. Abbildung 65), die Denkwege der V-Gruppe am zweithäufigsten ( $nv = 13$ , 41,9 %). Diese Nennung der Objekte wurde häufig weitergeführt, sodass eine **Kette von genannten Objekten** entstand (vgl. Abbildung 65, oberster Arm). Jedoch folgten darauf auch häufig die Nennungen von **strukturellen Attributen und Relationen**. In der **Mikroebene** der Denkwege, d.h. der Ebene des konkreten Inhaltes bezogen auf das dem Modellexperiment zugrundeliegende Explosionspentagon, haben 29,4 % der Schüler\*innen der V-Gruppe und 18,2 % der Schüler\*innen der SE-Gruppe mehr als die Hälfte der Bedingungen des Explosionspentagons genannt. Am häufigsten wurden die Objekte *Stoff*, *Zündquelle*, die Attribute *Zerteilungsgrad* im Zusammenhang mit dem Stoff sowie die *Energie der Zündquelle* und als Relationen *Aufwirbelung* und *Entzündung* wiedergegeben. Das **Oxidationsmittel** (Luft bzw. Sauerstoff) wird als Objekt während des Mappings lediglich von wenigen Schüler\*innen (6,7 %) genannt.

#### IV. Identifizierung eines Zusammenhangs zwischen der Wahrnehmung und den Denkmustern während des Denkens in Analogien beim Umgang mit Modellexperimenten (vgl. Abschnitt 5.4)

In der Studie konnte gezeigt werden, dass die **Aufnahme und Verarbeitung von Informationen** während der experimentellen Prozesse (Vorversuch, Modellexperiment) das *Mapping* in Teilen beeinflusst. Ausgehend vom Explosionspentagon wurden während des Mappings umso mehr kennzeichnende Bedingungen des Explosionsprozesses genannt, je häufiger während des *Vorversuchs* der Bereich um die Glühwendel ( $r = -.412^*$ ,  $p = .029$ ) und je häufiger ( $r = -.596^{**}$ ,  $p = .001$ ) sowie länger ( $r = .416^*$ ,  $p = .028$ ) der Bereich um die Luftpumpe fixiert wurden. Zudem scheinen die Denkprozesse durch die Betrachtung der für den reinen phänomenologisch wahrnehmbaren Prozess irrelevanten Bereiche (Stromquelle, Luftpumpe) während des *Modellexperiments* beeinflusst zu werden. Je länger die sogenannten irrelevanten Bereiche Stromquelle und Luftpumpe und je später die Luftpumpe fixiert wurden, umso mehr inhaltsrelevante Phrasen wurden während des Denkprozesses genannt (vgl. Tabelle 36). Im Zusammenhang mit der Verarbeitung wurden einzelne Bedingungen (u.a. Energie der Zündquelle) während des Mappings häufiger genannt,

wenn das Modellexperiment mit den explosionsrelevanten Aspekten besser ausgewertet wurde (vgl. Tabelle 37).

## V. Identifizierung des Wissenszuwachs über die Bedingungen für eine Staubexplosion infolge der Intervention (vgl. Abschnitt 5.5)

Die Gesamtleistungen beider Probandengruppen bezüglich der einzelnen Bedingungen für das Eintreten einer Staubexplosion waren im Post-Test signifikant höher als im Pre-Test (Wilcoxon-Test:  $z = -4.943$ ,  $p = .000$ ,  $n = 105$ ,  $r = .48$ ) und wiesen nach Cohen (1988, S. 80) eine mittlere Effektstärke auf ( $r = .48$ ).

Die steigende Tendenz der Gesamtleistung konnte ebenfalls bei der Betrachtung der fünf einzelnen Bedingungen, die für das Eintreten einer Staubexplosion relevant sind, deskriptiv identifiziert werden. So nannten die Schüler\*innen im Pre-Test größtenteils Aussagen, die in den Kategorien *Brennbarer Stoff/Brennstoff* und *Zündquelle* eingeordnet werden konnten. Im Post-Test nahmen die Häufigkeiten der Nennungen des *Brennbaren Stoffs/Brennstoffs* und der *Zündquelle* weiter zu. Die Leistungen bezogen auf die Bedingungen *Brennbarer Stoff* (Median<sub>Pre</sub> = 0; Median<sub>Post</sub> = 1) und *Oxidationsmittel* (Median<sub>Pre</sub> = 0; Median<sub>Post</sub> = 0) sind jeweils nach der Intervention signifikant höher als zum Pre-Test Zeitpunkt (asymptotischer Wilcoxon-Test:  $z_{Brennstoff} = -4.106$ ,  $z_{Oxidationsmittel} = -4.382$ ,  $p = .000$ ,  $n = 104$ ). Die Effektstärken nach Cohen (1988) liegen jeweils bei  $r > .40$  und entsprechen daher einem mittleren Effekt.

### Diskussion

Die Ergebnisse legen eine Reihe von Implikationen nahe, die ausführlich in Abschnitt 6.1 diskutiert werden. Insgesamt führt die Beschäftigung mit einem Modellexperiment und dem Denken in Analogien zu einem Wissenszuwachs (vgl. Abschnitt 5.5).

Die Ergebnisse zur **Wahrnehmung** unterstützen die Erkenntnisse anderer Studien im Zusammenhang mit Versuchsaufbauten. So liegt auch beim Betrachten des Modellexperiments eine erhöhte Aufmerksamkeit auf den relevanten Bereichen des Modellexperiments (vgl. Nehring & Busch, 2017). Jedoch legen die Schüler\*innen ihre Aufmerksamkeit auch auf die für die Wahrnehmung des reinen experimentellen Phänomens irrelevanten Bereiche. Diese Betrachtung der relevanten und irrelevanten Bereiche kann zum einen in der Durchführung des Modellexperiments begründet sein, für die diese Bereiche wichtige Durchführungsschritte beinhalten. Zum anderen können die irrelevanten Bereiche Informationen bereitstellen, die Assoziationen hervorrufen (konkret im Zusammenhang mit der Luftpumpe –

Aufwirbelung und Stromquelle – Strom/Wärme). Dies könnte die Ausbildung eines komplexeren und vernetzteren mentalen Modells fördern.

Weiterhin ist zu beachten, dass relevante Beobachtungen bei Modellexperimenten teilweise auch nur eingeschränkt möglich sein können. So wird z.B. die Öffnung des Klappdeckels durch den Explosionsprozess aufgrund der Schnelligkeit des Experiments und gleichzeitig auftretender, prägnanterer visueller Effekte (z. B. Flammenausbreitung) nicht wahrgenommen und damit auch nicht korrekt verarbeitet (vgl. Abbildung 47; Steff, 2015; Hilfert-Rüppel & Sieve, 2017). Diese Annahme von Steff (2015) und Hilfert-Rüppel & Sieve (2017) konnte somit innerhalb dieser Studie mit konkreten Daten belegt werden. Um schwer erkennbare, relevante Beobachtungen bei dynamischen Prozessen zu unterstützen, könnte die Wahrnehmung z.B. durch Highlights (farbliche Hervorhebung des Deckels) und Zeitlupenaufnahmen unterstützt werden (vgl. Jarodzka et al., 2013).

Die Ergebnisse zum Verhalten der Schüler\*innen während des **Denkens in Analogien** beim Umgang mit Modellexperimenten implizieren zunächst die Fähigkeit, Analogien zwischen Modellexperiment und Original zu erkennen und zu nutzen (vgl. Abschnitt 5.3). Dabei kann das Mapping auch beim Umgang mit Modellexperimenten als ein symmetrischer Prozess angesehen werden. Somit bilden sowohl das Modellexperiment als auch das Original einen Ausgangspunkt des Ähnlichkeitsvergleiches. Dies kann Studien zufolge zu einem tiefergehenderen Verständnis beider Bereiche führen (vgl. Kurtz et al., 2001, S. 418; Kleine, 1998; Wilbers, 2000).

Auf der Mesoebene konnte anhand der Denkgraphen gezeigt werden, dass die Schüler\*innen am häufigsten konkret an das Gesehene durch die Nennung eines Objekts (Substanz, Materialien) anknüpfen. Über den weiteren Verlauf des Denkprozesses nehmen die Aussagen der Schüler\*innen an Vernetzung und Komplexität zu (vgl. Kleine, 1998; Klein, Piacente-Cimini & Williams, 2007). Zusätzlich fällt im Zusammenhang mit den Modellexperimenten als Analogiebereich für ein Original auf, dass die Komplexität **nicht immer** vom Objekt über ein Attribut zu einer Relation ansteigt: so folgt ein Objekt am häufigsten auf ein strukturelles Attribut als Ausgangspunkt und an eine Relation knüpft ein strukturelles Attribut an.

Dabei werden die bereits (beispielsweise im Mapping) als relevant erkannten Inhalte (Bedingungen für eine Staubexplosion) auch häufig in der abschließenden Beschreibung des Originals und bei der Anwendung auf ein neues Original wiederholt verwendet.

Insgesamt gilt zu bedenken, dass die Ergebnisse dieser Studie einigen Limitationen unterliegen (vgl. Abschnitt 6.2). So wurde die Stichprobe nach der Verfügbarkeit von Schüler\*innen gebildet und nicht durch eine Zufallsstichprobe, wodurch eine

verbesserte Grundlage für eine Generalisierung der gebildeten Interpretationen möglich gewesen wäre (vgl. Krathwohl, 2009, S. 179). Im Zusammenhang mit der Analyse der Wahrnehmung ermöglichte die Verwendung eines stationären Eye-Trackers einerseits eine hohe Datenqualität und die Erkennung von generellen Wahrnehmungsmustern bei der Betrachtung des durchgeführten Modellexperiments. Andererseits lassen diese Daten keinen direkten Rückschluss auf die Wahrnehmung beim selbstständigen Experimentieren zu, welches durch weitere Variablen (Experimentierfähigkeit, Beobachtungsfähigkeit) beeinflusst werden kann. Daher wurden komplementär zum Eye-Tracking Daten zum Verständnis des Modellexperiments mittels Fragebögen und Versuchsprotokollen erhoben.

Für die Erhebung des Denkens in Analogien hat sich die Methode *Lautes Denken* als geeignet erwiesen, um unbeeinflusst die Denkwege beim Denken in Analogien zu generieren, obwohl bei dieser Methode immer bedacht werden muss, dass nicht zwangsläufig alle Gedanken artikuliert werden. Weiterhin wurde für das dabei verwendete Kategoriensysteme eine gute Interkoderreliabilität  $> 0,8$  erreicht (vgl. Abschnitt 4.3.4.3). Die aus der vorliegenden Studie ableitbaren Implikationen für schulische Lehr-Lern-Prozesse sind in Abschnitt 7 vorgestellt.

## 8.2 Ausblick

In der vorliegenden Arbeit konnte im Zusammenhang mit Modellexperimenten ein erster Zugang zur Wahrnehmung von experimentellen und dynamischen chemischen Prozessen durch Blickbewegungsmessung erfolgen und gleichzeitig die konkreten Prozesse beim Denken in Analogien erhoben werden. Aus den in dieser Arbeit erhaltenen Ergebnissen sowie den methodischen Weiterentwicklungen ergeben sich vielseitige Anknüpfungspunkte für weitere interessante Forschungsfragen und somit Forschungsvorhaben. Diese zielen auf eine Vertiefung der Erkenntnisse über die Wahrnehmung von experimentellen Prozessen sowie den Prozess des Denkens in Analogien ab.

### **Wahrnehmung**

Aufgrund der Dreigliedrigkeit des Videos (Versuchsaufbau, Experiment ohne Substanz, Experiment mit Substanz) gibt es insgesamt drei Bausteine, die weiter erforscht werden können. Zunächst stellt sich die Frage, wie stark die Art einer Durchführung (hier: Demonstrationsexperiment aus der Ich-Perspektive in Videoform) von Modellexperimenten die Wahrnehmung eines experimentellen Prozesses beeinflusst. So kann z.B. zwischen digitalen Inhalten (in Form von Videos oder Virtual Reality) und realen Experimenten unterschieden werden. Um solche Daten zur Wahrnehmung beim Betrachten eines Demonstrationsexperiments in einer realen

Lernumgebung oder beim eigenständigen Experimentieren zu ermöglichen, könnten mobile Eye-Tracking Systeme eingesetzt werden. Damit wird die Frage bearbeitbar, inwieweit sich die Wahrnehmung in Abhängigkeit von der Präsentationsform (Video, Demonstrationsexperiment oder Schüler\*innenexperiment) eines Modell-experiments unterscheidet.

Insbesondere digitalen Lernwerkzeuge sollen seit dem Digitalpakt stärkeren Eingang in den Unterricht finden und haben im Zusammenhang mit dem digitalen Lernen in Krisenzeiten (z.B. Covid-19-Pandemie) an Relevanz gewonnen. Durch den Einsatz digitaler Medien gibt es verschiedene Möglichkeiten, mit denen beispielsweise ein Video verändert werden kann, um die Wahrnehmung (beispielsweise der Öffnung des Klappdeckels) gegebenenfalls zu unterstützen. Eine Unterstützungsmöglichkeit könnte eine gezielte Instruktion oder visuelle Aufmerksamkeitslenkung darstellen. In der Literatur gibt es verschiedene Möglichkeiten der Lenkung, wie z.B. ergänzende auditive Stimuli, das Setzen von visuellen Markern (Highlights) oder auch Spotlights, welchen die Blickbewegungen von Experten zugrunde liegen (vgl. Jarodzka et al., 2013). Es stellt sich jedoch die Frage, ob diese Möglichkeiten der Aufmerksamkeitslenkung einen lernförderlichen Einfluss beim Betrachten von dynamischen Prozessen haben. Dieser Frage könnte durch gezieltes Einsetzen einer Möglichkeit der Aufmerksamkeitslenkung mithilfe eines Kontrollgruppendesigns nachgegangen werden. Ein weiterer interessanter und zukünftig relevanter Aspekt ist die Einführung von Virtual Reality und somit die Verwendung virtueller 3D-Umgebung als weitere Präsentationsform für Modellexperimente. Dabei kann der Frage nachgegangen werden, inwieweit die relevanten Informationen einer drei-dimensionalen Projektion aufgenommen und verarbeitet werden.

Neben der Art der Präsentationsform muss bedacht werden, dass bei schnellen dynamischen Prozessen – wie bei der Staubexplosion – die Wahrnehmung der einzelnen Stimuli im besonderen Maße erschwert ist. Um die Wahrnehmung von schnellen dynamischen Prozessen zu erleichtern, wird in der Literatur vorgeschlagen, die Aufmerksamkeit von Lernenden über die Änderung der Geschwindigkeit zu lenken (vgl. Hilfert-Rüppel & Sieve, 2017; Voßkühler, 2010). Ob die Reduktion der Geschwindigkeit einen Einfluss auf die Informationsaufnahme und -verarbeitung – besonders bei schnellen dynamischen Prozessen – hat, war bisher nicht empirisch ausreichend geklärt. In einer weiteren Teilstudie von Toschka, Renker und Sommer (unveröffentlicht) wurde dieser Frage mithilfe eines Kontrollgruppendesigns nachgegangen. Bei der Variation der Variable *Geschwindigkeit der Präsentation des Modell-experiments* konnte gezeigt werden, dass Schüler\*innen, die das Video in Normalgeschwindigkeit sahen, signifikant länger und öfter auf irrelevante Bereiche, wie die Stromquelle, sahen als Schüler\*innen, die das Video in Zeitlupe sahen. Zudem

wurden in der Zeitlupen-Bedingung signifikant länger die für das Verständnis der Explosion relevante Bereiche (Glühwendel und Deckel/Flamme) betrachtet als in der Bedingung *Normalgeschwindigkeit*. Gleichzeitig zeigt sich, dass die Zeitlupengruppe detailliertere und geordnetere Aussagen zu der Beobachtung und Auswertung getroffen hat. Somit unterstützt die Betrachtung des Modellexperiments in Zeitlupe die detailliertere Erkennung des gesamten Ablaufs des schnellen Prozesses (vgl. Just & Carpenter, 1984: Eye-Mind-Hypothese – Blicke ermöglichen Einblicke in mentale Prozesse).

Darüber hinaus könnte auch das Individuum näher in den Blickpunkt gerückt werden. So könnte weiter die Frage bearbeitet werden, ob die Blickpfade beim Wahrnehmen eines Modellexperiments expertiesabhängig sind oder ob es einen Zusammenhang zwischen dem Fähigkeitsselbstkonzept und dem Betrachten von Experimenten gibt. Solche Analysen würden Aufschluss darüber geben, in wie fern die Präsentation von Modellexperimenten zum weiteren Wissenserwerb an eine bereits erlernten Expertise optimal angepasst werden müsste.

### ***Denken in Analogien***

Im Bereich des Denkens in Analogien war es möglich, innerhalb dieser Arbeit die individuellen Denkwege von Schüler\*innen der siebten Jahrgangsstufe während des Denkens in Analogien beim Umgang mit Modellexperimenten zu visualisieren. Um diese Denkwege zu visualisieren, war es notwendig, zielgerichtet und theoriegestützt ein Kategoriensystem zu entwickeln, mit dem die zeitliche Abfolge der Analogieoperationen und -arten dargestellt werden konnte. Zusätzlich zu dieser Weiterentwicklung wurden die Denkwegen mithilfe von Denkgraphen visualisiert, wie sie bei Strippel (2017) erstmals in der Chemiedidaktik zur Modellierung von Kommunikationen während des Experimentierens zum Einsatz gekommen sind. Auf Basis dieser Visualisierung konnte identifiziert werden, welche Ähnlichkeiten die Schüler\*innen während des Denkens in Analogien nennen. Zusätzlich zu den Ähnlichkeiten, auf denen von den Schüler\*innen selbstständig der Schwerpunkt gelegt wurde, wäre es zudem interessant, Erkenntnisse über die von den Schüler\*innen festgestellten Unterschiede zu erhalten. Davon haben die Schüler\*innen während des Vergleiches lediglich wenige von sich aus genannt.

Auf Basis der Staubexplosion als konkretem Gegenstand wäre es darüber hinaus wissenswert, ob unterschiedliche Substanzen den Prozess des Denkens in Analogien beeinflussen. Möglich wäre, dass der Einsatz von Mehl als Originalsubstanz beim Modellexperiment zur Mehilstaubexplosion zu weniger abstrakten Prozessen während des Denkens in Analogien führen könnte als Substanzen, die im

Zusammenhang mit der Substanz weniger Oberflächenähnlichkeiten zum Original aufweisen (analog zu den Ergebnissen von Steff, 2015).

Weiterhin könnten andere Modellexperimente als Untersuchungsgegenstand eingesetzt werden, um die Denkprozesse von Schüler\*innen anhand des jeweiligen Modellexperiments zu analysieren. Dabei könnten Zusammenhänge zwischen der Art des betrachteten Modellexperiments und dem Denken in Analogien identifiziert werden. Zum Beispiel könnte der Modellierungsgrad des Modellexperiments – wie stark das Modellexperiment im Vergleich zum Original modelliert ist und wie hoch der Anteil ähnlicher und unterschiedlicher Elemente ist - variiert werden (vgl. Abschnitt 2.2.2). So könnte herausgefunden werden, ob das Nutzen verschiedener Analogieoperationen und Analogiearten vom Modellierungsgrad abhängt.

Auch können sich an die erhaltenen Ergebnisse weitere, allgemeinere Fragen anknüpfen. Zum Beispiel konnte in verschiedenen Studien gezeigt werden, dass die Generierung und Nutzung von Analogien abhängig von dem vorhandenen Vorwissen ist (vgl. Brown & Kane, 1988; Haider, 2010). Nun stellt sich im Zusammenhang mit Modellexperimenten die Frage, inwieweit konkrete Elemente des Vorwissens einen Einfluss auf die erkannten Elemente während des Denkens in Analogien bzw. ihre Abfolge haben. Dabei könnte ein unterschiedliches Alter der Probanden sowie unterschiedliche Vorerfahrungen zu unterschiedlichen Arten von Denkprozessen führen. Gleichzeitig wäre es interessant zu analysieren, ob es zu einer Veränderung bzw. Weiterentwicklung der Denkprozesse im Verlauf der Schullaufbahn kommt und ob diese Weiterentwicklung lediglich vom Vorwissen oder auch der Reflexionskompetenz abhängt.

Weiter können Verknüpfungen zwischen der Erhebung der Wahrnehmung und dem Denken in Analogien hergestellt werden. Anknüpfend an die aufmerksamkeitslenkenden Optionen wie Zeitlupenvideos, welche zu einer detaillierteren Wahrnehmung führen, wäre es interessant, ob eine solche detailliertere Wahrnehmung auch einen Einfluss auf den Vergleich zwischen Modellexperiment und Original – den Prozess des Denkens in Analogien – hat.

Insgesamt geht es bei den hier aufgeführten Fragen immer darum, Erkenntnisse über den Prozess des Denkens in Analogien und dessen Einflussfaktoren zu erhalten, um den Lernprozess der Lernenden zu verstehen und gezielt unterstützen bzw. verbessern zu können. Daher könnten abschließend, um den direkten Effekt von Interventionen auf den Prozess des Denkens in Analogien zu messen, Methoden zur Steuerung von Denkprozessen beim Denken in Analogien evaluiert werden.

Trotz – oder gerade wegen – dieser offenen und anknüpfenden Fragen kann diese Arbeit als ein erster Schritt gesehen werden, um die Wahrnehmung und die

detaillierten und individuellen Denkprozesse von Schüler\*innen beim Denken in Analogien während des Umgangs mit Modellexperimenten tiefergehend zu untersuchen, um daran anknüpfend die Wahrnehmung und das Denken in Analogien in Lehr-Lern-Prozessen individuell zu unterstützen und zu verbessern.



## 9 Literaturverzeichnis

- Altmann, G. T. M. (2004). Language-mediated eye movements in the absence of a visual world: The “blank screen paradigm”. *Cognition*, 93, 79–87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cognition.2004.02.005>.
- Amyotte, P. R. (2014). Some myths and realities about dust explosions. *Process Safety and Environmental Protection*, 92 (4), 292–299.
- Amyotte, P. R. & Eckhoff, R. K. (2010). Dust explosion causation, prevention and mitigation. An overview. *Journal of Chemical Health and Safety*, 17 (1), 15–28. DOI: 10.1016/j.jchas.2009.05.002.
- Anderson, J. R. (1983). A Spreading Activation Theory of Memory. *Journal of verbal learning and verbal Behavior*, 22, 261–295.
- Anderson, J. R., Bothell, D. & Douglass, S. (2004). Eye Movements Do Not Reflect Retrieval Processes: Limits of the Eye-Mind Hypothesis. *Psychol. Sci.*, 15, 225–231.
- Arnheim, R. (1972). *Anschauliches Denken: zur Einheit von Bild und Begriff*. Köln: Du Mont-Verlag.
- Artelt, C. & Wirth, J. (2014). Kognition und Metakognition. In T. Seidel & A. Krapp (Hrsg.), *Pädagogische Psychologie* (S. 167–192). Weinheim, Basel: Beltz Verlag.
- Atkinson, R. C. & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: a proposed system and its control processes. In K. W. Spence & J. T. Spence (Hrsg.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory*. New York: Academic Press.
- Ayres, P. & Paas, F. (2007). Can the cognitive load approach make instructional animations more effective? *Applied Cognitive Psychology*, 21, 811–820. <http://dx.doi.org/10.1002/acp.1351>.
- Bader, H. J. (2002). Das Experiment im Chemieunterricht. In P. Pfeifer, B. Lutz & H. J. Bader (Hrsg.), *Konkrete Fachdidaktik Chemie* (3. Auflage, S. 292–327). München: Oldenbourg.
- Bader, H. J. & Lühken, A. (2018). Experimente. In K. Sommer, J. Wambach-Laicher & P. Pfeifer (Hrsg.), *Konkrete Fachdidaktik Chemie* (1. Auflage, S. 460–517). Seelze: Aulis in Friedrich.
- Bader, H. J., Lühken, A. & Sommer, K. (2018). Schülerexperimente im Chemieunterricht. In K. Sommer, J. Wambach-Laicher & P. Pfeifer (Hrsg.), *Konkrete Fachdidaktik Chemie* (1. Auflage, S. 479–493). Seelze: Aulis in Friedrich.
- Barke, H.-D. (2006). *Chemiedidaktik. Diagnose und Korrektur von Schülervorstellungen*. (1. Auflage), Springer-Verlag: Berlin.
- Barke, H.-D. & Harsch, G. (2011). *Chemiedidaktik kompakt – Lernprozesse in Theorie und Praxis*. Berlin: Springer.

- Bartknecht, W. (1978).** Explosionen. Ablauf und Schutzmaßnahmen. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Bartknecht, W. & Zwahlen, G. (1993).** Explosionsschutz. Grundlagen und Anwendung. Berlin: Springer.
- Baumert, J., Roeder, P.M., Sang, F. & Schmitz, B. (1986).** Leistungsentwicklung und Ausgleich von Leistungsunterschieden in Gymnasialklassen. *Zeitschrift für Pädagogik*, 32, 639–660.
- Bauer, F. & Richter, V. (1986).** Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung von Analogien und Analogie-Schlüssen. *Physik in der Schule*, 24 (10), 384–389.
- Baur, A. (2018).** Fehler, Fehlkonzepte und spezifische Vorgehensweisen von Schülerinnen und Schülern beim Experimentieren. *ZfDN*, 24, 115–129.
- Bearman, C. R., Ball, L. J. & Ormerod, T.C. (2007).** The structure and function of spontaneous analogizing in domain-based problem solving. *Thinking Reasoning*, 13, 273–294. DOI: 10.1080/13546780600989686.
- Beck, H., Glienke, N. & Möhlmann, C. (1997).** BIA-Report 12/1997 - Brenn- und Explosionskenngrößen von Stäuben. Sankt Augustin: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG).
- Becker-Carus, C. (1979).** Psychophysiologische Methoden. Stuttgart: Enke Verlag.
- Becker-Carus, Ch. & Wendt, M. (2017).** Allgemeine Psychologie: Eine Einführung. Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53006-1>.
- Beller, S. & Bender, A. (2010).** Allgemeine Psychologie – Denken und Sprache. Reihe: Bachelorstudium Psychologie - Band 3. Göttingen: Hogrefe.
- Bender, H. F. (2013).** Das Gefahrstoffbuch. Sicherer Umgang mit Gefahrstoffen nach REACH und GHS (4., vollst. überarb. Auflage). Weinheim, Hoboken, NJ: Wiley-VCH.
- Bente, G. (2004).** Erfassung und Analyse des Blickverhaltens. In R. Mangold, P. Vorderer & G. Bente (Hrsg.), *Lehrbuch der Medienpsychologie* (S. 297–324). Göttingen: Hogrefe.
- Berger, P. & Luckmann, Th. (1977).** Die gesellschaftliche Konstruktion der Wirklichkeit. Eine Theorie der Wissenssoziologie (5. Auflage). Frankfurt am Main: Fischer Verlag.
- Bindernagel, J. A. & Eilks, I. (2009).** Evaluating roadmaps to portray and develop chemistry teachers' PCK about curricular structures concerning sub-microscopic models. Chemistry Education Research and Practice. *Chem. Educ. Res. Pract.*, 10, 77–85.
- Black, D. & Solomon, J. (1987).** Can Pupils Use Taught Analogies for Electric Current? *School Science Review*, 69, 249–254.
- Blake, Ch. (2013).** Eye-Tracking: Grundlagen und Anwendungsfelder. In W. Möhring & D. Schlütz (Hrsg.), *Handbuch standardisierte Erhebungsverfahren in der*

- 
- Kommunikationswissenschaft* (S. 367-387). Wiesbaden: Springer Fachmedien.  
DOI 10.1007/978-3-531-18776-1\_20
- Block, A. (2002).** Die Blickregistrierung als psychophysiologische Untersuchungsmethode. Grundlagen, Anwendung und technische Realisierung. Hamburg: Dr. Kovač Verlag.
- Boehm-Davis, D. A., Gray, W. D. & Schoelles, M. J. (2016).** The eye blink as a physiological indicator of cognitive workload. *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 44(33), 6-116-6-119.
- Bortz, J. & Döring, N. (2006).** Forschungsmethoden und Evaluation (4. Auflage). Heidelberg: Springer.
- Boucheix, J.-M. & Lowe, R. K. (2010).** An eye tracking comparison of external pointing cues and internal continuous cues in learning with complex animation. *Learning and Instruction*, 20, 123-135. <http://dx.doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.015>.
- Brown, A. L. (1989).** Analogical Learning and Transfer: What develops? In S. Vosniadou & A. Ortony (Hrsg.), *Similarity and Analogical Reasoning*. Cambridge: Cambridge University Press, 369-412.
- Brown, A. L. & Kane, M. J. (1988).** Preschool children can learn to transfer: Learning to learn and learning from example. *Cognitive Psychology*, 20, 493-523.
- Buber, R. (2007).** Denke-Laut-Protokolle. In Renate Buber & Hartmut H. Holzmüller (Hrsg.), *Qualitative Marktforschung Konzepte – Methoden – Analysen* (S.557-568). Göttingen: Hogrefe.
- Busker, M. (2014).** Entwicklung eines Fragebogens zur Untersuchungen des Fachinteresses In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 269-281). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Bühl, A. (2010).** PASW. Einführung in die moderne Datenanalyse. München: Pearson Studium.
- Chandler, P. & Sweller, J. (1991).** Cognitive load theory and the format of instruction. *Cognition and Instruction*, 8, 293-332. [http://dx.doi.org/10.1207/s1532690xci0804\\_2](http://dx.doi.org/10.1207/s1532690xci0804_2).
- Chen, X. (2011).** Visuelle Analyse von Eye-Tracking-Daten. *Diplomarbeit*. Universität Stuttgart.
- Clement, J. (1978).** The role of analogy in scientific thinking: Examples from a problem solving interview. University of Massachusetts, Department of Physics and Astronomy.
- Clement, J. (2008).** Methods Experts Use to Evaluate an Analogy Relation. In J. J. Clement, *Creative model construction in scientists and students* (S. 47-56), Dordrecht: Springer.

- Cohen, J. (1960).** A Coefficient of Agreement for nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*, 10 (1), 37–46.
- Cohen, J. (1988).** Statistical power analysis for the behavioural sciences (2nd edition). New York: Academic Press.
- Collin, C. (2008).** *Chemie fürs Leben – neue Unterrichtskonzeptionen für chemische Aspekte im Naturwissenschaftsunterricht in der Orientierungsstufe und für den Chemieanfangsunterricht* (Dissertation). Universität Rostock, Rostock.
- Cresswell, J. W. (2014).** Research design: qualitative, quantitative and mixed methods. Thousand Oaks: Sage.
- Cullipher, S., Hansen, S. J. R. & VandenPlas, J. R. (2018).** Eye tracking as a Research Tool: An Introduction. In J. R. VandenPlas, S. J. R. Hansen, S. Cullipher, *Eye Tracking for the Chemistry Education Researcher* (S. 1-9). Washington, DC: ACS Symposium Series; American Chemical Society.
- Cullipher, S. & Sevian, H. (2015).** Atoms versus Bonds: How Students Look at Spectra. *J. Chem. Educ.*, 92 , 1996–2005.
- Denzin, N. K. (1973).** The Research Act in Sociology: A Theoretical Introduction to Sociological Methods. Piscataway, NJ: Transaction Publishers.
- Deutscher Bildungsrat (1970).** Strukturplan für das Bildungswesen. Stuttgart: Klett.
- Dickerson, R. E. & Geis, I. (1981).** Chemie – eine lebendige und anschauliche Einführung. Weinheim: Verlag Chemie, 321-327.
- DIN EN 14034-3, 2011.** Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen - Teil 3: Bestimmung der unteren Explosionsgrenze UEG von Staub/Luft-Gemischen, zuletzt geprüft am 07.02.2021.
- DIN EN ISO 80079-20-2, 2014.** Explosionsfähige Atmosphären - Werkstoffeigenschaften - Prüfverfahren für brennbare Stäube (Entwurf), zuletzt geprüft am 07.02.2021.
- Dresing, T. & Pehl, T. (2018).** Praxisbuch Interview, Transkription & Analyse. Anleitungen und Regelsysteme für qualitativ Forschende (8. Auflage.) Marburg: Eigenverlag.
- Duchowski, A. (2007).** Eye tracking methodology: Theory and practice. (2nd edition). London: Springer.
- Dudeck, W.-G. (1997).** Analyse von Denkprozessen in einem analogieorientierten Elektrizitätsunterricht: Fallstudie in einer 10. Gymnasialklasse. Aachen: Mainz Verlag.
- Dudenverlag (2021a):** Duden. Attribut, das. Dudenverlag. Online verfügbar unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/Attribut>, zuletzt geprüft am 20.02.2021.

- 
- Dudenverlag (2021b):** Duden. Objekt, das. Dudenverlag. Online verfügbar unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/Objekt>, zuletzt geprüft am 20.02.2021.
- Dudenverlag (2021c):** Duden. Pulver, das. Dudenverlag. Online verfügbar unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/Pulver>, zuletzt geprüft am 20.02.2021.
- Dunker, N. (2010).** Concept Maps im naturwissenschaftlichen Sachunterricht. Oldenburg: Didaktisches Zentrum.
- Duit, R. (1991).** On the Role of Analogies and Metaphors in Learning Science. *Science Education*, 75 (6), 649–672.
- Duit, R. (1992).** Analogien und Lernen naturwissenschaftlicher Begriffe und Prinzipien. In: K. H. Wiebel (Hrsg.), *Zur Didaktik der Physik und Chemie: Probleme und Perspektiven* (S. 247–249). Alsbach: Leuchtturmverlag.
- Duit, R. (1995).** Analogien unter der Lupe. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 27, II–I4.
- Duit, R. & Glynn, S. (1992).** Analogien und Metaphern, Brücken zum Verständnis im schülergerechten Physikunterricht. In P. Häußler (Hrsg.), *Physikunterricht und Menschenbildung* (S. 223–250). Kiel: IPN.
- Duit, R. & Glynn, S. (1995).** Analogien – Brücken zum Verständnis. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 27, 4–10.
- Duit, R., Roth, W.-M., Komorek, M. & Wilbers, J. (2001).** Fostering conceptual change by analogies – between Scylla and Charybdis. *Learning and Instruction*, 11, 283–303.
- Eckhoff, R. K. (2003).** Dust explosions in the process industries (3rd edition). Amsterdam, Boston: Gulf Professional Pub.
- Engelkamp, J. & Zimmer, H. D. (2006).** Lehrbuch der kognitiven Psychologie. Göttingen: Hogrefe.
- Ericsson, K. A. & Simon, H. A. (1980).** Verbal reports as data. *Psychological Review*, 87 (3), 215–251.
- Ericsson, K.A. & Simon, H. A. (1993).** Protocol Analysis. Verbal reports as data. London: MIT Press.
- Falkenhainer, B., Forbus, K. D. & Gentner, D. (1989).** The structure-mapping engine: Algorithm and examples. *Artificial Intelligence*, 41 (1), 1–63.
- Fäth, J., Watzka, B., Girwidz, R. (2013).** Eye-Tracker-Untersuchung zu Gestaltungsprinzipien einer Animation. In S. Bernholz (Hrsg.), *Inquiry-based Learning – Forschendes Lernen. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Jahrestagung in Hannover 2012* (Band 33, S. 746–748). Berlin: Lit Verlag.
- Field, A. (2009).** Discovering Statistics Using SPSS. Los Angeles: Sage Publications.

- Forbus, K. D., Gentner, D. & Law, K. (1994).** MAC/FAC: A model of similarity-based retrieval. *Cognitive Science*, 19, 141–205.
- Funke, J. & Sperling, M. (2006).** Methoden der Denk- und Problemlöseforschung. In J. Funke, *Denken und Problemlösen* (S. 647–744). Göttingen, Bern, Toronto, Seattle: Hogrefe.
- Fuß, S. & Karbach, U. (2019).** Grundlagen der Transkription. Eine praktische Einführung (2. überarbeitete Auflage). Opladen & Toronto: Verlag Barbara Budrich.
- Geise, S. (2011).** Eyetracking in der Kommunikations- und Medienwissenschaft: Theorie, Methode und kritische Reflexion. *SCM Studies in Communication and Media* (Heft 2), 149–263.
- Gentner, D. (1983).** Structure-mapping: A theoretical framework for analogy. *Cognitive Science*, 7, 155–170.
- Gentner, D. (1989).** The mechanisms of analogical learning. In: S. Vosniadou & A. Ortony (Eds.): *Similarity and analogical reasoning*. New York, NY, US: Cambridge University Press, 199–241.
- Gentner, D. & Gentner, D. R. (1983).** Flowing waters and teaming crowds: Mental models of electricity. In D. Gentner & A. Stevens (Hrsg.), *Mental models* (S. 99–129). Hillsdale: Lawrence Erlbaum.
- Gentner, D., Rattermann, M. J. & Forbus, K. D. (1993).** The roles of similarity in transfer: separating retrievability and inferential soundness. *Cognitive Psychology*, 25, 524–575.
- Gessmann, M. (2009).** Philosophisches Wörterbuch. Stuttgart: Alfred Kröner Verlag.
- Giesen, D. (1974).** Untersuchungen über die Funktion der Pause im Vorgang lautendenkens beim Problemlösen (Diplomarbeit). Ruhr-Universität Bochum, Bochum.
- Gläser-Zikuda, M. (2017).** Qualitative Inhaltsanalyse in der medienpädagogischen Forschung - In Th. Knaus (Hrsg.) *Forschungswerkstatt Medienpädagogik. Projekt – Theorie – Methode* (S. 97–123). München: kopaed. URN: urn:nbn:de:hbz:5:170733 - DOI: 10.25526/fw-mp.30
- Glynn, S. (2008).** Making science concepts meaningful to students: teaching with analogies. In S. Mikelskis-Seifert, U. Ringelband & M. Brückmann (Hrsg.), *Four Decades of Research in Science Education – from Curriculum Development to Quality Improvement*. Münster: Waxmann.
- Glynn, S. M., Duit, R. & Thiele, R. B. (1995).** Teaching Science with analogies: A strategy for constructing knowledge. In S. M. Glynn, & R. Duit (1995). *Learning Science in the Schools: Research Reforming Practice*. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.

- 
- Gnoyke, A. (1997).** Das Lernen mit Bildern in der Chemie: Aktion und Interaktion von Wahrnehmen und Denken. Berlin: P. Lang Verlag.
- Godijn, R. & Theeuwes, J. (2003).** The Relationship Between Exogenous and Endogenous Saccades and Attention. In J. Hyönä, R. Radach & H. Deubel (Hrsg.), *The Mind's Eye. Cognitive and Applied Aspects of Eye Movement Research* (S. 3 – 26). Amsterdam: Elsevier.
- Göhner, M. & Krell, M. (2020).** Qualitative Inhaltsanalyse in naturwissenschaftsdidaktischer Forschung unter Berücksichtigung von Gütekriterien: Ein Review. *ZfDN*. <https://doi.org/10.1007/s40573-020-00111-o>.
- Graefe, G. (1979).** Mehlstaubexplosion in Bremen. In Starch, Stärke, 31 (5), S. 145.
- Graf, E. (2002).** Modelle im Chemieunterricht. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 67, 4–9.
- Gruber, T. (2011).** Gedächtnis. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Gutmann, M. (1996).** Die Evolutionstheorie und ihr Gegenstand. Die Evolutionstheorie und ihr Gegenstand: Beitrag der methodischen Philosophie zu einer konstruktiven Theorie der Evolution. Berlin: VWB, Verlag für Wiss. und Bildung.
- Haider, M. (2010).** Der Stellenwert von Analogien für den Erwerb naturwissenschaftlicher Erkenntnisse – Eine Untersuchung im Sachunterricht der Grundschule am Beispiel „Elektrischer Stromkreis“. Bad Heilbrunn: Verlag Julius Klinkhardt.
- Hammoud, R. I. & Mulligan, J. B. (2008).** Introduction to Eye Monitoring. In R. I. Hammoud (Hrsg.), *Passive Eye Monitoring. Algorithms, Applications and Experiments* (S. 1–19). Berlin: Springer.
- Handelsblatt (2012).** Apple lässt Arbeitsbedingungen kontrollieren. Zuletzt abgerufen am 07.02.2021 von <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/elektronik-aus-asien-apple-laesst-arbeitsbedingungen-kontrollieren/6069136.html>.
- Hank, B. (2018).** Schülervorstellungen und Konzeptwandelprozesse. In K. Sommer, J. Wambach-Laicher & P. Pfeifer (Hrsg.), *Konkrete Fachdidaktik Chemie* (S. 217–238). Seelze: Aulis in Friedrich.
- Harrison, A. G. & Treagust, D. F. (1996).** Secondary students' mental models of atoms and molecules: Implications for teaching chemistry. *Science Education*, 80 (5), 509–534. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-237X\(199609\)80:5<509::AID-SCE2>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(199609)80:5<509::AID-SCE2>3.0.CO;2-F)
- Haupt, P. (1984).** Verbrennungs- und Oxidationsvorgänge im Verständnis von Schülern. Köln: Aulis Verlag Deubner.

- Havanki, K. L. (2012).** A Process Model for the Comprehension of Organic Chemistry Notation, The Catholic University of America.
- Havanki, K. L. & VandenPlas, J. R. (2014).** Eye Tracking Methodology for Chemistry Education Research. In D. Bruce et al., *Tools of Chemistry Education Research* (S. 191–218). Washington, DC: American Chemical Society.
- Hegarty, M. (1992).** Mental animation: inferring motion from static displays of mechanical systems. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 18, 1084–1102. <http://dx.doi.org/10.1037/0278-7393.18.5.1084>.
- Heller, K. A. & Perleth, C. (2000).** Kognitiver Fähigkeitstest für 4. bis 12. Klassen, Revision. Göttingen: Beltz.
- Hesse, M. (1966).** Models and analogies in science. Notre Dame: The University of Notre Dame Press.
- Hilfert-Rüppel, D. & Sieve, B. (2017).** Entschleunigen biologischer und chemischer Abläufe durch Zeitlupenaufnahmen. In J. Meßinger-Koppelt, S. Schanze, & J. Groß (Hrsg.), *Lernprozesse mit digitalen Werkzeugen unterstützen. Perspektiven aus der Didaktik naturwissenschaftlicher Fächer* (S. 147–160). Hamburg: Joachim-Herz-Stiftung.
- Hillmayr, D., Reinholt, F., Ziernwald, L. & Reiss, K. (2017).** Digitale Medien im mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht der Sekundarstufe: Einsatzmöglichkeiten, Umsetzung und Wirksamkeit. Münster: Waxmann.
- Hofer, N. & Mayerhofer, W. (2010).** Die Blickregistrierung in der Werbewirkungsforschung: Grundlagen und Ergebnisse. *der markt*, 49, 143 – 169.
- Hoffman, R. R. (1980).** Metaphor in science. In R. P. Honeck & R. R. Hoffman (Hrsg.), *Cognition and figurative language* (S. 393-423). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Hoffman, J. E. & Subramaniam, B. (1995).** The Role of Visual Attention in Saccadic Eye Movements. *Percept. Psychophys.*, 57, 787–795.
- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H. & Van de Weijer, J. (2011).** Eye Tracking: A Comprehensive Guide to Methods and Measures. Lund: Oxford University Press.
- Holyoak, K. J. (1985).** The pragmatics of analogical transfer. In G. Brower (Hrsg.), *The psychological of learning and motivation* (19, S. 59–87), Academic Press.
- Holyoak, K. J. & Koh, K. (1987).** Surface and structural similarity in analogical transfer. *Memory and Cognition*, 15 (4), 332–340.
- Holyoak, K. J. & Thagard, P. (1989).** Analogical Mapping by Constraint Satisfaction. *Cognitive science*, 13 (3), 295–355.
- Holyoak, K. J. & Thagard, P. (1997).** The analogical mind. *American Psychologist*, 52 (1), 35–44. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.52.1.35>

- 
- Högermann, Ch. & Kricke, W. (2013).** Modelle für den Biologieunterricht – Band 2. Aulis-Verlag.
- Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA).** GESTIS-STAUB-EX - Datenbank Brenn- und Explosionskenngrößen von Stäuben. Zuletzt abgerufen am 07.02.2021 von <https://staubex.ifa.dguv.de>.
- iViewX System Manual (2011).** Zuletzt abgerufen am 20.02.2021 von [https://psychologie.unibas.ch/fileadmin/user\\_upload/psychologie/Forschung/N-Lab/SMI\\_iView\\_X\\_Manual.pdf](https://psychologie.unibas.ch/fileadmin/user_upload/psychologie/Forschung/N-Lab/SMI_iView_X_Manual.pdf).
- Jarodzka, H., Van Gog, T., Dorr, M., Scheiter, K. & Gerjets, P. (2013).** Learning to see: Guiding students' attention via a Model's eye movements fosters learning. *Learning and Instruction* 25, 62–70.
- Johnson-Laird, P. N. (2010).** Mental models and human reasoning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107 (43), 18243–18250.
- Johnson, R. B., Onwuegbuzie, A. J. & Turner, L. A. (2007).** Toward a definition of mixed methods research. *Journal of Mixed Methods Research*, 1(2), 112–133. doi: 10/fksqf8.
- Joos, M., Rötting, M. & Velichkovsky, B. M. (2003).** Spezielle Verfahren I: Bewegungen des menschlichen Auges: Fakten, Methoden und innovative Anwendungen. In G. Rickheit, T. Herrmann & W. Deutsch (Hrsg.), *Psycholinguistik. Ein internationales Handbuch* (S. 142 – 168). Berlin: de Gruyter.
- Just, M. A. & Carpenter, P. A. (1976).** Eye fixations and cognitive processes. *Cognitive Psychology*, 8(4), 441-480.
- Just, M. A. & Carpenter, P. A. (1980).** A theory of reading: From eye fixations to comprehension. *Psychological Review*, 87 (4), 329–354.
- Just, M. A. & Carpenter, P. A. (1984).** Using Eye Fixations to Study Reading Comprehension. In D. E. Kieras & M. A. Just, *New Methods in Reading Comprehension Research* (S. 151–182). Hillsdale, New Jersey, London: Lawrence Erlbaum Associates.
- Kakoschke, A. (2018).** Didaktische Prinzipien zur Stoffauswahl und -anordnung. In K. Sommer, J. Wambach-Laicher & P. Pfeifer (Eds.), *Konkrete Fachdidaktik Chemie* (S. 302–319). Seelze: Aulis in Friedrich.
- Kalogerakis, K. (2010).** Innovative Analogien in der Praxis der Produktentwicklung. Wiesbaden: Gabler.
- Karacan, H. & Hayhoe, M. M. (2008).** Is attention drawn to changes in familiar scenes? *Visual Cognition*, 16, 356–374.
- Kattmann, U. (2006).** Modelle. In H. Gropengießer & U. Kattmann (Hrsg.), *Fachdidaktik Biologie* (S. 330–339). Köln: Aulis Deubner.

- Kauffman, C. W. (1982).** Agricultural dust explosions in grain handling facilities. In J. H. S. Lee, C. M. Guirao (Hrsg.), *Fuel-air Explosions*. University of Waterloo Press, Waterloo, Ontario, Canada.
- Kircher, E. (1989).** Analogien im Physikunterricht. In W. Schneider (Hrsg.), *Wege in der Physikdidaktik*. Erlangen: Palm und Enke.
- Kircher, E. (1995).** Studien zur Physikdidaktik. Erkenntnis- und wissenschaftstheoretische Grundlagen. Kiel: IPN.
- Klaetsch, H. (2002).** Die Anwendung der Gestaltgesetze auf den Aufbau von chemischen Experimentapparaturen: Aus der Unterrichtspraxis - für die Unterrichtspraxis. Düsseldorf: Staccato-Verlag.
- Klaus, G. & Buhr, M. (1972).** Philosophisches Wörterbuch, Band 2. Berlin: Verlag des Bibliographischen Instituts.
- Kleine, E. (1998).** Chemie lernen mit Hilfe von Analogien am Beispiel des chemischen Gleichgewicht. Frankfurt: Peter Lang.
- Klein, P., Küchemann, S. & Kuhn, J. (2020).** Diagrammverständnis in verschiedenen Kontexten: Vergleich der Augenbewegungen zwischen Physikern und Nicht-Physikern mittels Eye-Tracking. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Jahrestagung in Wien 2019*, Band 40, (S. 138-141).
- Klein, P. D., Piacente-Cimini, S. & Williams, L. A. (2007).** The role of writing in learning from analogies. *Learning and Instruction*, 17, 595-611.
- Klinger, W. (1987).** Die Rolle der Analogiebildung bei der Deutung physikalischer Phänomene. In W. Kohn (Hrsg.), *Didaktik der Physik. Vorträge der Frühjahrstagung in Berlin 1987* (S. 326–333). Gießen: DPG-Fachausschuss Didaktik der Physik.
- Klos, S., Henke, C., Kieren, C., Walpuski, M. & Sumfleth, E. (2008).** Naturwissenschaftliches Experimentieren und chemisches Fachwissen – zwei verschiedene Kompetenzen. In *Zeitschrift für Pädagogik*, 54 (3), 304–321.
- Konrad, K. (2010).** Lautes Denken. In G. Mey & K. Mruck (Hrsg.), *Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie* (S. 476–490). Wiesbaden: Springer.
- Kracauer, S. (1952).** The challenge of qualitative content analysis. *Public Opinion Quarterly*, 16, 631–642.
- Krathwohl, D. R. (2009).** Methods of educational and social science research (3. Auflage). Long Grove, IL: Waveland Press.
- Krämer, V., Reiners, C. S. & Schumacher, E. (2008).** Zur Bedeutung von Analogien in Lernprozessen. *PdN–Chemie in der Schule*, 57 (7), 36-39.
- Krell, M. (2013).** Wie Schülerinnen und Schüler biologische Modelle verstehen. Erfassung und Beschreibung des Modellverständens von Schülerinnen und

---

Schülern der Sekundarstufe I. BIOLOGIE lernen und lehren, Band 6. Berlin: Logos Verlag.

- Kretz, D. & Krawczyk, D. (2014).** Expert analogy use in a naturalistic setting. *Frontiers in Psychology*, 5, 1–8. DOI: 10.3389/fpsyg.2014.01333.
- Kurtz, K., Miao, C. & Gentner, D. (2001).** Learning by Analogical Bootstrapping. *Journal of the Learning Sciences*, 10 (4), 417–446.
- Lai, M.-L., Tsai, M.-J., Yang, F.-Y., Hsu, C.-Y., Liu, T.-C., Lee, S. W.-Y., et al. (2013).** A review of using eye-tracking technology in exploring learning from 2000 to 2012. *Educational Research Review*, 10, 90–115.
- Lehesvuori, S., Viiri, J., Rasku-Puttonen, H., Moate, J. & Helaakoski, J. (2013).** Visualizing communication structures in science classrooms: Tracing cumulativity in teacher-led whole class discussions. *Journal of Research in Science Teaching*, 50 (8), 912–939. <http://doi.org/10.1002/tea.21100>
- Leven, W. (1991).** Blickverhalten von Konsumenten. Grundlagen, Messung und Anwendung in der Werbeforschung. Heidelberg: Physica.
- Lüer, G. Werner, S. & Lass, U. (1995).** Repräsentation analogen Wissens im Gedächtnis. In D. Dörner (Ed.), *Das Gedächtnis Probleme, Trends, Perspektiven* (S. 75–125). Göttingen: Hogrefe.
- Mackensen-Friedrichs, I. (2004).** Förderung des Expertiseerwerbs durch das Lernen mit Beispielaufgaben im Biologieunterricht der Klasse 9 (Dissertation). Christian-Albrechts-Universität, Kiel.
- Madsen, A. M., Larson, A. M., Loschky, L. C. & Rebello, N. S. (2012).** Differences in visual attention between those who correctly and incorrectly answer physics problems. *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.*, 8, 010122.
- Mahr, B. (2003).** Modellieren. Beobachtungen und Gedanken zur Geschichte des Modellbegriffs. In S. Krämer & H. Bredekamp (Hrsg.), *Bild, Schrift, Zahl* (S. 59–86). München: Wilhelm Fink.
- Mahr, B. (2004).** Das Wissen im Modell. KIT-Report Nr. 150. Berlin: Technische Universität, 1–21.
- Mahr, B. (2008a).** Ein Modell des Modellseins. Ein Beitrag zur Aufklärung des Modellbegriffs. In U. Dirks & E. Knobloch (Hrsg.), *Modelle* (S. 187–218). Frankfurt am Main: Peter Lang
- Mahr, B. (2008b).** Cargo: Zum Verhältnis von Bild und Modell. In I. Reichle (Hrsg.), *Visuelle Modelle* (S. 17–40). München: Fink.
- Mahr, B. (2009).** Die Informatik und die Logik der Modelle. *Informatik Spektrum*, 32(3), 228–249.
- Maljusch, X. (2018).** *Lernwirksamkeit des Modellexperiments: Schülervorstellungen zu explosiven Stoffen und Wahrnehmung der Mehlstaubexplosion* (Masterarbeit), Ruhr-Universität Bochum.

- Martins, I. & Ogborn, J. (1997).** Metaphorical reasoning about genetics. *International Journal of Science Education*, 19 (1), 47–63.
- Mayer, J. (1996).** Learning strategies for making sense out of expository text: the SOI model for guiding three cognitive processes in knowledge construction. *Educational Psychology Review*, 8, 357–371.
- Mayring, P. (2015).** Qualitative Inhaltsanalyse – Grundlagen und Techniken. Weinheim und Basel: Beltz Verlag.
- Mazur, J. E. (2004).** Lernen und Gedächtnis, (5. Aufl.) München: Pearson.
- Menge, S. (1996).** Rekonstruktion und Interpretation von individuellen Lernprozessen unter dem Gesichtspunkt des Transfers bei einzelnen Schülern der Sekundarstufe I im Unterricht zur Elektrizitätslehre. Universität Bremen: Unveröffentlichtes Manuskript.
- Metzger, W. (1953).** Gesetze des Sehens. Frankfurt am Main: Kramer.
- Miller, G. A. (1956).** The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63 (2), 81–97. <http://dx.doi.org/10.1037/h0043158>.
- Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2008).** Kernlehrplan für das Gymnasium – Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen. Frechen: Ritterbach.
- Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2019).** Das Schulwesen in Nordrhein-Westfalen aus quantitativer Sicht 2018/19 – Statistische Übersicht Nr. 404 (1. Auflage). Düsseldorf: MSB.
- Mittelstraß, J. (2016).** Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie. Stuttgart: J.B. Metzler.
- Moses, R. A. (Hrsg.) (1981).** *Adler's Physiology of the eye clinical application* (Kap. 1). Mosby, 1–15.
- Nehring, A. & Busch, S. (2017).** Chemistry Demonstrations and Visual Attention: Does the Setup Matter? Evidence from a Double-Blinded Eye-Tracking Study. *Journal of Chemical Education*, 95 (10), 1724–1735.
- Neuhaus, B. & Braun, E. (2007).** Testkonstruktion und Testanalyse – praktische Tipps für empirisch arbeitende Didaktiker und Schulpraktiker. In H. Bayrhuber, D. Elster, D. Krüger & H. J. Vollmer (Hrsg.), *Forschungen zur Fachdidaktik: Kompetenzentwicklung und Assessment* (S. 135–164). Innsbruck: Studienverlag.
- Neuhäuser, A. (1975).** Modellexperimente und Funktionsmodelle im Unterricht. *Chemie in der Schule*, 12, 538–545.
- Nielsen, J. & Pernice, K. (2010).** Eyetracking Web Usability. Berkeley: New Riders.
- Paatz, R. (2002).** Charakteristika analogiebasierten Denkens – Vergleich von Lernprozessen in Basis- und Zielbereich. Berlin: Logos.

- 
- Petermann, K., Friedrich, J. & Oetken, M. (2008).** „Das an Schülervorstellungen orientierte Unterrichtsverfahren“ – Inhaltliche Auseinandersetzung mit Schülervorstellungen im naturwissenschaftlichen Unterricht. *Chemkon*, 15 (3), 110–118. <https://doi.org/10.1002/ckon.200810074>
- Pfeifer, P., Lutz, B. & Bader, H. J. (2002).** Konkrete Fachdidaktik Chemie (3. Auflage). München: Oldenbourg.
- Pfeifer, P. & Sommer, K. (2018).** Klassifikation von Modellen. In K. Sommer, J. Wambach-Laicher & P. Pfeifer (Hrsg.), *Konkrete Fachdidaktik Chemie*. (1. Auflage, S. 524–527). Seelze: Aulis in Friedrich.
- Pfundt, H. (1981).** Fachsprache und Vorstellungen der Schüler – dargestellt an Beispielen aus dem IPN-Lehrgang „Stoffe und Stoffumbildung“. In R. Duit, W. Jung & H. Pfundt, *Alltagsvorstellungen und naturwissenschaftlicher Unterricht* (S. 161–181). Köln: Aulis Verlag Deubner.
- Pittman, K. & Beth-Halachmy, S. (1997).** The role of prior knowledge in analogy use. (Report No. CS 012 B16). Chicago, IL: Annual Meeting of the American Educational Research Association. (ED 407 658)
- Prieto, T., Watson, R. & Dillon, J. (1992).** Pupils' understanding of combustion. *Research in Science Teaching*, 22, 331–340.
- Proulx, M. J. & Green, M. (2011).** Does apparent size capture attention in visual search? Evidence from the Müller–Lyer illusion. *J. Vis.*, 11, 21.
- Psarros, N. (1999).** Die Chemie und ihre Methoden. Weinheim: Wiley-VCH.
- Rakoczi, G. (2012).** Eye Tracking in Forschung und Lehre. Möglichkeiten und Grenzen eines vielversprechenden Erkenntnismittels. In G. Csanyi, F. Reichl, & A. Steiner (Hrsg.), *Digitale Medien – Werkzeuge für exzellente Forschung und Lehre* (S. 87–98). Münster: Waxmann.
- Rayner, K. (2009).** Eye Movements and Attention in Reading, Scene Perception, and Visual Search. *Q. J. Exp. Psychol.*, 62, 1457–1506.
- Rayner, K., Raney, G. E. & Pollatsek, A. (1995).** Eye Movements and Discourse Processing. In R. F. Lorch & J. E. J. O'Brien (Hrsg.), *Sources of Coherence in Reading* (S. 9–35). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Regenbogen, A. & Meyer, U. (1998).** Wörterbuch der philosophischen Begriffe. Hamburg: Felix Meiner Verlag.
- Renker, J. (2017).** *The influence of mental representations on eye movement patterns under uncertainty* (Doktorarbeit), TU Dortmund Universität
- Riese, J. & Reinhold, P. (2014).** Entwicklung eines Leistungstests für fachdidaktisches Wissen. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 257–267). Berlin, Heidelberg: Springer.

- Rohr, M. & Reimann, P. (1999).** A cognitive model to describe the process of learning the particulate model of matter and its instructional consequences. In M. Komorek, H. Behrendt, H. Dahncke, R. Duit, W. Gräber & A. Kross (Hrsg.), *Research in Science Education Past, Present, and Future*. (Proceedings of the Second International Conference of the European Science Education Research Association (E.S.E.R.A.)). August 31th – September 4<sup>th</sup>, 1999, Kiel, Germany. Zuletzt abgerufen am 20.02.2021 über <https://archiv.ipn.uni-kiel.de/projekte/esera/book/allf.htm>.
- Ross, K. (1991).** Burning - a constructive not a destructice process. *School Science Review* 72 (261), 39–50.
- Rossa, E. (1975).** Methodik Chemieunterricht. Berlin: VEB.
- Rötting, M. (1999).** Typen und Parameter von Augenbewegungen. In M. Rötting & K. Seifert (Hrsg.), *Blickbewegungen in der Mensch-Maschine-Systemtechnik* (S. 1–18). Sinzheim: Pro Universitate.
- Sandkühler, H.-J. (Hrsg.) (1990).** Europäische Enzyklopädie zu Philosophie und Wissenschaften Band 1. Hamburg: Meiner.
- Sandmann, A. (2014).** Lautes Denken – die Analyse von Denk-, Lern- und Problemlöseprozessen. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 179–188). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Scheibe, A.-K., Trittel, M., Klug, J. & Schmitz, B. (2014).** Forschungsmethoden. In T. Seidel, A. Krapp (Hrsg.), *Pädagogische Psychologie* (S. 83–114). Weinheim, Basel: Beltz Verlag.
- Schmidkunz, H. (1983).** Die Gestaltung chemischer Demonstrationsexperimente nach wahrnehmungspsychologischen Erkenntnissen. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 31, 360–367.
- Schmidkunz, H. (2012).** Die chemische Reaktion. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 128, 41–44.
- Schmiermund, T. (2019).** Das Chemiewissen für die Feuerwehr. Frankfurt am Main: Springer Spektrum.
- Schmitz, R. P. (2021).** Trickfilm zur Reaktion von Natrium mit Chlor. Zuletzt abgerufen am 07.02.2021 von [https://www.chemie-interaktiv.net/html5\\_flash/nacl\\_synthese\\_5.html](https://www.chemie-interaktiv.net/html5_flash/nacl_synthese_5.html).
- Schröder, T. P. (2017).** *Validierungsparameter für Schulexperimente – Dargestellt an Modellexperimenten für Industrielle Prüfverfahren* (Dissertation). Ruhr-Universität Bochum, Bochum. Lehrstuhl für Didaktik der Chemie.
- Schröder, T. P., Steff, H. & Sommer, K. (2015a).** Untersuchen wie die Profis – Modellierung von Staubexplosionen mit der Low-Cost-Hartmann-Apparatur. In K. Sommer, J. Lorke, C. Mattiesson (Hrsg.), Publizieren in Zeitschriften für

---

Forschung und Unterrichtspraxis - Ein Element der Wissenschaftskommunikation in den Fachdidaktiken und Bildungswissenschaften. Bad Heilbrunn: Klinkhardt Verlag.

- Schröder, T. P., Steff, H. & Sommer, K. (2015b).** Die Low-Cost-Hartmannapparatur – selbst gebaut – Möglichkeit zur Modellierung und Charakterisierung von Staubexplosionen im Unterricht. *Praxis der Naturwissenschaften – Chemie in der Schule*, 64 (5), 10–13.
- Schwan, S. & Riempp, R. (2004).** The cognitive benefits of interactive videos: learning to tie nautical knots. *Learning and instruction*, 14 (3), 293–305.
- Schwedes, H. (1996a).** Lernen durch Analogiebildung. In *Repräsentation und Bedeutung – Schriftenreihe der Forschergruppe „Interdisziplinäre Kognitionsforschung“* (Hrsg.) Band III, Zusammenfassung des Seminars in Thülsfelde vom 5./6. September 1994, S. 187–210.
- Schwedes, H. (1996b).** Analogieorientierte Elektrizitätslehre als Aufbau mentaler Modelle. In R. Duit & C. v. Rhöneck (Hrsg.), *Lernen in den naturwissenschaftlichen Fächern* (S. 275–382). Kiel: IPN.
- Schwering, A., Krünnack, U., Kühnberger, K. U. & Gust, H. (2009).** Syntactic Principles of Heuristic-Driven Theory Projection. *Journal of Cognitive Systems Research*, 10 (3), 251–269.
- Séré, M.-G. (1986).** Children's conceptions of the gaseous state, prior to teaching. *European Journal of Science Education*, 8 (4), 413–425.
- Sommer, K. (2007).** Die Fachmethoden der Chemie. Anregungen für die Umsetzung des Kompetenzbereiches „Erkenntnisgewinnung“ im Unterricht. Köln: Aulis-Verl. Deubner (Praxis Schriftenreihe Chemie, 58).
- Sommer, K., Steff, H. & Toschka, C. (2018).** Modellexperimente. In K. Sommer, J. Wambach-Laicher & P. Pfeifer (Eds.), *Konkrete Fachdidaktik Chemie* (S. 541–547). Seelze: Aulis in Friedrich.
- Sommer, K., Toschka, C., Schröder, L., Schröder, T. P., Steff, H. & Fischer, R. A. (2017).** Modellexperimente im Chemieunterricht – Ein Beitrag zur Definition des Begriffes Modellexperiment und zur Bestimmung des Modellierungsgrades. *Chemkon*, 24 (1), 13–19. DOI: 10.1002/ckon.201710288
- Sommer, K., Toschka, C., Steff, H. & Wirth, J. (2019).** Oberflächenmerkmale von Modellsubstanzen und ihr Einfluss auf die Bildung von Analogien durch Lernende. *ZfdN*, 25, 259–272. DOI: 10.1007/s40573-019-00104-8.
- Spanjers, I. A. E., Van Gog, T. & Van Merriënboer, J. J. G. (2010).** A theoretical analysis of how segmentation of dynamic visualizations optimizes students' learning. *Educational Psychology Review*, 22, 411–423.
- Spreckelsen, K. (1995).** Analogiebildung als erste Schritte von Schülern auf dem Weg in die Physik. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 27, 30–32.

- Spreckelsen, K. (1997).** Wie Grundschulkinder physikalische Phänomene verstehen. *Grundschule*, 29 (10), 18–19.
- Stachowiak, H. (1973).** Allgemeine Modelltheorie. Berlin: Springer.
- Stachowiak, H. (1983).** Modelle – Konstruktion der Wirklichkeit. München: Wilhelm Fink Verlag.
- Stachura, E. (2010).** Der neurobiologische Konstruktivismus – Welche Konsequenzen haben die Ergebnisse der Hirnforschung für das Selbstverständnis des Menschen? Saarbrücken: Südwestdeutscher Verlag Für Hochschulschriften.
- Stahmer, K. W. & Gerhold, M. (2014).** Brenn- und Explosionskenngrößen von Zuckerstaub. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 74 Nr. 7/8, 279–285.
- Stavy, R. (1990).** Children's conception of changes in the state of matter: from liquid (or solid) to gas. *Journal of Research in Science Teaching*, 27 (3), 247–266.
- Steff, H. (2015).** Untersuchungen über Modellexperimente des Chemieunterrichts – dargestellt am Beispiel der Mehlstaubexplosion (Dissertation). Ruhr-Universität Bochum, Bochum. Lehrstuhl für Didaktik der Chemie.
- Steff, H., Schröder, T. P., Buse, S., Bär, L., Vogel, F., Heller, M. & Sommer, K. (2016).** Indisches Ritual und zeitgemäße Chemielaborantenausbildung – Analytik rund ums Holi-Pulver. *Chemie in unserer Zeit*, 50 (1), 18–25.
- Steffensky, M. (2007).** Verbrennung. Fachdidaktische Informationen. Zuletzt abgerufen am 12.02.2021 von <http://www.supra-lernplattform.de/index.php/lernfeld-natur-und-technik/verbrennung/fachdidaktische-informationen>.
- Steinbuch, K. (1977).** Denken in Modellen. In G. Schaefer (Hrsg.), *Leitthemen. Beiträge zur Didaktik der Naturwissenschaften 2/77. Denken in Modellen* (S. 10–19). Braunschweig: Westermann.
- Stern, J. A., Boyer, D. & Schroeder, D. (1994).** Blink rate: A possible measure of fatigue. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 36(2), 285–297.
- Strippel, Ch. G. (2017).** Naturwissenschaftliche Erkenntnisgewinnung an chemischen Inhalten vermitteln – Konzeption und empirische Untersuchung einer Ausstellung mit Experimentierstation. Berlin: Logos Verlag.
- Strippel Ch. G. & Bohrmann-Linde, C. (2018).** Sprache im Chemieunterricht. In K. Sommer, J. Wambach-Laicher & P. Pfeifer (Eds.), *Konkrete Fachdidaktik Chemie* (S. 239–248). Seelze: Aulis in Friedrich.
- Sumfleth, E. & Kleine, E. (1999).** Analogien im Chemieunterricht – eine Fallstudie am Beispiel des „Balls der einsamen Herzen“. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 5 (3), 39–56.
- Susac, A., Bubic, A., Martinjak, P., Planinic, M. & Palmovic, M. (2017).** Graphical representations of data improve student understanding of measurement and

- 
- uncertainty: An eye-tracking study. *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.*, 13, 020125-1–020125-20.
- Tang, H., Kirk, J. & Pienta, N. J. (2014).** Investigating the Effect of Complexity Factors in Stoichiometry Problems Using Logistic Regression and Eye Tracking. *J. Chem. Educ.*, 91 (7), 969–975.
- Tang, H., & Pienta, N. (2012).** Eye-Tracking Study of Complexity in Gas Law Problems. *Journal of Chemical Education*, 89 (8), 988–994.
- Tashakkori, A. & Teddlie, C. (2010).** Sage handbook of mixed methods in social & behavioral research (2nd edition). Thousand Oaks, CA: Sage Publications.
- Tatler, B. W. (2007).** The central fixation bias in scene viewing: Selecting an optimal viewing position independently of motor biases and image feature distributions. *Journal of Vision*, 7 (14), 1–17.
- Tobii Eyetrackers.** Wie funktioniert Eyetracking? Zuletzt abgerufen am 07.02.2021 von <https://de.tobiidynavox.com/pages/funktioniert-eyetracking>.
- Toczkowski, T. & Ralle, B. (2017).** Von der Komplexität „einfacher“ Experimente. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 70 (2), 76–82.
- Topczewski, J. J., Topczewski, A. M., Tang, H., Kendhammer, L. K. & Pienta, N. J. (2017).** NMR Spectra through the Eyes of a Student: Eye Tracking Applied to NMR Items. *Journal of Chemical Education*, 94 (1), 29–37.
- Toschka, C. & Sommer, K. (2018).** Generierung und Nutzung von Analogien zum Umgang mit Modellexperimenten. In C. Maurer (Hrsg.), *Qualitätsvoller Chemie- und Physikunterricht – normative und empirische Dimensionen* (S. 456–459). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Jahrestagung in Regensburg 2017. Berlin: Lit Verlag.
- Toschka, C. & Sommer, K. (2019).** Analogien erkennen, Analogien nutzen – Verstehen von Analogien als Werkzeug zum Erkenntnisgewinn. *Unterricht Chemie*, 171, 16–23.
- Upmeier zu Belzen, A. & Krüger, D. (2010).** Modellkompetenz im Biologieunterricht. *ZfDN*, 16, 41–57.
- VandenPlas, J. R., Hansen, S. J. R. & Cullipher, S. (2018).** Eye Tracking for the Chemistry Education Researcher. Washington, DC: ACS Symposium Series; American Chemical Society.
- von Ameln, F. (2004).** Konstruktivismus. Tübingen, Basel: A. Francke Verlag.
- Vosniadou, S. & Ortony, A. (1989).** Similarity and analogical reasoning. New York: Cambridge University Press.
- Voßkühler, A. (2010).** Blickbewegungsmessung an Versuchsaufbauten. Studien zur Wahrnehmung, Verarbeitung und Usability von physikbezogenen Experimenten am Bildschirm und in der Realität. In H. Niedderer, H. Fischer, & E.

- Sumfleth (Hrsg.), *Studien zu Physik- und Chemielernen* (vol. 104). Berlin: Logos Verlag.
- Wascher, E., Heppner, H., Möckel, T., Kobald, S. O. & Getzmann, S. (2015).** Eye-blanks in choice response tasks uncover hidden aspects of information processing. *EXCLI journal*, 14, 1207–1218.
- Wasser, H. (2007).** Im Auge des Betrachters. Systemtheoretische Phänomenologie. Refrath bei Köln, 2007.
- Watzka, B., Hoyer, C., Ertl, B., Girwidz, R. (2020).** Wirkung visueller und auditiver Hinweise in Videos zu Wirbelströmen. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Jahrestagung in Wien 2019*, Band 40, 142-145.
- Weerda, J. (1978).** *Begriffe der Chemie und Physik in der Sprache der Kinder und Wissenschaften: Gegenüberstellung der Begriffsbildung; eine empirische Untersuchung* (Dissertation). Frankfurt am Main: Verlag Peter Lang GmbH.
- Wilbers, J. (2000).** Post-festum- und heuristische Analogien im Physikunterricht. – Analogiebasierte Lernprozesse im Bereich des deterministischen Chaos. Kiel: IPN.
- Wilbers, J. & Duit, R. (2001).** Untersuchungen zur Mikro-Struktur des analogischen Denkens in Teaching Experiments. In S. von Aufschnaiter & M. Welzel (Hrsg.), *Nutzung von Videodaten zur Untersuchung von Lehr-Lern-Prozessen* (S. 143-156). Münster: Waxmann.
- Wild, E. & Möller, J. (Hrsg.) (2014).** Pädagogische Psychologie. Heidelberg: Springer.
- Williamson, V. M., Hegarty, M., Deslongchamps, G., Williamson, K. C. & Shultz, M. J. (2013).** Identifying Student Use of Ball-and-Stick Images versus Electrostatic Potential Map Images via Eye Tracking. *J. Chem. Educ.*, 90, 159–164.
- Wirth, J. (2018).** Lernen. In K. Sommer, J. Wambach-Laicher & P. Pfeifer (Eds.), *Konkrete Fachdidaktik Chemie* (S. 186–197). Seelze: Aulis in Friedrich.
- Wirth, J., Thillmann, H., Künsting, J., Fischer, H. E. & Leutner, D. (2008).** Das Schülerexperiment im naturwissenschaftlichen Unterricht. Bedingungen der Lernförderlichkeit einer verbreiteten Lehrmethode aus instruktionspsychologischer Sicht. *Zeitschrift für Pädagogik*, 54 (3), 361–375.
- Wolfe, J. M. & Horowitz, T. S. (2017).** Five factors that guide attention in visual search. *Nature Human Behaviour*, 1, 0058, DOI: 10.1038/s41562-017-0058
- Wünsch, G. (2000).** Einführung in die Philosophie der Chemie. Würzburg: Königshausen und Neumann.
- Yarbus, A. L. (1967).** Eye Movements and Vision. New York: Plenum Press.
- Young, L. R. & Sheena, D. (1975).** Survey of Eye Movement Recording Methods. *Behavior Research Methods*, 7 (5), 397–429.

---

Zacks, J. M., Speer, N. K., Swallow, K. M., Braver, T. S., & Reynolds, J. R. (2007). Event perception: a mind-brain perspective. *Psychological bulletin*, 133 (2), 273.



# 10 Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: ANALOGIERELATION ZWISCHEN ANALOGIE- UND ZIELBEREICH.	3
ABBILDUNG 2: ANALOGIEDENKPROZESS MIT AUSGEHEND VOM ANALOGIEBEREICH AUF DEN ZIELBEREICH TRANSFERIERTEN NEUEN ERKENNTNISSEN (SYMBOLISCH DARGESTELLT ALS SONNE)(VERÄNDERT NACH KALOGERAKIS, 2010).	7
ABBILDUNG 3: STACHOWIAKS ORIGINAL-MODELL-BEZIEHUNG (VERÄNDERT NACH KRELL, 2013 UND ANGELEHNT AN U.A. STACHOWIAK, 1973, S. 155FF.).	17
ABBILDUNG 4: ERGÄNZUNG DER ORIGINAL-MODELL-BEZIEHUNG VON STACHOWIAK (1973) DURCH STEINBUCHS MODELL „DENKEN IN MODELLEN“(1977, S. 11).	19
ABBILDUNG 5: STAUBEXPLOSIONSPENTAGON (VERÄNDERT NACH KAUFFMAN, 1982; AMYOTTE & ECKHOFF, 2010).	23
ABBILDUNG 6: AUFBAU DES MODELLEXPERIMENTS IN DER LC-HA.	26
ABBILDUNG 7: DARSTELLUNG DER KONKREten MERkmale eingeteilt nach objekten (hellgrau), oberflächliche (mittelgrau) und strukturelle attribute (dunkelgrau) und relationen (schwarz), welche die analogie zwischen modellexperiment und original bilden.	33
ABBILDUNG 8: ZYKLISCHE DARSTELLUNG DES Wahrnehmungsprozesses (VERÄNDERT NACH ENGELKAMP & ZIMMER, 2006).	35
ABBILDUNG 9: MAKRO-, MESO- UND MIKROEBENE DER DENKMUSTER.	48
ABBILDUNG 10: ÜBERSICHT DER DATENERHEBUNGSMETHODEN IN ABHÄNGIGKEIT DER ZIELE UND FORSCHUNGSFRAGEN (SE: SCHÜLER*INNEN-EXPERIMENT, V: VIDEO).	52
ABBILDUNG 11: UNTERSUCHUNGSDDESIGN.	54
ABBILDUNG 12: ÜBERSICHT DER DATENERHEBUNGSMETHODEN MIT ZUGEHÖRIGKEIT ZU DEN EINZELNEN KONSTRUKTEN.	58
ABBILDUNG 13: VORWISSENSFRAGEBOGEN – ITEM 6.	61
ABBILDUNG 14: VORWISSENSFRAGEBOGEN – ITEM 7.	61
ABBILDUNG 15: VORWISSENSFRAGEBOGEN – ITEM 8.	62
ABBILDUNG 16: VORWISSENSFRAGEBOGEN – ITEM 1.	62
ABBILDUNG 17: AUFBAU EINES EYETRACKERS (ANGELEHNT AN <a href="https://www.tobiidynavox.de/wie-funktioniert-eyetracking/">https://www.tobiidynavox.de/wie-funktioniert-eyetracking/</a> ).	66
ABBILDUNG 18: SETUP MIT GENUTZTEM EYE-TRACKER DER FIRMA SMI (EIGENES BILD).	70
ABBILDUNG 19: BESCHRIFTETER VERSUCHSAUFBAU (BILD AUS EINEM VIDEO).	72
ABBILDUNG 20: AUFWIRBELUNG UND ENTZÜNDUNG IM BEREICH DER GE SCHWINDIGKEITSREDUZIERUNG (BILDSEQUENZ AUS EINEM VIDEO).	72
ABBILDUNG 21: AREAS OF INTEREST DES VERSUCHSAUFBaus.	74
ABBILDUNG 22: NOTWENDIGE SCHritte BEIM ARBEITEN MIT DER METHODE „LAUTES DENKEN“ UND DEREN UMSETZUNG INNERHALB DER VORLIEGENDEN STUDIE.	84
ABBILDUNG 23: AUFGABENLEITFADEN ZUR BEARBEITUNG MITTELS DER METHODE „LAUTES DENKEN“ UND DEREN ZUORDNUNG ZU DEN VERSCHIEDENEN THEMATISCHEN ABSCHNITTEN.	86
ABBILDUNG 24: DARSTELLUNG DER KONKREten MERkmale eingeteilt nach objekten (hellgrau), oberflächlichen (mittelgrau) und strukturellen attribute (dunkelgrau) und relationen (schwarz), welche die analogie zwischen modellexperiment und original 1 bilden (ENTSPRICHT ABBILDUNG 7).	89
ABBILDUNG 25: BEISPIELHAFTES LAUT-DENK PROTOKOLL MIT KODIERUNGEN IN MAXQDA.	106

## 10 Abbildungsverzeichnis

---

ABBILDUNG 26: VORGEHEN BEI DER VISUALISIERUNG VON KOMMUNIKATIONSGRAPHEN ZUR NATURWISSENSCHAFTLICHEN ERKENNTNISGEWINNUNG (STRIPPEL, 2017). _____	110
ABBILDUNG 27: VORGEHEN BEI DER VISUALISIERUNG DER INHALTSANALYTISCH AUSGEWERTETEN LAUT-DENK PROTOKOLLE IN DENKGRAPHEN IN DER VORLIEGENDEN ARBEIT. _____	110
ABBILDUNG 28: VISUALISIERUNG EINES BEISPIELHAFTEN LAUT-DENK PROTOKOLLS. _____	111
ABBILDUNG 29: REDUZIERTE DARSTELLUNG DER MAKRO-EBENE ANHAND EINES BEISPIELHAFTEN LAUT-DENK PROTOKOLLS. _____	112
ABBILDUNG 30: ROADMAP VON BINDERNAGEL & EILKS (2009). _____	113
ABBILDUNG 31: REDUZIERTE DARSTELLUNG DER MESO-EBENE ANHAND EINES BEISPIELHAFTEN LAUT-DENK PROTOKOLLS (BLAU) UND ZWEI WEITEREN PROTOKOLLEN (BLASS BLAU) MIT HILFE VON ROADMAPS. _____	114
ABBILDUNG 32: REDUZIERTE DARSTELLUNG DER MIKRO-EBENE MIT HILFE DER EXPLOSIONSPENTAGONS ANHAND EINES BEISPIELHAFTEN LAUT-DENK PROTOKOLLS. _____	115
ABBILDUNG 33: STICHPROBENBEZOGENE VORLAGE DER DATEN BEZOGEN AUF DIE EINZELNNEN STUDIENSCHWERPUNKTE. _____	116
ABBILDUNG 34: ÜBERSICHT DER DATENAUSWERTUNGSMETHODEN MIT SOFTWAREBEZOGENEN DATENAUSWERTUNGSSCHRITTEN UND DER ZUGEHÖRIGKEIT ZU DEN EINZELNNEN KONSTRUKTEN. _____	119
ABBILDUNG 35: VON DEN SCHÜLER*INNEN GENANNTEN BEDINGUNGEN FÜR EINE STAUBEXPLOSION UND DEREN ABSOLUTE HÄUFIGKEITEN MIT ERKANNTEEN BEZIEHUNGEN. _____	124
ABBILDUNG 36: PROZENTUALE VERTEILUNG DER GESAMTPUNKTZAHLEN BEI DER EXPLOSIVITÄTSEINSCHÄTZUNG EXPLOSIVER STOFFE (N =103, 2 FEHLEND). _____	125
ABBILDUNG 37: PUNKTZAHLEN VORWISSEN DER SCHÜLER*INNEN DIFFERENZIERT NACH VIDEO- UND SCHÜLER*INNENEXPERIMENT-GRUPPE (KREISE MIT DER JEWELIGEN VERSUCHSPERSONENNUMMER STEHEN FÜR INDIVIDUELLE AUSREIßER, VGL. ANHANG 12.13). _____	127
ABBILDUNG 38: FIXATIONSANZAHL DER GESAMTSTICHPROBE BEIM BETRACHTEN DES <b>VERSUCHSAUFBADS</b> DIFFERENZIERT NACH DEN AREAS OF INTEREST (KREISE UND STERNE MIT DER JEWELIGEN VERSUCHSPERSONENNUMMER STEHEN FÜR INDIVIDUELLE AUSREIßER, VGL. ANHANG 12.13). _____	130
ABBILDUNG 39: FIXATIONSDAUER DER GESAMTSTICHPROBE BEIM BETRACHTEN DES <b>VERSUCHSAUFBADS</b> DIFFERENZIERT NACH DEN AREAS OF INTEREST (KREISE UND STERNE MIT DER JEWELIGEN VERSUCHSPERSONENNUMMER STEHEN FÜR INDIVIDUELLE AUSREIßER, VGL. ANHANG 12.13). _____	131
ABBILDUNG 40: FIXATIONSANZAHL DER GESAMTSTICHPROBE BEIM BETRACHTEN DES <b>VORVERSUCHS</b> DIFFERENZIERT NACH DEN AREAS OF INTEREST (KREISE UND STERNE MIT DER JEWELIGEN VERSUCHSPERSONENNUMMER STEHEN FÜR INDIVIDUELLE AUSREIßER, VGL. ANHANG 12.13). _____	132
ABBILDUNG 41: FIXATIONSDAUER DER GESAMTSTICHPROBE BEIM BETRACHTEN DES <b>VORVERSUCHS</b> DIFFERENZIERT NACH DEN AREAS OF INTEREST (KREISE UND STERNE MIT DER JEWELIGEN VERSUCHSPERSONENNUMMER STEHEN FÜR INDIVIDUELLE AUSREIßER, VGL. ANHANG 12.13). _____	133
ABBILDUNG 42: ZEIT BIS ZUR ERSTEN FIXATION INNERHALB EINES AOIS DER GESAMTSTICHPROBE BEIM BETRACHTEN DES <b>VORVERSUCHS</b> DIFFERENZIERT NACH DEN AREAS OF INTEREST (KREISE UND STERNE MIT DER JEWELIGEN VERSUCHSPERSONENNUMMER STEHEN FÜR INDIVIDUELLE AUSREIßER, VGL. ANHANG 12.13). _____	134
ABBILDUNG 43: FIXATIONSANZAHL DER GESAMTSTICHPROBE BEIM BETRACHTEN DES <b>MODELLEXPERIMENTS</b> DIFFERENZIERT NACH DEN AREAS OF INTEREST (KREISE UND STERNE MIT DER JEWELIGEN VERSUCHSPERSONENNUMMER STEHEN FÜR INDIVIDUELLE AUSREIßER, VGL. ANHANG 12.13). _____	135

---

ABBILDUNG 44: FIXATIONSDAUER DER GESAMTSTICHPROBE BEIM BETRACHTEN DES <b>MODELLEXPERIMENTS</b> DIFFERENZIERT NACH DEN AREAS OF INTEREST (KREISE UND STERNE MIT DER JEWEILIGEN VERSUCHSPERSONENNUMMER STEHEN FÜR INDIVIDUELLE AUSREISER, VGL. ANHANG 12.13). . . . .	135
ABBILDUNG 45: ZEIT BIS ZUR ERSTEN FIXATION INNERHALB EINES AOIs DER GESAMTSTICHPROBE BEIM BETRACHTEN DES <b>MODELLEXPERIMENTS</b> DIFFERENZIERT NACH DEN AREAS OF INTEREST (KREISE UND STERNE MIT DER JEWEILIGEN VERSUCHSPERSONENNUMMER STEHEN FÜR INDIVIDUELLE AUSREISER, VGL. ANHANG 12.13). . . . .	136
ABBILDUNG 46: INDIVIDUELLE FIXATIONEN BEIM BETRACHTEN DES EXPLOSIONSPROZesses EINER VERSUCHSPERSON IN SECHS BILDERN. . . . .	138
ABBILDUNG 47: HEAT MAP DER FIXATIONEN BEIM BETRACHTEN DES EXPLOSIONSPROZesses DER GESAMTSTICHPROBE MIT DEN DEFINIERTEN AOIs ZUM VERGLEICH. . . . .	139
ABBILDUNG 48: PROZENTUALE HÄUFIGKEIT DER PUNKTZahl BEOBSCHAUUNG VERSUCHSAUFBAU. . . . .	143
ABBILDUNG 49: PROZENTUALE HÄUFIGKEIT DER PUNKTZahl <b>BEOBSCHAUUNG DES MODELLEXPERIMENTs</b> . . . . .	144
ABBILDUNG 50: PROZENTUALE HÄUFIGKEIT DER PUNKTZahl <b>AUSWERTUNG DES MODELLEXPERIMENTs</b> . . . . .	144
ABBILDUNG 51: BEOBSCHAUUNG UND AUSWERTUNG DES FRAGEBOGENS DIFFERENZIERT NACH DEN INDIVIDUELLEN ITEMS MIT IHREN THEMATISCHEM SCHWERPUNKTEN. . . . .	145
ABBILDUNG 52: PUNKTZahl (a) BEOBSCHAUUNG, (b) AUSWERTUNG UND (c) DES GESAMTEN VERSUCHSPROTOKolls DER SCHÜLER*INNEN DIFFERENZIERT NACH VIDEO UND SCHÜLER*INNENEXPERIMENT-GRUPPE (KREISE MIT DER JEWEILIGEN VERSUCHSPERSONENNUMMER STEHEN FÜR INDIVIDUELLE AUSREISER, VGL. ANHANG 12.13). . . . .	150
ABBILDUNG 53: DENKGGRAPH OHNE EXPLIZITEN VERGLEICH (z.B. LM1307). . . . .	153
ABBILDUNG 54: DENKGGRAPH MIT EXPLIZITEM VERGLEICH (z. B. PA1006). . . . .	154
ABBILDUNG 55: MIT EINEM EXPLIZITEN VERGLEICH STARTENDER UND ABSCHLIEßENDER DENKGGRAPH (z.B. LO1607). . . . .	154
ABBILDUNG 56: DENKWEGE MIT <b>EINER ANALOGIEOPERATION</b> DIFFERENZIERT NACH DER PRÄSENTATIONSFORM DES MODELLEXPERIMENTs UND DEREN ABSOLUTER HÄUFIGKEIT. . . . .	156
ABBILDUNG 57: DENKWEGE MIT <b>ZWEI ANALOGIEOPERATIONEN (BESCHREIBUNG)</b> DIFFERENZIERT NACH DER PRÄSENTATIONSFORM DES MODELLEXPERIMENTs UND DEREN ABSOLUTER HÄUFIGKEIT. . . . .	157
ABBILDUNG 58: DENKWEGE MIT <b>ZWEI ANALOGIEOPERATIONEN (BESCHREIBUNG UND ABBILDende BESCHREIBUNG)</b> DIFFERENZIERT NACH DER PRÄSENTATIONSFORM DES MODELLEXPERIMENTs UND DEREN ABSOLUTER HÄUFIGKEIT. . . . .	158
ABBILDUNG 59: DENKWEGE MIT <b>ZWEI ANALOGIEOPERATIONEN (BESCHREIBUNG UND ABBILDende BESCHREIBUNG, ZWEI ABBILDende BESCHREIBUNGEN)</b> DIFFERENZIERT NACH DER PRÄSENTATIONSFORM DES MODELLEXPERIMENTs UND DEREN ABSOLUTER HÄUFIGKEIT. . . . .	159
ABBILDUNG 60: DENKWEGE MIT <b>DREI ANALOGIEOPERATIONEN (BESCHREIBUNG UND ABBILDende BESCHREIBUNG M -&gt; O)</b> DIFFERENZIERT NACH DER PRÄSENTATIONSFORM DES MODELLEXPERIMENTs UND DEREN ABSOLUTER HÄUFIGKEIT. . . . .	160
ABBILDUNG 61: DENKWEGE MIT <b>DREI ANALOGIEOPERATIONEN (BESCHREIBUNG UND ABBILDende BESCHREIBUNG O -&gt; M BZW. O &lt;-&gt; M)</b> DIFFERENZIERT NACH DER PRÄSENTATIONSFORM DES MODELLEXPERIMENTs UND DEREN ABSOLUTER HÄUFIGKEIT. . . . .	161
ABBILDUNG 62: DENKWEGE MIT <b>DREI ANALOGIEOPERATIONEN (BESCHREIBUNG UND ZWEI ABBILDende BESCHREIBUNGEN O)</b> DIFFERENZIERT NACH DER PRÄSENTATIONSFORM DES MODELLEXPERIMENTs UND DEREN ABSOLUTER HÄUFIGKEIT. . . . .	161
ABBILDUNG 63: DENKWEGE MIT <b>VIER ANALOGIEOPERATIONEN</b> DIFFERENZIERT NACH DER PRÄSENTATIONSFORM DES MODELLEXPERIMENTs UND DEREN ABSOLUTER HÄUFIGKEIT. . . . .	162

## 10 Abbildungsverzeichnis

---

ABBILDUNG 64: DENKWEGE MIT FÜNF ANALOGIEOPERATIONEN DIFFERENZIERT NACH DER PRÄSENTATIONSFORM DES MODELLEXPERIMENTS UND DEREN ABSOLUTER HÄUFIGKEIT. _____	163
ABBILDUNG 65: GEMEINSAME ROADMAP DER SCHÜLER*INNEN DER V-GRUPPE UND DER SE-GRUPPE WÄHREND DES VERGLEICHES VON MODELLEXPERIMENT UND ORIGINAL AUSGEHEND VON EINEM OBJEKT. _____	164
ABBILDUNG 66: GEMEINSAME ROADMAP DER SCHÜLER*INNEN DER V-GRUPPE UND DER SE-GRUPPE WÄHREND DES VERGLEICHES VON MODELLEXPERIMENT UND ORIGINAL AUSGEHEND VON EINEM OBERFLÄCHLICHEN ATTRIBUT. _____	165
ABBILDUNG 67: GEMEINSAME ROADMAP DER SCHÜLER*INNEN DER V-GRUPPE UND DER SE-GRUPPE WÄHREND DES VERGLEICHES VON MODELLEXPERIMENT UND ORIGINAL AUSGEHEND VON EINEM STRUKTURELLEN ATTRIBUT. _____	165
ABBILDUNG 68: GEMEINSAME ROADMAP DER SCHÜLER*INNEN DER V-GRUPPE UND DER SE-GRUPPE WÄHREND DES VERGLEICHES VON MODELLEXPERIMENT UND ORIGINAL AUSGEHEND VON EINER RELATION. _____	165
ABBILDUNG 69: PROZENTUALE HÄUFIGKEIT DER GENANNTEN BEDINGUNGEN DES EXPLOSIONSPENTAGONS WÄHREND DES MAPPINGS DIFFERENZIERT NACH PROBANDENGRUPPEN (BLAU: VIDEO, GRAU: SCHÜLER*INNENEXPERIMENTE). _____	168
ABBILDUNG 70: BEISPIELHAFTES EXPLOSIONSPENTAGON VON BA2810 (VP 7) (DIE WÄHREND DES MAPPINGS GENANNTEN BEDINGUNGEN SIND ROT MARKIERT). _____	173
ABBILDUNG 71: DENKWEG WÄHREND DES MAPPINGS VON BA2810 (VP 7). DER OBERE TEIL BESCHREIBT DEN ANFANG UND DER UNTERE TEIL DIE FORTSETZUNG DES DENKWEGS. _____	173
ABBILDUNG 72: BEISPIELHAFTES EXPLOSIONSPENTAGON VON SO2411 (VP 49) (DIE WÄHREND DES MAPPINGS GENANNTEN BEDINGUNGEN SIND ROT MARKIERT). _____	174
ABBILDUNG 73: DENKWEG WÄHREND DES MAPPINGS VON SO2411 (VP 49). _____	175
ABBILDUNG 74: PROZENTUALE HÄUFIGKEIT DER GENANNTEN ELEMENTE DES EXPLOSIONSPENTAGONS BEIM ERGEBNIS DES MAPPINGS. _____	177
ABBILDUNG 75: DENKWEGE MIT EINER ANALOGIEOPERATION DIFFERENZIERT NACH DER PRÄSENTATIONSFORM DES MODELLEXPERIMENTS UND DEREN ABSOLUTE HÄUFIGKEIT. _____	181
ABBILDUNG 76: DENKWEGE MIT ZWEI ANALOGIEOPERATIONEN ( <b>BESCHREIBUNG</b> ) DIFFERENZIERT NACH DER PRÄSENTATIONSFORM DES MODELLEXPERIMENTS UND DEREN ABSOLUTE HÄUFIGKEIT. _____	182
ABBILDUNG 77: DENKWEGE MIT ZWEI ANALOGIEOPERATIONEN ( <b>BESCHREIBUNG UND ABBILDENDE BESCHREIBUNG</b> ) DIFFERENZIERT NACH DER PRÄSENTATIONSFORM DES MODELLEXPERIMENTS UND DEREN ABSOLUTE HÄUFIGKEIT. _____	183
ABBILDUNG 78: DENKWEGE MIT ZWEI ANALOGIEOPERATIONEN ( <b>BESCHREIBUNG UND ABBILDENDE BESCHREIBUNG</b> ) DIFFERENZIERT NACH DER PRÄSENTATIONSFORM DES MODELLEXPERIMENTS UND DEREN ABSOLUTE HÄUFIGKEIT. _____	184
ABBILDUNG 79: DENKWEGE MIT DREI ANALOGIEOPERATIONEN DIFFERENZIERT NACH DER PRÄSENTATIONSFORM DES MODELLEXPERIMENTS UND DEREN ABSOLUTE HÄUFIGKEIT. _____	185
ABBILDUNG 80: GEMEINSAME ROADMAP DER SCHÜLER*INNEN DER V-GRUPPE UND DER SE-GRUPPE WÄHREND DER ANWENDUNG AUSGEHEND VON EINEM OBJEKT. _____	187
ABBILDUNG 81: GEMEINSAME ROADMAP DER SCHÜLER*INNEN DER V-GRUPPE UND DER SE-GRUPPE WÄHREND DER ANWENDUNG AUSGEHEND VON EINEM OBERFLÄCHLICHEN ATTRIBUT. _____	187
ABBILDUNG 82: GEMEINSAME ROADMAP DER SCHÜLER*INNEN DER V-GRUPPE UND DER SE-GRUPPE WÄHREND DER ANWENDUNG AUSGEHEND VON EINEM STRUKTURELLEN ATTRIBUT. _____	188
ABBILDUNG 83: GEMEINSAME ROADMAP DER SCHÜLER*INNEN DER V-GRUPPE UND DER SE-GRUPPE WÄHREND DER ANWENDUNG AUSGEHEND VON EINER RELATION. _____	188

---

ABBILDUNG 84: PROZENTUALE HÄUFIGKEIT DER GENANNTEN BEDINGUNGEN DES EXPLOSIONSPENTAGONS WÄHREND DER ANWENDUNG DIFFERENZIERT NACH PROBANDENGRUPPEN (BLAU: VIDEO, GRAU: SCHÜLER*INNENEXPERIMENTE). _____	189
ABBILDUNG 85: VERTEILUNG DER PUNKTZahl BEIM POST-TEST A) DER GESAMTSTICHPROBE UND B) DER PROBANDENGRUPPEN VIDEO UND SCHÜLER*INNENEXPERIMENT. _____	200
ABBILDUNG 86: VERTEILUNG DER PUNKTZahl BEIM PRE-TEST A) DER GESAMTSTICHPROBE UND B) DER PROBANDENGRUPPEN VIDEO UND SCHÜLER*INNENEXPERIMENT. _____	200
ABBILDUNG 87: VON DEN SCHÜLER*INNEN GENANNTEN BEDINGUNGEN FÜR EINE STAUBEXPLOSION IM PRE-TEST (LINKS) UND IM POST-TEST (RECHTS) UND DEREN ABSOLUTE HÄUFIGKEITEN MIT ERKANNten BEZIEHUNGEN. _____	201
ABBILDUNG 88: AREAS OF INTEREST ZUM ZEITPUNKT DER PRÄSENTATION DES BESCHRIFTETEN VERSUCHSAUFBAUS IM VIDEO. _____	208
ABBILDUNG 89: ZUORDNUNGSAufGABE MODELLEXPERIMENT „MEHLSTAUBEXPLOSION“ (VGL. STEFF, 2015). _____	237
ABBILDUNG 90: ANALOGIEBETRACHTUNG AM BEISPIEL DES MODELLEXPERIMENTS „STAUBEXPLOSION“ MIT ERHÖHTER EIGENSTÄNDIGKEIT. _____	239
ABBILDUNG 91: ÜBERSICHT DER DATENAUSWERTUNGSISTRUMENTE MIT SOFTWAREBEZOGENEN DATENAUSWERTUNGSSCHRITTEN UND DER ZUGEHÖRIGKEIT ZU DEN EINZELNEN KONSTRUKTEN (ENTSPRICHT ABBILDUNG 34). _____	245
ABBILDUNG 92: PUNKTZAHLEN VON (A) KFT V-TEST 3 UND (B) N-TEST 2 SOWIE (C) DER SUMMER DIESER BEIDEN SUBTESTS DIFFERENZIERT NACH VIDEO- UND SCHÜLER*INNENEXPERIMENT-GRUPPE. _____	345
ABBILDUNG 93: GESAMTINTERESSE DER SCHÜLER*INNEN DIFFERENZIERT NACH VIDEO UND SCHÜLER*INNENEXPERIMENT-GRUPPE. _____	347
ABBILDUNG 94: ANZAHL DER BLINZLER DIFFERENZIERT NACH DEN DREI EINZELNEN SEQUENZEN DES VIDEOS (AUFBAU, VORVERSUCH, MODELLEXPERIMENT). _____	348
ABBILDUNG 95: PUPILLENDURCHMESSER DIFFERENZIERT NACH DEN DREI EINZELNEN SEQUENZEN DES VIDEOS (AUFBAU, VORVERSUCH, MODELLEXPERIMENT). _____	349



## II Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: ÜBERSICHT DER BEZEICHNUNGEN FÜR EINFACHEN UND TIEFER GEHENDEN ANALOGIEN.	5
TABELLE 2: CHARAKTERISIERUNG DES MODELLEXPERIMENTS IN DER LC-HA ANHAND DER ME-MERKMALSGRUPPEN UND ANALOGIEARTEN.	29
TABELLE 3: DETAILLIERTER TABELLARISCHER VERGLEICH VON ORIGINAL 1 (UNFALL) UND MODELLEXPERIMENT MIT BEZUG ZUM EXPLOSIONSKONZEPT.	31
TABELLE 4: ÜBERSICHT ÜBER DIE ARTEN UND DER LÄNGEN DER SEQUENZEN, DIE IM VIDEO PRÄSENTIERT WERDEN.	72
TABELLE 5: FIXATIONSBEZOGENE INDIKATOREN MIT DEN ZUGEHÖRIGEN IMPLIKATIONEN (VERÄNDERT NACH GEISE, 2011; NEHRING & BUSCH, 2018).	74
TABELLE 6: BEOBSACHTUNGS- UND INTERPRETATIONSANSÄTZE BASIEREND AUF DEN BEDINGUNGEN FÜR EINE STAUBEXPLOSION.	79
TABELLE 7: MAXIMALE PUNKTZAHLEN NACH THEMENBEREICHEN SORTIERT.	81
TABELLE 8: DETAILLIERTER TABELLARISCHER VERGLEICH VON ORIGINAL 1 (UNFALL) UND MODELLEXPERIMENT MIT BEZUG ZUM EXPLOSIONSKONZEPT (ENTSPRICHT TABELLE 3).	88
TABELLE 9: DETAILLIERTER TABELLARISCHER VERGLEICH VON ANWENDUNGSBEISPIEL (ALUMINIUM-STaubEXPLOSION) UND ORIGINAL 1 BZW. MODELLEXPERIMENT MIT BEZUG ZUM EXPLOSIONSKONZEPT.	91
TABELLE 10: KATEGORIENSYSTEM „BESCHREIBUNG DES ORIGINALS“ (KURSIV: ANMERKUNGEN ZU DEN ANKERBEISPIelen).	97
TABELLE 11: KATEGORIENSYSTEM „BESCHREIBUNG DES MODELLEXPERIMENTS“ (KURSIV: ANMERKUNGEN ZU DEN ANKERBEISPIelen).	98
TABELLE 12: KATEGORIENSYSTEM „ABBILDENE BESCHREIBUNG VON ORIGINAL ZU MODELLEXPERIMENT“.	100
TABELLE 13: KATEGORIENSYSTEM „ABBILDENE BESCHREIBUNG VON MODELLEXPERIMENT ZU ORIGINAL“.	102
TABELLE 14: KATEGORIENSYSTEM „RICHTUNGSUNABHÄNGIGE ABBILDENE BESCHREIBUNG ZWISCHEN ORIGINAL UND MODELLEXPERIMENT“ (KURSIV: ANMERKUNGEN ZU DEN ANKERBEISPIelen).	104
TABELLE 15: INTERKODERRELIABILITÄTEN FÜR ALLE FÜNF KATEGORIENSYSTEME UND JEWELLS DEN EINZELNEN EBENEN (N = 20 AUFNAHMEN, 2 KODIERER) – FÜR DIE ABBILDENDEN KATEGORIENSYSTEME MÜSSEN DIE WERTE NOCH EINMAL BERECHNET WERDEN, DA MOMENTAN NOCH PROBLEM MIT DEN DATEN IM PROGRAMM GIBT. DAS PROGRAMM ERKENNT DIE BEZIEHUNGEN NICHT.	108
TABELLE 16: GRUNDSÄTZLICHE UND ABSOLUTE STICHPROBENGRÖßen NACH DEN STUDIENSCHWERPUNKTEN.	117
TABELLE 17: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER ERGEBNISSE ZUR AUFGABE „NOTIERE DIE BEDINGUNGEN, DIE NÖTIG SIND, UM EIN FEUER ZU ENTZÜNDEn.“ BZGL. DER KOMPONENTE BRENNSTOFF.	122
TABELLE 18: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER ERGEBNISSE ZUR AUFGABE „NOTIERE DIE BEDINGUNGEN, DIE NÖTIG SIND, UM EIN FEUER ZU ENTZÜNDEn.“ BZGL. DER KOMPONENTE ZÜNDQUELLE.	122
TABELLE 19: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER ERGEBNISSE ZUR AUFGABE „NOTIERE DIE BEDINGUNGEN, DIE NÖTIG SIND, UM EIN FEUER ZU ENTZÜNDEn.“ BZGL. DER KOMPONENTE SAUERSTOFF.	122
TABELLE 20: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER ERGEBNISSE ZUR AUFGABE „ERKLÄRE, WAS EINE EXPLOSION IST.“.	123
TABELLE 21: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER ERGEBNISSE ZUR AUFGABE „BEGRÜNDE, WELCHE BEDINGUNGEN GEgeben SEIN MÜSSEN, DAMIT ES ZU EINER EXPLOSION KOMMT.“.	123

## II Tabellenverzeichnis

---

TABELLE 22: ERGEBNISSE DER BEURTEILUNG DER EXPLOSIVITÄT VON STOFFEN IM VERGLEICH ZUR KORREKten ANTWERT (DIE GRÜNE EINFÄRBUng EINER ZEILE GIBT AN, DASS DIE MEHRHEIT DER SCHÜLER*INNEN DEN JEWELIGEN STOFF KORREKT NACH DESSEN EXPLOSIVITÄT EINGESTUFT HAT)._____	124
TABELLE 23: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER ERGEBNISSE ZUR AUFGABE „WARUM KÖNNEN MANCHE STOFFE EXPLODIEREN UND MANCHE NICHT?“ _____	126
TABELLE 24: ERSTE FIXATION DER GESAMTSTICHPROBE BEIM BETRACHTEN DES VERSUCHSAUFBaus DIFFERENZIERT NACH DEN AREAS OF INTEREST. _____	132
TABELLE 25: MITTELWERTE, STANDARDABWEICHUNG SOWIE MINIMUM- UND MAXIMUMWERTE FÜR DIE ERREICHTE PUNKTZAHl BZGL. DER BEOBSCHTUNGEN UND AUSWERTUNGEN AUF DEM VERSUCHSPROTOKOLL._____	140
TABELLE 26: SIGNIFIKANTE KORRELATIONEN NACH SPEARMAN ZWISCHEN DEN VARIABLEN DER INFORMATIONS AUFNAHME UND - VERARBEITUNG. * p < .05, ** p < .01. _____	148
TABELLE 27: RELEVANTE INHALTE DER DENKWEGE ALLER SCHÜLER*INNEN BEIM VERGLEICH DIFFERENZIERT NACH DEN EINZELNEN ANALOGIEARTEN (* GIBT DIE FÜNF BEDINGUNGEN DES EXPLOSIONSPENTAGONS IM ENGEREN SINNE AN)._____	167
TABELLE 28: HÄUFIGKEIT DER GENANNTEN BEDINGUNGEN DES EXPLOSIONSPENTAGONS WÄHREND DES MAPPINGS (* GIBT DIE FÜNF BEDINGUNGEN DES EXPLOSIONSPENTAGONS IM ENGEREN SINNE AN)._____	169
TABELLE 29: SIGNIFIKANTE KORRELATIONEN NACH SPEARMAN ZWISCHEN DEN VARIABLEN „ANZAHL DER ANALOGIEOPERATIONEN“ BZW. „ANZAHL INHALTSRELEVANTER PHRASEN“ UND DEN BEDINGUNGEN DES EXPLOSIONSPENTAGONS WÄHREND DES MAPPINGS. * p < .05, ** p < .01. _____	170
TABELLE 30: SIGNIFIKANTE KORRELATIONEN NACH SPEARMAN ZWISCHEN DEN EINZELNEN ELEMENTEN DES EXPLOSIONSPENTAGONS WÄHREND DES MAPPINGS. * p < .05, ** p < .01. ES IST ZU BEACHTEN, DASS DIE BEDINGUNGEN MIT DEN NUMMERN 1 UND 4 AUF DER SEITE EINER VARIABLE AUSGELASSEN WURDEN, DA DORT KEINE KORRELATIONEN IDENTIFIZIERT WERDEN KONNTEN. _____	172
TABELLE 31: HÄUFIGKEIT DER GENANNTEN ELEMENTE DES EXPLOSIONSPENTAGONS WÄHREND DES ERGEBNIS DES MAPPINGS. _____	178
TABELLE 32: SIGNIFIKANTE KORRELATIONEN NACH SPEARMAN ZWISCHEN DEN EINZELNEN ELEMENTEN DES EXPLOSIONSPENTAGONS BEIM MAPPING UND BEIM ERGEBNIS MAPPING. * p < .05, ** p < .01. _____	179
TABELLE 33: HÄUFIGKEIT DER GENANNTEN ELEMENTE DES EXPLOSIONSPENTAGONS WÄHREND DER ANWENDUNG (* GIBT DIE FÜNF ELEMENTE DES EXPLOSIONSPENTAGONS IM ENGEREN SINNE AN)._____	190
TABELLE 34: SIGNIFIKANTE KORRELATIONEN NACH SPEARMAN ZWISCHEN DEN VARIABLEN „ANZAHL DER OPERATIONEN“ BZW. „ANZAHL INHALTSRELEVANTER PHRASEN“ UND DEN ELEMENTEN DES EXPLOSIONSPENTAGONS WÄHREND DES TRANSFERS. * p < .05, ** p < .01. _____	192
TABELLE 35: SIGNIFIKANTE KORRELATIONEN NACH SPEARMAN ZWISCHEN DEN EINZELNEN ELEMENTEN DES EXPLOSIONSPENTAGONS WÄHREND DES MAPPINGS UND DER ANWENDUNG. * p < .05, ** p < .01. ES IST ZU BEACHTEN, DASS BEI DER „ANWENDUNG“ DIE BEDINGUNGEN MIT DEN NUMMERN 1-3 AUSGELASSEN WURDEN, DA DORT KEINE KORRELATIONEN IDENTIFIZIERT WERDEN KONNTEN. _____	194
TABELLE 36: SIGNIFIKANTE KORRELATIONEN NACH SPEARMAN ZWISCHEN DEN VARIABLEN DER INFORMATIONS AUFNAHME IN SEQUENZ 3 UND DEN GENANNTEN BEDINGUNGEN EINER STAUBEXPLOSION (ORIENTIERT AM EXPLOSIONSPENTAGON) BEIM MAPPING. * p < .05, ** p < .01. _____	196

---

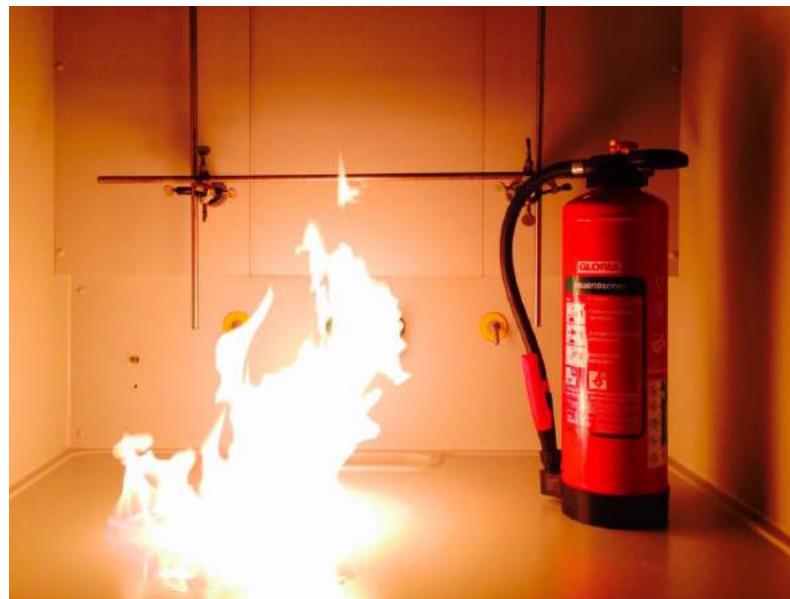
TABELLE 37: SIGNIFIKANTE KORRELATIONEN NACH SPEARMAN ZWISCHEN DER ERSTEN VERARBEITUNG DER AUFGENOMMENEN INFORMATIONEN UND DEN GENANNTEN BEDINGUNGEN EINER STAUBEXPLOSION (ORIENTIERT AM EXPLOSIONSPENTAGON BEIM MAPPING.* P < .05, ** P < .01. _____	198
TABELLE 38: WILCOXON-TEST ERGEBNISSE DIFFERENZIERT NACH DEN EINZELNNEN BEDINGUNGEN MIT EFFEKTSTÄRKEN (N = 104). _____	202
TABELLE 39: KATEGORIENSYSTEM „BESCHREIBUNG DES ORIGINALS“. _____	329
TABELLE 40: KATEGORIENSYSTEM „BESCHREIBUNG DES MODELLEXPERIMENTS“ (KURSIV: ANMERKUNGEN ZU DEN ANKERBEISPIELEN). _____	331
TABELLE 41: KATEGORIENSYSTEM „ABBILDENDE BESCHREIBUNG VON ORIGINAL ZU MODELLEXPERIMENT“ (KURSIV: ANMERKUNGEN ZU DEN ANKERBEISPIELEN). _____	333
TABELLE 42: KATEGORIENSYSTEM „ABBILDENDE BESCHREIBUNG VON MODELLEXPERIMENT ZU ORIGINAL“ (KURSIV: ANMERKUNGEN ZU DEN ANKERBEISPIELEN). _____	337
TABELLE 43: KATEGORIENSYSTEM „RICHTUNGSUNABHÄNGIGE ABBILDENDE BESCHREIBUNG ZWISCHEN ORIGINAL UND MODELLEXPERIMENT“ (KURSIV: ANMERKUNGEN ZU DEN ANKERBEISPIELEN). _____	341
TABELLE 44: ABSOLUTE UND PROZENTUALE VERTEILUNG DER AUSSAGEN ZUR <b>BEZEICHNUNG DES STOFFS</b> BEI DER BESCHREIBUNG DER BEOBSACHTUNG (N = 36). _____	350
TABELLE 45: ABSOLUTE UND PROZENTUALE VERTEILUNG DER AUSSAGEN ZUR <b>BEOBACHTBAREN AUSWIRKUNG DES STROMANSCHALTENS</b> BEI DER BESCHREIBUNG DER BEOBSACHTUNG (N = 36). _____	350
TABELLE 46: ABSOLUTE UND PROZENTUALE VERTEILUNG DER AUSSAGEN ZUR <b>BEOBACHTBAREN MOMENTANEN AUSWIRKUNG DES HERUNTERDRÜCKENS DER LUFTPUMPE</b> BEI DER BESCHREIBUNG DER BEOBSACHTUNG (N = 36). _____	350
TABELLE 47: ABSOLUTE UND PROZENTUALE VERTEILUNG DER AUSSAGEN ZUR <b>BEOBACHTBAREN ABSCHLIEßENDEN AUSWIRKUNG DES HERUNTERDRÜCKENS DER LUFTPUMPE</b> BEI DER BESCHREIBUNG DER BEOBSACHTUNG (N = 36). _____	350
TABELLE 48: ABSOLUTE UND PROZENTUALE VERTEILUNG DER AUSSAGEN ZUR <b>ART DER REAKTION</b> BEI DER BESCHREIBUNG DER AUSWERTUNG (N = 36). _____	351
TABELLE 49: ABSOLUTE UND PROZENTUALE VERTEILUNG DER AUSSAGEN ZUR <b>BRENNBARKEIT DES STOFFS</b> BEI DER BESCHREIBUNG DER AUSWERTUNG (N = 36). _____	351
TABELLE 50: ABSOLUTE UND PROZENTUALE VERTEILUNG DER AUSSAGEN ZUR <b>FUNKTION DER LUFTPUMPE</b> BEI DER BESCHREIBUNG DER AUSWERTUNG (N = 36). _____	351
TABELLE 51: ABSOLUTE UND PROZENTUALE VERTEILUNG DER AUSSAGEN ZUM <b>VORLIEGEN VON SAUERSTOFF ODER LUFT ALS REAKTIONSPARTNER</b> BEI DER BESCHREIBUNG DER AUSWERTUNG (N = 36). _____	351
TABELLE 52: ABSOLUTE UND PROZENTUALE VERTEILUNG DER AUSSAGEN ZUR <b>GLÜHWENDEL</b> BEI DER BESCHREIBUNG DER AUSWERTUNG (N = 36). _____	351
TABELLE 53: ABSOLUTE UND PROZENTUALE VERTEILUNG DER AUSSAGEN ZUR <b>DRUCKENTSTEHUNG</b> INFOLGE DER STATTFINDENDEN REAKTION BEI DER BESCHREIBUNG DER AUSWERTUNG (N = 36). _____	351
TABELLE 54: MITTELWERTE UND STANDARDABWEICHUNG DER EINZELNNEN ITEMS ZUM <b>VERSUCHSAUFBAU</b> . _____	352
TABELLE 55: MITTELWERTE UND STANDARDABWEICHUNG DER EINZELNNEN ITEMS ZUM <b>VORVERSUCH</b> . _____	352
TABELLE 56: MITTELWERTE UND STANDARDABWEICHUNG DER EINZELNNEN ITEMS ZUM <b>MODELLEXPERIMENT</b> . _____	353
TABELLE 57: SIGNIFIKANTE KORRELATIONEN NACH SPEARMAN ZWISCHEN DEN EINZELNNEN BEDINGUNGEN DES EXPLOSIONSPENTAGONS WÄHREND DER ANWENDUNG. * P < .05, ** P < .01. _____	354



## 12 Anhang

### 12.1 Versuchsskripte des Schülerlaborprojektes *Feuer(löschen) im Schülerlabor*

# Feuer(löschen) im Schülerlabor



Didaktik der Chemie RUB & IfaDo | Christina Toschka, Dr. Johanna Renker & Prof. Dr. Katrin Sommer

## **Versuch 1: Feuerfestes Taschentuch**

## **Untersuchungsplan**

**Geräte:** Taschentuch, Tiegelzange, Becherglas (250 mL), Messzyylinder, Feuerzeug

**Chemikalien:** Ethanol, Natriumchlorid, Wasser

## Durchführung

1. Stelle eine Mischung aus 10 mL Ethanol, 10 mL Wasser und einer Spatelspitze Natriumchlorid her.
  2. Tränke das Taschentuch in der Ethanol-Wasser-Mischung.
  3. Halte das Taschentuch mit der Tiegelzange fest und entzünde es **unter dem Abzug**.

## Beobachtung

Notiere deine Beobachtungen.

---

---

---

---

---

## Auswertung

**Erkläre deine Beobachtungen.**

---

---

---

---

---

---

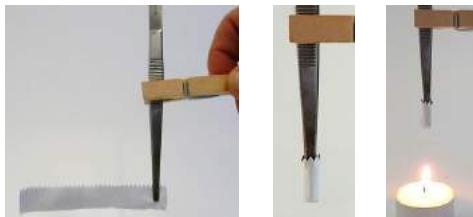
### Versuch 2: Bimetall

#### Untersuchungsplan

**Geräte:** Pinzette, Schere, Reagenzglasklammer, Kerze, Feuerzeug

**Chemikalie:** Kaugummipapier (Es besteht aus einer Papier- und einer Aluminiumseite und verhält sich wie ein Bimetall.)

#### Aufbau



#### Vorbereitung

1. Schneide das Kaugummipapier in 1 cm breite Streifen.
2. Das Papier muss nun zu einer Spirale gerollt werden – mit der Papierseite nach außen.
3. Am besten gehst du folgendermaßen vor: Papier mit einer Pinzette halten, Reagenzglasklammer mittig an der Pinzette befestigen, Kaugummipapier zur Spirale drehen.

#### Durchführung

1. Zünde die Kerze mit einem Feuerzeug an.
2. Halte die Spirale über die Flamme. **Vorsicht:** Spirale nicht zu dicht an die Flamme halten, **Entzündungsgefahr!** Nutze gegebenenfalls die Dose mit Löschsand, wenn sich die Spirale entzündet.
3. Hat sich die Spirale aufgedreht, lösche die Flamme.

#### Beobachtung

Notiere deine Beobachtungen.

---

---

---

---

#### Auswertung

Erkläre deine Beobachtungen.

---

---

---

---

**Versuch 3: Heißluftballon**

**Untersuchungsplan**

**Geräte:** Mülltüte, Toaster

**Aufbau**



**Durchführung**

1. Starte den Toaster auf maximaler Stufe und heize einige Minuten vor.
2. Halte eine Mülltüte über den heizenden Toaster: am besten mit einer Hand oben und einer Hand unten.
3. Wenn die Tüte sich aufgebläht hat und „von allein steht“, halte sie unten mit beiden Händen fest, und zwar so, dass sie senkrecht steht.
4. Sobald die Tüte nach oben „strebt“, lasse sie los.

**Beobachtung**

Notiere deine Beobachtungen.

---

---

---

---

**Auswertung**

Erkläre deine Beobachtungen.

---

---

---

---

Skizziere auf der nächsten Seite in **Abb. 1, 2 und 3**, wie der Prozess auf Teilchenebene ablaufen könnte.

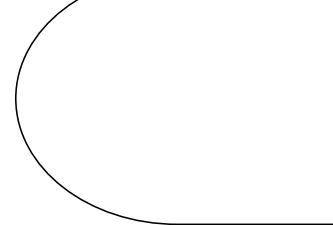


Abb. 1

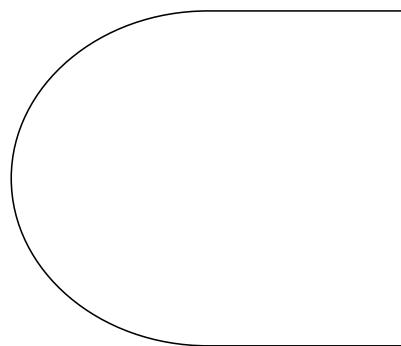


Abb. 2

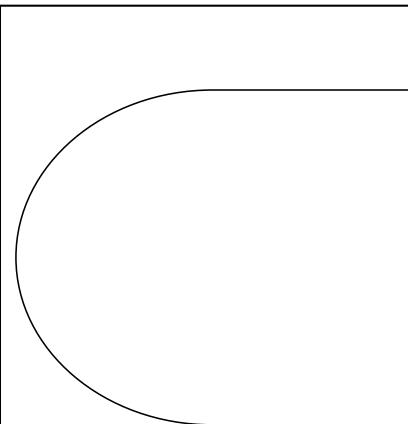


Abb. 3

**Versuch 4: Davy Sicherheitslampe**

**Untersuchungsplan**

**Geräte:** Kunststoffflasche mit Aufsatz, Kupferdrahtnetz, Kerze, Feuerzeug, Stativ mit Klemme

**Chemikalie:** Erdgas

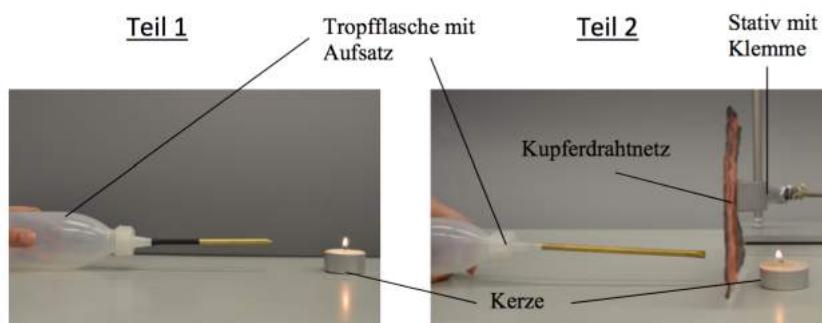
**Durchführung (Teil 1)**

1. Befülle die Kunststoffflasche aus der Gasleitung mit Erdgas.
2. Entzünde die Kerze mit einem Feuerzeug.
3. Leite von der linken Seite die jeweilige Substanz in die Flamme der Kerze ein, indem du die Kunststoffflasche leicht zusammendrückst.

**Durchführung (Teil 2)**

1. Spanne das Kupferdrahtnetz in die Klemme ein.
2. Stelle die brennende Kerze in einem Abstand von ca. 2 cm auf die rechte Seite des Kupferdrahtnetzes.
3. Leite von der linken Seite die jeweilige Substanz durch das Kupferdrahtnetz in die Flamme der Kerze, indem du die Kunststoffflasche leicht zusammendrückst.

**Aufbauten**



**Beobachtung**

Notiere deine Beobachtungen.

---

---

---

**Auswertung**

Erkläre deine Beobachtungen.

---

---

---

**Versuch 5: Mit Wasser löschar?**

a) Holzbrand vs. Metallbrand

**Untersuchungsplan**

**Geräte:** Magnetheizrührer, Erlenmeyerkolben (250 mL), Siedesteine, Tiegelzange, Bunsenbrenner, Feuerzeug

**Chemikalien:** Holzstäbchen, Magnesiumband, Wasser

**Durchführung (Teil 1)**

1. **Arbeite im Abzug!**
2. Befülle einen 250 mL Erlenmeyerkolben mit ca. 200 mL Wasser und lege 3 Siedesteine dazu.
3. Erhitze das Wasser in dem Erlenmeyerkolben bis es siedet und Wasserdampf aus dem Glas aufsteigt.
4. Entzünde das Holzstäbchen und halte es über den Wasserdampf.

**Durchführung (Teil 2)**

1. **Arbeite im Abzug!**
2. Erhitze das Wasser im Erlenmeyerkolben weiter, so dass der Wasserdampf weiterhin aufsteigt.
3. Halte das Magnesiumband mit der Tiegelzange fest und entzünde das Magnesiumband in der Brennerflamme. **Schau bitte nicht direkt in die Flamme!**
4. Halte das entzündete Magnesiumband (relativ schnell) über den Wasserdampf.

**Beobachtung**

Notiere deine Beobachtungen.

**Auswertung**

Erkläre deine Beobachtungen.

**Versuch 6: Mit Wasser löschar?**

**b) Papierbrand vs. Fettbrand**

**Untersuchungsplan**

**Geräte:** Metallschale, Tiegelzange, Tiegel, Tondreieck, Dreibein, Bunsenbrenner, Feuerzeug, lange Pipette (30 cm), Messzylinder (5 mL)

**Chemikalie:** Papierstücke, Speiseöl, Wasser

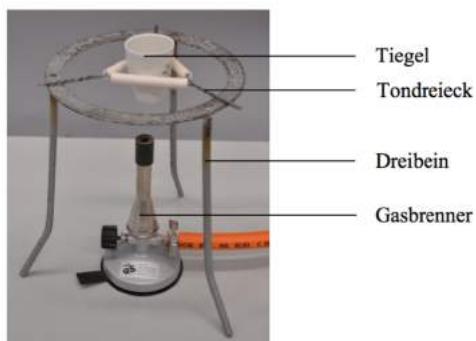
**Durchführung (Teil 1)**

1. **Arbeite im Abzug!**
2. Gib ein Papierstück in eine Metallschale.
3. Zünde diese Papierstück mit einem Feuerzeug an.
4. Gib mit einer langen Pipette Wasser auf den Brand.

**Durchführung (Teil 2)**

1. **Arbeite im Abzug!**
2. Messe mit einem Messzylinder 5 mL des Speiseöls ab.
3. Gib diese 5 mL in den Tiegel.
4. Schließe die Scheibe des Abzugs.
5. Erhitze den Tiegel so lange mit dem Bunsenbrenner, bis sich das Speiseöl entzündet.
6. Schalte den Bunsenbrenner aus.
7. Gib mit einer langen Pipette genau einen Tropfen Wasser in den Tiegel.

**Aufbau (Teil 2)**



**Beobachtung**

Notiere deine Beobachtungen.

---

---

---

---

**Auswertung**

Erkläre deine Beobachtungen.

---

---

---

---

**Versuch 7: Löschen durch Abkühlen**

**Untersuchungsplan**

**Geräte:** Bunsenbrenner, Feuerzeug, Dreibein, Tondreieck, Metallschale, kleiner Eisentiegel, Tiegelzange

**Chemikalien:** Speiseöl, Eis, Wasser

**Durchführung**

1. **Arbeite im Abzug!**
2. Gib etwas Eis in eine Schale und gib etwas Wasser hinzu.
3. Gib 5 mL des Speiseöls in den Tiegel.
4. Schließe den Abzug soweit es geht.
5. Erhitze das Speiseöl bis es sich entzündet und von alleine weiterbrennt.
6. Nimmt den Tiegel mit einer Tiegelzange und tauche die untere Hälfte des Tiegels in bereitgestelltes Eiswasser. (**Vorsicht! Den Tiegel gut festhalten und das heiße Speiseöl im Tiegel nicht in das Eiswasser umkippen lassen!**)

**Beobachtung**

Notiere deine Beobachtungen.

---

---

---

---

---

---

---

---

**Auswertung**

Erkläre deine Beobachtungen.

---

---

---

---

---

---

---

---

### Versuch 8: Modellierung eines Feuerlöschers

Wie funktioniert ein Feuerlöscher?

Plant für diese Versuchsfrage einen Versuch und führt ihn durch. Überlege dir, was und wie du einen Feuerlöscher modellieren kannst. Es gibt viele verschiedene Feuerlöscher-Typen. Auf dieser Seite findest du eine kurze Information zum Schaumfeuerlöscher.

Suche dir einige der bereitstehenden Chemikalien und Geräte aus, die du zum Modellieren eines Feuerlöschers nutze möchtest. Überlege genau, welche Chemikalien und Geräte dafür wirklich wichtig sind.

Notiere deine Auswahl der Geräte und Chemikalien. Skizziere dann den Aufbau und notiere die Durchführung.

#### Information zum Schaumlöscher:

Den Schaumfeuerlöscher setzt man bei Kraftstoff-, Öl- und Fettbränden ein. Durch eine chemische Reaktion zwischen Aluminiumhydrogensulfat und Natriumhydrogencarbonat (Natron) entstehen bei diesem Löscher-Typ Kohlenstoffdioxid-Bläschen, die das Löschmittel aufschäumen. Der zähe Schaum überzieht den Brandherd, kühlt ihn ab und hält den Sauerstoff fern. Bei einer Notladung von Flugzeugen wird oft ein solcher Schaumteppich gelegt, um einem Brand vorzubeugen.

#### Geräte:

---

---

#### Chemikalie:

---

---

#### Aufbau:



## 12.2 Verlaufspläne der Vorerhebung und Intervention

Vorerhebung			
Zeit	Inhaltliche Aspekte	Schüler- und Betreueraktivität	Materialien/ Medien
0‘-3‘	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Begrüßung der Schüler*innen (Name, Lehrstuhl, Dissertationsprojekt)</li> <li>▪ Ihr kommt in den nächsten Tagen zu uns nach Bochum in das Schülerlabor.</li> <li>▪ Da werdet ihr Experimentieren und dabei einige Aufgaben ausfüllen.</li> </ul>		
3‘-5‘	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Schüler*innen-ID erklären (Anonymität):</i> Damit wir die Ergebnisse Eurer Aufgaben einander zuordnen können, vergeben wir anonymisierte Schüler*innen-Identifikationsnummern (Schüler*innen-ID). Die Schüler*innen-IDs setzen sich aus dem ersten Buchstaben Deines Vornamens, dem zweiten Deines Nachnamens und dem Tag und Monat Deines Geburtstages zusammen. Musterbeispiel vorlesen. Bitte trage Deine persönliche Schüler*innen-ID nun in die dafür vorgesehenen Kästchen ein.</li> </ul>		
5‘-35‘	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Vorab möchte ich, dass ihr heute ein paar Aufgaben bearbeitet.</b> Für meine Arbeit ist es ganz wichtig, dass ihr die Fragebögen selbstständig ausfüllt. Die Experimente werden zwar in Kleingruppen durchgeführt, das Ausfüllen soll aber in Einzelarbeit erfolgen. In dem Labor steht euch dafür genügend Platz zur Verfügung.</li> <li>▪ <b>Vorwissenstest</b>  <i>Vorwissenstest kurz erläutern:</i> Im Folgenden findest Du einige Fragen zu dem Thema <i>Brände und Brandbekämpfung</i>. Bei einigen Fragen wirst du aufgefordert, eine Begründung für Deine Antwort aufzuschreiben. Es ist wichtig, dass ihr die Fragebögen in Einzelarbeit bearbeitet. Es ist nicht erwartet, dass ihr alle Aufgaben komplett lösen könnt. Alle Deine Antworten werden anonym behandelt. Weiter sollt auf diesem Blatt einige Angaben zu deiner Person sowie zu Deinem Interesse am Chemieunterricht machen. Auch diese Daten werden anonym behandelt. Zur Bearbeitung habt ihr ca. 30 Minuten Zeit. Habt ihr bis hierher noch Fragen? Wenn Ihr zwischendurch Fragen habt, könnt ihr euch gerne melden und ich komme zu euch.</li> </ul>	<p>Betreuer*in: Austeilen / Einstellen der Fragebögen, Vorlesen der Instruktion</p> <p>Schüler*innen: Bearbeitung des Fragebogens in Einzelarbeit</p>	Vorwissensfragebogen
35‘-55‘	<p><b>Kognitiver Fähigkeitstest (KFT)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einleitung KFT: Es gibt zwei unterschiedliche Fragebögen die als V3-Test und N2-Test gekennzeichnet sind. Diese Fragebögen werden von Euch nacheinander bearbeitet. Es ist wichtig, dass ihr die Fragebögen in Einzelarbeit bearbeitet. Es ist nicht erwartet, dass ihr alle Aufgaben komplett lösen könnt.</li> <li>▪ Austeilen der <b>Aufgabenhefte und Antwortbögen</b></li> </ul>	<p>Betreuer*in: Austeilen / Einstellen der Aufgabenhefte und Antwortbögen,</p>	<p>KFT Instruktion, KFT Aufgabenhefte, KFT Antwortbögen, Stoppuhr</p>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Instruktionen KFT <b>V3-Test</b> vorlesen (vgl. Heller &amp; Perleth, 2000)</li> <li>▪ <i>Beginn! Stoppuhr auf 7 Minuten.</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <i>Stopp! Bitte legt eure Bleistifte jetzt hin!</i></li> </ul> </li> <li>▪ Nun nehmt euch den Zettel mit N2-Test.</li> <li>▪ Instruktionen KFT <b>N2-Test</b> vorlesen (vgl. Heller &amp; Perleth, 2000)</li> <li>▪ <i>Beginn! Stoppuhr auf 8 Minuten.</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <i>Stopp! Bitte legt eure Bleistifte jetzt hin!</i></li> </ul> </li> <li>▪ Einsammeln der Antwortbögen und Aufgabenhefte.</li> </ul>	Vorlesen der Instruktion  Schüler*innen: Bearbeitung der beiden KFT-Subtests in Einzelarbeit	
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

Intervention			
Zeit	Inhaltliche Aspekte	Schüler- und Betreueraktivität	Materialien/ Medien
9:00 – 9:30 Uhr	<p><b>Einführung in den Projekttag</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Begrüßung der Schüler*innen</li> <li>▪ Einführung in den Projektablauf</li> <li>▪ Organisation der Experimente: Es gibt insgesamt 7 Experimente die ihr in diesem Projekt durchführen werdet. Diese Experimente behandeln das Thema Brände und Brandbekämpfung. Diese Experimente sind von 1-7 durchnummieriert. Es gibt insgesamt 4 Betreuer die euch in diesem Projekt begleiten werden.</li> <li>▪ Vorstellen der Betreuer: Solltet ihr während des Experimentierens Fragen haben, könnt ihr euch an die Betreuer wenden. Folgende Betreuer werden euch begleiten: Betreuer 1, Betreuer 2, Betreuer 3, Betreuer 4.</li> <li>▪ Einteilung in 2er und 3er Gruppen (Gruppenkarten 1-12 nutzen).</li> <li>▪ Jede Gruppe erhält einen Ablaufplan mit der Reihenfolge der Stationen.</li> <li>▪ Erklärung der Testinstrumente: Ihr erhaltet von mir ein Experimentierheft. In diesem Experimentierheft findet ihr die Experimentievorschriften der 7 Experimente. Die Experimente werden in Kleingruppen (2-3 Schüler*innen) durchgeführt. Bei einem Experiment bekommt ihr gesonderte Zettel, auf denen ihr wieder eure Schüler*innen-ID (Hinweis zur Anonymität geben) eintragt. Bevor ihr dieses Experiment durchführen könnt, müsst ihr eine kleine Voruntersuchung des bei dem Experiment eingesetzten Stoffes machen und einen kurzen Steckbrief zu dem Stoff ausfüllen.</li> <li>▪ Für meine Arbeit ist es ganz wichtig, dass ihr die Fragebögen selbstständig ausfüllt. Die Experimente werden zwar in Kleingruppen durchgeführt, das Ausfüllen soll aber in Einzelarbeit erfolgen. In dem Labor steht euch dafür genügend Platz zur Verfügung.</li> </ul>	Präsentation  Gruppenkarten für Einleitung, Experimentieranleitungen, Ablaufpläne für die einzelnen Gruppen  Be- treuer*in: Sicher- heitsein- weisung, Austeilen der	

	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einführung in die Methode <i>Lautes Denken</i> mit Übung (Einführung vorlesen und 10 Minuten für das Lösen der Aufgaben in Partnerarbeit geben. Anschließend kurz die Herausforderungen diskutieren.)</li> <li>▪ Sicherheitsbelehrung (raumspezifisches integrieren)</li> <li>▪ Bevor experimentiert werden kann: Kittel anziehen, Laborbrillen austeiln</li> <li>▪ Hefte mit den Experimentieranleitungen austeiln</li> </ul>	Experimentieranleitungen	
9:30 - 13:40 Uhr	<p><b>Laborphase</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aufteilung der Schüler*innen auf die Arbeitsplätze</li> <li>▪ Instruktion für das Experimentieren im Labor: Die Experimente sind in den Laborheften beschrieben. Alles was ihr für das Experiment benötigt findet ihr an den Arbeitsplätzen mit der entsprechenden Nummerierung. Nach dem Experiment notiert Ihr eure Beobachtungen in dem Experimentierheft und fertigt eine Auswertung an. Denkt bitte daran, dass die Aufgaben in Einzelarbeit angefertigt werden müssen, um voneinander unabhängige Ergebnisse zu erhalten. Nach dem Experiment räumt ihr euren Arbeitsplatz auf und wartet dann an den Schreibplätzen. Das nächste Experiment wird erst dann durchgeführt, wenn die Schüler*innen der anderen Gruppe ihre Beobachtungen und Auswertung eingetragen haben.</li> <li>▪ <b>Besonderheit – Station Eye-Tracking:</b> Die Station Eye-Tracking ist zusätzlich zu den 7 Experimenten zu sehen. Sie besteht aus 3 Elementen. Zunächst müssen die Schüler*innen in ihren Kleingruppen eine Voruntersuchung der Eigenschaften des Stoffes durchführen und protokollieren und einige persönliche Daten abgeben. Dann werden sie einzeln nacheinander in den Raum mit dem Eye-Tracker geführt, wo ihre Blickdaten aufgenommen werden. Wenn diese Datenaufnahme fertig ist, müssen sie noch einige Fragebögen ausfüllen. Dies machen sie an den Tischen im Labor. Zunächst füllen sie ein offenes Protokoll aus, geben das an den*die Untersuchungsleiter*in ab und bekommen den ersten geschlossenen Fragebogen. Dieser wird nach der Bearbeitung wieder eingesammelt und die Schüler*innen erhalten den zweiten Fragebogen, den sie bearbeiten sollen. Einsammeln und den dritten Fragebogen austeiln, bearbeiten lassen und wieder einsammeln. Anschließend den Aufgaben-Leitfaden für das <i>Laute Denken</i> einigen zufällig ausgewählten Schüler*innen austeiln und laut denken lassen.</li> </ul>		
Flexibel zwischen 11:45 & 13:00 Uhr	<p><b>Mittagspause:</b> Zwischen den Experimenten wird flexibel eine ca. 30-minütige Pause eingefügt. Diese muss leider etappenweise durchgeführt werden, damit alle Eye-Tracking Daten aufgenommen werden können.</p>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Zusatztversuch – Modellierung eines Feuerlöschers:</b> Wenn Schüler*innen mit den Experimenten 1-7 fertig sind, dürfen sie sich Gedanken darüber machen, wie sie den Feuerlöscher modellieren könnten und ihre Idee umsetzen.</li> </ul>		

13:40- 14:00 Uhr	<p><i>Abschlussbesprechung (kein relevanter Teil der Intervention)</i></p> <p><b>Wie entstehen Brände?</b> (A: Brennbarer Stoff, Sauerstoff &amp; Zündquelle)</p> <p><b>Was ist das Besondere an einer Staubexplosion?</b> (A: extrem schneller Verbrennungsprozess; Zerteilungsgrad des Stoffes entscheidet über die Schnelligkeit der Reaktion)</p> <p><b>Wie könnt ihr Brände am besten löschen?</b> (A: Mit Wasser → Nicht immer die beste Wahl; Verschiedene Feuerlöscher-Typen gibt es (Nasslöscher, Kohlenstoffdioxidschneelöscher, Trockenlöscher, Schaumlöscher))</p> <p><b>Wie schaffen diese Feuerlöscher es, das Feuer zu löschen?</b> (Gemeinsamkeiten?) (A: Abkühlen und/oder Sauerstoff fern halten)</p>		Präsentation
------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--------------

### 12.3 Fragebogen zum Vorwissen

--	--	--	--

Schüler-ID

Hallo liebe Schülerin, hallo lieber Schüler,

damit wir die Ergebnisse Eurer Fragebögen einander zuordnen können, vergeben wir anonymisierte Schüler-Identifikationsnummern (Schüler-ID).

Trage dazu in die oberen Quadrate den **ersten Buchstaben** Deines Vornamens, den **zweiten Buchstaben** Deines Nachnamens sowie den **Tag** und **Monat** Deiner Geburt ein.

Beispiel:

Max Müstermann, geboren am 15.01.2002

M	U	15	01
---	---	----	----

Schüler-ID

**Hallo liebe Schülerin, hallo lieber Schüler,**

im Folgenden findest du einige Aussagen zum Thema „*Brände und Brandbekämpfung*“.

Bitte bearbeite die Arbeitsaufträge.

Bei einigen Aussagen wirst du aufgefordert, eine Begründung oder Erklärung aufzuschreiben.

Kreuze bei einer anderen Aufgabe bitte an, ob die Aussagen *stimmen* („*stimmt*“), *nicht stimmen* („*stimmt nicht*“) oder ob du es nicht weißt („*weiß nicht*“). Mache nur dann bei jeder Aussage *ein* Kreuz für „*stimmt*“ oder „*stimmt nicht*“, wenn du dir sicher bist! Wenn du nicht sicher bist, kreuze „*weiß nicht*“ an! Es können auch mehrere Aussagen hintereinander falsch oder richtig sein.

Alle deine Angaben werden anonym behandelt.

Nun kann's auch schon losgehen. Viel Spaß!

- 1.) Notiere die Bedingungen, die nötig sind, um ein Feuer zu entzünden.

---

---

---

---

- a. Beschreibe, wie diese Bedingungen zusammenhängen können.

---

---

---

---

- 2.) Ordne folgende Gegenstände nach ihrer Brennbarkeit ein. Trage dazu in die Kästchen bei dem Gegenstand, der am besten brennt, eine 1 ein. Und nummeriere fortlaufend. Schreibe die Namen der Gegenstände auf die Linie.



---

---

---

---

- 3.) Im Jahr 1772 führte der Naturwissenschaftler Joseph Priestley einen Versuch durch, der wichtige Erkenntnisse für das Verständnis von Leben auf der Erde brachte. Dabei brachte er eine Kerze in einen abgeschlossenen Behälter. Die Kerze erlosch nach kurzer Zeit. Als er eine Maus in den gleichen Behälter brachte, starb sie. Daraufhin setzte er Maus und Kerze zusammen in den Behälter. Die Kerze erlosch schneller als sonst. Offenbar benötigten Maus und Kerze den gleichen Bestandteil der Luft.
- Welcher Bestandteil der Luft ist es, den Maus und Kerze benötigen?

---

---

---

---

- 4.) Man kann mit einem Feuerzeug einen Eisennagel anzünden, wenn man ein bestimmtes Hilfsmittel verwendet.
- a. Kreuze das richtige Hilfsmittel an.

Eisenfeile       Grillanzünder       Hammer       Herdplatte       weiß nicht

- b. Erläutere, wie du es machen würdest.

---

---

---

---

---

---

- 5.) Begründe, warum man mit einem Stock und trockenen Gräsern ein Lagerfeuer entzünden kann?

---

---

---

---

---

---

- 6.) Erkläre, was eine Explosion ist.

---

---

---

---

---

7.) Begründe, welche Bedingungen gegeben sein müssen, damit es zu einer Explosion kommt.

---

---

---

---

8.) Was kann explodieren? Kreuze alle richtigen Antworten an.

Backpulver		
stimmt <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>	weiß nicht <input type="checkbox"/>

Mehlstaub		
stimmt <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>	weiß nicht <input type="checkbox"/>

Benzindampf		
stimmt <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>	weiß nicht <input type="checkbox"/>

Öldampf		
stimmt <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>	weiß nicht <input type="checkbox"/>

Betonstaub		
stimmt <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>	weiß nicht <input type="checkbox"/>

Sand		
stimmt <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>	weiß nicht <input type="checkbox"/>

Erdgas		
stimmt <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>	weiß nicht <input type="checkbox"/>

Schwarzpulver		
stimmt <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>	weiß nicht <input type="checkbox"/>

Kohlenstoffdioxidgas		
stimmt <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>	weiß nicht <input type="checkbox"/>

Wasserdampf		
stimmt <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>	weiß nicht <input type="checkbox"/>

a. Warum können manche Stoffe explodieren und manche nicht? Begründe deine Vermutungen.

---

---

---

---

**Du hast es fast geschafft!**

Auf diesem Blatt sollst Du nun unter Punkt 9 noch ein paar Angaben zu deiner Person machen. Unter Punkt 10 findest Du sechs Aussagen, mit denen wir Dein Interesse am Chemieunterricht erfragen möchten. Mache pro Aussage immer nur ein Kreuz für das, was am ehesten auf Dich zutrifft. Alle Daten werden anonym behandelt.

**9.) Angaben zu deiner Person:**

Wie alt bist du?

Kreuze hier dein Geschlecht an: Mädchen:  Junge:

Trage hier deine letzte Zeugnisnote für die folgenden Fächer ein:

Chemie:  Physik:  Mathematik:  Deutsch:  Englisch:

Kreuze hier an, welche Sprache du zu Hause sprichst:

Deutsch:  Türkisch:  Russisch:  andere Sprache, nämlich \_\_\_\_\_

**10.) Angaben zu deinem Interesse am Chemieunterricht:**

	Trifft völlig zu	Trifft eher zu	Trifft eher nicht zu	Trifft gar nicht zu
1.) Mir liegt viel daran, in Chemie viel zu wissen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2.) Es ist für mich persönlich wichtig, das in Chemie Gelernte zu behalten.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3.) Ich freue mich auf den Chemieunterricht.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4.) In Chemie würde ich gern mehr Unterricht haben.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5.) Chemie gehört für mich zu den wichtigen Fächern.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6.) Mein Interesse am Fach Chemie ist hoch.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7.) Mein Interesse am Experimentieren ist hoch.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Vielen Dank für deine Mitarbeit! ☺**

## 12.4 Musterlösung Vorwissensfragebogen

	Kategorienbeschreibung	Ankerbeispiele	Codierung
<b>Wet 1 – Notiere die Bedingungen, die nötig sind, um ein Feuer zu entzünden. → Wird Aufgeteilt in 3 Variablen, welche die drei wichtigsten Bedingungen darstellen.</b>			
<b>Wet 1 Brennstoff</b>	<b>Eine Einordnung in diese Kategorie erfolgt, wenn...</b>		
3. Fachkonzept vorhanden	... das Konzept erläutert wird.		3
2. Fachkonzept teilweise vorhanden	... der Oberbegriff genannt wird.	Stoff, der brennt; Brennmaterial; brennbares Material; brennbarer Untergrund;	2
1. Fachkonzept unwahrscheinlich	... ein Beispiel genannt wird.	Gegenstand, der das Feuer aufnimmt	1
o. Fachkonzept nicht erschließbar	... kein relevantes Beispiel genannt wird.	„Man sollte kein Feuer legen wo zum Beispiel schnell etwas anbrennen kann oder wo Erstickungsgefahr ist. (IJU1301)“; Gas (da zu unspezifisch – brennbares Gas wäre mit 1 zu kodieren)	<input type="radio"/>
<b>Wet 1 Sauerstoff</b>	<b>Eine Einordnung in diese Kategorie erfolgt, wenn...</b>		
3. Fachkonzept vorhanden	... das Konzept erläutert wird.		3
2. Fachkonzept teilweise vorhanden	... der Oberbegriff genannt wird.	Sauerstoff	2
1. Fachkonzept unwahrscheinlich	... ein Beispiel genannt wird.	Luft	1
o. Fachkonzept nicht erschließbar	... kein relevantes Beispiel genannt wird.	„Man sollte kein Feuer legen wo zum Beispiel schnell etwas anbrennen kann oder wo Erstickungsgefahr ist. (IJU1301)“; Gas (da zu unspezifisch – brennbares Gas wäre mit 1 zu kodieren)	<input type="radio"/>
<b>Wet 1 Zündquelle</b>	<b>Eine Einordnung in diese Kategorie erfolgt, wenn...</b>		
3. Fachkonzept vorhanden	... das Konzept erläutert wird.		3
2. Fachkonzept teilweise vorhanden	... der Oberbegriff genannt wird.	Wärme; Entzündungstemperatur	2
1. Fachkonzept unwahrscheinlich	... ein Beispiel genannt wird.	Feuer; Hitze; Feuerzeug; Anzünder; Zünder; Funken z.B. durch Feuerstein	1
o. Fachkonzept nicht erschließbar	... kein relevantes Beispiel genannt wird.	„Man sollte kein Feuer legen wo zum Beispiel schnell etwas anbrennen kann oder wo Erstickungsgefahr ist. (IJU1301)“; Gas (da zu unspezifisch – brennbares Gas wäre mit 1 zu kodieren)	<input type="radio"/>

<b>Wet 1a – Beschreibe, wie diese Bedingungen zusammenhängen können.</b>		
<b>Wet 1a</b>	<b>Eine Einordnung in diese Kategorie erfolgt, wenn...</b>	
3. Fachkonzept vorhanden	... eine Beziehung zwischen zwei bis drei Bedingungen genannt und zusätzlich erläutert wird.	3
2. Fachkonzept teilweise vorhanden	... eine Beziehung zwischen drei Bedingungen (Brennstoff, Sauerstoff und Zündquelle) genannt wird und erkannt wird, dass sich diese drei Bedingungen gegenseitig bedingen.	„Wenn ein Brennmaterial vorhanden ist sowie Sauerstoff vorhanden ist und sich das Material aufheizt kommt es zum Brand“; „Sauerstoff braucht man damit das Feuer brennen kann ein Feuerzeug um es anzuzünden und Brennbares, z.B. Holz, braucht man, damit es brennt (ILO2810).“
1. Fachkonzept unwahrscheinlich	... eine Beziehung zwischen zwei Bedingungen genannt wird (auch im Beispiel möglich).	„Im Wald gibt es trockenes Holz und trockene Gräser, dies entzündet sich durch eine weggeworfene Zigarette und breite sich schnell aus (IJE1804).“; Man braucht Sauerstoff, damit das Feuer weiterhin brennt. (IMIO202)“;
o. Fachkonzept nicht erschließbar	... keine relevante Beziehung genannt wird.	„Es müssen alle drei Bedingungen erfüllt sein, damit es brennt.“ (IAE1401); „Ohne Brandkörper keine Energie, Ohne Sauerstoff kann es nicht Brennen, und ohne Hitze geht es nicht. (IJIO403)“; Wenn eine der Sachen fehlt, geht es nicht. (IMCI704)“; „weiß nicht“
<b>Wet 2 – Ordne folgende Gegenstände nach ihrer Brennbarkeit ein.</b>		
<b>Wet 2</b>	<b>Eine Einordnung in diese Kategorie erfolgt, wenn...</b>	
3. Fachkonzept vorhanden	... der Gegenstand an 4. Stelle eingeordnet wird.	4
2. Fachkonzept teilweise vorhanden	... der Gegenstand an 3. Stelle eingeordnet wird.	3
1. Fachkonzept unwahrscheinlich	... der Gegenstand an 2. Stelle eingeordnet wird.	2
o. Fachkonzept nicht erschließbar	... der Gegenstand an 1. Stelle eingeordnet wird.	1
<b>Wet 3 – Welcher Bestandteil der Luft ist es, den Maus und Kerze benötigen?</b>		
<b>Wet 3</b>	<b>Eine Einordnung in diese Kategorie erfolgt, wenn...</b>	
2. Fachkonzept teilweise vorhanden	... Sauerstoff als der Bestandteil der Luft genannt wird, den Maus und Kerze benötigen und gleichzeitig erläutert wird, wieso Sauerstoff die korrekte Antwort sein muss.	„Sie brauchen beide Sauerstoff und wenn sie in einem geschlossenen Behälter gesteckt werden, fehlt ihnen der Sauerstoff und sie können nicht mehr. Bei der Maus: Organe werden nicht mehr versorgt und sie stirbt. Bei der Kerze: Feuer braucht Sauerstoff (Luft) zum Brennen.“; „Sauerstoff, die Maus muss atmen und die Kerze benötigt es zum Brennen.“

1. Fachkonzept unwahrscheinlich	... der Begriff Sauerstoff als der Bestandteil der Luft genannt wird, den Maus und Kerze benötigen.	„Die Kerze und die Maus benötigen Sauerstoff.“;	I
o. Fachkonzept nicht erschließbar	... kein Stoff bzw. ein irrelevanter Stoff genannt wird.		O
<b>Wet 4a – Man kann mit einem Feuerzeug einen Eisennagel anzünden, wenn man ein bestimmtes Hilfsmittel verwendet.</b>			
<b>Wet 4a</b>	<b>Eine Einordnung in diese Kategorie erfolgt, wenn...</b>		
5	weiß nicht		5
4	Herdplatte		4
3	Hammer		3
2	Grillanzünder		2
I	Eisenfeile		I
<b>Wet 4b – Erläutere, wie du es machen würdest.</b>			
<b>Wet 4b</b>	<b>Eine Einordnung in diese Kategorie erfolgt, wenn...</b>		
3. Fachkonzept vorhanden	... das Prinzip vollständig erklärt wird.		3
2. Fachkonzept teilweise vorhanden	... das Prinzip teilweise erklärt wird.	„Ich würde die Eisenfeile nehmen und sie am Eisennagel reiben, dass der Nagel durch die Reibung erhitzt wird und dann das Feuerzeug dranhalten.“	2
1. Fachkonzept unwahrscheinlich	... das Vorgehen beschrieben wird.	„Ich würde einen Bunsen Brenner benutzen irgendwann ist das Metall so heiß, dass es brennt. Kurz darauf schmilzt das Eisen.“	I
o. Fachkonzept nicht erschließbar	... eine irrelative oder falsche Aussage genannt wird.	„Ich würde es mit einer Eisenfeile polieren, da diese eine sehr rauhe und abtragende Oberfläche hat und diese sehr trocken ist.“	O
<b>Wet 5 – Begründe, warum man mit einem Stock und trockenen Gräsern ein Lagerfeuer entzünden kann?</b>			
<b>Wet 5</b>	<b>Eine Einordnung in diese Kategorie erfolgt, wenn...</b>		
3. Fachkonzept vorhanden	... das Prinzip vollständig erklärt wird.	„Dadurch das der Stock sich bewegt wird Reibung aufgebaut und durch Reibung entsteht Hitze irgendwann ist das Gras heiß genug und brennt.“;	3
2. Fachkonzept teilweise vorhanden	... das Prinzip teilweise erklärt wird.	„Weil die Reibung die ein Stock auslöst wenn man den Stock auf einer Holzplatte oder Gras reibt ein paar Funken loslässt und dann das trockene Gras anfängt zu brennen.“	2
1. Fachkonzept unwahrscheinlich	... das Vorgehen beschrieben wird.	„Das trockene Gras brennt sehr schnell und mit dem Stock kann man ganz schnell reiben, (...).“	I
o. Fachkonzept nicht erschließbar	... eine irrelative oder falsche Aussage genannt wird.	„Weil beides ein brennlicher Stoff ist und beide aber, wenn sie nass (feucht) wären nicht brennen können. Die Gräser entzünden sich schneller, da es weniger braucht weil es trockener ist.“; Das trockene Gras entzündet sich schnell. Man kann mit dem Stock Funken machen und das Gras somit	O

		entzünden.“; „Irgend etwas mit Reibung.“; „Da trockene Blätter durch schnelle Reibung und Feuer anfängt zu brennen, da sie so trocken sind.“
<b>Wet 6 – Erkläre, was eine Explosion ist.</b>		
<b>Wet 6</b>	<b>Eine Einordnung in diese Kategorie erfolgt, wenn...</b>	
3. Fachkonzept vorhanden	... eine Beschreibung einer Explosion als zeitlich gesteigerte Form der Verbrennung erfolgt.	„Verbrennung ist extrem schnell“; „Das Heptan ist innerhalb von Millisekunden verbrannt, wodurch sich die Wärme sehr schnell ausbreitet.“; „ruckartige Freisetzung von Energie“; „Ein Stoff z.B. Mehl entzündet sich und wegen seiner großen Oberfläche verbrennt es schlagartig, dies nennt man Explosion.“
2. Fachkonzept teilweise vorhanden	... der Begriff Explosion im Zusammenhang mit Brennstoff genannt wird. <u>Oder:</u> ... der Begriff Explosion deutlich als Folge von etwas, das im Zusammenhang mit dem Brennstoff und einer Zündquelle steht, genannt wird.	„Das heiße Mehl explodiert“; „Dose explodiert schlagartig“; „kleine Explosion“
1. Fachkonzept unwahrscheinlich	... ein Verbrennen oder ein Synonym (Entzündung, Zündung, Flamme etc.) genannt werden.	„Weizenmehl verwandelt sich in eine große Flamme“; „Als wir die Luftpumpe betätigten entstand eine Stichflamme“; „Durch das Feuerzeug entzündet sich das Feuerzeugbenzin“; „Das Feuerzeug zündet das Benzin“; „Bei einer Explosion reagiert ein Stoff.“; „Eine Explosion ist, wenn ein Stoff entzündet wird, der eine Druckwelle erzeugt.“
o. Fachkonzept nicht erschließbar	... keine der Kategorien 1-3 erfüllt werden.	„Durch den Kabelbruch und die Luft kam es zu einer Explosion“; „Als ein Luftstoß gekommen ist, ist das Mehl in die Luft gestoßen und das, wahrscheinlich kaputte, Kabel hat Feuer gefangen.“
<b>Wet 7 – Begründe, welche Bedingungen gegeben sein müssen, damit es zu einer Explosion kommt. – Spaltung in die verschiedenen Bereiche „Zerteilungsgrad“, „Brennbares Stoffgemisch“, „Zündquelle“ und „Druckanstieg“</b>		
<b>Wet 7 – Zerteilungsgrad</b>	<b>Eine Einordnung in diese Kategorie erfolgt, wenn...</b>	
3. Fachkonzept vorhanden	... das Vorliegen einer großen Oberfläche explizit genannt wird. ... der Prozess der Oberflächenvergrößerung der Substanz wörtlich genannt, ein Synonym für diesen Vorgang verwendet oder der Vorgang an sich beschrieben wird.	„wenn ein Brennstoff so gut mit Sauerstoff „vermischt“ ist, also dass, dann z.B. Benzin verstäubt ist und wegen der großen Oberfläche gut mit dem O <sub>2</sub> reagiert“
2. Fachkonzept teilweise vorhanden	... eine spezifische Beziehung zur Oberfläche genannt wird, sie jedoch implizit bleibt (z.B. ohne nähere Charakterisierung durch die	„(...) wird das Weizen durch das Plexiglasrohr verteilt.“; „Durch die schnelle Zerstreuung des Mehls, entstand durch den Strom eine Flamme.“; „Ich

	Attribute „große“ oder „vergrößerte“) – implizit könnte Oberfläche drinstecken (z.B. Zerteilungsgrad, fein verteilt, fein vernebelt) ... eine Verteilung des Stoffes wörtlich genannt, ein Synonym für diesen Vorgang verwendet oder der Vorgang an sich beschrieben wird.	denke die Luft bestäubt den glühenden Draht mit Mehl, dadurch kommen Flammen“; „Vielleicht haben sich Dämpfe durch das Schütteln gebildet“; „Wenn man den Stopfen abnimmt, strömt das Gas aus(...)“
1. Fachkonzept unwahrscheinlich	... der Prozess einer Mobilisierung (z.B. Verwirbelung) der Substanz wörtlich genannt wird. ... keine bzw. lediglich eine unspezifische Beziehung zur Oberfläche genannt wird.	AB: fein vernebelt, fein verteilt „das Mehl „fliegt“ hoch“; „Durch den Luftstoß wird der Toner an den heißen Draht gestoßen“; „Da das Mehl von dem Rohr aufgewirbelt wurde“
○. Fachkonzept nicht erschließbar	... keine der Kategorien 1-3 erfüllt werden.	„Durch das Feuer hat sich Heptan in ein Gas verwandelt“
<b>Wet 7 – Brennbares Stoffgemisch</b>		
3. Fachkonzept vorhanden	... die beiden Einzelkomponenten des Stoffgemisches – Brennstoff und Luft (bzw. Sauerstoff) – genannt und als Reaktionspartner erkannt werden und <b>ein</b> Bezug zur Brennbarkeit (Feuer, Flamme, entzündlich, entflammbar etc.) gegeben wird. <u>Oder:</u> ... der Brennstoff in Kombination mit dem Oxidationsbegriff genannt wird (verweist auf Sauerstoff als Reaktionspartner bei einer Verbrennungsreaktion).	„Vielleicht sind irgendwelche bestimmten Stoffe im Weizenmehl und wenn dieser erhitzt werden und Luft dazu kommt brennen sie“; „Das Maismehl wird nach oben gepustet und hat sich mit Sauerstoff vermischt und es gab eine Explosion“; „Mit Sauerstoff ist das Mehl zu einer Flame geworden, die ganz kurz aufleuchtet wenn man auf die Luft Pumpe drückt“
2. Fachkonzept teilweise vorhanden	... die beiden Einzelkomponenten des Stoffgemisches – Brennstoff und Luft (bzw. Sauerstoff) – genannt, aber <b>nicht</b> als Reaktionspartner erkannt werden und <b>kein</b> Bezug zur Brennbarkeit (Feuer, Flamme, entzündlich, entflammbar etc.) gegeben wird. ... Luft muss dabei explizit in der Rolle des Reaktionspartners vorkommen. Ein lediglich mit einer Mobilisierung zusammenhängender Luftstoß wird somit nicht als Reaktionspartner akzeptiert.	„Das Mehl ist daran (Zündquelle) gekommen und im Zusammenhang mit Sauerstoff explodiert“; „(...) hat zusammen mit der Luft das Weizenmehl zum explodieren gebracht“; „Die Luft verbindet sich mit dem Weizen, daraus wird ein Weizenmehlluftgemisch (...); „Das Weizenmehl ist mit etwas Heißem und Luft in Verbindung gekommen (...)"
1. Fachkonzept unwahrscheinlich	... die Brennstoff-Komponente genannt wird. <u>Oder:</u> ... erläutert wird, dass es sich um einen brennbaren Stoff handelt (implizites Wissen wird akzeptiert).	„das Weizenmehl verwandelt sich in eine große Flamme, als mit einer Luftpumpe Luft in das Plexiglasrohr gepumpt wird.“; „Sobald Luft dazu kam, wehte das Maismehl nach oben und der Glühwendel glühte auf.“; „auf einen brennbaren Stoff trifft“; „ein Sprengstoff ...“; „es ... Feuer fängt“

o. Fachkonzept nicht erschließbar	... keine der Kategorien 1-3 erfüllt werden.	„Das Maismehl spritzt in die Luft und es kommt eine Flamme“; „Kommt Luft raus, so entsteht eine Pulverwolke“; „(...) und durch den Luftstoß ging das Mehl in die Luft“; „Luftdruck“; „Bomben“; „Gase“ (ohne Spezifizierung); „verschiedene Stoffe“; „Man braucht min. einen Stoff, der explosiv ist. (1AI2309)“	o
-----------------------------------	----------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---

Wet 7 - Zündquelle	Eine Einordnung in diese Kategorie erfolgt, wenn...	
3. Fachkonzept vorhanden	... eine Zündquelle und ein Phänomen der Verbrennungsreaktion (Verbrennung und/oder Druckanstieg) wörtlich genannt und <b>ein</b> Kausalzusammenhang zwischen der Zündquelle und dem Phänomen hergestellt wird. (Kann z.B. ausgedrückt werden durch kausale Konjunktionen (weil, dadurch, denn, da etc.), kausale Adverbien (deshalb, darum, somit etc.) oder durch einen Sinnzusammenhang (zeitlich oder inhaltlich) zwischen der Zündquelle und dem Phänomen.)	„Mehl hat den Glühwendel berührt und es entstand eine Flamme“; „Durch den Luftstoß wird das Toner an die Glühwendel gestoßen, durch die Hitze entzündet sich das Toner.“; „Wenn man das Feuerzeug an die Öffnung hält, gibt es kurz eine Flamme an der Öffnung.“; „Dann stieg vom Tiegel das Mehl hoch und ab der Glühwendel kam Feuer hoch“; „Das Mehl ist bis zur Glühwendel geflogen und explodiert“; „Das Weizenmehl entzündet sich <u>wegen dem</u> Kabelbrand“
2. Fachkonzept teilweise vorhanden	... eine Zündquelle und ein Phänomen der Verbrennungsreaktion (Verbrennung und/oder Druckanstieg) wörtlich genannt und <b>kein</b> Kausalzusammenhang zwischen der Zündquelle und dem Phänomen hergestellt wird.	„Mehl gelang zu dem brennenden Kabel“; „Das Mehl kam zusammen mit der Luft nah genug an das brennende Kabel dran, (...); „es (das Weizenmehl) ist von dem Kabel entzündet worden“
1. Fachkonzept unwahrscheinlich	... eine Zündquelle wörtlich genannt oder implizit darauf verwiesen wird. (Dabei ist der Begriff „Anzünden“ erlaubt, „Entzünden“ wird in o eingeordnet.)	„Feuer“; „Herd“; „gelangt ins Feuer“; „(...) das Kabel gebrannt hat“; „Glühwendel“; „hohe Temperatur“; „(...) erhitzt werden“
o. Fachkonzept nicht erschließbar	... keine der Kategorien 1-3 erfüllt werden.	„Das Mehl schoss nach oben und entzündete sich explosionsartig“ (aktive Formulierung)

**mögliche Zündquellen:** Draht, Glühwendel, Strom, Glühdraht, elektrische Leitung, Feuerzeug, Flamme, Feuer, brennender Tiegel, Herdplatte

Wet 7 - Druckanstieg	Eine Einordnung in diese Kategorie erfolgt, wenn...	
3. Fachkonzept vorhanden	... ein Druck(-anstieg) und eine Ursache des Druck(-anstiegs) (Temperaturanstieg, Verbrennungsprodukte etc.) wörtlich genannt werden und einen prozesshaften Sinnzusammenhang ( <b>zeitliche Abfolge</b> oder <b>inhaltliche Abfolge</b> ) zwischen dem Druckanstieg und der Ursache hergestellt wird.	„(...) wodurch sich die Wärme sehr schnell ausbreitet und ein hoher Druck entstand.“; „Durch die Wärme oder die kleine Explosion dehnt sich die Luft aus und durch den Druck fliegt der Deckel in die Luft“; „Es entsteht eine Flamme und dadurch wird der Druck höher und der Deckel geht auf.“

2. Fachkonzept teilweise vorhanden	... ein Druck(-anstieg) und/oder eine Ursache des Druck(-anstiegs) (Temperaturanstieg, Verbrennungsprodukten...) wörtlich genannt werden.	„Die Temperatur steigt an und es kommt (...) zu einer Ausdehnung der Gase“; „Durch den Druck wird der Deckel angehoben“	2
1. Fachkonzept unwahrscheinlich	... eine von der Druckerhöhung ausgehende Auswirkung (z.B. Anheben des Deckels, Umfallen der Dose) wörtlich genannt, ein Synonym für diesen Vorgang verwendet oder der Vorgang an sich beschrieben wird, ohne den Begriff Druck zu nennen.	„(...) drückt den Deckel nach oben“; „Danach hebt der Deckel ab“; „Der Deckel fliegt auf“	1
o. Fachkonzept nicht erschließbar	... keine der Kategorien 1-3 erfüllt werden.	„Die Korken bringen extra Druck“; „Wegen dem Luftdruck“	o
<b>Wet 8 – Was kann explodieren? Kreuze alle richtigen Antworten an. (Verschiedene Materialien werden als einzelne Variablen betrachtet.)</b>			
<b>Wet 8 – Back-pulver</b>		<b>Als Antwort wird ... angekreuzt.</b>	
3	weiß nicht		3
2	stimmt nicht		2
1	stimmt		1
<b>Wet 8 – Mehlstaub</b>		<b>Als Antwort wird ... angekreuzt.</b>	
3	weiß nicht		3
2	stimmt nicht		2
1	stimmt		1
<b>Wet 8 – Benzindampf</b>		<b>Als Antwort wird ... angekreuzt.</b>	
3	weiß nicht		3
2	stimmt nicht		2
1	stimmt		1
<b>Wet 8 – bei allen weiteren Materialien analog</b>		<b>Als Antwort wird ... angekreuzt.</b>	
3	weiß nicht		3
2	stimmt nicht.		2
1	stimmt.		1
<b>Wet 8a – Warum können manche Stoffe explodieren und manche nicht? Begründe deine Vermutungen.</b>			
<b>Wet 8a</b>	<b>Eine Einordnung in diese Kategorie erfolgt, wenn...</b>		
3. Fachkonzept vorhanden	... die Eigenschaften "brennbar" und "große Oberfläche" genannt werden.	„Da in manchen Stoffen Sachen erhalten sind, die auf Feuer reagieren. Mehl Staub ist so gut, weil er so klein gemahlen ist, darum brennt er besser.“	3
2. Fachkonzept teilweise vorhanden	... die Eigenschaft "große Oberfläche" genannt werden.		2
1. Fachkonzept unwahrscheinlich	... die Eigenschaft "brennbar" explizit genannt werden oder implizit gemeint wird.	„Für eine Explosion aber muss es sich sofort entzünden. (1JE1804)“; „Manche Stoffe reagieren auf Wärme/Feuer sehr empfindlich und und deswegen kann es zu Explosio-nen kommen.“	1

o. Fachkonzept nicht erschließbar	... falsche bzw. irrelevante Aussage genannt werden.	„Manche Stoffe können explodieren, da dieser Stoff unter bestimmten Bedingungen entstanden ist.“; „Weil manche Stoffe explosive Stoffe enthalten und andere nicht.“; „(...) hochexplosiv“ ( <i>wird als Eigenschaft genannt</i> )	o
-----------------------------------	------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---

## 12.5 Leitfaden zur Instruktion vor der Präsentation des Videos beim Eye-Traker

„Nimm bitte auf diesem Stuhl Platz. Setze dich ruhig locker hin. Du wirst dir gleich ein Video anschauen. Währenddessen werden deine Augenbewegungen mit diesem Gerät aufgenommen.

Damit das gut funktioniert, muss das Gerät deine Augen auch gut sehen, sodass wir zunächst eine passende Sitzposition für dich finden müssen (*Sitzposition einstellen*). Ab jetzt bitte nicht mehr bewegen. Gleich wird auf dem Monitor ein roter Punkt erscheinen. Bitte schaue Dir diesen roten Punkt ganz genau an und verfolge ihn die ganze Zeit mit deinen Augen ohne den Kopf zu bewegen. Versuche dabei so wenig wie möglich zu blinzeln.

(*Kalibrierung läuft.*)

Bleibe bitte weiterhin so sitzen. Beobachte genau, was im Video passiert. Schreibe danach deine Beobachtungen auf und werte sie aus. Das Video wird jetzt gestartet.“

## 12.6 Vorversuch zum Modellexperiment *Staubexplosion*

Bevor sich die Schüler\*innen mit dem Modellexperiment *Staubexplosion* im Schüler\*innenexperiment oder in Form eines Videos beschäftigt haben, sollte der Stoff, der in dem Modellexperiment eingesetzt wurde, auf spezifische Eigenschaften untersucht werden. Dabei standen die Eigenschaften Aussehen, Farbe, Magnetismus, elektrische Leitfähigkeit und Brennbarkeit im Fokus. Die Auswertung konnte in die vorgesehenen Kästen unter der jeweiligen Eigenschaft notiert werden.

				<u>Zur Erinnerung:</u> Trage dazu in die oberen Quadrate den ersten Buchstaben Deines Vornamens, den zweiten Buchstaben Deines Nachnamens sowie den Tag und Monat Deiner Geburt ein.																																	
Schüler-ID				Beispiel:																																	
Max Mustermann, geboren am <u>15.01.2002</u> .																																					
M				U																																	
15				01																																	
Schüler-ID																																					
<p><b>Hallo liebe Schülerin, hallo lieber Schüler,</b></p> <p><b>in dem Experiment, das Dir später gezeigt wird, wird ein Stoff verwendet. Untersuche nun die Eigenschaften des Stoffes genauer. Dafür stehen Dir verschiedene Materialien zur Verfügung. Trage Deine Ergebnisse in die Tabelle (Steckbrief zum verwendeten Stoff) ein.</b></p>																																					
<b>Tabelle: Steckbrief zum verwendeten Stoff</b>																																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="8" style="text-align: center; background-color: #cccccc; padding: 2px;">Eigenschaften</th> </tr> <tr> <th rowspan="2" style="width: 25%;">Aussehen</th> <th rowspan="2" style="width: 25%;">Farbe</th> <th colspan="2" style="width: 20%;">Magnetismus</th> <th colspan="2" style="width: 20%;">Elektrische Leitfähigkeit</th> <th colspan="2" style="width: 20%;">Brennbarkeit</th> </tr> <tr> <th style="width: 10%;">Ja</th> <th style="width: 10%;">Nein</th> <th style="width: 10%;">Ja</th> <th style="width: 10%;">Nein</th> <th style="width: 10%;">Ja</th> <th style="width: 10%;">Nein</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="height: 40px;"></td> </tr> </tbody> </table>								Eigenschaften								Aussehen	Farbe	Magnetismus		Elektrische Leitfähigkeit		Brennbarkeit		Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein								
Eigenschaften																																					
Aussehen	Farbe	Magnetismus		Elektrische Leitfähigkeit		Brennbarkeit																															
		Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein																														

## 12.7 Eye-Tracking Protokoll

Bevor den Schüler\*innen das Video präsentiert wurde, sollten sie noch ein paar Angaben zu ihrer Person machen. Ein Schwerpunkt bildete die Frage nach dem Tragen einer Sehhilfe. Diese Informationen ist für die Aufnahme von Eye-Tracking Daten relevant, da u.a. Sehhilfen die Aufnahme von Eye-Tracking Daten unmöglich machen können oder aufgrund von Reflexionen die Daten verfälschen können.

Darüber hinaus haben die Schüler\*innen, die das Modellexperiment im Video gesehen haben, eine kurze schriftliche Einweisung zu den einzelnen Sequenzen, die sie im Folgenden sehen werden, erhalten. Gleichzeitig waren auf demselben Blatt Zeilen vorgedruckt, auf denen die Schüler\*innen nach dem Schauen des Videos ihre Beobachtung und Auswertung notieren konnten.

<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Schüler-ID		
<p><b>Hallo liebe Schülerin, hallo lieber Schüler,</b></p> <p>auf diesem Blatt sollst Du zunächst Angaben zu deiner Person machen.</p> <p>Alle Daten werden anonym behandelt.</p>		
<p><b>Angaben zu deiner Person:</b></p> <p>Wie alt bist du? <input type="text"/></p> <p>Kreuze hier dein Geschlecht an: Mädchen: <input type="checkbox"/> Junge: <input type="checkbox"/></p> <p>Trage hier deine letzte Zeugnisnote für die folgenden Fächer ein:</p> <p>Chemie: <input type="checkbox"/> Physik: <input type="checkbox"/> Mathematik: <input type="checkbox"/> Deutsch: <input type="checkbox"/> Englisch: <input type="checkbox"/></p> <p>Kreuze hier an, welche Sprache du zu Hause sprichst:</p> <p>Deutsch: <input type="checkbox"/> Türkisch: <input type="checkbox"/> Russisch: <input type="checkbox"/> andere Sprache, nämlich _____</p> <p>Trägst du momentan eine der folgenden Sehhilfen?</p> <p>Brille <input type="checkbox"/> Kontaktlinsen <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/></p>		

--	--	--	--

Schüler-ID

**Hallo liebe Schülerin, hallo lieber Schüler,**

**gleich zeigen wir Dir ein Video mit folgenden Inhalten: Zuerst wirst Du den beschrifteten Versuchsaufbau sehen, dann wird ein Vorversuch einmal ohne einen Stoff durchgeführt und als letztes wird das Experiment mit einem Stoff durchgeführt, den Du zuvor untersucht hast.**  
**Beobachte ganz genau, was dabei passiert.**

**Schreibe danach Deine Beobachtungen auf und werte sie aus.**

**Beobachtung:**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**Auswertung:**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## 12.8 Beobachtungs- und Verständnisfragebogen zur Wahrnehmung des Modellexperiments

--	--	--	--

Schüler-ID

Auf dieser Seite findest Du eine Aufgabe zum **beschrifteten Versuchsaufbau**. Lies Dir die Aufgabe **ganz genau** durch und kreuze die Begriffe an, die Deiner Meinung nach am besten zutreffen. Bei dieser Aufgabe können **mehrere Begriffe** angekreuzt werden.

### 1. Beschrifteter Versuchsaufbau:

1) Hier darfst Du mehrere Wörter ankreuzen. Kreuze **alle** Begriffe an, die Du in dem Versuchsaufbau sehen konntest.

<input type="checkbox"/> Becherglas	<input type="checkbox"/> Glas	<input type="checkbox"/> Plexiglasrohr
<input type="checkbox"/> Deckel	<input type="checkbox"/> Glastiegel	<input type="checkbox"/> Schlauch
<input type="checkbox"/> Draht	<input type="checkbox"/> Glühwendel	<input type="checkbox"/> Spannungsquelle
<input type="checkbox"/> Feuerzeug	<input type="checkbox"/> Holzbrett	<input type="checkbox"/> gelber Stoff
<input type="checkbox"/> Folie	<input type="checkbox"/> Kabel	<input type="checkbox"/> blauer Stoff
<input type="checkbox"/> Gewinkeltes Glasrohr	<input type="checkbox"/> Luftpumpe	<input type="checkbox"/> Zündholz

## 12.8 Beobachtungs- und Verständnisfragebogen zur Wahrnehmung des Modellexperiments

--	--	--	--

Schüler-ID

Auf dieser Seite findest Du zwei Fragen zu möglichen Beobachtungen und Aussagen über den **Vorversuch**, den Du gerade gesehen hast. Lies Dir die Fragen und Aussagen **ganz genau** durch und kreuze jeweils die **EINE** Aussage an, die Deiner Meinung nach am besten zutrifft.

### 2. Vorversuch:

#### 2a) Wo findet der Versuch statt?

- |                          |                                                                |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> | Der Versuch findet in einem offenen Plexiglasrohr statt.       |
| <input type="checkbox"/> | Der Versuch findet in einem halboffenen Plexiglasrohr statt.   |
| <input type="checkbox"/> | Der Versuch findet in einem geschlossenen Plexiglasrohr statt. |

#### 2b) Was passiert während des Vorversuchs mit dem Deckel?

- |                          |                                                                       |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> | Der Deckel öffnet sich, wenn die Luftpumpe heruntergedrückt wird.     |
| <input type="checkbox"/> | Der Deckel öffnet sich, nachdem die Luftpumpe heruntergedrückt wurde. |
| <input type="checkbox"/> | Der Deckel öffnet sich <u>nicht</u> beim Betätigen der Luftpumpe.     |

--	--	--	--

Schüler-ID

Auf dieser Seite und den nächsten Seiten findest Du eine Reihe von Fragen zu möglichen Beobachtungen und Aussagen über das **Experiment**, das Du gerade gesehen hast. Lies Dir die Fragen und Aussagen **ganz genau** durch und kreuze jeweils die **EINE** Aussage an, die Deiner Meinung nach am besten zutrifft.

**3. Experiment:**

**Ein Stoff wird in ein kleines Gefäß gefüllt und das Experiment mit diesem Stoff durchgeführt.**

**Beobachtung:****3a) Wie sieht der Stoff aus?**

- |                          |                               |
|--------------------------|-------------------------------|
| <input type="checkbox"/> | Der Stoff ist kristallförmig. |
| <input type="checkbox"/> | Der Stoff ist grobkörnig.     |
| <input type="checkbox"/> | Der Stoff ist pulverförmig.   |

**3b) Was passiert mit dem Stoff direkt nachdem die Luftpumpe betätigt wurde?**

- |                          |                                                           |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> | Der Stoff bleibt unten im Glastiegel.                     |
| <input type="checkbox"/> | Der Stoff wird zum Teil im Plexiglasrohr aufgewirbelt.    |
| <input type="checkbox"/> | Der Stoff wird vollständig im Plexiglasrohr aufgewirbelt. |

**3c) Wann entsteht die Flamme?**

- |                          |                                                            |
|--------------------------|------------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> | Die Flamme entsteht direkt am Glastiegel.                  |
| <input type="checkbox"/> | Die Flamme entsteht unmittelbar an der Glühwendel.         |
| <input type="checkbox"/> | Die Flamme entsteht im oberen Bereich des Plexiglasrohres. |

## 12.8 Beobachtungs- und Verständnisfragebogen zur Wahrnehmung des Modellexperiments

--	--	--	--

Schüler-ID

### 3d) Wie breitet sich die Flamme im Plexiglasrohr aus?

- |                          |                                                                                                                          |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> | Die Flamme entsteht am Glastiegel und breitet sich <u>nicht</u> weiter aus.                                              |
| <input type="checkbox"/> | Die Flamme entsteht am Glastiegel und breitet sich nur <u>nach oben</u> hin aus.                                         |
| <input type="checkbox"/> | Die Flamme entsteht am Glastiegel und breitet sich im Laufe des Experiments <u>im gesamten Rohr</u> weiter aus.          |
| <input type="checkbox"/> | Die Flamme entsteht unmittelbar an der Glühwendel und breitet sich <u>nicht</u> weiter aus.                              |
| <input type="checkbox"/> | Die Flamme entsteht unmittelbar an der Glühwendel und breitet sich nur <u>nach oben</u> hin aus.                         |
| <input type="checkbox"/> | Die Flamme entsteht unmittelbar an der Glühwendel und breitet sich im Laufe des Experiments <u>im gesamten Rohr</u> aus. |
| <input type="checkbox"/> | Die Flamme entsteht im oberen Bereich des Rohres und breitet sich <u>nicht</u> weiter aus.                               |
| <input type="checkbox"/> | Die Flamme entsteht im oberen Bereich des Rohres und breitet sich nur <u>nach oben</u> hin aus.                          |
| <input type="checkbox"/> | Die Flamme entsteht im oberen Bereich des Rohres und breitet sich im Laufe des Experiments <u>im gesamten Rohr</u> aus.  |

### 3e) Was passiert beim Experiment mit dem Deckel?

- |                          |                                                                             |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> | Der Deckel öffnet sich, sobald die Luftpumpe langsam heruntergedrückt wird. |
| <input type="checkbox"/> | Der Deckel öffnet sich sofort, wenn die Flamme gerade entsteht.             |
| <input type="checkbox"/> | Der Deckel öffnet sich erst, nachdem die Flamme wieder ausgegangen ist.     |
| <input type="checkbox"/> | Der Deckel öffnet sich erst, wenn sich die Flamme ausbreitet.               |
| <input type="checkbox"/> | Der Deckel bleibt im Laufe des Experiments geschlossen.                     |

--	--	--	--

Schüler-ID

**Auswertung:****3f) Welche Eigenschaften hat der Stoff bei diesem Experiment?**

- |                          |                                                                                          |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> | Bei dem Experiment wurden grobe Stücke eines <u>nicht</u> brennbaren Stoffes eingesetzt. |
| <input type="checkbox"/> | Bei dem Experiment wurden feine Körner eines <u>nicht</u> brennbaren Stoffes eingesetzt. |
| <input type="checkbox"/> | Bei dem Experiment wurden feine Körner eines brennbaren Stoffes eingesetzt.              |
| <input type="checkbox"/> | Bei dem Experiment wurden grobe Stücke eines brennbaren Stoffes eingesetzt.              |

**3g) Schaue Dir die in 3b angekreuzte Aussage an. Was passiert ganz genau im Rohr direkt nach Betätigung der Luftpumpe?**

- |                          |                                                                         |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> | Der Stoff bleibt unten, weil er zu schwer ist.                          |
| <input type="checkbox"/> | Der Stoff steigt im Rohr hoch.                                          |
| <input type="checkbox"/> | Der Stoff vermischt sich mit der im Rohr enthaltenen Luft.              |
| <input type="checkbox"/> | Der Stoff vermischt sich mit dem im Rohr enthaltenen Kohlenstoffdioxid. |
| <input type="checkbox"/> | Der Stoff breitet sich in dem im Rohr enthaltenen Vakuum aus.           |

**3h) Warum entzündet sich der Stoff in dem in 3c) angekreuzten Bereich?**

- |                          |                                                                                                                                                                    |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> | Der Stoff entzündet sich, da in dem angekreuzten Bereich eine große Menge des Stoffes ist.                                                                         |
| <input type="checkbox"/> | Der Stoff entzündet sich, da in dem angekreuzten Bereich genug Hitze ist.                                                                                          |
| <input type="checkbox"/> | Der Stoff entzündet sich, da sich in dem angekreuzten Bereich der Stoff und die Luft gut vermischt haben.                                                          |
| <input type="checkbox"/> | Der Stoff entzündet sich, da sich in dem angekreuzten Bereich der Stoff und die Luft gut vermischt haben und diese Mischung durch die Hitze entzündet werden kann. |

**3i) Warum öffnet sich der Deckel des Plexiglasrohres?**

- |                          |                                                                                    |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> | Der Deckel öffnet sich durch die Luft, die die Luftpumpe abgibt.                   |
| <input type="checkbox"/> | Der Deckel öffnet sich, weil er durch die Flamme aufgedrückt wird.                 |
| <input type="checkbox"/> | Der Deckel öffnet sich durch den Druck, der während des Experiments gebildet wird. |
| <input type="checkbox"/> | Der Deckel bleibt im Laufe des Experiments geschlossen.                            |

**3j) Welche Funktion hat das Plexiglasrohr?**

- |                          |                                                                                                   |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> | Das Plexiglasrohr wird eigentlich gar nicht für das Experiment benötigt.                          |
| <input type="checkbox"/> | Das Plexiglasrohr ist eine Grenze für das aufgewirbelte Pulver, sodass es nicht überall hinkommt. |
| <input type="checkbox"/> | Das Plexiglasrohr bildet einen abgeschlossenen Raum, wodurch Druck aufgebaut werden kann.         |

## 12.9 Beispielhafte .txt-Ausgabedatei des Eye-Tracking Systems

Die Bezeichnungen der gemessenen und gespeicherten Variablen sind grau und kursiv hervorgehoben.

```
## [iView]
## Converted from: C:\Users\iView    X\Desktop\VideoEyetracking3\data\I_I_SMI_2020-01-
## 09_09-58-27.idf
## Date:      09.01.2020 08:59:12
## Version:   IDF Converter 3.0.16
## IDF Version: 9
## Sample Rate: 500
## Separator Type: Trial
## Trial Count: 3
## Uses Plane File: False
## Number of Samples: 50089
## Reversed: none
## [Run]
## Subject: I
## Description: VideoEyetracking3
## [Calibration]
## Calibration Type: 9-point
## Calibration Area: 1920 1080
## Calibration Point 0: Position(960;533)
## Calibration Point 1: Position(560;136)
## Calibration Point 2: Position(1360;136)
## Calibration Point 3: Position(560;930)
## Calibration Point 4: Position(1360;930)
## Calibration Point 5: Position(560;533)
## Calibration Point 6: Position(960;136)
## Calibration Point 7: Position(1360;533)
## Calibration Point 8: Position(960;930)
## [Geometry]
## Stimulus Dimension [mm]: 600 340
## Head Distance [mm]: 830
## [Hardware Setup]
## System ID: IRX122807032SMG
## Operating System : 6.1
## iView X Version: 2.8.26
## [Filter Settings]
## Heuristic: False
## Heuristic Stage: 0
## Bilateral: True
## Gaze Cursor Filter: True
## Saccade Length [px]: 80
## Filter Depth [ms]: 20
```

---

```

## Format: LEFT, RIGHT, RAW, DIAMETER, CR, POR, QUALITY, EYEPOSITION,
TRIGGER, MSG, FRAMECOUNTER
##
Time Type Trial L Raw X [px] L Raw Y [px] R Raw X [px] R Raw Y [px] L Dia X [px]
      L Dia Y [px] L Mapped Diameter [mm] R Dia X [px] R Dia Y [px] R Mapped Di-
ameter [mm] L CR1 X [px] L CR1 Y [px] L CR2 X [px] L CR2 Y [px] R CR1 X [px] R CR1
Y [px] R CR2 X [px] R CR2 Y [px] L POR X [px] L POR Y [px] R POR X [px] R POR Y [px]
Timing Latency L Validity R Validity Pupil Confidence L EPOS X L
EPOS Y     L EPOS Z     R EPOS X     R EPOS Y     R EPOS Z     Trigger Frame Aux1
4525391624 SMP 2 539.0600 566.7198 787.7640 552.6613
              20.4542 20.4542 5.8558 21.7058 21.7058 6.1611 537.1453
              572.0006 543.7085 571.8584 783.5157 558.0031 789.9820
              558.0055 965.3100 639.4931 965.3100 639.4931 0 1653
              0 0 1 26.6009 -16.0055 654.2895 -38.9993 -
12.2224 650.8768 120
4525393657 SMP 2 539.0944 566.6458 787.6763 552.6439
              20.4350 20.4350 5.8453 21.780121.78016.1597 537.1391 571.9993
              543.7028 571.8614 783.5150 558.0038 789.9761 558.0091
              964.6866 637.0235 964.6866 637.0235 0 1590 0 0
              1 26.5919 -15.9993 654.0294 -38.9877 -12.2196
              650.6977 120
4525395636 SMP 2 539.2507 566.9235 787.8076 552.6873
              20.8439 20.8439 5.8575 21.6439 21.6439 6.1515 537.1377
              571.9982 543.4866 572.0006 783.5161 558.0036 789.8348
              558.1386 954.3739 638.4720 954.3739 638.4720 0 3264
              0 0 1 26.6148 -16.0143 653.8813 -38.9627 -
12.2349 650.5943 120
4525398963 SMP 2 539.0067 566.7607 787.7993 552.3427
              20.6867 20.6867 5.8592 21.6115 21.6115 6.1429 537.1370 571.9982
              543.4873 572.0006 783.5168 558.0032 789.7140 558.1441
              953.6602 632.1831 953.6602 632.1831 0 1593 0 0
              1 26.6088 -16.0107 653.7338 -38.9444 -12.2350
              650.5574 120
4525400602 SMP 2 539.0212 566.6773 787.7959 552.7591
              20.6021 20.6021 5.8560 22.0650 22.0650 6.1591 537.1362
              571.9980 543.4868 572.0004 783.5160 558.0029 789.7085
              558.1412 951.1472 634.6694 951.1472 634.6694 0 1712
              0 0 1 26.6030 -16.0070 653.5876 -38.9415 -
12.2339650.5234 120
4525402326 SMP 2 539.0396 566.8110 787.5287 552.6672
              20.6620 20.6620 5.8562 21.7391 21.7391 6.1558 537.1355 571.9979
              543.4863 572.0007 783.5157 558.0030 789.4882 558.0019
              951.2432 636.4614 951.2432 636.4614 0 1620 0 0
              1 26.5973 -16.0035 653.4427 -38.9175 -12.2172
              650.6146 120

```

## 12.9 Beispielhafte .txt-Ausgabedatei des Eye-Tracking Systems

4525403958	SMP	2	538.9933	566.8503	787.5732	552.6627
21.2722		21.2722	5.8875	21.8171	21.8171	6.1571
543.4870		572.0005	783.2909	558.1468	789.4876	558.0014
947.7352		637.3392	947.7352	637.3392	0	1515
1	26.5914	-15.9999	653.2983	-38.8856	-12.2354	0
650.5776		120				

...

## 12.10 Einführung der Methode *Lautes Denken*

### Einführung in die Methode „Lautes Denken“

Mit unserer Untersuchung möchten wir etwas darüber erfahren, was du denkst, wenn du Texte und Experimente zu ausgewählten chemischen Problemen und deren Lösung bearbeitest.

Zu diesem Zweck die Bitte an dich:

**DENKE LAUT,**

**während du dich mit den vorgegebenen Texten und Aufgaben beschäftigst. Mit dieser Aufforderung ist gemeint, dass du ALLES ERZÄHLST, was du denkst, wenn du den Versuch und Text zum ersten Mal vor Augen hast, bis zu dem Punkt, an dem alle aufgeworfenen Fragestellungen für dich vollständig geklärt sind.**

**LESE zu diesem Zweck LAUT!**

Du solltest im Idealfall ohne Unterbrechung, also möglichst PAUSENLOS deine Gedanken zu den gerade bearbeiteten Textstellen AUSSPRECHEN.

Du solltest deine Äußerungen vor dem Sprechen jedoch nicht besonders ordnen oder deine Gedanken besonders verständlich wiedergeben wollen.

Du solltest auch nicht dem Versuchsleiter das Problem oder deine Gedanken erklären wollen.

Stelle dir vor,

du wärst GANZ ALLEIN IM RAUM

und sprichst nur zu dir selbst.

Äußerst wichtig ist, dass du STÄNDIG REDEST.

Wenn du für eine längere Zeit still bist, werden wir dich wie folgt zum Weiterreden auffordern:

**Bitte weiterreden!**

**Das Reden bitte nicht vergessen!**

**Bitte äußere deine Gedanken!**

Hast du noch Fragen? Dann stelle sie bitte jetzt.

VIELEN DANK FÜR DEINE MITARBEIT!

Im Folgenden wird das laute Denken anhand einfacher Denkaufgaben praktisch geübt.

**Übungsaufgaben:**

**Aufgabe (1): Versuche möglichst genau zu schätzen, wie viele Türen dein Zuhause hat und erzählen alles, was dir dabei durch den Kopf geht.**

**DENKE JETZT LAUT, während du die Aufgabe löst.**

Tauscht euch nun kurz mit eurem Partner darüber aus, wie die Lösung der Aufgabe für euch war. Was ist euch leichtgefallen? Was hat euch Schwierigkeiten bereitet?

Bevor wir morgen mit der Hauptuntersuchung beginnen, wollen wir eine weitere Aufgabe zur Übung durchführen. Du sollst genau die gleichen Dinge tun, wie zuvor bei Aufgabe 1: DENKE LAUT – also äußere alle Gedanken. Hast du zu diesem Vorgehen noch Fragen?

**Aufgabe (2): Multipliziere bitte  $24 \times 36$  im Kopf und erzähle alles, was dir dabei durch den Kopf geht!**

**DENKE LAUT, während du die Aufgabe löst.**

## 12.11 Leitfaden für den Analogiedenkenprozess

--	--	--	--

Schüler-ID

Spreche Deine **Schüler-ID** auf das Tonband.

**DENKE nun LAUT!** Lese dazu den folgenden Text auch laut vor.

**Unfall:**

„In einer Getreidemühle der Stadt Bremen hat sich im Jahre 1979 eine schwere Explosion ereignet, welche große Teile des Gebäudes vollständig zerstörte. In dieser Mühle wurden unter anderem Weizenkörner zu Weizengrundmehl verarbeitet, die sich auf dem Boden des Gebäudes ablagerten. Als Grund für den Unfall konnte einige Zeit später ein Kabelbrand identifiziert werden.“

Im Folgenden findest Du einige Aufgaben.

Bearbeite die Aufgaben bitte **in der angegebenen Reihenfolge**.

**DENKE dabei weiterhin LAUT!**

- 1) Vergleiche das Experiment mit dem Unfall, indem du Ähnlichkeiten und Unterschiede findest. **Erkläre**, warum es passiert. Antworte so vollständig wie möglich.
- 2) Beschreibe noch einmal genau, wie es zur Explosion in der Mühle gekommen ist. Nutze die von dir gefundenen Ähnlichkeiten und Unterschiede.
- 3) Es gibt noch weitere Unglücke, bei denen es zu einer Explosion gekommen ist. Daher wird im folgenden Text ein weiterer Unfall beschrieben. Lese ihn dir bitte sorgfältig durch.  
„**Die Laptops von Apple werden aus einem Block Aluminium gefräst, dabei kommt Metall-Staub in die Luft. In einem chinesischen Werk, in dem diese Laptops produziert werden, kam es dadurch zu einer Explosion.**“
  - a) Beschreibe detailliert, wie es bei diesem Unfall zu einer Explosion gekommen sein kann. Nutze dazu den Vergleich, den du beim vorherigen Unfall gemacht hast.
- 4) Nenne abschließend bitte noch einmal, welche Bedingungen ganz allgemein gegeben sein müssen, damit eine Explosion stattfinden kann.
- 5) Wie wirken diese Bedingungen zusammen?

## 12.12 Kategoriensysteme *Denken in Analogien*

Beschreibung der Bereiche

### *Beschreibung des Originals*

Tabelle 39: Kategoriensystem „Beschreibung des Originals“.

Ebene	Kategorienbeschreibung	Kodierregeln	Ankerbeispiele
1. Objekt-ebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eine <b>einzelne Komponente</b> oder ein Objekt (Gegenstand), welche/welches das originale System kennzeichnet, wird als Substantiv genannt.</li> <li>▪ Es ist nicht in ein größeres korrespondierendes System eingebunden.</li> <li>▪ Lediglich eine Komponente wird in den Fokus gestellt.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Auch alle vorgegebenen Wörter und Elemente der Komposita, die das originale System kennzeichnen und teilweise implizit Eigenschaften nennen, werden als Objekt eingesstuft (Bzgl. Mehlstaubexplosion: Getreidemühle, Explosion, Gebäude, Mühle, Weizenkörner, Weizenmehl, Boden, Kabelbrand, Mehl). (Bzgl. Metallstaubexplosion: Block Aluminium, Metallstaub, Luft, Werk, Explosion).</li> <li>▪ Die Weizenkörner werden – auch wenn sie nicht als Grundsubstanz für den Explosionsprozess gelten – als Objekt kodiert, da sie das Weizen charakterisieren und das Schülerverständnis nicht auf der Grobkörnigkeit der Weizenkörner besteht. Siehe: MS2409: „[...] so pulverartige Material, so wie Weizenkörner oder Metall-Staub, oder allgemein Staub [...].“ LOo612: „[...] Weizen- Weizenkörner ähm könnten das Pulver darstellen [...]“</li> </ul>	„Also die Weizenkörner und das Weizenmehl ist ja“; „kam es irgendwann zu einer Explosion“; „Also es in der Mühle zwar zu einer Explosion gekommen“; „Okay, ich glaube, dass es halt so ist, (.) dass (.) dieser Kabelbrand (.)“
2. Oberflächliche Attribut-ebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eine einzelne Komponente oder ein Objekt des originalen Systems wird durch eine explizite <b>Eigenschaftszuweisung</b> näher charakterisiert.</li> <li>▪ Diese Zuweisung soll auf oberflächlichen,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kodiert wird das Objekt zusammen/gemeinsam mit der jeweiligen (irrelevanten) Eigenschaft ohne zusätzliche Kodierung des Objektes.</li> <li>▪ Mögliche Eigenschaften sind:</li> </ul>	„die Kabel an waren“; „[...] da war nur noch so ein bisschen von dem Kabel da. Nur noch dieses. Also die Isolierung war ab. Nur noch (.) der Draht davon war da.“; „Weizenkörner

	<ul style="list-style-type: none"> <li>d.h. für das Phänomen <b>irrelevanten</b> Eigenschaften (Aussehen, wörtliche Kennzeichnung, irrelevante Stoffeigenschaften, ...) basieren.</li> <li>Die Komponente und die Eigenschaft sollen in <b>direkter</b> Beziehung zueinander stehen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kabel: kaputt, nicht isoliert</li> <li>Stoff: weiß, magnetisch, leitfähig, Flocken/flockig, synthetisch, natürlich</li> <li>Stoff/Luft: farblos, geruchlos</li> <li>Mühle: undurchsichtig, fest, Form betreffend (rund, zylinderförmig, ...)</li> </ul>	lagen auf dem Boden“; „Das Weizenmehl ist weiß (selbst entwickeltes Beispiel).“
3. Strukturelle Attributebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eine einzelne Komponente oder ein Objekt des originalen Systems wird durch eine explizite <b>Eigenschaftszuweisung</b> näher charakterisiert.</li> <li>Diese Zuweisung soll auf strukturellen, d.h. für das Phänomen <b>relevanten Eigenschaften</b> (u.a. Brennbarkeit, große Oberfläche/feine Verteilung, Energie, ...) basieren.</li> <li>Die Komponente und die Eigenschaft sollen in <b>direkter</b> Beziehung zueinander stehen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tritt eine strukturelle und oberflächliche Eigenschaftszuweisung gemeinsam innerhalb einer Phrase auf (z.B. „schwarzes Pulver“), wird diese Phrase doppelt kodiert. Zuerst wird das Objekt „Pulver“ gemeinsam mit der jeweiligen (irrelevanten) Eigenschaft „schwarz“ oberflächlich kodiert. Und dann wird „Pulver“ auf struktureller Attributebene kodiert.</li> </ul>	„Weizenkörner so leicht brennbar sind [...]“; „Dafür ist aber wichtig, dass das Pulver verteilt ist in der Luft.“; „Und das Weizenmehl ist dann wahrscheinlich explosiv.“; „Weizenmehl ist halt pulverig, also das ist halt, ähm, ja ist halt pulverig“; „ kam in dem Fall von den Kabeln die (.) Wärme“
4. Relationsebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eine <b>Beziehung</b>/ ein wechselseitiges Verhältnis zwischen mindestens <b>zwei</b> einzelnen Komponenten des originalen Systems wird genannt.</li> <li>Ein sinnbezogener Zusammenhang zwischen diesen einzelnen Komponenten ist deutlich erkennbar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Umgangssprachliche Formulierungen von Relationsbeschreibungen werden auch kodiert, z.B. der Verpuffung als Synonym für den Begriff Explosion.</li> <li>Worte, die eine Relation implizit tragen (Aerosol, Aufwirbelung)</li> <li>Aufzählungen von Bedingungen, die einen gemeinsamen Sinnzusammenhang haben und zu „etwas“ [der Relation] führen, werden zu einer Relation zusammengefasst.</li> <li>Findet eine Sinnänderung sowie eine räumliche/zeitliche Trennung (u.a. „und</li> </ul>	„Das Pulver müsste sich sozusagen in der Luft verbreitet haben und ähm, ähm dann, und dann kam halt diese Hitze, die erforderlich ist für so eine Explosion von dem äh Kabelbrand. Wahrscheinlich war es da nicht isoliert dann. Ähm ja. Und dann kam es halt zu der Explosion und dann ist halt alles explodiert.“; „beim Kabelbrand erhitzt sich das Kabel auch (2)

		dann“) innerhalb einer Aufzählung statt, so dass keine übergeordnete Relation erkennbar ist, wird die Aufzählung nicht als Relation kodiert.	und entzündet (.) den Mehlstaub.“; „[...] zu der Explosion ist es gekommen, weil die Weizenkörner ähm durch den Wind mit aufgepustet wurden und dann mit dem Ka-, mit den Kabeln in Verbindung kam und dadurch ein Kabelbrand ausgelöst wurde.“
--	--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### Beschreibung des Modellexperiments

Tabelle 40: Kategoriensystem „Beschreibung des Modellexperiments“ (kursiv: Anmerkungen zu den Ankerbeispielen).

Ebene	Kategorienbeschreibung	Kodierregeln	Ankerbeispiele
1. Objekt-ebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eine <b>einzelne Komponente</b> oder ein Objekt, welche/welches das Modellexperiment kennzeichnet, wird genannt.</li> <li>▪ Es ist nicht in ein größeres korrespondierendes System eingebunden.</li> <li>▪ Lediglich eine Komponente wird in den Fokus gestellt.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Auch alle vorgegebenen Wörter, die das Modellexperiment kennzeichnen und teilweise implizit Eigenschaften nennen, werden als Objekt eingestuft (Glühwendel, Stoff, Schlauch, Gummistopfen, Glasrohr, Luftpumpe, Deckel, Plexiglasrohr, Tiegel, Kabel, Netzgerät).</li> </ul>	„[...], dass da halt dieses Pulver war und dieses heiße Draht, das glühende Draht und dann halt, [...]“
2. Oberflächliche Attribut-ebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eine einzelne Komponente oder ein Objekt des Modellexperiments wird durch eine explizite <b>Eigenschaftszuweisung</b> näher charakterisiert.</li> <li>▪ Diese Zuweisung soll auf oberflächlichen, d.h. für das Phänomen <b>irrelevanten</b> Eigenschaften (Aussehen, wörtliche Kennzeichnung, ...) basieren.</li> <li>▪ Die Komponente und die Eigenschaft sollen in <b>direkter</b> Beziehung zueinanderstehen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kodiert wird das Objekt zusammen/gemeinsam mit der jeweiligen (irrelevanten) Eigenschaft ohne zusätzliche Kodierung des Objektes.</li> <li>▪ Mögliche Eigenschaften sind:</li> <li>▪ Glühwendel: leuchtet, geht an</li> <li>▪ Stoff: schwarz, magnetisch, leitfähig, Flocken/flockig, synthetisch, natürlich</li> </ul>	„Das was wir untersucht haben, dieses <b>schwarze</b> , trockene Pulverform.“ („trockene Pulverform“ auf der Strukturellen Attributebene einzutragen); „auch die Plexiglaswand äh ja schwarz wurde.“

		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Stoff/Luft: farblos, geruchlos</li> <li>▪ Plexiglasrohr: durchsichtig, fest, Form betreffend (rund, zylinderförmig, ...)</li> </ul>	
3. Strukturelle Attributebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eine einzelne Komponente oder ein Objekt des Modellexperiments wird durch eine explizite <b>Eigenschaftszuweisung</b> näher charakterisiert.</li> <li>▪ Diese Zuweisung soll auf strukturellen, d.h. für das Phänomen <b>relevanten Eigenschaften</b> (u.a. Brennbarkeit, große Oberfläche/feine Verteilung, ...) basieren.</li> <li>▪ Die Komponente und die Eigenschaft sollen in <b>direkter Beziehung</b> zueinanderstehen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Das Substantiv „<i>Pulver</i>“ liefert implizit eine Eigenschaftszuweisung des Stoffes. (<i>Dudenverlag (2021c)</i>: „staubfein, zerkleinerter, zerriebener oder zermahlener Stoff.“)</li> <li>▪ Tritt eine strukturelle und oberflächliche Eigenschaftszuweisung gemeinsam innerhalb einer Phrase auf (z.B. „schwarzes Pulver“), wird diese Phrase doppelt kodiert. Einmal wird das Objekt „Pulver“ zusammen/gemeinsam mit der jeweiligen (irrelevanten) Eigenschaft „schwarz“ oberflächlich kodiert. Und dann „Pulver“ auf struktureller Attributebene.</li> </ul> <p>„Das was wir untersucht haben, dieses [...] <b>trockene Pulverform</b>.“ (es handelt sich um die Eigenschaften „trocken“ und „pulverförmig“); „der Glühdraht [...] hat sich erhitzt“</p>	
4. Relationsebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eine <b>Beziehung</b>/ ein wechselseitiges Verhältnis zwischen mindestens <b>zwei</b> einzelnen Komponenten des Modellexperiments wird genannt.</li> <li>▪ Ein sinnbezogener Zusammenhang zwischen diesen einzelnen Komponenten ist deutlich erkennbar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Umgangssprachliche Formulierungen von Relationsbeschreibungen werden auch kodiert, z.B. der Verpuffung als Synonym für den Begriff Explosion.</li> <li>▪ Worte, die eine Relation implizit tragen (Aerosol, Aufwirbelung)</li> <li>▪ Aufzählungen von Bedingungen, die einen gemeinsamen Sinnzusammenhang haben und zu „etwas“ [der Relation] führen, werden zu einer Relation zusammengefasst.</li> <li>▪ Findet eine Sinnänderung sowie eine räumliche/zeitliche Trennung (u.a. „und dann“) innerhalb einer</li> </ul>	<p>„als man mit der Pumpe äh das, die Luft in die äh in das Gefäß gepumpt hat, ging das Pulver hoch und da kam das an die Glühdraht und dadurch gabs eine äh Flamme“; [...] im Versuch war es so, dass (. ) dieser schwarze Staub, oder, ja ja, der schwarze Staub wurde durch die Luft hochgepumpt [...]“</p>

		Aufzählung statt, so dass keine übergeordnete Relation erkennbar ist, wird die Aufzählung nicht als Relation kodiert.	
--	--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

Richtungsabhängige abbildende Beschreibung

### **Abbildende Beschreibung Original → Modellexperiment**

Tabelle 41: Kategoriensystem „Abbildende Beschreibung von Original zu Modellexperiments“ (kursiv: Anmerkungen zu den Ankerbeispielen).

Ebene	Kategorienbeschreibung	Kodierregeln	Ankerbeispiele
I. Objekt-ebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einzelne Komponenten oder Objekte aus den zwei Systemen (Original &amp; Modellexperiment) werden zwischen Original und Modellexperiment verglichen bzw. aufeinander abgebildet (ge-mappt).</li> <li>▪ Sie sind <b>nicht</b> in ein größeres korrespondierendes System eingebunden.</li> <li>▪ Die Richtung für die Übertragung vom Original zum Modellexperiment ist direkt identifizierbar.</li> <li>▪ Lediglich eine <b>Eins-zu-Eins-Korrespondenz</b> wird hergestellt.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Auch alle vorgegebenen Wörter, die das Original/ Modellexperiment kennzeichnen und teilweise implizit Eigenschaften nennen, werden als Objekt eingestuft (Bzgl. Mehlstaubexplosion: Getreidemühle, Explosion, Gebäude, Mühle, Weizenkörner, Weizenmehl, Boden, Kabelbrand, Mehl). (Bzgl. Metallstaubexplosion: Block Aluminium, Metallstaub, Luft, Werk, Explosion.) (Bzgl. Modellexperiment: Glühwendel, Stoff, Schlauch, Gummistopfen, Glasrohr, Luftpumpe, Deckel, Plexiglasrohr, Tiegel, Kabel, Netzgerät).</li> <li>▪ Implizit durch „es“/„ist genauso wie das“ ausgedrückte Objekte, die eine <b>Eins-zu-Eins-Korrespondenz</b> zu einem konkreten Objekt aufweisen werden kodiert, wenn „es/das“ im Kontext klar definierbar ist.</li> <li>▪ Wenn nicht klar deutlich wird, ob vom Original auf das Modellexperiment (Bereiche) oder umgekehrt kodiert wird und die</li> </ul>	<p>„Ich denke, dass die Weizenkörner ähnlich wie das Pulver waren“ (<i>Es findet ausschließlich eine Abbildung auf der Objektebene statt, da den Weizenkörnern keine Eigenschaft zugewiesen wird.</i>); „Also, (...liest Aufgabe erneut...) ähm, wir hatten ja auch son, so was Ähnliches wie ähm Elektro-kabel, ähm, ja das war halt genau gleich.“</p>

		<p>beiden Bereiche eher gleichrangig genannt werden, wird das Objekt mit Hilfe des Kategoriensystems Abbildende Beschreibung Original – Modellexperiment kodiert.</p>	
2. Oberflächliche Attributebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einfache <b>Objekteigenschaften</b> aus beiden Systemen (Original &amp; Modellexperiment), welche auf oberflächlichen, d.h. für das Phänomen <b>irrelevanten</b> Eigenschaften (Aussehen, wörtliche Kennzeichnung, ...) basieren, werden zwischen Original und Modellexperiment verglichen bzw. aufeinander abgebildet (gemappt).</li> <li>▪ Die Komponente und die Eigenschaft sollten jeweils in einer expliziten, <b>direkten</b> und korrekten Beziehung zueinander stehen.</li> <li>▪ Die Richtung für die Übertragung vom Original zum Modellexperiment ist direkt identifizierbar.</li> <li>▪ Dennoch sollten die Eigenschaften <b>nicht</b> in ein größeres korrespondierendes System eingebunden sein.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kodiert wird das Objekt zusammen/gemeinsam mit der jeweiligen (irrelevanten) Eigenschaft ohne zusätzliche Kodierung des Objektes.</li> <li>▪ Mögliche Eigenschaften sind:</li> <li>▪ Glühwendel/Kabel: leuchtet, geht an, kaputt, nicht isoliert</li> <li>▪ Stoff: schwarz/weiß, magnetisch, leitfähig, Flocken/flockig, synthetisch, natürlich</li> <li>▪ Stoff/Luft: farblos, geruchlos</li> <li>▪ Plexiglasrohr/Mühle: (un-) durchsichtig, fest, Form betreffend (rund, zylindrisch, ...)</li> <li>▪ Implizit durch „es“/ „das“ ausgedrückte Objekte, die eine <b>Eins-zu-Eins-Korrespondenz</b> zu einem konkreten Objekt aufweisen und deren Eigenschaften „gleich“/ „genauso wie“/ „ähnlich“ sein sollen, werden kodiert, wenn „es/das“ im Kontext klar definierbar ist.</li> <li>▪ Wenn nicht klar deutlich wird, ob vom Original auf das Modellexperiment (Bereiche) oder umgekehrt kodiert wird und die beiden Bereiche eher gleichrangig genannt</li> </ul>	<p>„Weizenkörner die zu Mehl gemacht wurden auf dem Boden (2) sich abgelagerten haben des Gebäudes ist das so wie im Experiment als wir die ähm (.) ähm dieses schwarze Pulver in (.) in die Schüssel da getan haben, so als ob wir das auf diesen Boden gelegt hätten.“; „Bei der Mühle [...] das ist ja wie eine Art Turm und es ist ja dann so wie mit der Plexiröhre.“</p>

		<p>werden, wird das oberflächliche Attribut mit Hilfe des Kategoriensystems Abbildende Beschreibung Original – Modellexperiment kodiert.</p>	
3. Strukturelle Attributebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einfache <b>Objekteigenschaften</b> aus beiden Systemen (Original &amp; Modellexperiment), welche auf strukturellen, d.h. für das Phänomen <b>relevanten</b> Eigenschaften (Aussehen, wörtliche Kennzeichnung, ...) basieren, werden zwischen Original und Modellexperiment verglichen bzw. aufeinander abgebildet (gemappt).</li> <li>▪ Die Komponente und die Eigenschaft sollten jeweils in einer expliziten, <b>direkten</b> und korrekten Beziehung zueinanderstehen.</li> <li>▪ Die Richtung für die Übertragung vom Original zum Modellexperiment ist direkt identifizierbar.</li> <li>▪ Dennoch sollten die Eigenschaften <b>nicht</b> in ein größeres korrespondierendes System eingebunden sein.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Das Substantiv „<i>Pulver</i>“ liefert implizit eine Eigenschaftszuweisung des Stoffes. (<i>Dudenverlag</i> (2021c): „staubfein, zerkleinerter, zerriebener oder zermahlener Stoff.“)</li> <li>▪ Tritt eine strukturelle und oberflächliche Eigenschaftszuweisung gemeinsam innerhalb einer Phrase auf (z.B. „schwarzes Pulver“), wird diese Phrase doppelt kodiert. Einmal wird das Objekt „<i>Pulver</i>“ zusammen/gemeinsam mit der jeweiligen (irrelevanten) Eigenschaft „schwarz“ oberflächlich kodiert. Und dann „<i>Pulver</i>“ auf struktureller Attributebene.</li> <li>▪ Implizit durch „es“/ „das“ ausgedrückte Objekte, die eine <b>Eins-zu-Eins-Korrespondenz</b> zu einem konkreten Objekt aufweisen und deren Eigenschaften „gleich“/ „genauso wie“/ „ähnlich“ sein sollen, werden kodiert, wenn „es/das“ im Kontext klar definierbar ist.</li> <li>▪ Wenn nicht klar deutlich wird, ob vom Original auf das Modellexperiment (Bereiche) oder umgekehrt kodiert wird und die beiden Bereiche eher gleichrangig genannt werden, wird das strukturelle Attribut mit Hilfe des Kategoriensystems</li> </ul>	<p>„In der Mühle sind (.) hat sich das Kabel erhitzt, wie bei dem Experiment, und [...].“; „Kabel, ach, Kabelbrand identifiziert werden konnte, so wie bei uns halt das mit dem, mit dem, mit dem Glühwendel, ist ja auch heiß“; „Also es ist ja auch so, dass es ein geschlossener Raum war, auch in dem Experiment.“</p>

		Abbildende Beschreibung Original – Modellexperiment kodiert.	
4. Relati- onsebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Beziehungen/ wechselseitige Verhältnisse, welche in jedem System (Original &amp; Modellexperiment) aus mindestens <b>zwei</b> einzelnen Komponenten bestehen, werden zwischen Original und Modellexperiment <b>verglichen</b> bzw. aufeinander abgebildet (ge- mappt).</li> <li>▪ Die Richtung für die Übertragung vom Original zum Modellexperiment ist direkt identifizierbar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Umgangssprachliche Formulierungen von Relationsbeschreibungen werden auch kodiert, z.B. der Verpuffung als Synonym für den Begriff Explosion.</li> <li>▪ Worte, die eine Relation implizit tragen (Aerosol, Aufwirbelung)</li> <li>▪ Aufzählungen von Bedingungen, die einen gemeinsamen Sinnzusammenhang haben und zu „etwas“ [der Relation] führen, werden zu einer Relation zusammengefasst.</li> <li>▪ Findet eine Sinnänderung sowie eine räumliche/zeitliche Trennung (u.a. „und dann“) innerhalb einer Aufzählung statt, so dass keine übergeordnete Relation erkennbar ist, wird die Aufzählung nicht als Relation kodiert.</li> <li>▪ Implizit durch „es“/ „das“ ausgedrückte Objekte, die eine <b>Eins-zu-Eins-Korrespondenz</b> zu einem konkreten Objekt aufweisen und deren Eigenschaften „gleich“/ „genauso wie“/ „ähnlich“ sein sollen, werden kodiert, wenn „es/das“ im Kontext klar definierbar ist.</li> <li>▪ Wenn nicht klar deutlich wird, ob vom Original auf das Modellexperiment (Bereiche) oder umgekehrt kodiert wird und die beiden Bereiche eher gleichrangig genannt werden, wird die Relation mit Hilfe des</li> </ul> <p>„In der Mühle sind (.) hat sich das Kabel erhitzt, wie bei dem Experiment, und ist (.) mit dem Mehlstaub ist an das Kabel gekommen, so hat es sich entzündet, genauso wie der Staub bei dem Experiment.“; „Also das ist wahrscheinlich so, dieses Mehl da, was da rumlag, wurde wie in dem Experiment mit diesem Kabelbrand, wurden die, weil die so fein überall liegen, wurden die dann angezündet, und dann wurde alles da, hat alles gebrannt und das ist halt genauso wie in dem Experiment.“</p>	

		Kategoriensystems Abbildende Beschreibung Original – Modellexperiment kodiert.	
--	--	--------------------------------------------------------------------------------	--

### Abbildende Beschreibung Modellexperiment → Original

Tabelle 42: Kategoriensystem „Abbildende Beschreibung von Modellexperiment zu Original“ (kursiv: Anmerkungen zu den Ankerbeispielen).

Ebene	Kategorienbeschreibung	Kodierregeln	Ankerbeispiele
I. Objekt-ebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einzelne Komponenten oder Objekte aus den zwei Systemen (Original &amp; Modellexperiment) werden zwischen Original und Modellexperiment verglichen bzw. aufeinander abgebildet (ge- mappt).</li> <li>▪ Die Richtung für die Übertragung vom Modellexperiment zum Original ist direkt identifizierbar.</li> <li>▪ Sie sind <b>nicht</b> in ein größeres korrespondierendes System eingebunden.</li> <li>▪ Lediglich eine <b>Eins-zu-Eins-Korrespondenz</b> wird hergestellt.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Auch alle vorgegebenen Wörter, die das Original/ Modellexperiment kennzeichnen und teilweise implizit Eigenschaften nennen, werden als Objekt eingestuft (Bzgl. Mehlstaubexplosion: Getreidemühle, Explosion, Gebäude, Mühle, Weizenkörner, Weizenmehl, Boden, Kabelbrand, Mehl). (Bzgl. Metallstaubexplosion: Block Aluminium, Metallstaub, Luft, Werk, Explosion.) (Bzgl. Modell- experiment: Glühwendel, Stoff, Schlauch, Gummistopfen, Glasrohr, Luftpumpe, Deckel, Plexiglasrohr, Tiegel, Kabel, Netzgerät).</li> <li>▪ Implizit durch „es“/„ist genauso wie das“ ausgedrückte Objekte, die eine <b>Eins-zu-Eins-Korrespondenz</b> zu einem konkreten Objekt aufweisen werden kodiert, wenn „es/das“ im Kontext klar definierbar ist.</li> <li>▪ Wenn nicht klar deutlich wird, ob vom Original auf das Modellexperiment (Bereiche) oder umgekehrt kodiert wird und die beiden Bereiche eher gleichrangig genannt werden, wird das Objekt mit</li> </ul>	<p>„Der Stoff ist das die Weizenkörner.“;      „Wir haben dazu so ganz, son, ganz viel Luft, ähm, ganz viel Luft auf einmal dahin gepustet, ich weiß nicht, wie das in der Mühle gekommen ist, ja ähm vielleicht war es auch windig oder so.“;      „im Fall des Experiments ein schwarzes Pulver ist und in dem, also in dem Unfall, bei dem Unfall, war es Getrei-, also war es anscheinend Getreide“; „das Pulver könnten die Körner sein“; „Glühwendel könnte ein brennendes Kabel darstellen.“</p>

		Hilfe des Kategoriensystems Abbildende Beschreibung Original – Modellexperiment kodiert.	
2. Oberflächliche Attributebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einfache <b>Objekteigenschaften</b> aus beiden Systemen (Original &amp; Modellexperiment), welche auf oberflächlichen, d.h. für das Phänomen <b>irrelevanten</b> Eigenschaften (Aussehen, wörtliche Kennzeichnung, ...) basieren, werden zwischen Original und Modellexperiment verglichen bzw. aufeinander abgebildet (gemappt).</li> <li>▪ Die Komponente und die Eigenschaft sollten jeweils in einer expliziten, <b>direkten</b> und korrekten Beziehung zueinanderstehen.</li> <li>▪ Die Richtung für die Übertragung vom Modellexperiment zum Original ist direkt identifizierbar.</li> <li>▪ Dennoch sollten die Eigenschaften <b>nicht</b> in ein größeres korrespondierendes System eingebunden sein.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kodiert wird das Objekt zusammen/gemeinsam mit der jeweiligen (irrelevanten) Eigenschaft ohne zusätzliche Kodierung des Objektes.</li> <li>▪ Mögliche Eigenschaften sind:</li> <li>▪ Glühwendel/Kabel: leuchtet, geht an, kaputt, nicht isoliert</li> <li>▪ Stoff: schwarz/weiß, magnetisch, leitfähig, Flocken/flockig, synthetisch, natürlich</li> <li>▪ Stoff/Luft: farblos, geruchlos</li> <li>▪ Plexiglasrohr/Mühle: (un-) durchsichtig, fest, Form betreffend (rund, zylindrisch, ...)</li> <li>▪ Implizit durch „es“/ „das“ ausgedrückte Objekte, die eine <b>Eins-zu-Eins-Korrespondenz</b> zu einem konkreten Objekt aufweisen und deren Eigenschaften „gleich“/ „genauso wie“/ „ähnlich“ sein sollen, werden kodiert, wenn „es/das“ im Kontext klar definierbar ist.</li> <li>▪ Wenn nicht klar deutlich wird, ob vom Original auf das Modellexperiment (Bereiche) oder umgekehrt kodiert wird und die beiden Bereiche eher gleichrangig genannt werden, wird das oberflächliche Attribut mit Hilfe des Kategoriensystems</li> </ul> <p>„[...] Getreide ist ja, denke ich, auch gelb [...]“; „Dieser glühende Draht sieht aus wie das Kabel (selbst entwickeltes Beispiel).“</p>	

		Abbildende Beschreibung Original – Modellexperiment kodiert.	
3. Strukturelle Attributebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Einfache <b>Objekteigenschaften</b> aus beiden Systemen (Original &amp; Modellexperiment), welche auf strukturellen, d.h. für das Phänomen <b>relevanten</b> Eigenschaften (Aussehen, wörtliche Kennzeichnung, ...) basieren, werden zwischen Original und Modellexperiment verglichen bzw. aufeinander abgebildet (gemappt).</li> <li>■ Die Komponente und die Eigenschaft sollten jeweils in einer expliziten, <b>direkten</b> und korrekten Beziehung zueinanderstehen.</li> <li>■ Die Richtung für die Übertragung vom Modellexperiment zum Original ist direkt identifizierbar.</li> <li>■ Dennoch sollten die Eigenschaften <b>nicht</b> in ein größeres korrespondierendes System eingebunden sein.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Das Substantiv „<i>Pulver</i>“ liefert implizit eine Eigenschaftszuweisung des Stoffes. (<i>Dudenverlag (2021c)</i>: „staubfein, zerkleinerter, zerriebener oder zermahlener Stoff.“)</li> <li>■ Tritt eine strukturelle und oberflächliche Eigenschaftszuweisung gemeinsam innerhalb einer Phrase auf (z.B. „schwarzes Pulver“), wird diese Phrase doppelt kodiert. Einmal wird das Objekt „Pulver“ zusammen/gemeinsam mit der jeweiligen (irrelevanten) Eigenschaft „schwarz“ oberflächlich kodiert. Und dann „Pulver“ auf struktureller Attributebene.</li> <li>■ Implizit durch „es“/ „das“ ausgedrückte Objekte, die eine <b>Eins-zu-Eins-Korrespondenz</b> zu einem konkreten Objekt aufweisen und deren Eigenschaften „gleich“/ „genauso wie“/ „ähnlich“ sein sollen, werden kodiert, wenn „es/das“ im Kontext klar definierbar ist.</li> <li>■ Wenn nicht klar deutlich wird, ob vom Original auf das Modellexperiment (Bereiche) oder umgekehrt kodiert wird und die beiden Bereiche eher gleichrangig genannt werden, wird das strukturelle Attribut mit Hilfe des Kategoriensystems Abbildende Beschreibung Original – Modellexperiment kodiert.</li> </ul>	„da die Glühwendel sich erhitzt hat, beim Kabelbrand erhitzt sich das Kabel auch (2); „in dem Versuch war [...] ein Staub, und durch die größere Oberfläche [...] die Körner“; [...] da der Stoff brennbar ist oder man vielleicht Weizenmehl oder so (.) ähm brennen könnte, das brennbar ist [...].“

4. Relati- onsebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <b>Beziehungen</b>/ wechselseitige Verhältnisse, welche in jedem System (Original &amp; Modellexperiment) aus mindestens <b>zwei</b> einzelnen Komponenten bestehen, werden zwischen Original und Modellexperiment <b>verglichen</b> bzw. aufeinander abgebildet (ge- mappt).</li> <li>■ Die Richtung für die Übertragung vom Modellexperiment zum Original ist direkt identifizierbar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Umgangssprachliche Formulierungen von Relationsbeschreibungen werden auch kodiert, z.B. der Verpuffung als Synonym für den Begriff Explosion.</li> <li>■ Worte, die eine Relation implizit tragen (Aerosol, Aufwirbelung)</li> <li>■ Aufzählungen von Bedingungen, die einen gemeinsamen Sinnzusammenhang haben und zu „etwas“ [der Relation] führen, werden zu einer Relation zusammengefasst.</li> <li>■ Findet eine Sinnänderung sowie eine räumliche/zeitliche Trennung (u.a. „und dann“) innerhalb einer Aufzählung statt, so dass keine übergeordnete Relation erkennbar ist, wird die Aufzählung nicht als Relation kodiert.</li> <li>■ Implizit durch „es“/ „das“ ausgedrückte Objekte, die eine <b>Eins-zu-Eins-Korrespondenz</b> zu einem konkreten Objekt aufweisen und deren Eigenschaften „gleich“/ „genauso wie“/ „ähnlich“ sein sollen, werden kodiert, wenn „es/das“ im Kontext klar definierbar ist.</li> <li>■ Wenn nicht klar deutlich wird, ob vom Original auf das Modellexperiment (Bereiche) oder umgekehrt kodiert wird und die beiden Bereiche eher gleichrangig genannt werden, wird die Relation mit Hilfe des Kategoriensystems Abbildende Beschreibung Original – Modellexperiment kodiert.</li> </ul>	<p>„als man mit der Pumpe äh das, die Luft in die äh in das Gefäß gepumpt hat, ging das Pulver hoch und da kam das an die Glühdraht und dadurch gabs eine äh Flamme. Ähm. Und, und ja. Ich denke, dass bei dem Unfall fast dasselbe passiert ist.“; „[...] Pulver. Da wurde es ja mit Luft hochgewirbelt, und das kann ich mir vorstellen, dass dann durch die Mühle ein Windzug kam“; „Das [...] Pulver hat sich an dem Glühdraht in Flammen gesetzt und das Weizenmehl aber am Kabelbrand.“</p>
------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Richtungsunabhängige abbildende Beschreibung zwischen Original und Modellexperiment

### **Abbildende Beschreibung Original – Modellexperiment**

Tabelle 43: Kategoriensystem „Richtungsunabhängige abbildende Beschreibung zwischen Original und Modellexperiment“ (kursiv: Anmerkungen zu den Ankerbeispielen).

Ebene	Kategorienbeschreibung	Kodierregeln	Ankerbeispiele
1. Objekt-ebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einzelne Komponenten oder Objekte aus den zwei Systemen (Original &amp; Modellexperiment) werden zwischen Original und Modellexperiment verglichen bzw. aufeinander abgebildet (ge-mappt).</li> <li>▪ Sie sind <b>nicht</b> in ein größeres korrespondierendes System eingebunden.</li> <li>▪ Lediglich eine <b>Eins-zu-Eins-Korrespondenz</b> ohne Richtungsangabe bei der Übertragung wird hergestellt.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Auch alle vorgegebenen Wörter, die das Original/ Modellexperiment kennzeichnen und teilweise implizit Eigenschaften nennen, werden als Objekt eingestuft (Bzgl. Mehlstaubexplosion: Getreidemühle, Explosion, Gebäude, Mühle, Weizenkörner, Weizenmehl, Boden, Kabelbrand, Mehl). (Bzgl. Metallstaubexplosion: Block Aluminium, Metallstaub, Luft, Werk, Explosion.) (Bzgl. Modellexperiment: Glühwendel, Stoff, Schlauch, Gummistopfen, Glasrohr, Luftpumpe, Deckel, Plexiglasrohr, Tiegel, Kabel, Netzgerät).</li> <li>▪ Implizit durch „es“/“ist genauso wie das“ ausgedrückte Objekte, die eine <b>Eins-zu-Eins-Korrespondenz</b> zu einem konkreten Objekt aufweisen werden kodiert, wenn „es/das“ im Kontext klar definierbar ist.</li> </ul>	„auch bei beiden ein Feuer da, also eine Flamme.“; „wir hatten ja auch ein Kabel bei dem Unfall in der Mühle und bei unserem Experiment.“; ein Pulver und Weizen ist ähnlich.“
2. Oberflächliche Attribut-ebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einfache <b>Objekteigenschaften</b> aus beiden Systemen (Original &amp; Modellexperiment), welche auf oberflächlichen, d.h. für das Phänomen <b>irrelevanten</b> Eigenschaften (Aussehen, wörtliche Kennzeichnung, ...) basieren, werden zwischen Original und</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kodiert wird das Objekt zusammen/gemeinsam mit der jeweiligen (irrelevanten) Eigenschaft ohne zusätzliche Kodierung des Objektes.</li> <li>▪ Mögliche Eigenschaften sind:</li> </ul>	„Weil der Draht und das Kabel ähnlich aussehen, von der Form aus.“ ( <i>selbst entwickeltes Beispiel</i> )

	<p>Modellexperiment verglichen bzw. aufeinander abgebildet (gemappt).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Die Komponente und die Eigenschaft sollten jeweils in einer expliziten, <b>direkten</b> und korrekten Beziehung zueinanderstehen.</li> <li>▪ Keine Richtung für die Übertragung eines Bereiches und den anderen ist identifizierbar.</li> <li>▪ Dennoch sollten die Eigenschaften <b>nicht</b> in ein größeres korrespondierendes System eingebunden sein.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Glühwendel/Kabel: leuchtet, geht an, kaputt, nicht isoliert</li> <li>▪ Stoff: schwarz/weiß, magnetisch, leitfähig, Flocken/flockig, synthetisch, natürlich</li> <li>▪ Stoff/Luft: farblos, geruchlos</li> <li>▪ Plexiglasrohr/Mühle: (un-) durchsichtig, fest, Form betreffend (rund, zylindrförmig, ...)</li> <li>▪ Implizit durch „es“ / „das“ ausgedrückte Objekte, die eine <b>Eins-zu-Eins-Korrespondenz</b> zu einem konkreten Objekt aufweisen und deren Eigenschaften „gleich“ / „genauso wie“ / „ähnlich“ sein sollen, werden kodiert, wenn „es/das“ im Kontext klar definierbar ist.</li> </ul>	
3. Strukturelle Attributebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einfache <b>Objekteigenschaften</b> aus beiden Systemen (Original &amp; Modellexperiment), welche auf strukturellen, d.h. für das Phänomen <b>relevanten</b> Eigenschaften (Aussehen, wörtliche Kennzeichnung, ...) basieren, werden zwischen Original und Modellexperiment verglichen bzw. aufeinander abgebildet (gemappt).</li> <li>▪ Die Komponente und die Eigenschaft sollten jeweils in einer expliziten, <b>direkten</b> und korrekten Beziehung zueinanderstehen.</li> <li>▪ Keine Richtung für die Übertragung eines Bereiches und den anderen ist identifizierbar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Das Substantiv „Pulver“ liefert implizit eine Eigenschaftszuweisung des Stoffes. (<i>Dudenverlag (2021c)</i>: „staubfein, zerkleinerter, zerriebener oder zermahlener Stoff.“)</li> <li>▪ Tritt eine strukturelle und oberflächliche Eigenschaftszuweisung gemeinsam innerhalb einer Phrase auf (z.B. „schwarzes Pulver“), wird diese Phrase doppelt kodiert. Einmal wird das Objekt „Pulver“ zusammen/gemeinsam mit der jeweiligen (irrelevanten) Eigenschaft „schwarz“ oberflächlich kodiert. Und dann „Pulver“ auf struktureller Attributebene.</li> </ul>	„beides waren Pulverstoffe“; „beides waren ja halt heiße Kabel“; „die Ähnlichkeiten sind, dass es brennbare Stoffe [...]“; „gleich ist, dass es halt ein geschlossener Raum war“

	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dennoch sollten die Eigenschaften <b>nicht</b> in ein größeres korrespondierendes System eingebunden sein.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Implizit durch „es“/ „das“ ausgedrückte Objekte, die eine <b>Eins-zu-Eins-Korrespondenz</b> zu einem konkreten Objekt aufweisen und deren Eigenschaften „gleich“/ „genauso wie“/ „ähnlich“ sein sollen, werden kodiert, wenn „es/das“ im Kontext klar definierbar ist.</li> </ul>	
4. Relationsebene	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Beziehungen</b>/ wechselseitige Verhältnisse, welche in jedem System (Original &amp; Modellexperiment) aus mindestens <b>zwei</b> einzelnen Komponenten bestehen, werden zwischen Original und Modellexperiment <b>verglichen</b> bzw. aufeinander abgebildet (ge-mappt).</li> <li>▪ Keine Richtung für die Übertragung eines Bereiches und den anderen ist identifizierbar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Umgangssprachliche Formulierungen von Relationsbeschreibungen werden auch kodiert, z.B. der Verpuffung als Synonym für den Begriff Explosion.</li> <li>▪ Worte, die eine Relation implizit tragen (Aerosol, Aufwirbelung)</li> <li>▪ Aufzählungen von Bedingungen, die einen gemeinsamen Sinnzusammenhang haben und zu „etwas“ [der Relation] führen, werden zu einer Relation zusammengefasst.</li> <li>▪ Findet eine Sinnänderung sowie eine räumliche/zeitliche Trennung (u.a. „und dann“) innerhalb einer Aufzählung statt, so dass keine übergeordnete Relation erkennbar ist, wird die Aufzählung nicht als Relation kodiert.</li> <li>▪ Implizit durch „es“/ „das“ ausgedrückte Objekte, die eine <b>Eins-zu-Eins-Korrespondenz</b> zu einem konkreten Objekt aufweisen und deren Eigenschaften „gleich“/ „genauso wie“/ „ähnlich“ sein sollen, werden kodiert, wenn „es/das“ im Kontext klar definierbar ist.</li> </ul>	„das (.) Pulver (.) und das Mehl haben sich wahrscheinlich (2) in der Luft verteilt und wurden dann durch eine Flamme entzündet.“; „gleich ist, dass die Sachen wahrscheinlich aufgewirbelt worden sind, [...]; „das Gleiche, [...], dass (2) ja also, es war was Feines und das ist mit (.) Strom oder Wärme (2) zusammengekommen und [...].“

## 12.13 Ergebnisse zum Vergleich der Stichprobengruppen Video und Schüler\*innenexperiment

Zur Charakterisierung der Probandengruppen (Video und Schüler\*innenexperiment) und der Identifizierung von gegebenenfalls vorhandenen Unterschieden zwischen den beiden Probandengruppen, wurden zunächst die Ergebnisse folgender Testabschnitte der Intervention betrachtet:

- Kognitiver Fähigkeitstest (KFT) mit seinen Subskalen figurale und verbale Analogien (vgl. Heller & Perleth 2000),
- Interesse am Chemieunterricht-Items mit einer 4-stufigen Likert Skala (1 = trifft völlig zu bis 4 = trifft gar nicht zu; umkodiert: 1 = geringes Interesse bis 4 = hohes Interesse) (vgl. Anhang 12.3, Baumert et al. 1986).

### Kognitive Fähigkeiten der Probandengruppen

Die Ergebnisse der Schüler\*innen in diesen Testabschnitten liefern Aussagen dazu, ob die Probandengruppen homogen sind. Dies ist vor allem relevant, um das Vorwissen der beiden Probandengruppen gemeinsam betrachten zu können sowie mögliche Gruppenunterschiede zwischen den beiden Probandengruppen beim Denken in Analogien zu bestärken.

Die Boxplot-Diagramme in Abbildung 92 (a) – (c) zeigen die Ergebnisse der beiden Subskalen des kognitiven Fähigkeitstests (KFT) und die Summe der beiden Subskalen (KFT\_gesamt). Diese Diagrammform ist geeignet, um die Verteilung der Daten graphisch darzustellen und dabei deskriptiv mit Hilfe des Medians, des ersten und dritten Quartils, der Streuung und Ausreißern zu beschreiben (vgl. Field, 2009). Sie fassen verschiedene Lagemaße einer Verteilung zusammen. Die waagerechte Linie in den Boxen zeigt den Median (Quartil 2) der entsprechenden Verteilung an. Er gibt an, dass 50% der Werte unterhalb des Medians liegen und 50% oberhalb des Medians liegen. Die Box wird durch das erste und das dritte Quartil begrenzt. Das erste Quartil (unteres Quartil) ist die untere Grenze des Boxplots und gibt den Wert an, bei dem 25% der Werte drunter liegen. Somit liegen 75% der Werte über dem ersten Quartil. Das dritte Quartil (oberes Quartil) ist analog zu dem ersten Quartil zu verstehen. Es bedeutet, dass 25% der Werte oberhalb des dritten Quartils liegen und 75% der Werte unterhalb des dritten Quartils liegen. Die Box stellt die Differenz zwischen dem dritten und ersten Quartil dar und wird als Interquartilsabstand bezeichnet. Darüber hinaus gibt es Ausreißer. Werte, die als Ausreißer definiert werden, liegen das 1,5-fache des Interquartilsabstandes über bzw. unter der Box. Die Ausreißer werden mit einem Kreis mit Fallnummer markiert. Darüber hinaus gibt es auch noch extreme Ausreißer, welche mit einem Stern und der zugehörigen Fallnummer markiert werden. Diese liegen das 3-fache des

## 12.13 Ergebnisse zum Vergleich der Stichprobengruppen Video und Schüler\*innenexperiment

Interquartilsabstandes über bzw. unter des ersten und dritten Quartils. Alle Werte darunter sind keine Ausreißer. Die waagerechten Linien (Whisker) am oberen und unteren Ende einer jeden Box stellen die Maximal- bzw. Minimalwerte dar, die keine Ausreißer mehr sind (vgl. Field, 2009; Bühl, 2010, 264 & 981 f.). Die Ergebnisdarstellung erfolgt differenziert nach den beiden Probandengruppen *Video* und *Schüler\*innenexperiment* (vgl. Abschnitt 4.4).

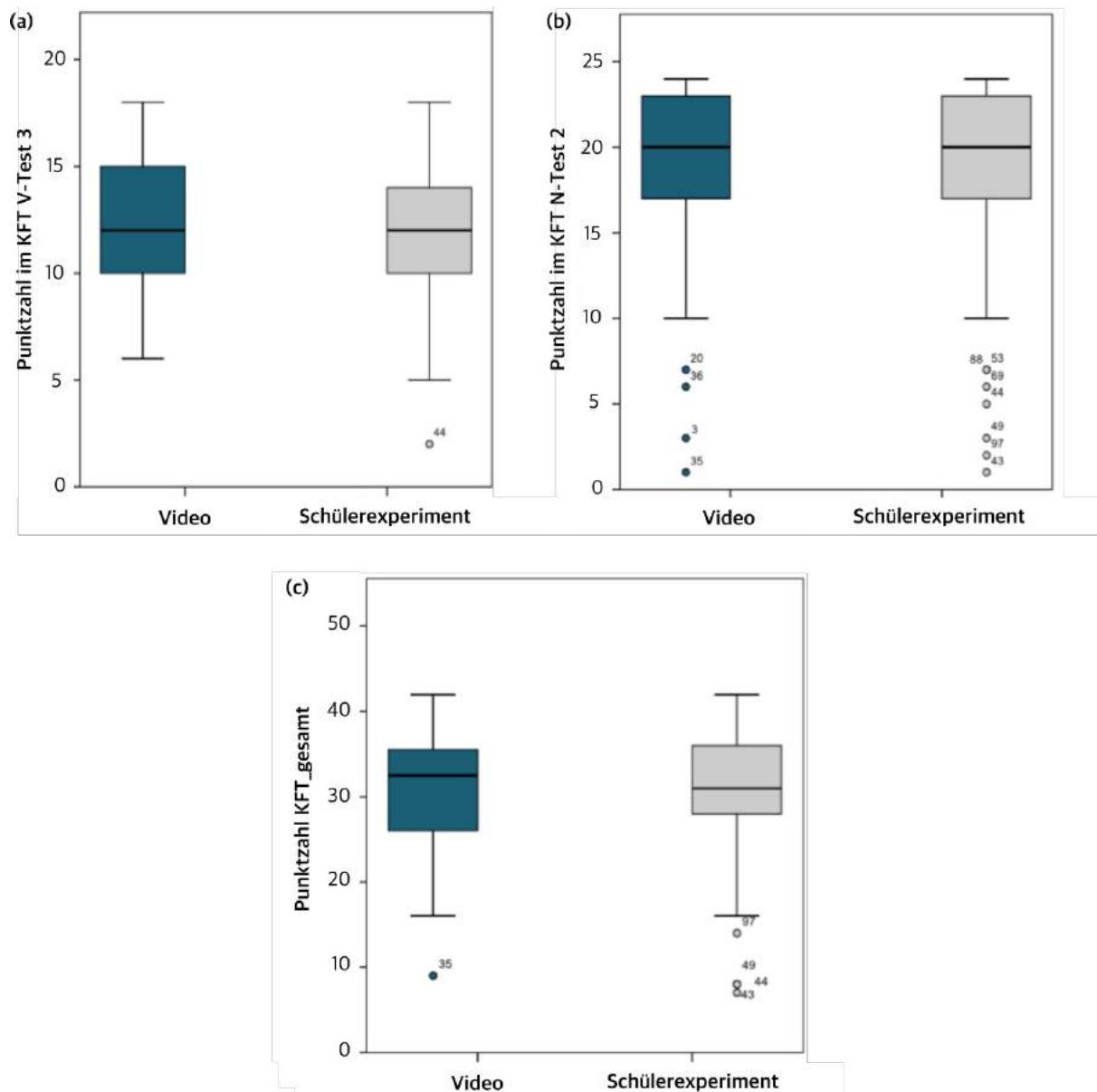


Abbildung 92: Punktzahlen von (a) KFT V-Test 3 und (b) N-Test 2 sowie (c) der Summe dieser beiden Subtests differenziert nach Video- und Schüler\*innenexperiment-Gruppe.

Im Hinblick auf die Subtests des KFT kann anhand der Boxplot-Diagramme erkannt werden, dass die Mediane der beiden Probandengruppen identisch sind (Median<sub>V-Test 3</sub> = 12,00; Median<sub>N-Test 2</sub> = 20,00) (vgl. Abbildung 92 (a) & (b)). Gleichzeitig liegen auch die Gesamtergebnisse des KFT auf einem vergleichbaren Niveau (vgl. Abbildung 92 (c)). So weisen die Mediane der Testleistungen des kognitiven

Fähigkeits-Tests Werte zwischen 32,50 (Video) und 31,00 (Schüler\*innenexperiment) auf. Darüber hinaus sind auch die Punkte, die 50 % der Versuchspersonen der jeweiligen Gruppe erhalten, in den Subtests sowie dem Gesamtwert auf einem vergleichbaren Niveau angesiedelt (KFT\_gesamt Video: 26,00 – 35,75; KFT\_gesamt Schüler\*innenexperiment: 28,00 – 36,00).

Um statistisch abzusichern, dass keine Unterschiede in Bezug auf den kognitiven Fähigkeitstest zwischen den beiden Probandengruppen existieren, wurden weitere statistische Analysen der Ergebnisse durchgeführt.

Der Kolmogorov-Smirnov-Test offenbarte, dass die vorliegenden Daten des KFT signifikant nicht normalverteilt sind ( $p_{KFT\_Kolmogorov-Smirnov-Test} = .000$ ;  $p < .001$ ) (Bühl 2010, S. 368f.). Entsprechend wurden für die weiteren Analysen ein non-parametrisches Verfahren, der Mann-Whitney U-Test, eingesetzt. Dieser Mann-Whitney-U-Test wurde berechnet um zu überprüfen, ob sich die kognitiven Fähigkeiten zwischen den beiden einzelnen Probandengruppen (Schüler\*innenexperiment und Video) unterscheiden. Der Test zeigt bezogen auf die Ergebnisse des KFT, dass es zwischen den beiden Einzelgruppen keinen signifikanten Unterschied in der Testleistung gibt,  $U = 1113.500$ ,  $Z = -.756$ ,  $p = .449$ .

### ***Gesamtinteresse der Probandengruppen***

Das Boxplot-Diagramm in Abbildung 93 zeigt das Gesamtinteresse, das auf dem Mittelwert der entsprechenden Ergebnisse der sieben Einzelitems besteht (vgl. Abschnitt 4.3.5). Die Mediane der einzelnen Probandengruppen (Video, Schüler\*innenexperiment) entsprechen sich und liegen bei 3,33 Punkten. Das Gesamtinteresse von 50 % der Versuchspersonen, die das Video betrachtet haben, liegt zwischen 3,00 und 3,50. Bei den Versuchspersonen, die das Schüler\*innenexperiment durchgeführt haben, liegt das Interesse von 50 % der Versuchspersonen zwischen 3,00 und 3,67. Die beiden Probandengruppen unterscheiden sich lediglich in den minimalen sowie maximalen Werten. So weist die Video-Gruppe ein Maximum von 3,83 auf, die Schüler\*innenexperimente-Gruppe von 4,00. Gleichzeitig liegt das Minimum mit 2,50 Punkten bei der Video-Gruppe höher als das Minimum der Schüler\*innenexperimente-Gruppe (2,17).

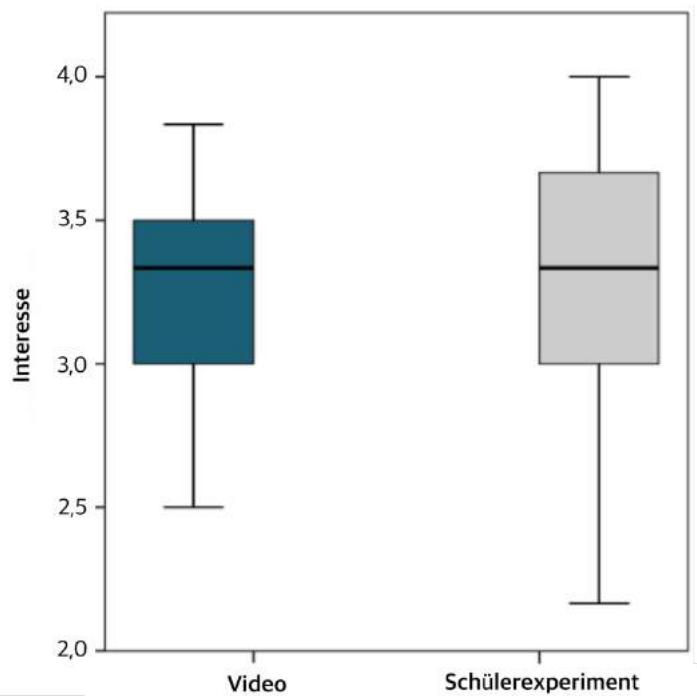


Abbildung 93: Gesamtinteresse der Schüler\*innen differenziert nach Video und Schüler\*innenexperiment-Gruppe.

Um statistisch abzusichern, dass keine Unterschiede beim Interesse am Chemieunterricht zwischen den beiden Probandengruppen existieren, wurden weitere statistische Analysen der Ergebnisse durchgeführt.

Der Kolmogorov-Smirnov-Test offenbart, dass die vorliegenden Daten des Gesamtinteresses signifikant nicht normalverteilt sind ( $p_{\text{Interesse\_Kolmogorov-Smirnov-Test}} = .003$ ;  $p < .001$ ) (vgl. Bühl 2010, S. 368f.). Somit wurde auch hier der non-parametrische Mann-Whitney-U-Test für die weiteren Analysen eingesetzt. Auch bei den Ergebnissen des Gesamtinteresses kann zwischen den beiden Probandengruppen kein signifikanter Unterschied identifiziert werden,  $U = 1141.000$ ,  $Z = -.331$ ,  $p = .740$ .

#### ***Zwischenzusammenfassung der Ergebnisse bezüglich der soziodemographischen Daten***

Insgesamt konnte bezüglich der erhobenen Kontrollvariablen (soziodemographische Daten, kognitive Fähigkeiten und Interesse am Chemieunterricht) beim Vergleich der Probandengruppen vor der Studie keine signifikanten Gruppenunterschiede identifiziert werden (Kognitiver Fähigkeitstest:  $U = 1113.500$ ,  $Z = -.756$ ,  $p = .449$ ; Gesamtinteresse am Chemieunterricht:  $U = 1141.000$ ,  $Z = -.331$ ,  $p = .740$ ) (vgl. Abbildung 93). Die Gruppen unterscheiden sich vor der Studie also nicht in den relevanten Merkmalen. Entsprechend wurden diese Variablen bei den folgenden Analysen nicht weiter berücksichtigt.

## 12.14 Ergebnisse weiterer Augenparameter

### Blinzelrate

Im Folgenden wird die Anzahl der Blinzler während des Betrachtens des Videos differenziert nach den drei einzelnen Sequenzen des Videos betrachtet (vgl. Abbildung 94).

Ein Mensch blinzt 10 bis 15-mal pro Minute (vgl. Moses, 1981, S. 1 ff.). Die Anzahl der Blinzler ist damit abhängig von der Länge der präsentierten Sequenzen im Video. Daher ist bei der Betrachtung der Blinzler wichtig, dass beachtet wird, dass die Sequenzen des Videos unterschiedliche Längen aufweisen. Sequenz 2 ist 3-mal so lang wie Sequenz 1 und Sequenz 3 4-mal so lang wie Sequenz 1. Es fällt auf, dass die Anzahl der Blinzler mit der Länge des Videos proportional zunimmt. Der Median in Sequenz 1 liegt bei 5 Blinzlern während der Präsentation des Versuchsaufbaus. Die Mediane in den Sequenz 2 (Vorversuch) und 3 (Modellexperiment) liegen bei 14 bzw. 16 Blinzlern. In Sequenz 1 liegen 50 % der Werte zwischen 2 und 11 Blinzlern. In Sequenz 2 sind die 50 % der Werte zwischen 6 und 22 zu finden und in Sequenz 3 zwischen 6 und 32 Blinzlern. In Sequenz 1 liegt die Streuung der Werte zwischen 0 (Minimum) und 17 (Maximum). Diese Streuung nimmt über Sequenz 2 zu Sequenz 3 zu. So ist das Minimum in Sequenz 2 1 und das Maximum 46 Blinzler, in Sequenz 3 beträgt das Minimum 0 und das Maximum 64 Blinzler. Dabei fällt auf, dass die Anzahl der Blinzler mit der Länge der jeweiligen Videosequenz ansteigt.

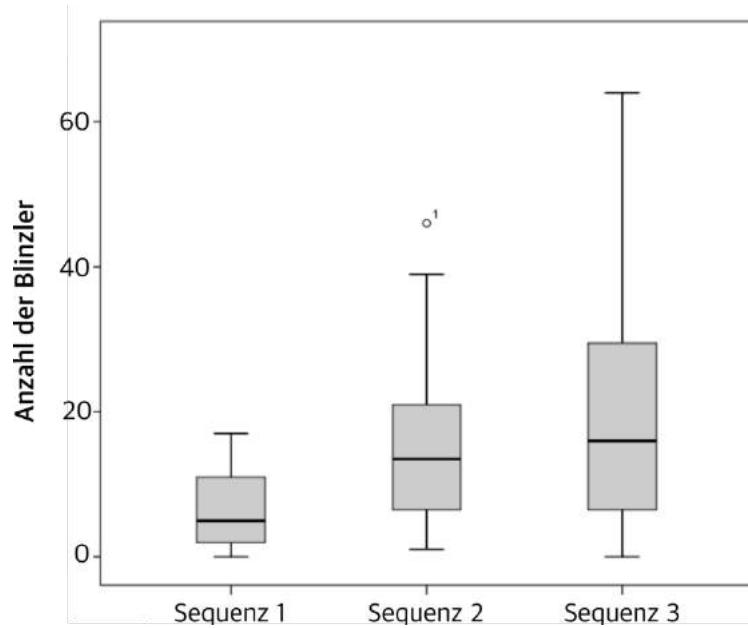


Abbildung 94: Anzahl der Blinzler differenziert nach den drei einzelnen Sequenzen des Videos (Aufbau, Vorversuch, Modellexperiment).

### Pupillendurchmesser

Der Pupillendurchmesser ist ein Kennwert, der eine Versuchsperson charakterisiert. Der normale Pupillendurchmesser von Erwachsenen liegt zwischen 2 mm und 4 mm in hellem Licht. In der Dunkelheit variiert er zwischen 2 mm und 8 mm (vgl. Becker-Carus, 1979, 145). Die Pupillendurchmesser der Gesamtstichprobe sind in Abbildung 95 differenziert nach den drei einzelnen Sequenzen des Videos dargestellt.

Der Median der Pupillendurchmesser in den Sequenzen 1, 2 und 3 sinken leicht von Sequenz zu Sequenz, jedoch liegt er durchgängig ungefähr bei 5 mm (vgl. Abbildung 95). 50 % der Werte liegen in allen Sequenzen zwischen 5 und 6 mm. In Sequenz 1 liegt die Streuung der Werte zwischen 4 (Minimum) und 7 (Maximum). Diese Streuung nimmt über Sequenz 2 zu Sequenz 3 leicht ab. So ist in den Sequenzen 2 und 3 der minimale Pupillendurchmesser 4 mm und das Maximum 6 mm.

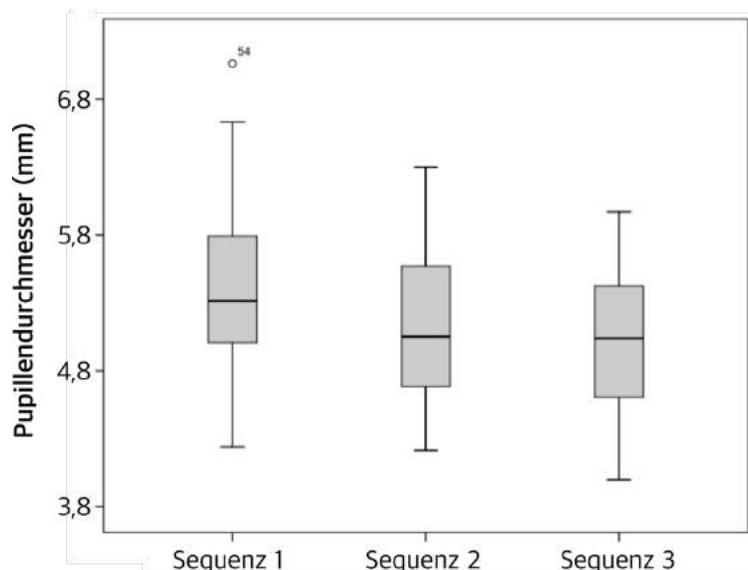


Abbildung 95: Pupillendurchmesser differenziert nach den drei einzelnen Sequenzen des Videos (Aufbau, Vorversuch, Modellexperiment).

## 12.15 Ergebnisse zur Informationsverarbeitung

*Differenzierte Betrachtung der im Versuchsprotokoll genannten Beobachtungen und Auswertungen nach inhaltlichen Aussagen*

### **Beobachtungen**

Tabelle 44: Absolute und prozentuale Verteilung der Aussagen zur **Bezeichnung des Stoffs** bei der Beschreibung der Beobachtung ( $n = 36$ ).

<b>Bezeichnung des Stoffes</b>	<b>absoluter Anteil</b>	<b>prozentualer Anteil</b>
Nicht erschließbare Aussagen	4	11,1 %
Stoff wird genannt	10	27,8 %
Pulver wird genannt	22	61,1 %

Tabelle 45: Absolute und prozentuale Verteilung der Aussagen zur **beobachtbaren Auswirkung des Stromanschaltens** bei der Beschreibung der Beobachtung ( $n = 36$ ).

<b>Wenn ich den Strom anschalte, dann ...</b>	<b>absoluter Anteil</b>	<b>prozentualer Anteil</b>
Nicht erschließbare Aussagen	8	22,2 %
... wird die Glühwendel heiß.	1	2,8 %
... geht die Glühwendel an/ leuchtet/ glüht auf.	22	61,1 %
... geht die Glühwendel an/ leuchtet/ glüht auf und wird heiß.	5	13,9 %

Tabelle 46: Absolute und prozentuale Verteilung der Aussagen zur **beobachtbaren momentanen Auswirkung des Herunterdrückens der Luftpumpe** bei der Beschreibung der Beobachtung ( $n = 36$ ).

<b>Wenn ich den Kolben der Luftpumpe ruckartig nach unten drücke, dann ...</b>	<b>absoluter Anteil</b>	<b>prozentualer Anteil</b>
Nicht erschließbare Aussagen	8	22,2 %
... entsteht ein Feuer/ eine Stich(Flamme)/eine Verbrennung.	4	11,1 %
... wird das Pulver aufgewirbelt/ fliegt hoch/verteilt sich.	18	50,0 %
... wird das Pulver aufgewirbelt/ fliegt hoch/verteilt sich und es entsteht ein Feuer/ eine Stich(Flamme)/eine Verbrennung.	6	16,7 %

Tabelle 47: Absolute und prozentuale Verteilung der Aussagen zur **beobachtbaren abschließenden Auswirkung des Herunterdrückens der Luftpumpe** bei der Beschreibung der Beobachtung ( $n = 36$ ).

<b>Nachdem der Kolben der Luftpumpe heruntergedrückt worden ist, ...</b>	<b>absoluter Anteil</b>	<b>prozentualer Anteil</b>
Nicht erschließbare Aussagen	25	69,4 %
... entsteht ein Feuer/ eine Stich(Flamme)/eine Verbrennung.	10	27,8 %
... geht der Deckel auf.	1	2,8 %

## Auswertungen

Tabelle 48: Absolute und prozentuale Verteilung der Aussagen zur Art der Reaktion bei der Beschreibung der Auswertung ( $n = 36$ ).

<b>Verbrennung</b>	<b>absoluter Anteil</b>	<b>prozentualer Anteil</b>
Nicht erschließbare Aussagen	26	72,2 %
Feuer, Flamme, Stichflamme	1	2,8 %
Verbrennung, Verbrennungsreaktion, Explosion	9	25,0 %

Tabelle 49: Absolute und prozentuale Verteilung der Aussagen zur Brennbarkeit des Stoffs bei der Beschreibung der Auswertung ( $n = 36$ ).

<b>Brennstoff</b>	<b>absoluter Anteil</b>	<b>prozentualer Anteil</b>
Nicht erschließbare Aussagen	28	77,8 %
Brennbarkeit, Brennstoff wird genannt	8	22,2 %

Tabelle 50: Absolute und prozentuale Verteilung der Aussagen zur Funktion der Luftpumpe bei der Beschreibung der Auswertung ( $n = 36$ ).

<b>Funktion der Luftpumpe</b>	<b>absoluter Anteil</b>	<b>prozentualer Anteil</b>
Nicht erschließbare Aussagen	27	75,0 %
Betätigung der Luftpumpe wirbelt Pulver auf.	7	19,4 %
Betätigung der Luftpumpe wirbelt Pulver auf und ein Staub-Luft-Gemisch wird gebildet.	2	5,6 %

Tabelle 51: Absolute und prozentuale Verteilung der Aussagen zum Vorliegen von Sauerstoff oder Luft als Reaktionspartner bei der Beschreibung der Auswertung ( $n = 36$ ).

<b>Sauerstoff</b>	<b>absoluter Anteil</b>	<b>prozentualer Anteil</b>
Nicht erschließbare Aussagen	26	72,2 %
Sauerstoff wird als Reaktionspartner genannt.	10	27,8 %

Tabelle 52: Absolute und prozentuale Verteilung der Aussagen zur Glühwendel bei der Beschreibung der Auswertung ( $n = 36$ ).

<b>Glühwendel</b>	<b>absoluter Anteil</b>	<b>prozentualer Anteil</b>
Nicht erschließbare Aussagen	22	61,1 %
Glühwendel erzeugt Wärme (Erwärmung).	4	11,1 %
Glühwendel zündet Brennstoff/ Staub-Luft-Gemisch.	10	27,8 %

Tabelle 53: Absolute und prozentuale Verteilung der Aussagen zur Druckentstehung infolge der stattfindenden Reaktion bei der Beschreibung der Auswertung ( $n = 36$ ).

<b>Druck</b>	<b>absoluter Anteil</b>	<b>prozentualer Anteil</b>
Nicht erschließbare Aussagen	34	94,4 %
Entstehung von Druck aufgrund der Reaktion.	2	5,6 %

### Differenzierte Betrachtung der einzelnen Items im Fragebogen

Tabelle 54: Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen Items zum Versuchsaufbau.

	AFo-lie_r	AGlas-rohr_r	AGlas_r	AGlastie-gel_r	AGlüh_r	AHolz_r	AKa-bel_r	ALuft_r
N	Gültig	36	36	36	36	36	36	36
	Fehlend	0	0	0	0	0	0	0
Mittelwert		,9722	,9167	,5833	,4444	,4722	,8889	,3889
Standard-ab-weichung		,1666	,28031	,50000	,50395	,50631	,31873	,49441
Minimum		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
Maximum		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

	APG_r	ASch-lau_r	AS-pann_r	Agel-berSt_r	Ablau-erSt_r	AZünd_r
N	Gültig	36	36	36	36	36
	Fehlend	0	0	0	0	0
Mittelwert		,7500	,3611	,7222	,1389	,9722
Standardab-weichung		,43916	,48714	,45426	,35074	,16667
Minimum		,00	,00	,00	,00	,00
Maximum		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

	ABech_r	ADeckel_r	ADraht_r	AFeuer_r
N	Gültig	36	36	36
	Fehlend	0	0	0
Mittelwert		,8611	,5556	,2222
Standardab-weichung		,35074	,50395	,42164
Minimum		,00	,00	,00
Maximum		1,00	1,00	1,00

Tabelle 55: Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen Items zum Vorversuch.

	VV2a_r	VV2b_r
N	Gültig	36
	Fehlend	0
Mittelwert		,2222
Standardabwei-chung		,42164
Minimum		,00
Maximum		1,00

Tabelle 56: Mittelwerte und Standardabweichung der einzelnen Items zum Modellexperiment.

	E3a_r	E3b_r	E3c_r	E3d_r	E3e_r	E3f_r
N	Gültig	36	36	36	31	35
	Fehlend	0	0	0	5	1
<b>Mittelwert</b>	,9722	,7500	,7778	,3548	,1143	,3056
<b>Standardabwei-</b>	,16667	,43916	,42164	,48637	,32280	,46718
<b>chung</b>						
<b>Minimum</b>	,00	,00	,00	,00	,00	,00
<b>Maximum</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

	E3g_r	E3h_r	E3i_r	E3j_r
N	Gültig	35	34	36
	Fehlend	1	2	0
<b>Mittelwert</b>	,4000	,7353	,2500	,6000
<b>Standardab-</b>	,4970	,44781	,43916	,4970
<b>weichung</b>	5		5	
<b>Minimum</b>	,00	,00	,00	,00
<b>Maximum</b>	1,00	1,00	1,00	1,00

## 12.16 Analogie-Denkgraphen Mapping

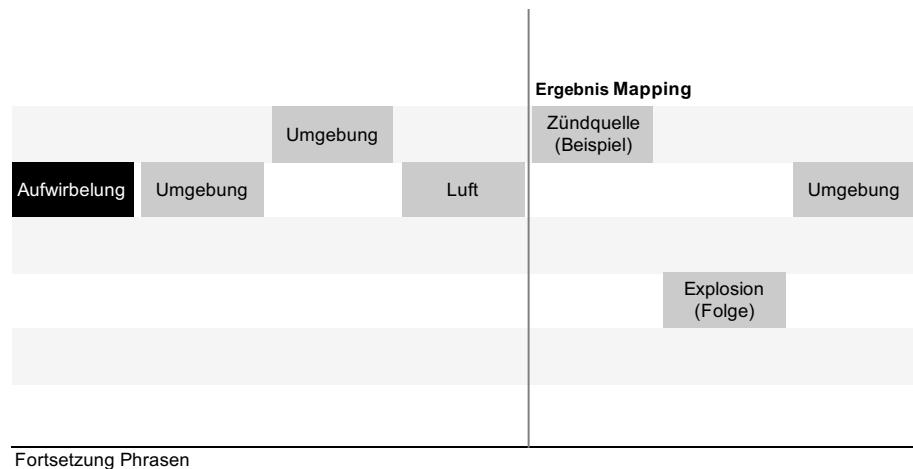
### Video-Gruppe

AI0511\_I\_map.xlsx

Mapping		Ergebnis Mapping	
Beschreibung des Originals	Umgebung	Umgebung	Entzündung
Beschreibung des Modellexperiments			Umgebung
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$			Sauerstoff
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$			
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$	Ent-zünd. Brennb. (Stoff)	Zerteil (Stoff) Brennb. (Stoff)	
Sonstiges			
Phrasen		Explosion (Folge)	
		Flamme (Folge)	
		Fortsetzung Phrasen	

AI2910\_I\_map.xlsx

Mapping	
Beschreibung des Originals	Flamme (Folge)
Beschreibung des Modellexperiments	Zündquelle (Beispiel)
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$	Zündquelle (Beispiel)
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$	Umgebung
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$	Stoff
Sonstiges	Entzündung
Metakognitive Operation	
Phrasen	



AO0902\_I\_map.xlsx

Mapping	Ergebnis Mapping
Beschreibung des Originals	Explosion (Folge)
Beschreibung des Modellexperiments	
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$	
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$	
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$	
Sonstiges	Wiederholung
Phrasen	

AR0710\_I\_map.xlsx

Mapping	Ergebnis Mapping
Beschreibung des Originals	
Beschreibung des Modellexperiments	
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$	
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$	
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$	
Sonstiges	
Phrasen	

I2 Anhang

AR1211\_I\_map.xlsx

Mapping				Ergebnis Mapping
Beschreibung des Originals		Aufwirbelung	Explosion	
Beschreibung des Modellexperiments	Farbe (Stoff)	Energie (Zündquelle)		Entzündung Energie Zerteil.
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$	Zerteilungsgrad (Stoff)			Flamme (Folge)
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$		Zündquelle (Beispiel)		
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$				
Sonstiges				Fehlvorstellung

---

Phrasen

Aufwirbelung	Explosion	Stoff	Umgebung	Explosion (Folge)
--------------	-----------	-------	----------	----------------------

Fehl-  
vorstellung

---

### Fortsetzung Phrasen

BA0811\_I\_map.xlsx

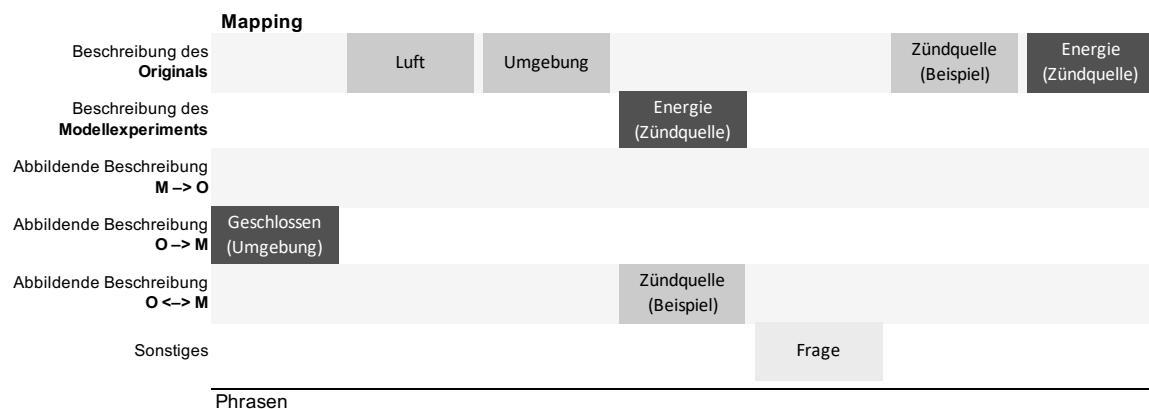
Mapping					Ergebnis Mapping
Beschreibung des Originals	Stoff	Explosion (Folge)	Stoff	Umgebung	Explosion (Folge)
Beschreibung des Modellexperiments		Farbe (Stoff)			
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$					
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$					
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$					
Sonstiges					Wiederholung
Phrasen					

## Phrasen

Entzündung

Fortsetzung Phrasen

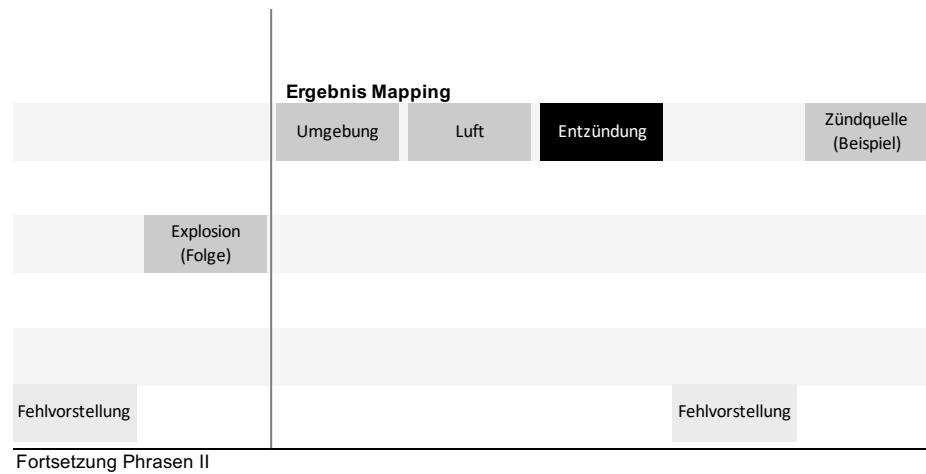
BA2810\_I\_map.xlsx



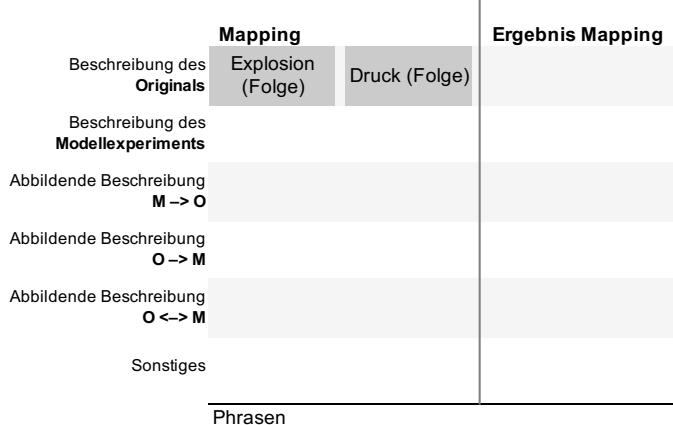
Brennbarkeit (Stoff)	Luftzufuhr	Energie (Zündquelle)	Aufwir- brennb- belung Zerteil.	Geschlossen (Umgebung)
----------------------	------------	----------------------	---------------------------------	------------------------

Fehlvorstellung Fehlvorstellung

Fortsetzung Phrasen I



BB0103\_I\_map.xlsx



CÖ1102\_I\_map.xlsx

	Mapping	Ergebnis Mapping
Beschreibung des Originals		Entzündung
Beschreibung des Modellexperiments	Energie (Zündquelle)	Ablagerung (Stoff)
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$	Zündquelle (Beispiel)	
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$		
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$		
Sonstiges	Metakognitive Operation	
Phrasen		

CÜ2506\_I\_map.xlsx

	Mapping	Ergebnis Mapping
Beschreibung des Originals	Umgebung	Zerteilungsgrad (Stoff)
Beschreibung des Modellexperiments		Zerteilungsgrad (Stoff)
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$		Zerteilungsgrad (Stoff)
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$	Explosion (Folge)	Stoff Umgebung Zündquelle (Beispiel) Stoff
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$		
Sonstiges		
Phrasen		

**Ergebnis Mapping**

Explosion (Folge) Energie (Zündquelle)

Aufwirbelung

Fortsetzung Phrasen

## I2 Anhang

---

FE0107\_I\_map.xlsx

Mapping					Ergebnis Mapping	
Beschreibung des Originals	Entzündbarkeit (Stoff)	Entzündung		Aufwirbelung	Explosion	Energ. (Zündquelle)
Beschreibung des Modellexperiments						
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$						
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$			Explosion (Folge)			Explosion (Folge)
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$						
Sonstiges						

Phrasen

FR2004\_I\_map.xlsx

Mapping				Ergebnis Mapping	
Beschreibung des Originals	Brennbarkeit (Stoff)	Zündquelle (Beispiel)	Explosion (Folge)	Brennbarkeit (Stoff)	Entzündung
Beschreibung des Modellexperiments					
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$					
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$					
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$					
Sonstiges					

Phrasen

HO0102\_I\_map.xlsx

Mapping				Ergebnis Mapping		
Beschreibung des Originals			Energie (Zündquelle)	Explosion (Folge)	Energie (Zündquelle)	Druck (Folge)
Beschreibung des Modellexperiments	Zerteilungsgrad (Stoff)					
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$						
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$						
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$	Stoff	Geschlossen (Umgebung)	Zündquelle (Beispiel)			
Sonstiges						

Phrasen

Explosions-  
fähigkeit  
(Stoff)

Fortsetzung Phrasen

IC2504\_I\_map.xlsx

Mapping	Ablagerung (Stoff)	Stoff	Entzündbar- keit (Stoff)	Ergebnis Mapping
Beschreibung des Originals				Entzündung   Energ- quelle)
Beschreibung des Modellexperiments		Farbe Zerteil (Stoff) (Stoff)		
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$				
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$	Geschlossen (Umgebung)	Aufwirbelung	Zündquelle (Beispiel)	
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$				
Sonstiges				
Phrasen				

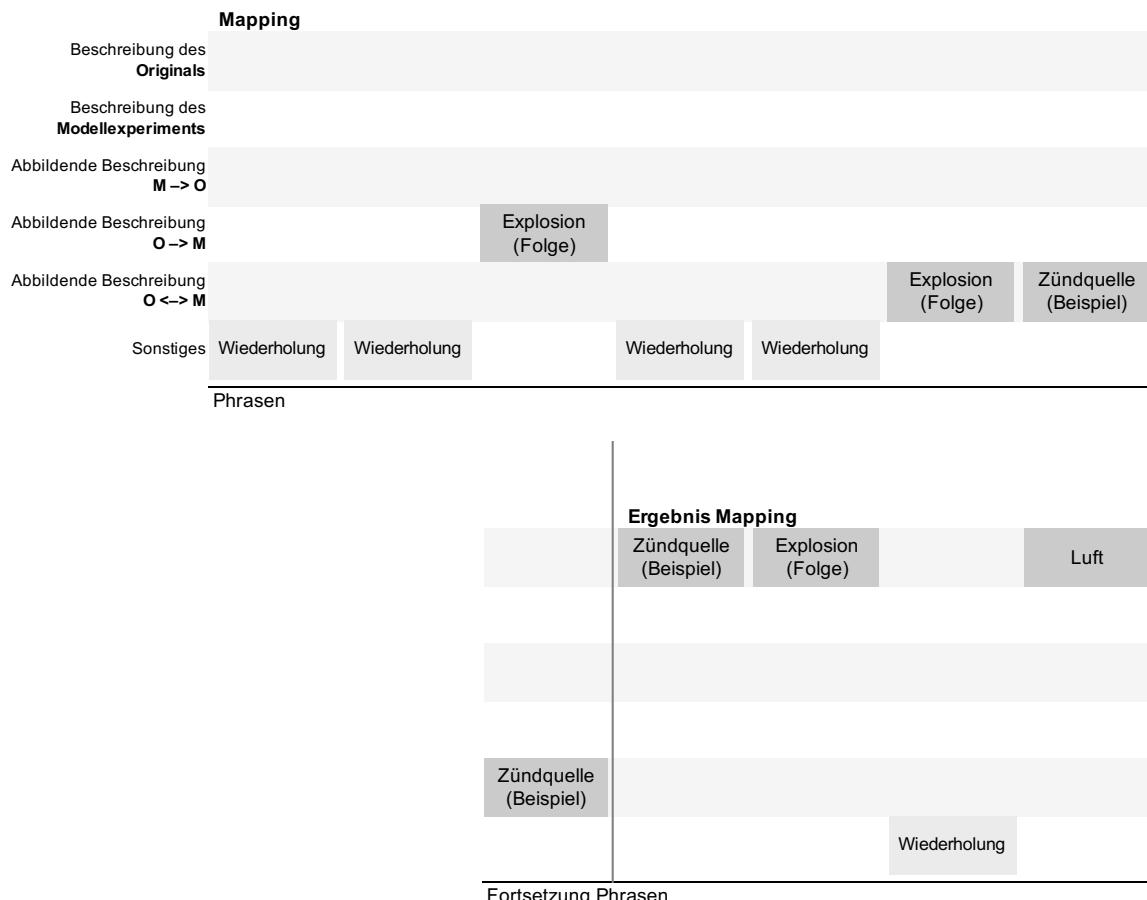
Druck (Folge)

Fortsetzung Phrasen

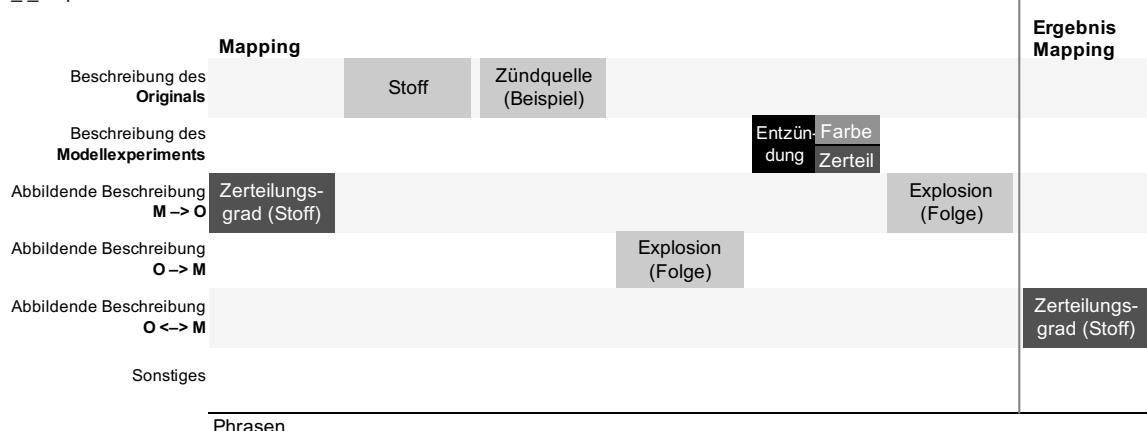
## I2 Anhang

---

JA2807\_I\_map.xlsx



JE1501\_I\_map.xlsx



## 12.16 Analogie-Denkgraphen Mapping



Fortsetzung Phrasen

JI2404\_I\_map.xlsx

Beschreibung des Originals						
Beschreibung des Modellexperiments		Explosion (Folge)	Energie (Zündquelle)	Luft	Zerteilungsgrad (Stoff)	
Abbildende Beschreibung M → O						
Abbildende Beschreibung O → M						
Abbildende Beschreibung O <→ M			Energie (Zündquelle)			
Sonstiges	Wiederholung					Metakognitive Operation
Phrasen						

JI2710\_I\_map.xlsx

Mapping	Ergebnis Mapping							
Beschreibung des Originals	Entzündung	Be-schäd. (Zündq)	Flamme (Folge)	Brenn-bark. (Stoff)	Zerteil (Stoff)	Brennbarkeit (Stoff)	Zündq- Energ. Stoff- (Zünd- Interak. quelle)	Entzündung
Beschreibung des Modellexperiments						Luftdruck		
Abbildende Beschreibung M → O								
Abbildende Beschreibung O → M								
Abbildende Beschreibung O <→ M								
Sonstiges								
Phrasen								

## I2 Anhang

---

JR3003\_I\_map.xlsx

Mapping	Ergebnis Mapping		
	Zündquelle-Stoff-Interaktion	Entzündung	Stoff
Beschreibung des Originals			Explosion (Folge)
Beschreibung des Modellexperiments			
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$			
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$			
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$			
Sonstiges			Wiederholung

Phrasen

KÄ1602\_I\_map.xlsx

Mapping	Ergebnis Mapping			
	Brennbarkeit (Stoff)	Entzündung	Explosion (Folge)	Zündquelle (Beispiel)
Beschreibung des Originals				Aufwirbelung
Beschreibung des Modellexperiments				Zündquelle-Stoff-Interaktion
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$				
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$				
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$				
Sonstiges				Explosion

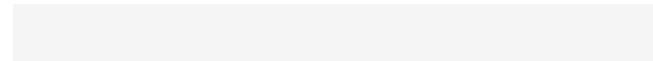
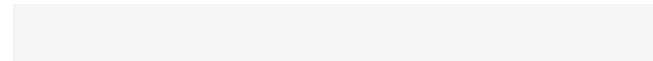
Phrasen

KE2703\_I\_map.xlsx

Mapping					Druck (Folge)
	Geschlossen (Umgebung)	Energie (Zündquelle)	Zerteilungsgrad (Stoff)		
Beschreibung des Originals					
Beschreibung des Modellexperiments					
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$					
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$					
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$	Geschlossen (Umgebung)			Geschlossen (Umgebung)	
Sonstiges					Wiederholung

Phrasen

Ergebnis Mapping				
Geschlossen (Umgebung)	Zerteilungs- grad (Stoff)	Flamme (Folge)	Druck (Folge)	Explosion (Folge)



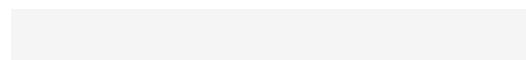
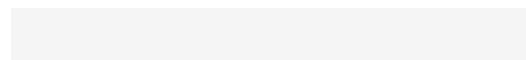
Fortsetzung Phrasen

LC0103\_I\_map.xlsx

Mapping		Ergebnis Mapping	
Beschreibung des Originals		Zündquelle (Beispiel)	Stoff
Beschreibung des Modellexperiments	Zerteilungs- grad (Stoff)	Zerteilungs- grad (Stoff)	
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$		Energie (Zündquelle)	
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$	Ablagerung (Stoff)		
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$	Zerteilungs- grad (Stoff)		Stoff
Sonstiges	Wiederholung		

Phrasen

Geschlossen (Umgebung)	Entzündung	Öffnung (Umgebung)	Explosion (Folge)
---------------------------	------------	-----------------------	----------------------



Fortsetzung Phrasen

## I2 Anhang

---

LE0109\_I\_map.xlsx

Mapping			Ergebnis Mapping	
Beschreibung des Originals	Energie (Zündquelle)	Zerteilungsgrad (Stoff)	Energie (Zündquelle)	Ablagerung (Stoff)
Beschreibung des Modellexperiments	Energie (Zündquelle)	Zerteilungsgrad (Stoff)		
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$		Stoff		
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$			Entzündung	
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$				
Sonstiges				

Phrasen

LT2604\_I\_map.xlsx

Mapping						Ergebnis Mapping	
Beschreibung des Originals	Brennbarkeit (Stoff)	Stoff	Zündquelle-Stoff-Interaktion	Stoff-Luft-Gemisch	Explosion (Folge)	Farbe (Stoff)	Entzündung Energ. (Zündquelle)
Beschreibung des Modellexperiments							
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$							
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$						Stoff-Luft-Gemisch	
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$							
Sonstiges							

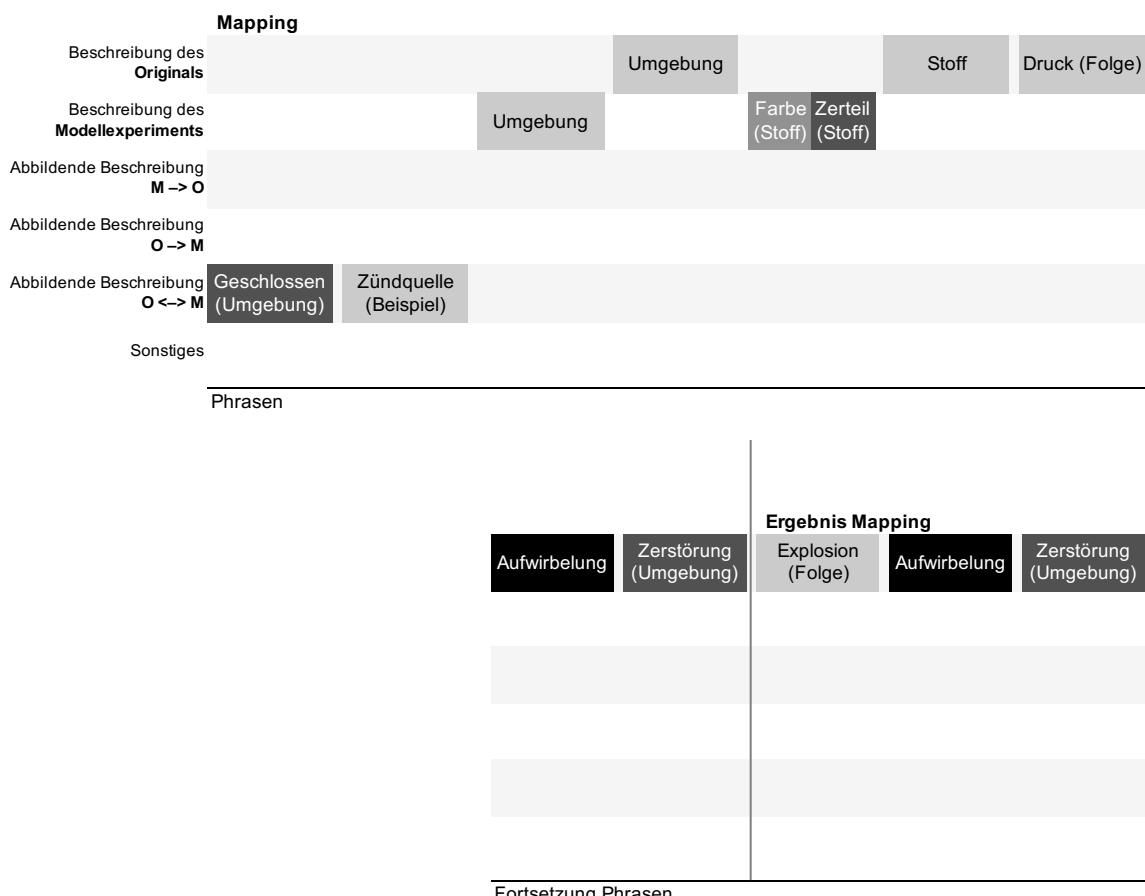
Phrasen

Ergebnis Mapping			
Expl- losion	Energ. (Zünd- quelle)	Stoff	Expl- losion Energ. (Zünd- quelle)
Stoff-Luft- Gemisch			

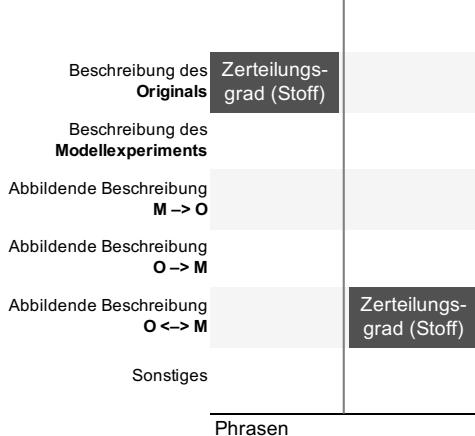
Fortsetzung Phrasen

## 12.16 Analogie-Denkgraphen Mapping

MP0201\_I\_map.xlsx



MU2912\_I\_map.xlsx



## I2 Anhang

---

NA0109\_I\_map.xlsx

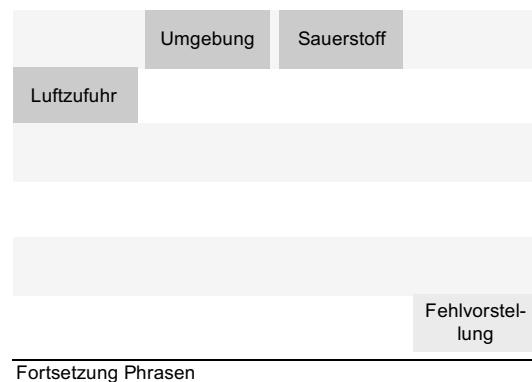
Mapping			Ergebnis Mapping	
Beschreibung des Originals			Geschlossen (Umgebung)	
Beschreibung des Modellexperiments			Farbe Zerteil (Stoff) (Stoff)	
Abbildende Beschreibung M → O			Stoff	
Abbildende Beschreibung O → M			Umgebung	
Abbildende Beschreibung O <→ M			Zündquelle (Beispiel)	
Sonstiges				
Phrasen				

NA0506\_I\_map.xlsx

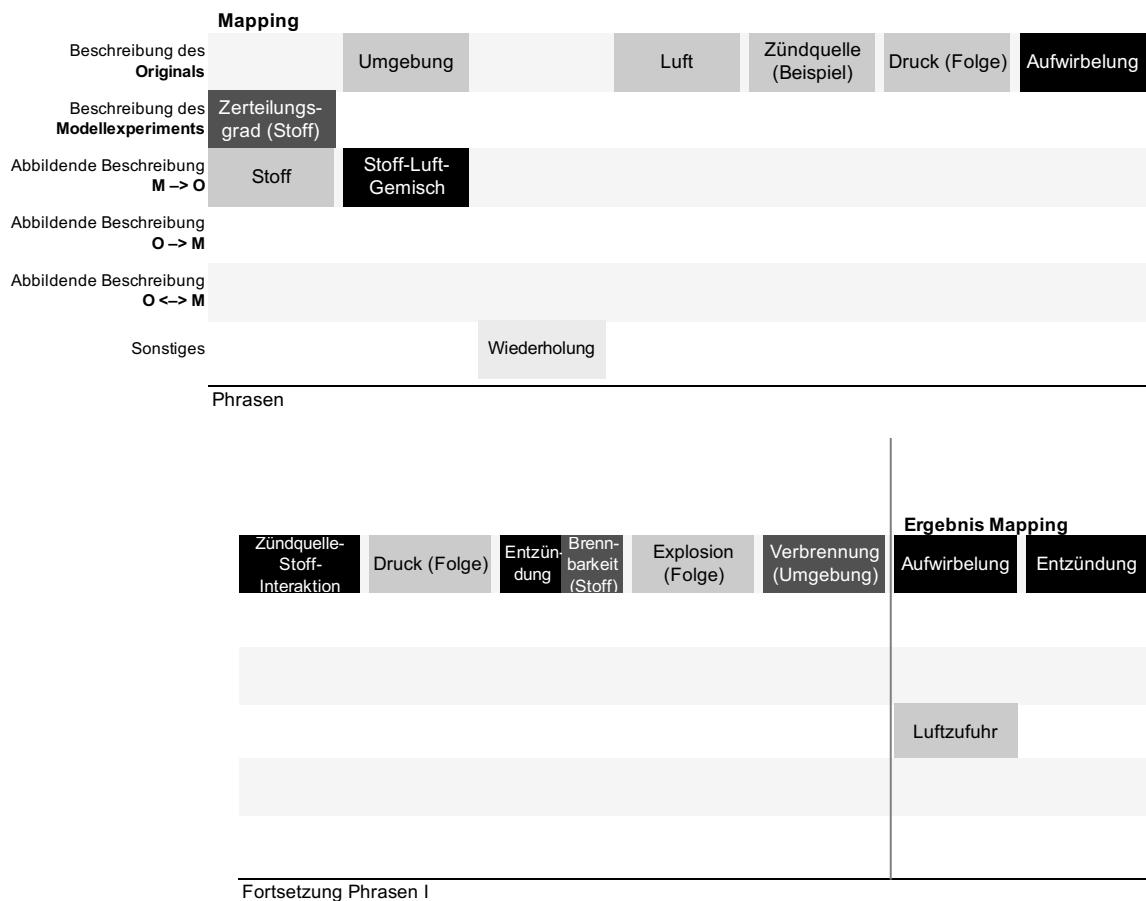
Mapping			Ergebnis Mapping		
Beschreibung des Originals	Stoff		Stoff	Stoff	Energie (Zündquelle)
Beschreibung des Modellexperiments		Aufwirbelung			
Abbildende Beschreibung M → O					
Abbildende Beschreibung O → M					
Abbildende Beschreibung O <→ M					
Sonstiges	Metakognitive Operation	Fehlvorstellung			
Phrasen					

SI0305\_I\_map.xlsx

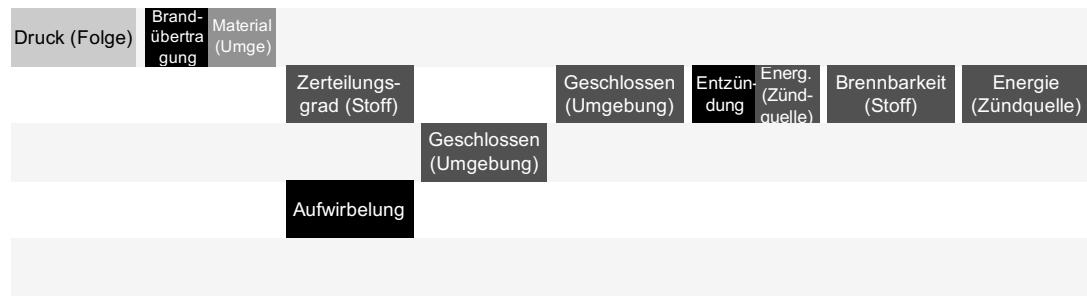
Mapping			Ergebnis Mapping	
Beschreibung des Originals	Stoff	Zündquelle (Beispiel)	Druck (Folge)	
Beschreibung des Modellexperiments	Druck (Folge)			
Abbildende Beschreibung M → O				
Abbildende Beschreibung O → M				
Abbildende Beschreibung O <→ M			Druck (Folge)	
Sonstiges	Wiederholung		Fehlvorstellung	
Phrasen				



SO2411\_I\_map.xlsx



I2 Anhang

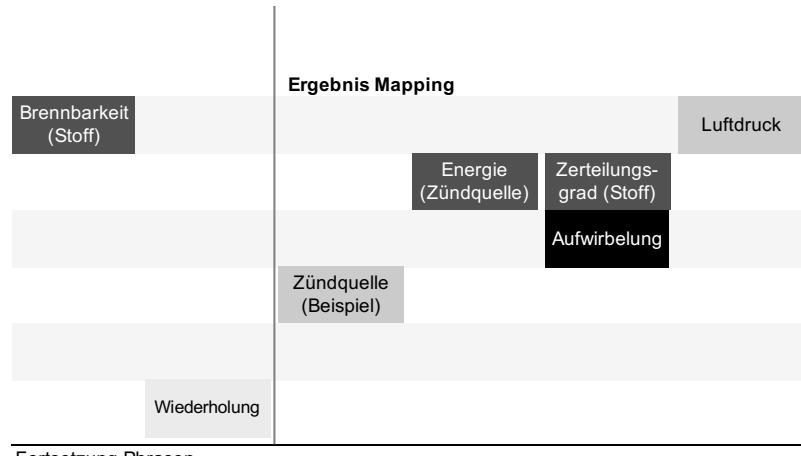
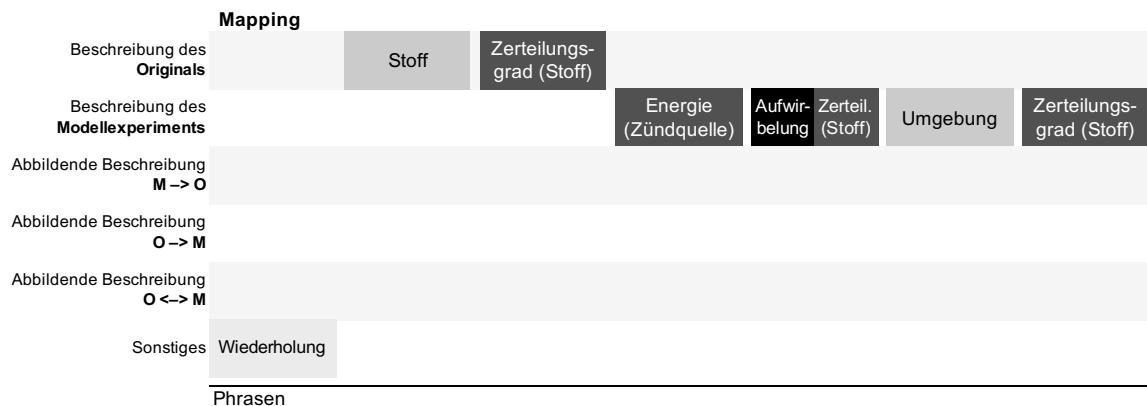


---

## Fortsetzung Phrasen II

Fortsetzung  
Phrasen III

SÜ0311\_I\_map.xlsx



TA1108\_I\_map.xlsx

Mapping	Ergebnis Mapping			
	Umgebung	Explosion (Folge)	Aufwirbelung	Zerteil. (Stoff)
Beschreibung des Originals				
Beschreibung des Modellexperiments				
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$	Aufwirbelung Brennbarkeit Zerteil.			
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$				
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$				
Sonstiges				
Phrasen				

TI1412\_I\_map.xlsx

Mapping	Ergebnis Mapping				Umgebung	Brennbarkeit (Stoff)	Entzündung	Entzündung
	Aufwirbelung	Umgebung	Zündquelle (Beispiel)	Umgebung				
Beschreibung des Originals								
Beschreibung des Modellexperiments								
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$								
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$								
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$	Brennbarkeit (Stoff)							
Sonstiges								
Phrasen								

VE0201\_I\_map.xlsx

Mapping	Ergebnis Mapping			
	Farbe	Zerteil. (Stoff)	Zündquelle (Beispiel)	
Beschreibung des Originals				
Beschreibung des Modellexperiments				
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$	Stoff			
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$				
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$		Explosion (Folge)	Aufwirbelung	Explosion
Sonstiges			Wiederholung	
Phrasen				

## Schülerexperiment-Gruppe

AC3005\_I\_map.xlsx

	Mapping	Ergebnis Mapping		
Beschreibung des Originals				
Beschreibung des Modellexperiments				
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$				
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$	Aufwirbelung $O \leftrightarrow M$	Zerteilung (Stoff)	Explosion	Aufwirbelung Zerteil. Explosion Energ (Zündquelle)
Sonstiges	Frage			
	Phrasen			

AE1401\_I\_map.xlsx

	Mapping	Ergebnis Mapping		
Beschreibung des Originals	Entzündung	Zerteilung (Stoff)	Umgebung	Zerteilungsgrad (Stoff)
Beschreibung des Modellexperiments				Zerteilungsgrad (Stoff)
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$	Energie (Zündquelle)			
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$	Zündquelle (Beispiel)		Energ (Zündquelle)	Entzündung
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$				
Sonstiges				
	Phrasen			

AI2309\_I\_map.xlsx

	Mapping	Ergebnis Mapping	
Beschreibung des Originals		Energie (Zündquelle)	Stoff
Beschreibung des Modellexperiments	Sauerstoff		
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$			
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$			
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$	Zerteilungsgrad (Stoff)		
Sonstiges			
	Phrasen		
			Wiederholung

AO0805\_I\_map.xlsx

	Mapping	Ergebnis Mapping
Beschreibung des Originals		Zündquelle (Beispiel)
Beschreibung des Modellexperiments		
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$	Stoff	
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$		
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$		
Sonstiges		
	Phrasen	

AO2507\_I\_map.xlsx

	Mapping			
Beschreibung des Originals	Stoff			Stoff
Beschreibung des Modellexperiments		Farbe Zerteil. (Stoff) (Stoff)	Farbe Zerteil. (Stoff) (Stoff)	Zerteilungsgrad (Stoff)
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$				
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$		Stoff	Stoff	
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$				Druck (Folge)
Sonstiges		Wiederholung		Wiederholung
	Phrasen			
		Ergebnis Mapping		
		Explosion (Folge)	Druck (Folge)	Stoff
				Zerteilungsgrad (Stoff)
Akustik (Folge)			Druck (Folge)	Brennbarkeit (Stoff)
Frage				Explosion (Folge)
Fortsetzung Phrasen				

## I2 Anhang

---

AR1712\_I\_map.xlsx

	<b>Mapping</b>	<b>Ergebnis Mapping</b>				
Beschreibung des Originals		Umgebung	Explosion (Folge)	Zündquelle (Beispiel)	Entzündung	Explosion (Folge)
Beschreibung des Modellexperiments						Umgebung
Abbildende Beschreibung M → O						
Abbildende Beschreibung O → M						
Abbildende Beschreibung O <→ M						
Sonstiges	Wiederholung					
Phrasen						

CA2602\_I\_map.xlsx

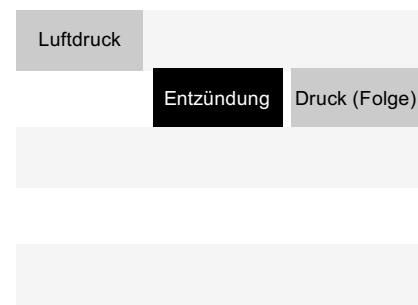
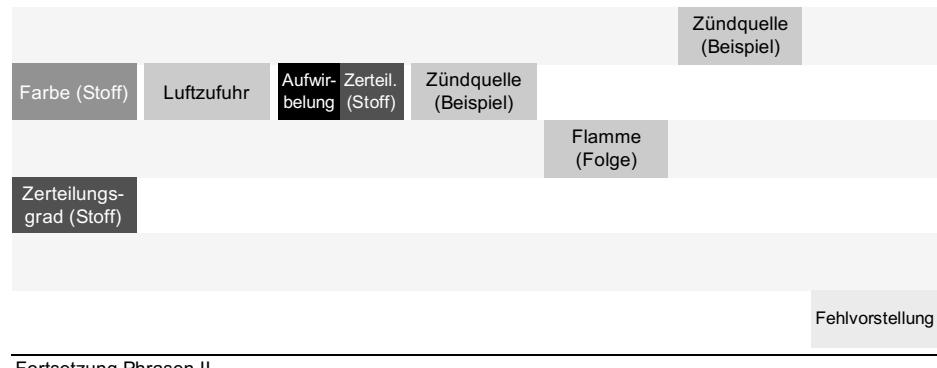
	<b>Mapping</b>	<b>Ergebnis Mapping</b>		
Beschreibung des Originals	Zündquelle (Beispiel)	Druck (Folge)	Umgebung	Zündquelle (Beispiel)
Beschreibung des Modellexperiments				Explosion (Folge)
Abbildende Beschreibung M → O				
Abbildende Beschreibung O → M				
Abbildende Beschreibung O <→ M				
Sonstiges		Fehlvorstellung	Fehlvorstellung	
Phrasen				

	Stoff	Zerteilungsgrad (Stoff)	Zerteilungsgrad (Stoff)	Brennbarkeit (Stoff)	Explosion (Folge)	Entzündbarkeit (Stoff)



Wiederholung

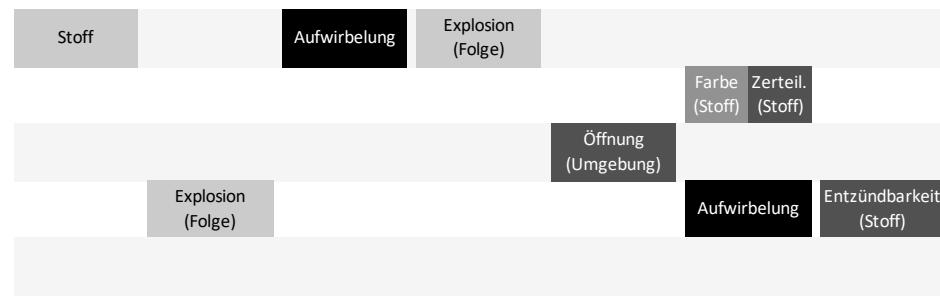
Fortsetzung Phrasen I



CS0406\_I\_map.xlsx

Mapping				
Beschreibung des Originals	Zündquelle (Beispiel)			
Beschreibung des Modellexperiments	Aufwirbelung (Stoff)	Zerteil. (Stoff)	Explosion (Folge)	Öffnung (Umgebung)
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$				
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$				
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$				
Sonstiges	Metakognitive Operation	Wiederholung	Wiederholung	
Phrasen				

I2 Anhang



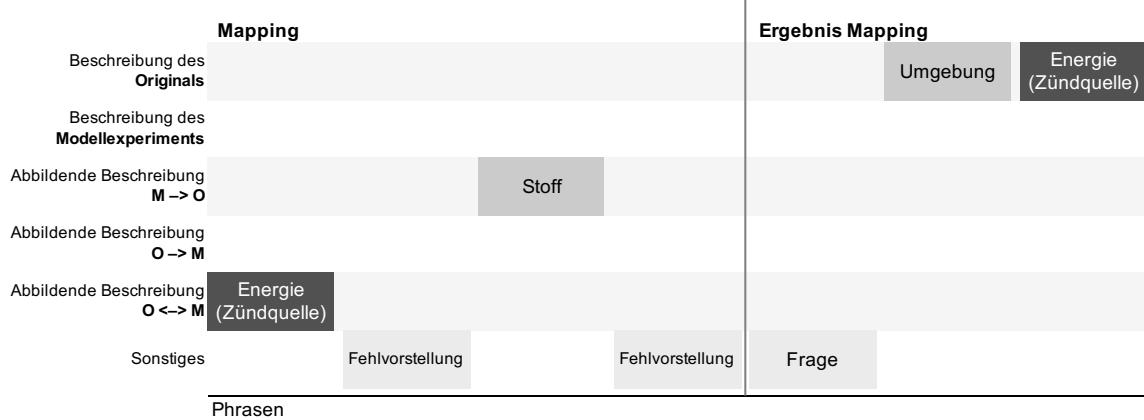
---

Fortsetzung Phrasen I



## Fortsetzung Phrasen II

EE2604\_I\_map.xlsx





EO2707\_I\_map.xlsx

Mapping						
Beschreibung des Originals	Ablagerung (Stoff)	Zündquelle (Beispiel)	Umgebung	Stoff	Zündq- Stoff- Interak	Ablage- rung (Stoff)
Beschreibung des Modellexperiments						
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$						
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$						
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$						
Sonstiges	Wiederholung				Wiederholung	

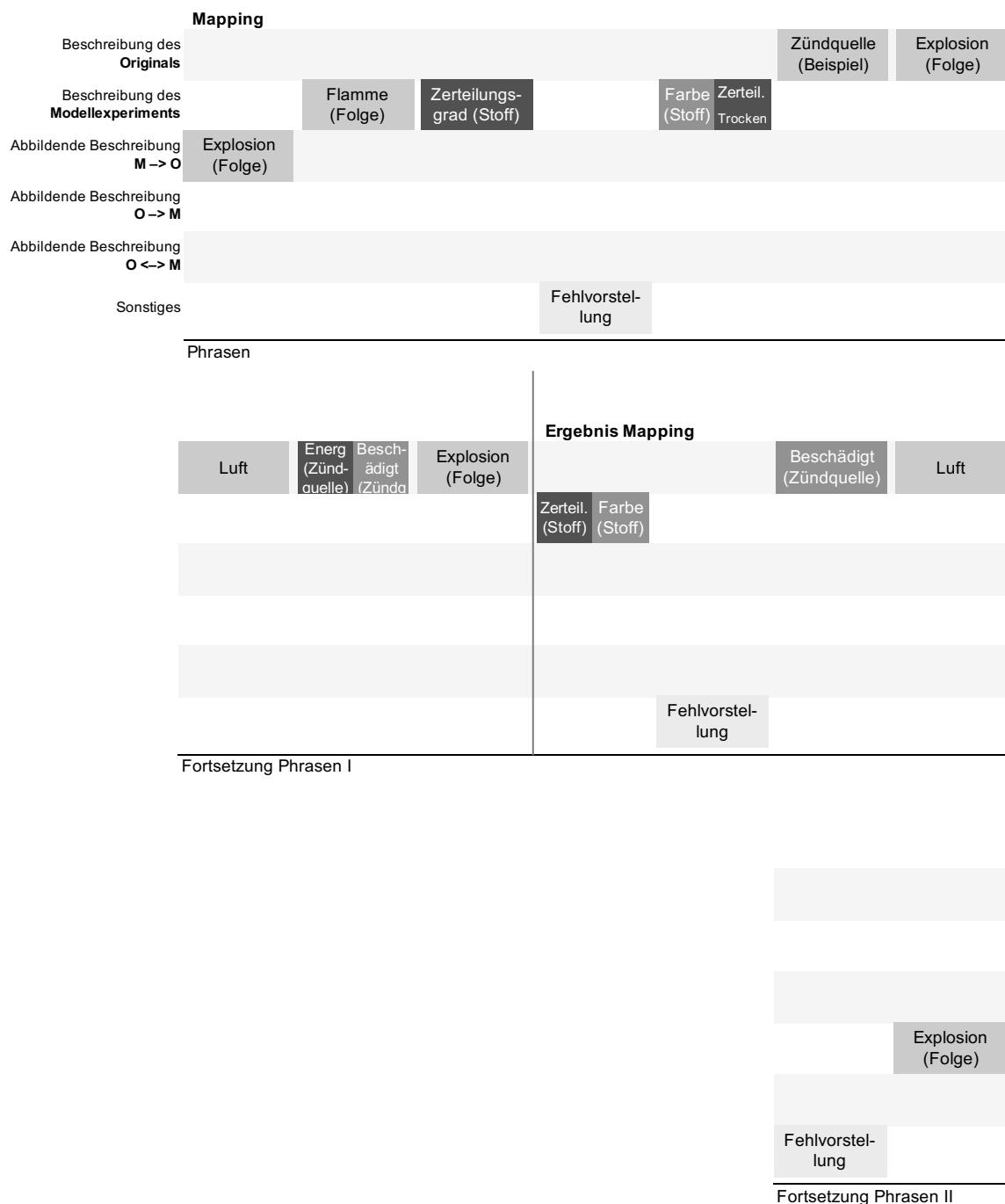
Phrasen

Ergebnis Mapping		
Explosion (Folge)	Brennbarkeit (Stoff)	Explosion (Folge)

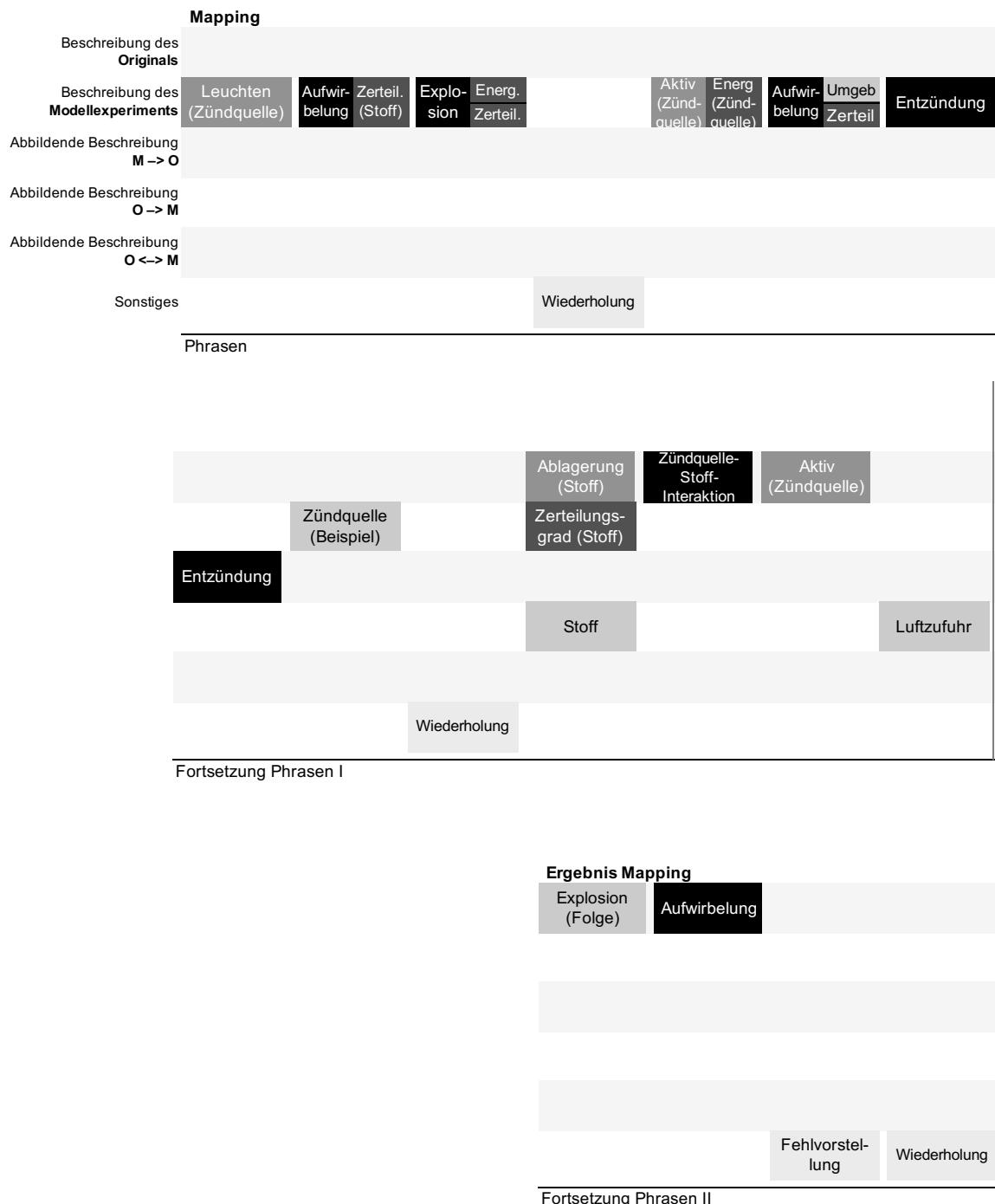
Fortsetzung Phrasen

I2 Anhang

EW2708\_I\_map.xlsx



FI0401\_I\_map.xlsx



## I2 Anhang

---

HI0308\_I\_map.xlsx

Mapping					Ergebnis Mapping
Beschreibung des Originals	Stoff	Energie (Zündquelle)	Entzündbarkeit (Stoff)	Entzündung	Energie (Zündquelle)
Beschreibung des Modellexperiments					
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$			Brennbarkeit (Stoff)		
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$					
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$					
Sonstiges	Wiederholung				
Phrasen					

Entzündbarkeit (Stoff)	Brennbarkeit (Stoff)
------------------------	----------------------

--

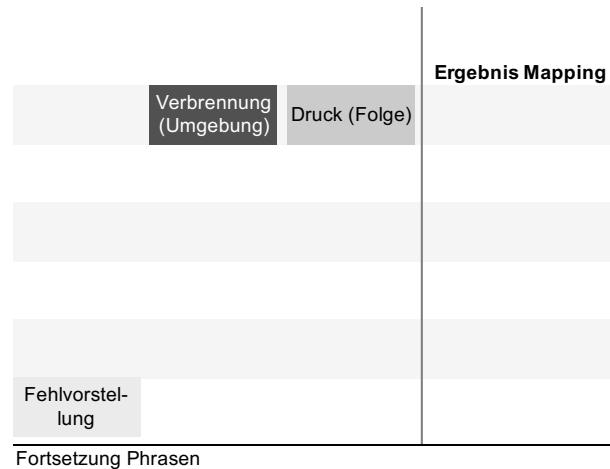
--

Fortsetzung Phrasen

HR0305\_I\_map.xlsx

Mapping						
Beschreibung des Originals	Stoff	Umgebung	Druck (Folge)	Flamme (Folge)	Explosion (Folge)	Explosion (Folge)
Beschreibung des Modellexperiments						
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$						
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$						
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$						
Sonstiges					Frage	
Phrasen						

## 12.16 Analogie-Denkgraphen Mapping



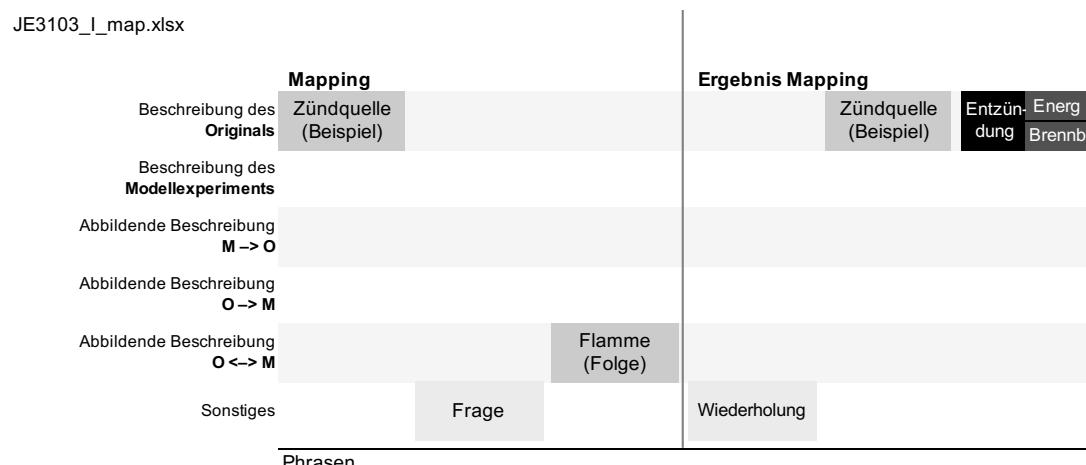
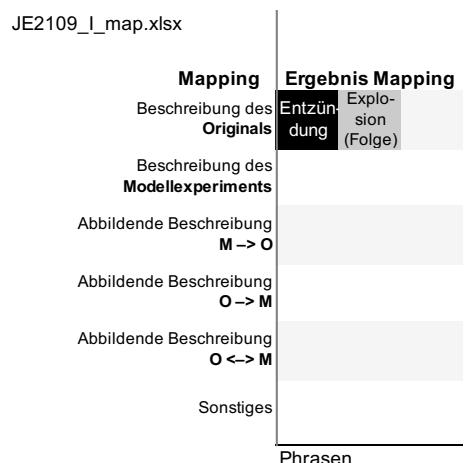
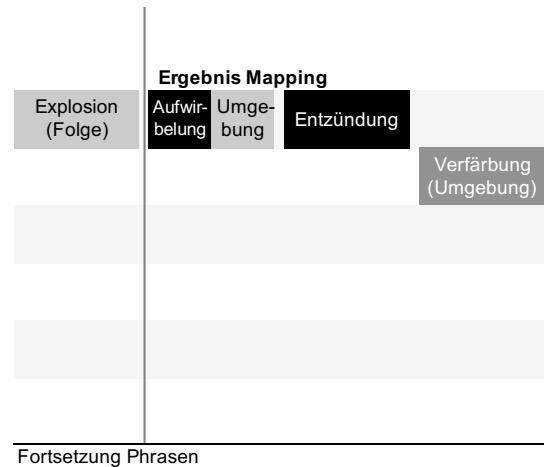
JC1006\_I\_map.xlsx

	Mapping		Ergebnis Mapping	
Beschreibung des Originals			Energie (Zündquelle)	Druck (Folge)
Beschreibung des Modellexperiments	Luftzufuhr	Druck (Folge)		
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$			Explosion (Folge)	
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$				
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$				
Sonstiges			Wiederholung	Wiederholung
	Phrasen			

JE1804\_I\_map.xlsx

	Mapping		Entzündung		Umgebung	
Beschreibung des Originals		Umgebung				
Beschreibung des Modellexperiments	Aufwirbelung	Zerteil. (Stoff)	Farbe	Zerteil. (Stoff) (Stoff)	Farbe	Zerteil. (Stoff)
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$			Stoff			Aufwirbelung
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$					Explosion (Folge)	
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$						
Sonstiges						
	Phrasen					

I2 Anhang



JI0403\_I\_map.xlsx

Mapping					Ergebnis Mapping	
Beschreibung des Originals	Explosion (Folge)		Umgebung	Entzündbarkeit (Stoff)	Umgebung	Stoff
Beschreibung des Modellexperiments		Aufwirbelung Farbe Zerteil	Entzündbarkeit (Stoff)			
Abbildende Beschreibung M → O						
Abbildende Beschreibung O → M						
Abbildende Beschreibung O <→ M						
Sonstiges						
Phrasen						

JI3005\_I\_map.xlsx

Mapping		Ergebnis Mapping				
Beschreibung des Originals		Brennbarkeit (Stoff)	Zündquelle (Beispiel)	Beschädigt (Zündquelle)	Energie (Zündquelle)	Brennbarkeit (Stoff)
Beschreibung des Modellexperiments		Energie (Zündquelle)				
Abbildende Beschreibung M → O		Zündquelle (Beispiel)				
Abbildende Beschreibung O → M						
Abbildende Beschreibung O <→ M						
Sonstiges						
Wiederholung						
Phrasen						

Ergebnis Mapping					
Umgebung	Zündquelle (Beispiel)	Beschädigt (Zündquelle)	Stoff	Brennbarkeit (Stoff)	Energie (Zündquelle)

Fortsetzung Phrasen

## I2 Anhang

---

JR1012\_I\_map.xlsx

Mapping				Ergebnis Mapping	
Beschreibung des Originals	Stoff	Zerteilungsgrad (Stoff)	Brennbarkeit (Stoff)	Aufwirbelung	
Beschreibung des Modellexperiments					
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$				Luftzufuhr	
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$					
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$					
Sonstiges					Fehlvorstellung
Phrasen					

JU1305\_I\_map.xlsx

Mapping				Ergebnis Mapping	
Beschreibung des Originals		Brandübertragung	Umgebung	Explosion (Folge)	Umgebung
Beschreibung des Modellexperiments					
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$					
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$					
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$					
Sonstiges	Wiederholung	Wiederholung	Wiederholung		
Phrasen					

Explosion (Folge)

Fortsetzung Phrasen

## 12.16 Analogie-Denkgraphen Mapping

LD0904\_I\_map.xlsx

Mapping				Ergebnis Mapping	
Beschreibung des Originals					
Beschreibung des Modellexperiments	Energie (Zündquelle)	Aufwirbelung	Explosion	Öffnung (Umgebung)	
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$					
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$					
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$				Entzündung	
Sonstiges					Metakognitive Operation
Phrasen					

LI0409\_I\_map.xlsx

Mapping		Ergebnis Mapping	
Beschreibung des Originals	Entzündung	Energ (Zündquelle)	Zündquelle-Stoff-Interaktion
Beschreibung des Modellexperiments			Flamme (Folge)
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$			
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$			
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$			
Sonstiges		Wiederholung	
Phrasen			

LL2109\_I\_map.xlsx

Mapping				Ergebnis Mapping			
Beschreibung des Originals	Zerstörung (Umgebung)	Zündquelle (Beispiel)	Explosion (Folge)	Verbrennung (Umgebung)	Brennbarkeit (Stoff)	Ablagerung (Stoff)	Flamme (Folge)
Beschreibung des Modellexperiments							Umgebung
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$							
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$							
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$							
Sonstiges							
Phrasen							

## I2 Anhang

---

LM1307\_I\_map.xlsx

Beschreibung des Originals	Entzündung	Energie (Zündquelle)	Entzündung		Umgebung	Energie (Zündquelle)
Beschreibung des Modellexperiments				Aufwirbelung	Flamme (Folge)	
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$						
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$						
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$						
Sonstiges						

Phrasen

Flamme (Folge)

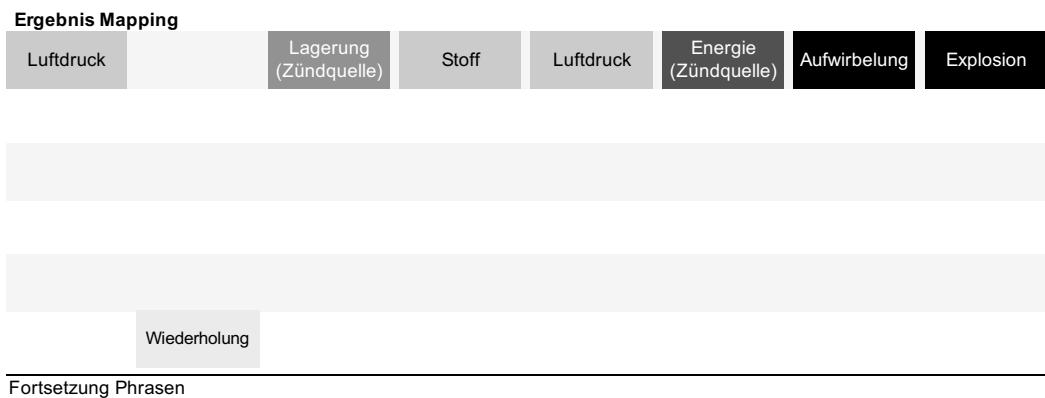
Fortsetzung Phrasen

LO0612\_I\_map.xlsx

### Mapping

Beschreibung des Originals			Energie (Zündquelle)	Ablagerung (Stoff)	Stoff
Beschreibung des Modellexperiments		Zerteilungsgrad (Stoff)		Zerteilungsgrad (Stoff)	
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$	Energie (Zündquelle)	Stoff	Zündquelle (Beispiel)	Stoff	
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$					
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$					
Sonstiges	Frage		Wiederholung		

Phrasen



LO1607\_I\_map.xlsx

Beschreibung des Originals	Brennbarkeit (Stoff)	Zündquelle (Beispiel)	Zündquelle-Stoff-Interaktion	Zündquelle (Beispiel)
Beschreibung des Modellexperiments				
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$		Entzündung		
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$				Explosion (Folge)
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$				
Sonstiges	Wiederholung			

Phrasen

LÖ2810\_I\_map.xlsx

Mapping	Ergebnis Mapping
Beschreibung des Originals	Energie (Zündquelle)
Beschreibung des Modellexperiments	Zündq- Stoff- Interak Zerteil (Stoff) Entzündung
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$	Entzündung
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$	
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$	
Sonstiges	

Phrasen

## I2 Anhang

---

LR1703\_I\_map.xlsx

Mapping				Ergebnis Mapping
Beschreibung des Originals	Luftzufuhr	Entzündbarkeit (Stoff)	Explosion (Folge)	Ablagerung (Stoff)
Beschreibung des Modellexperiments				
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$		Zerteilungsgrad (Stoff)		
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$			Entzündung	
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$				
Sonstiges				Wiederholung
Phrasen				

Stoff-Luft-Gemisch	Ablagerung (Stoff)	Expl- Zerteil	grad (Stoff)
		Zündquelle (Beispiel)	Stoff

Fortsetzung Phrasen

---

LT2205\_I\_map.xlsx

Mapping				Ergebnis Mapping
Beschreibung des Originals	Umgebung	Stoff	Beschädigt (Zündquelle)	Umgebung
Beschreibung des Modellexperiments				
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$			Flamme (Folge)	Luftzufuhr
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$				Leitfähigkeit (Zündquelle)
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$				
Sonstiges				
Phrasen				

## 12.16 Analogie-Denkgraphen Mapping

MA1602\_I\_map.xlsx

	Mapping				Ergebnis Mapping	
Beschreibung des Originals		Stoff	Umgebung	Luftzufuhr	Zündquelle (Beispiel)	Umgebung
Beschreibung des Modellexperiments						Zündquelle-Stoff-Interaktion
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$						
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$	Zündquelle (Beispiel)					
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$						
Sonstiges						

Phrasen

Entzündung

Fortsetzung Phrasen

MA1603\_I\_map.xlsx

	Mapping			Ergebnis Mapping	
Beschreibung des Originals		Energie (Zündquelle)		Zündquelle (Beispiel)	
Beschreibung des Modellexperiments					
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$					
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$					
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$					
Sonstiges	Frage		Metakognitive Operation		

Phrasen

## I2 Anhang

---

ME0510\_I\_map.xlsx

Beschreibung des Originals	Mapping				Ergebnis Mapping	
	Zündquelle (Beispiel)	Energie (Zündquelle)	Zündquelle (Beispiel)	Energie (Zündquelle)	Zündquelle (Beispiel)	
Beschreibung des Modellexperiments						
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$						
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$						
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$						
Sonstiges					Wiederholung	Wiederholung

Phrasen

Zündquelle (Beispiel)	Energie (Zündquelle)
-----------------------	----------------------

--

--

Fortsetzung Phrasen

MI0202\_I\_map.xlsx

Beschreibung des Originals	Mapping		Ergebnis Mapping		
	Zündquelle-Stoff-Interaktion	Explosion (Folge)	Aufwirbelung	Explosion	Zündquelle-Stoff-Interaktion
Beschreibung des Modellexperiments					
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$					
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$					
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$					
Sonstiges					Wiederholung

Phrasen

Ablagerung (Stoff)	Zündquelle- Stoff- Interaktion	Brennbarkeit (Stoff)	Explosion
-----------------------	--------------------------------------	-------------------------	-----------

---

Fortsetzung Phrasen

MI0502\_I\_map.xlsx

Mapping		Ergebnis Mapping	
Beschreibung des Originals		Umgebung	Ablagerung (Stoff)
Beschreibung des Modellexperiments			
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$			
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$	Explosion (Folge)	Zündquelle (Beispiel)	Energie (Zündquelle)
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$			
Sonstiges	Wiederholung	Wiederholung	
Phrasen			

Zündquelle- Stoff-Luft- Interaktion	Explosion
-------------------------------------------	-----------

---

Fortsetzung Phrasen

## I2 Anhang

---

MÖ0106\_I\_map.xlsx

Beschreibung des Originals	Mapping				Ergebnis Mapping		
	Zündq- Stoff- Interak- tionsquelle)	Energ	Entzündung	Material (Umgebung)	Brandüber- tragung (Umgebung)	Druck (Folge)	Umgebung
Beschreibung des Modellexperiments							
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$							
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$							
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$							
Sonstiges					Metakognitive Operation		
Phrasen							

Energie (Zündquelle)	Flamme (Folge)	Zündquelle- Stoff- Interaktion
Zerteilungs- grad (Stoff)		
Stoff		
		Explosion (Folge)

Fortsetzung Phrasen

---

MS0107\_I\_map.xlsx

Beschreibung des Originals	Mapping		Ergebnis Mapping	
	Explosion (Folge)		Entzündbar- keit (Stoff)	Explosion (Folge)
Beschreibung des Modellexperiments				
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$				
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$				
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$				
Sonstiges		Frage		
Phrasen				

## 12.16 Analogie-Denkgraphen Mapping

MS2409\_I\_map.xlsx

Mapping		Ergebnis Mapping		
Beschreibung des Originals	Zündquelle-Stoff-Interaktion	Ablagerung (Stoff)	Lagerung (Zündquelle)	
Beschreibung des Modellexperiments	Farbe (Stoff) Zerteil (Stoff)			
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$				
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$	Ablagerung (Stoff)	Stoff	Aufwirbelung	Explosion
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$				
Sonstiges				
Phrasen				

## Luftzufuhr

## Explosion (Folge)

---

## Fortsetzung Phrasen

MÜ2907\_I\_map.xlsx

Explosions-fähigkeit (Stoff)	Explosion
---------------------------------	-----------

---

Fortsetzung Phrasen

NA1001\_I\_map.xlsx

Beschreibung des Originals	Mapping	Ergebnis Mapping			
	Energie (Zündquelle)	Zündquelle (Beispiel)	Explosion (Folge)	Umgebung	Beschädigt (Zündquelle)
Beschreibung des Modellexperiments					
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$					
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$					
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$					
Sonstiges	Wiederholung	Wiederholung			

Phrasen

---

Stoff	Explosion (Folge)
-------	-------------------

---

Fortsetzung Phrasen

## 12.16 Analogie-Denkgraphen Mapping

NC1704\_I\_map.xlsx

	Mapping			Ergebnis Mapping		
Beschreibung des Originals	Explosion (Folge)	Aufwirbelung	Explosion		Aufwirbelung	Energie (Zündquelle)
Beschreibung des Modellexperiments						
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$						
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$				Luftzufuhr		
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$						
Sonstiges						

Phrasen

NC1807\_I\_map.xlsx

	Mapping					Ergebnis Mapping	
Beschreibung des Originals	Umgebung	Aufwirbelung	Ablagerung (Stoff)	Zündquelle-Stoff-Interaktion	Explosion	Stoff	Zündq- Stoff- Interak.
Beschreibung des Modellexperiments						Zerteilungsgrad (Stoff)	Zerteil- Ablag.
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$							
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$							
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$							
Sonstiges							

Phrasen

Entzündung

Fortsetzung Phrasen

## I2 Anhang

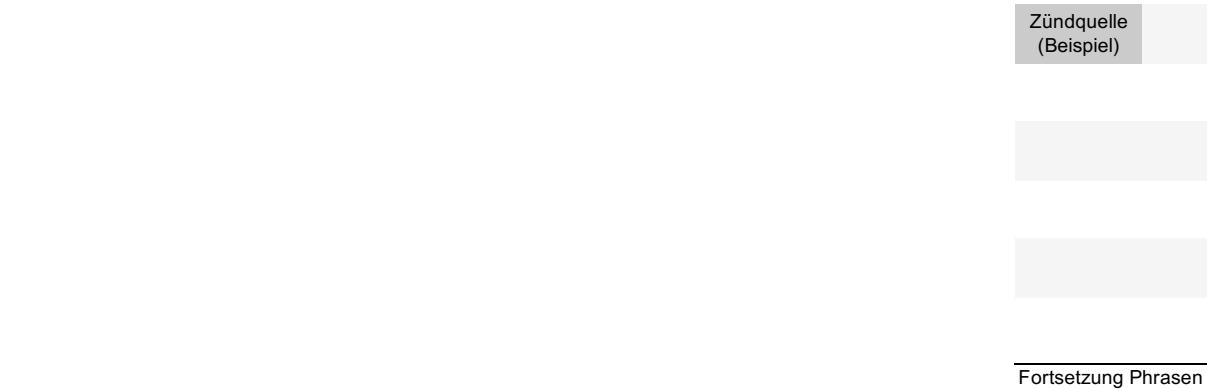
---

NE2203\_I\_map.xlsx

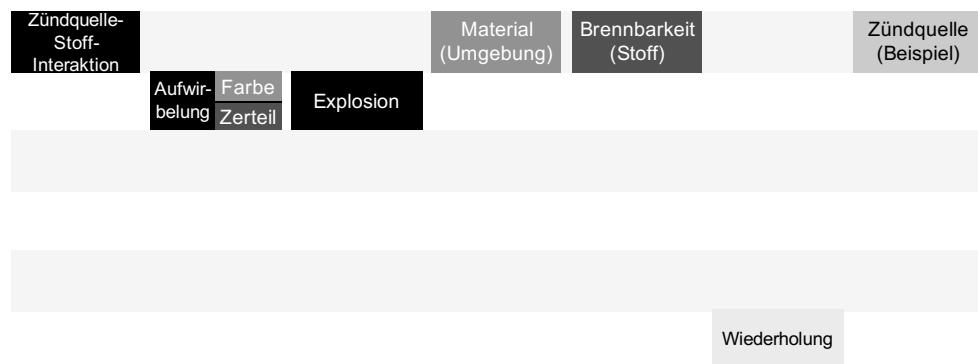
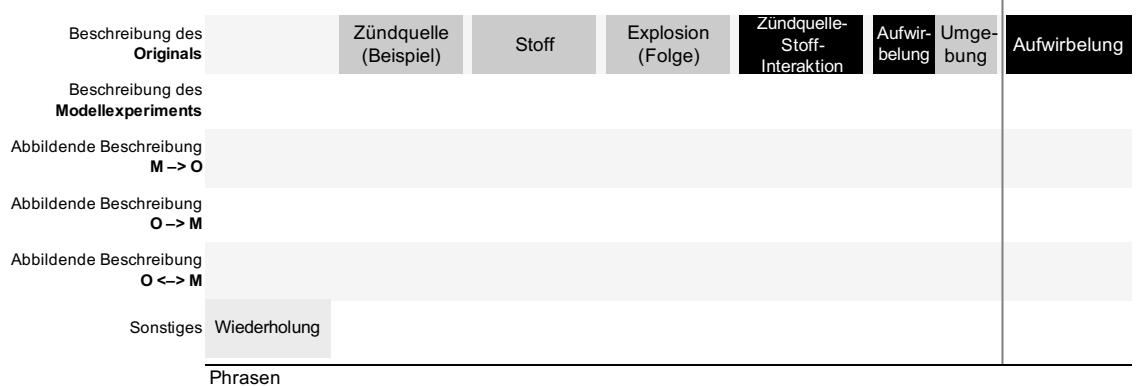
Mapping				
Beschreibung des Originals	Beschreibung des Modellexperiments	Zündquelle-Stoff-Interaktion	Entzündung	
Abbildende Beschreibung M → O		Zündquelle (Beispiel)		
Abbildende Beschreibung O → M				
Abbildende Beschreibung O <→ M				
Sonstiges	Wiederholung	Wiederholung	Wiederholung	
Phrasen				
		Ergebnis Mapping		
		Beschädigt (Zündquelle)	Brennbarkeit (Stoff)	Zündquelle-Stoff-Interaktion
				Explosion (Folge)
Fehlvorstellung		Wiederholung		
Fortsetzung Phrasen				

PA1006\_I\_map.xlsx

Mapping		Ergebnis Mapping			
Beschreibung des Originals	Beschreibung des Modellexperiments	Zündquelle-Stoff-Interaktion	Explosion (Folge)	Aufwirbelung	Zündquelle (Bsp)
	Farbe Zerteil (Stoff) (Stoff)	Luftzufuhr			
Abbildende Beschreibung M → O					
Abbildende Beschreibung O → M	Entzündung				
Abbildende Beschreibung O <→ M					
Sonstiges					
Phrasen					



PO0707\_I\_map.xlsx



---

Fortsetzung Phrasen I

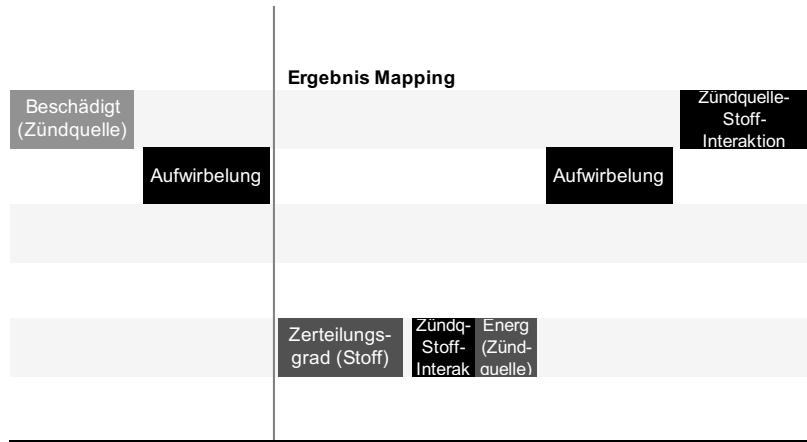
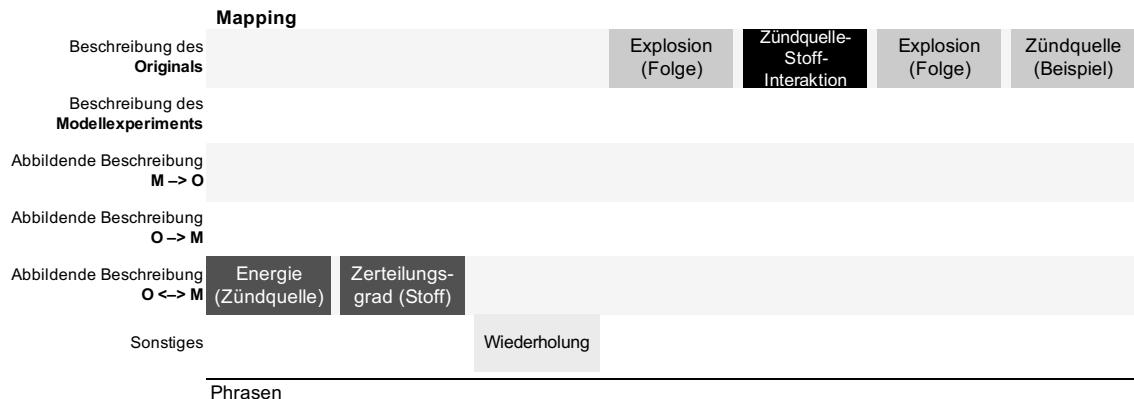
Explosion (Folge)	Entzündbar- keit (Stoff)	Aufwirbelung	Verbrennung (Umgebung)
----------------------	-----------------------------	--------------	---------------------------

---

Fortsetzung Phrasen II

---

PO1404\_I\_map.xlsx



SÖ0503\_I\_map.xlsx

Mapping							Ergebnis Mapping	
Beschreibung des Originals	Brennbarkeit (Stoff)	Zündquelle (Beispiel)		Zündquelle (Beispiel)	Umgebung	Explosion (Folge)	Druck (Folge)	
Beschreibung des Modellexperiments								
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$								
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$								
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$								
Sonstiges			Fehlvorstellung					
Phrasen								
Zündquelle (Beispiel)	Explosion (Folge)		Zündquelle (Beispiel)		Druck (Folge)			
		Flamme (Folge)						
			Druck (Folge)					
					Wiederholung	Wiederholung		
Fortsetzung Phrasen I								

TI0201\_I\_map.xlsx

Mapping					Ergebnis Mapping			
Beschreibung des Originals			Energie (Zündquelle)	Entzündung	Umgebung			
Beschreibung des Modellexperiments	Zündquelle-Stoff-Interaktion	Explosion (Folge)	Zerteilungsgrad (Stoff)					
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$			Stoff			Stoff		
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$								
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$								
Sonstiges								
Phrasen								

Energie  
(Zündquelle)

Zündquelle  
(Beispiel)

Entzündung

Fortsetzung Phrasen

TU0301\_I\_map.xlsx

Mapping		Ergebnis Mapping			
Beschreibung des Originals	Akustik (Folge)	Druck (Folge)	Umgebung	Umgebung	Explosion
Beschreibung des Modellexperiments					
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$	Zerteilungsgrad (Stoff)				
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$					
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$					
Sonstiges	Frage				
Phrasen					

TV0904\_I\_map.xlsx

Mapping		Ergebnis Mapping						
Beschreibung des Originals	Umgebung	Zünd-Stoff-Interak	Trock-Enheit (Stoff)	Entzündung	Entzündung	Energ (Zündquelle)	Umgebung	Explosion (Folge)
Beschreibung des Modellexperiments	Entzündung Energ							
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$	Entzündung							
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$								
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$								
Sonstiges								
Phrasen								

Umgebung	Zündquelle (Beispiel)	Explosion (Folge)
----------	--------------------------	----------------------

Fortsetzung Phrasen

VE2607\_I\_map.xlsx

Mapping		Ergebnis Mapping	
Beschreibung des Originals		Zündquelle (Beispiel)	
Beschreibung des Modellexperiments		Brand- erhalt.	Energ. (Zünd- (Luft) quelle)
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$	Explosion (Folge)		
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$			
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$			
Sonstiges	Wiederholung		Wiederholung
Phrasen			

YA1304\_I\_map.xlsx

Mapping		Umgebung	Zündquelle (Beispiel)	Flamme (Folge)
Beschreibung des Originals				
Beschreibung des Modellexperiments	Aufwir- belung (Stoff)	Zerteil- ung (Stoff)	Zündquelle (Beispiel)	Flamme (Folge)
Abbildende Beschreibung $M \rightarrow O$				
Abbildende Beschreibung $O \rightarrow M$				
Abbildende Beschreibung $O \leftrightarrow M$		Flamme (Folge)		
Sonstiges				
Phrasen				

**Ergebnis Mapping**

Luft	Explosion (Folge)	Luft	Brennbarkeit (Stoff)
------	----------------------	------	-------------------------



Wiederholung

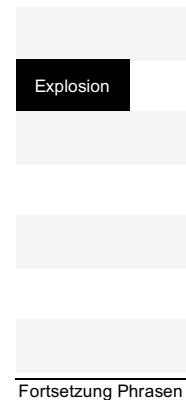
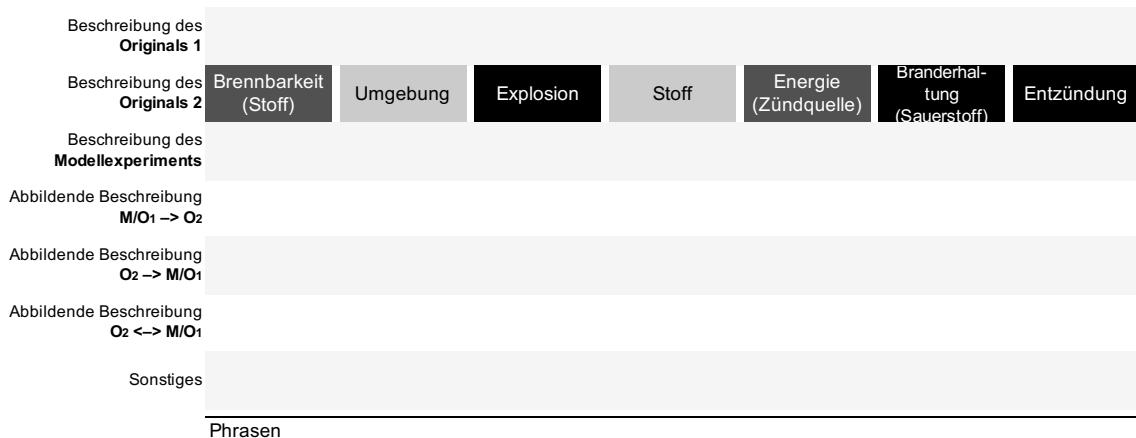
---

Fortsetzung Phrasen

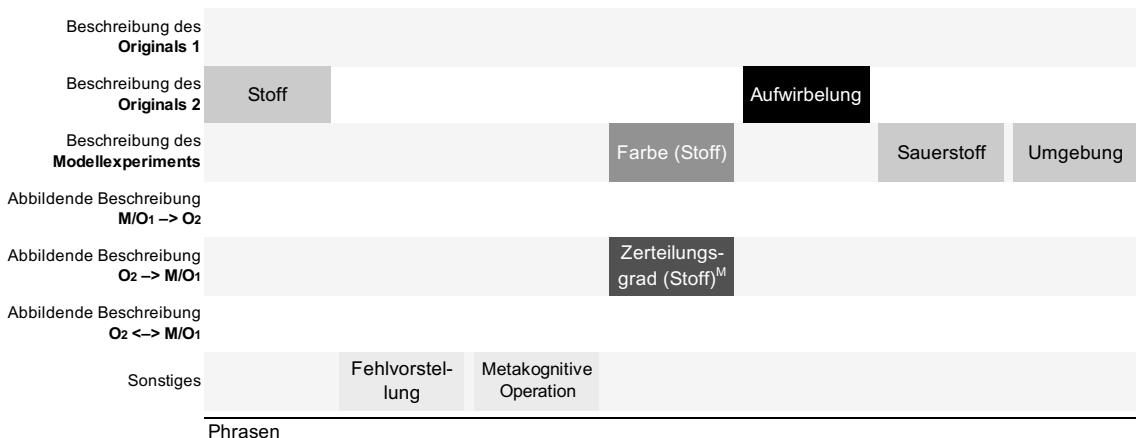
## 12.17 Analogie-Denkgraphen Anwendung

### Video-Gruppe

AI0511\_trans.xlsx



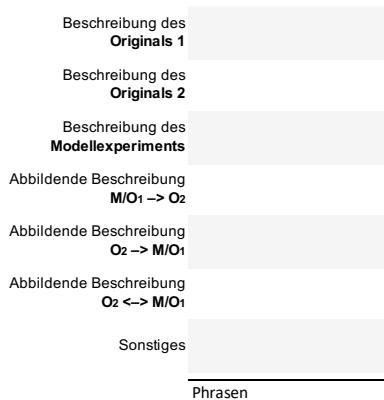
AI2910\_trans.xlsx



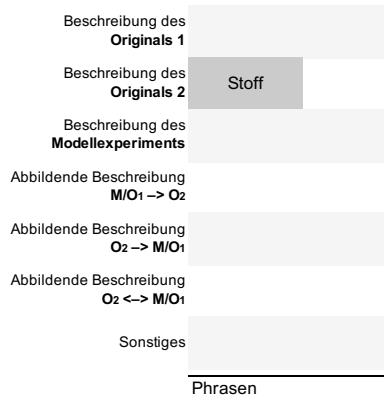
## I2 Anhang

---

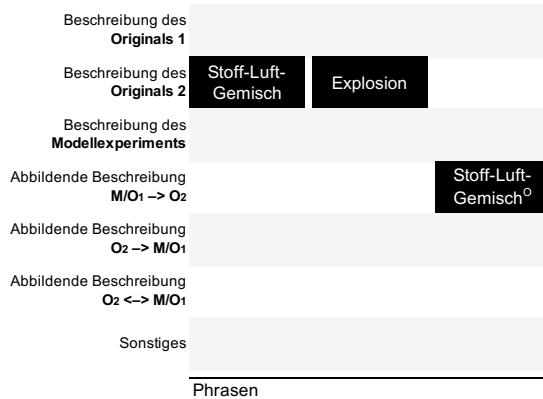
AO0902\_trans.xlsx



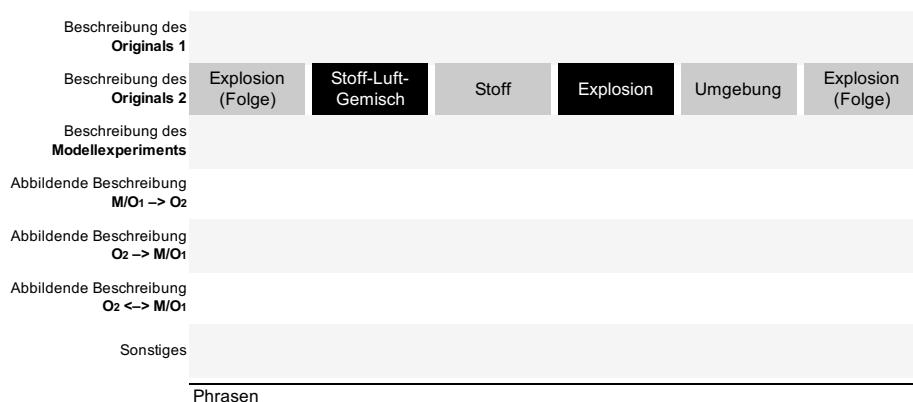
AR0710\_trans.xlsx



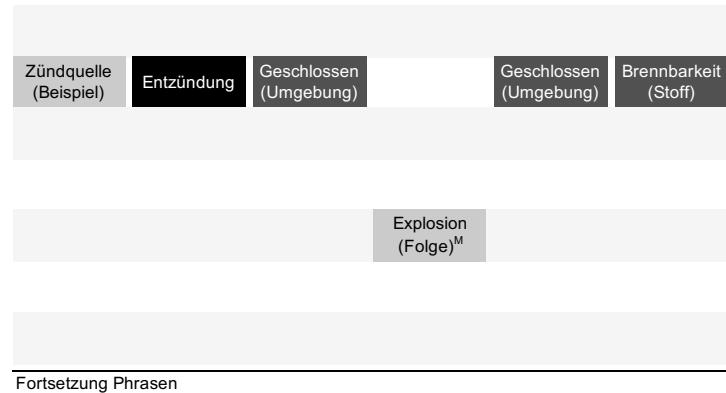
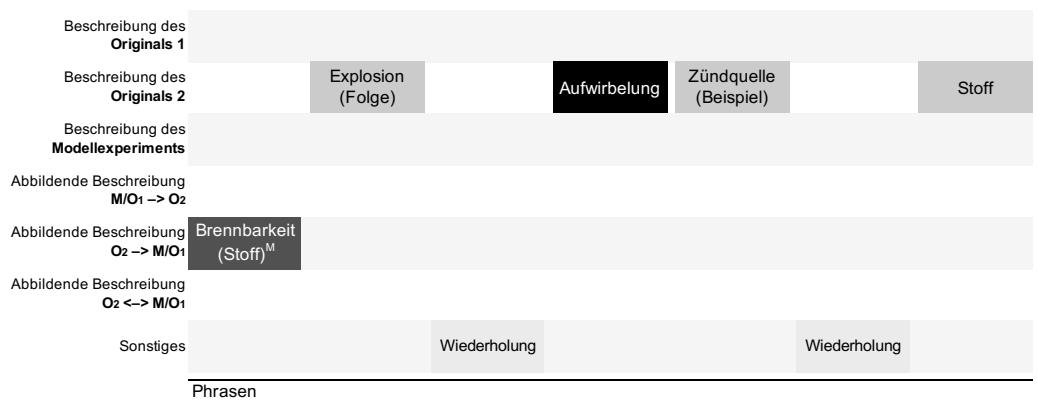
AR1211\_trans.xlsx



BA0811\_trans.xlsx



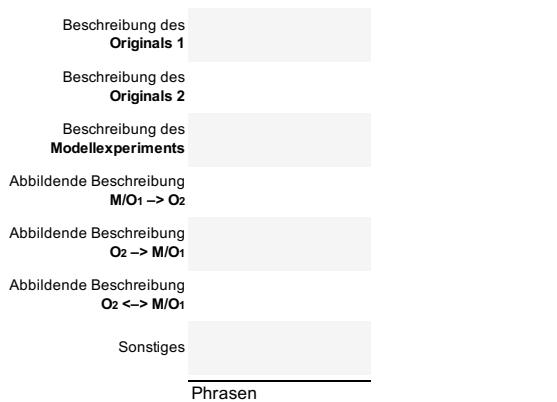
BA2810\_trans.xlsx



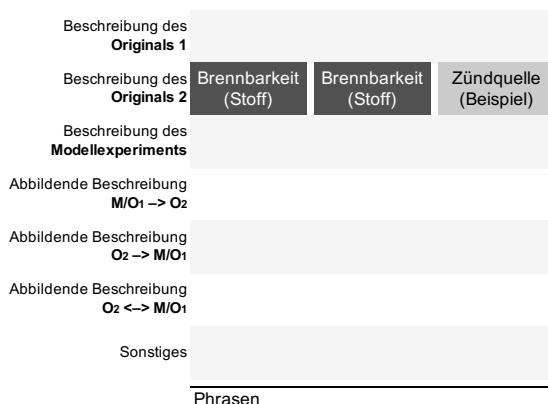
## I2 Anhang

---

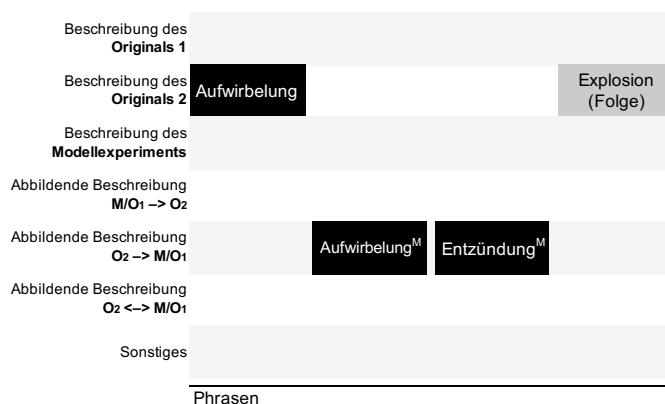
BB0103\_trans.xlsx



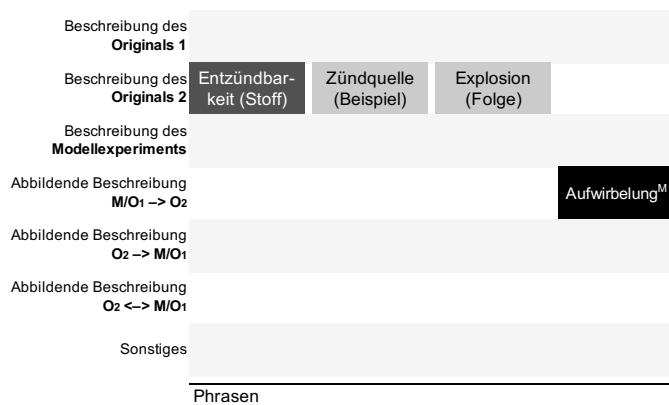
CO1102\_trans.xlsx



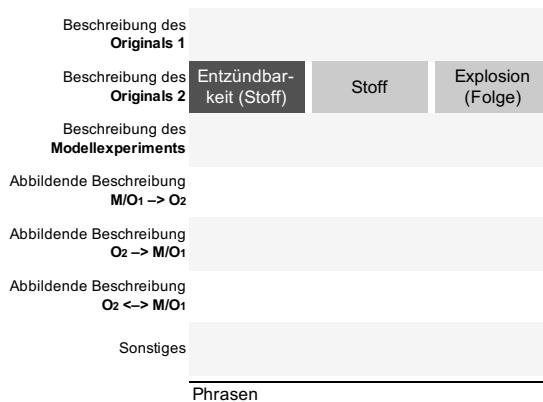
CU2506\_trans.xlsx



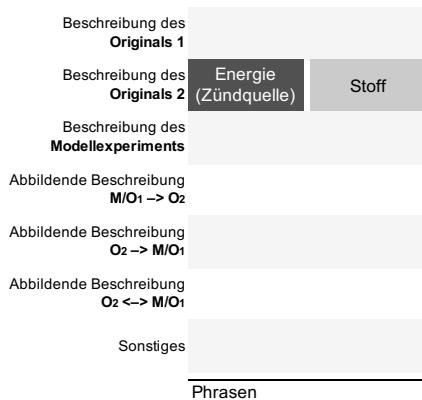
FE0107\_trans.xlsx



FR2004\_trans.xlsx

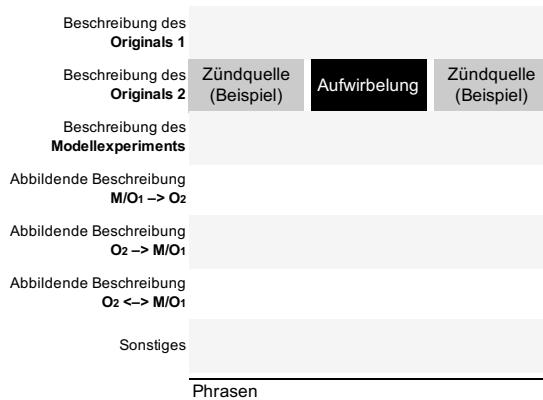


HO0102\_trans.xlsx



## I2 Anhang

IC2504\_trans.xlsx



JA2807\_trans.xlsx

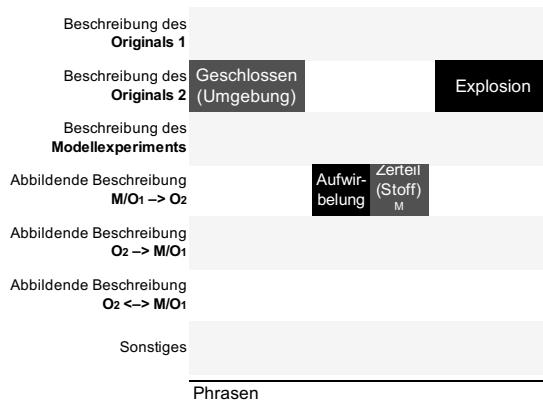


Explosion  
(Folge)

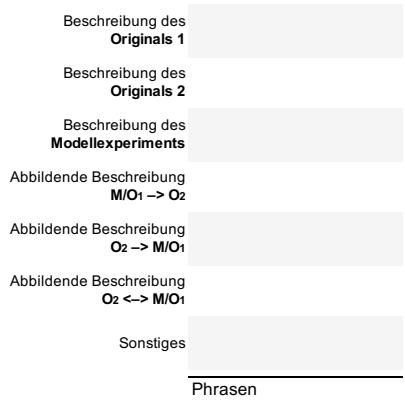
Zündquelle-  
Stoff-  
Interaktion<sup>o</sup>

Fortsetzung Phrasen

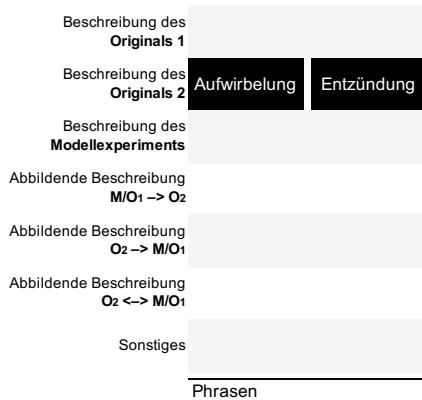
JE1501\_trans.xlsx



JI2404\_trans.xlsx

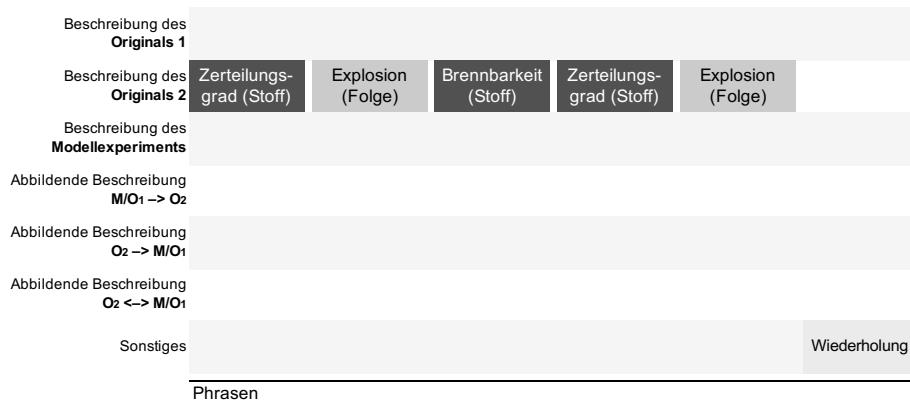


JI2710\_trans.xlsx

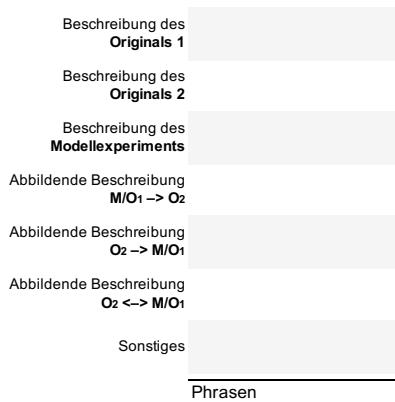


I2 Anhang

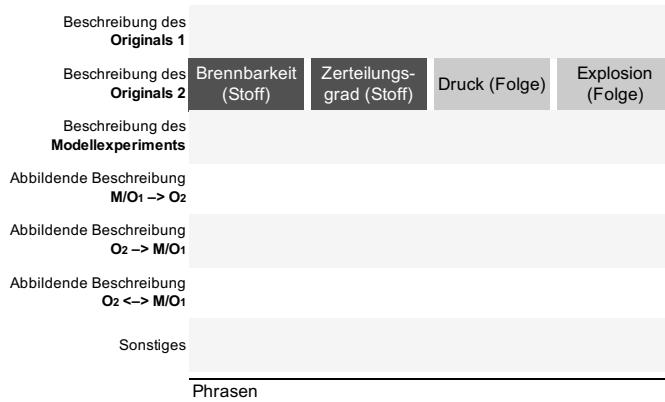
JR3003\_trans.xlsx



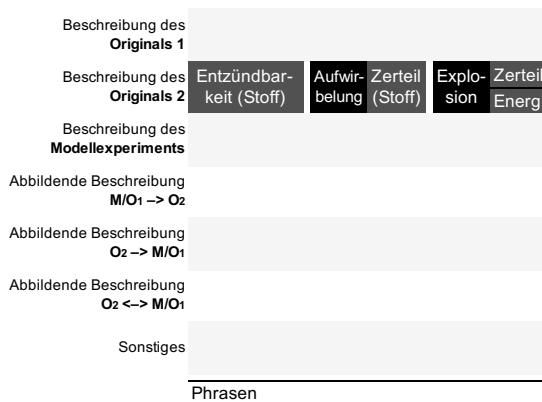
KA1602\_trans.xlsx



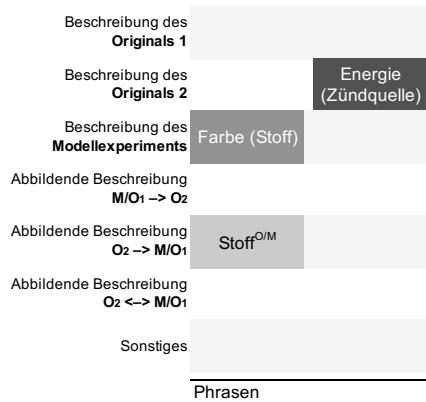
KD2703\_trans.xlsx



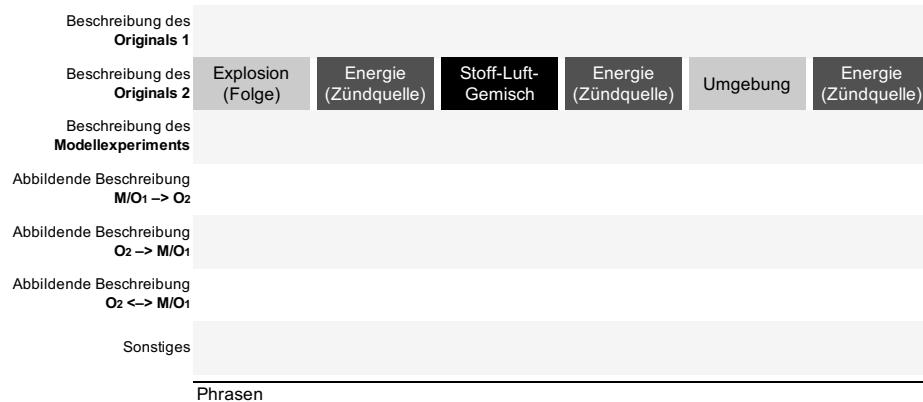
LC0103\_trans.xlsx



LE0109\_trans.xlsx



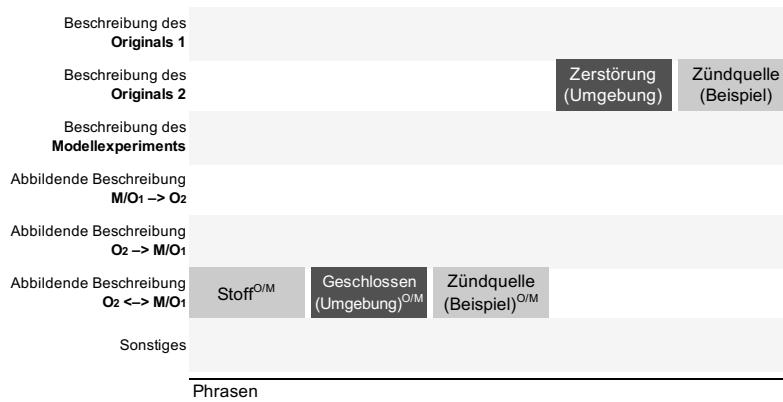
LT2604\_trans.xlsx



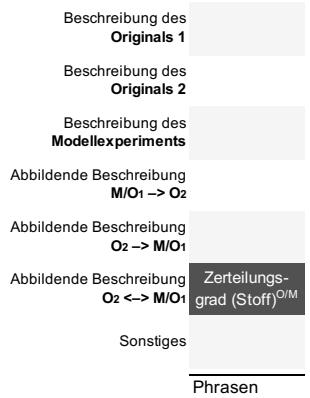
## I2 Anhang

---

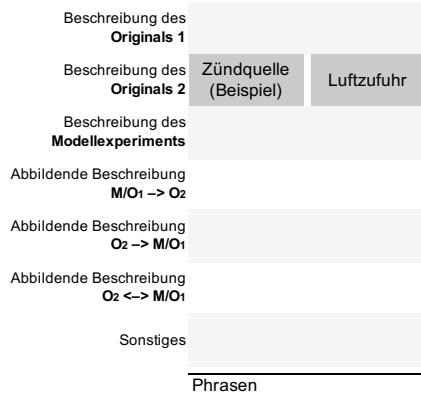
MP0201\_trans.xlsx



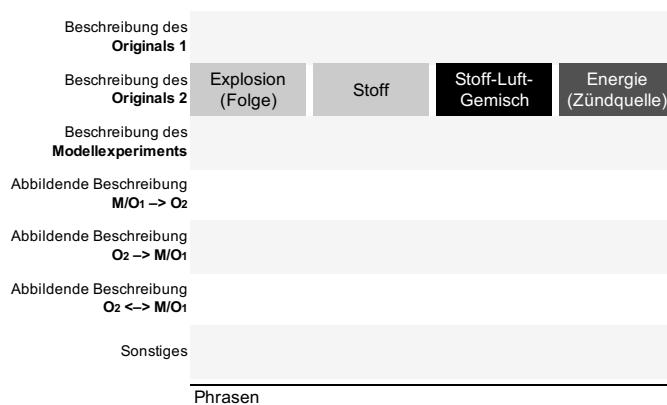
MU2912\_trans.xlsx



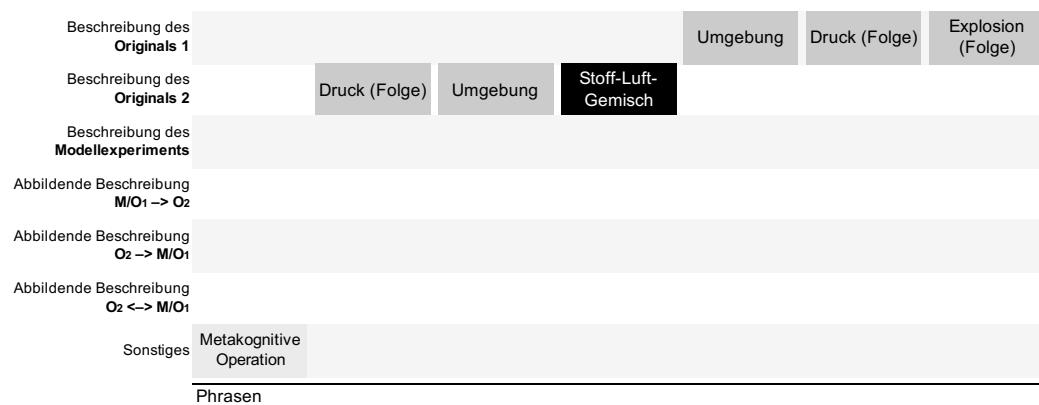
NA0109\_trans.xlsx



NA0506\_trans.xlsx



SI0305\_trans.xlsx

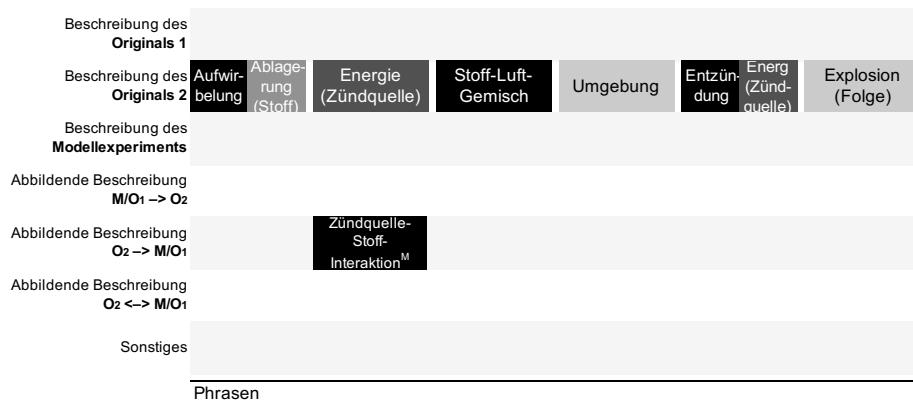


Fortsetzung Phrasen

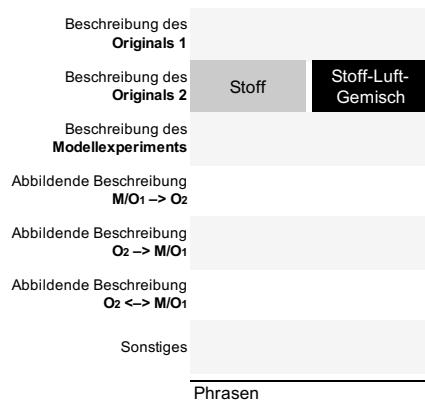
## I2 Anhang

---

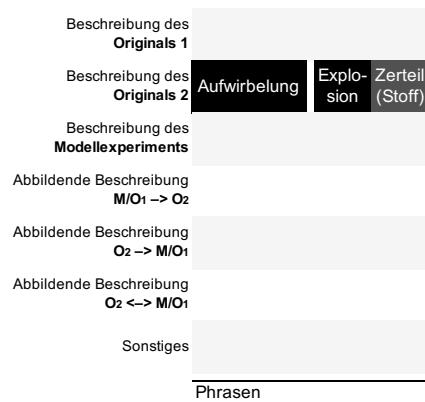
SO2411\_trans.xlsx



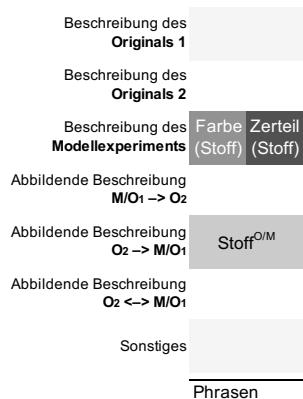
SU0311\_trans.xlsx



TA1108\_trans.xlsx

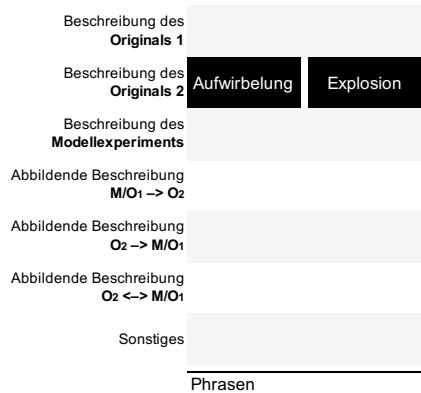


VE0201\_trans.xlsx

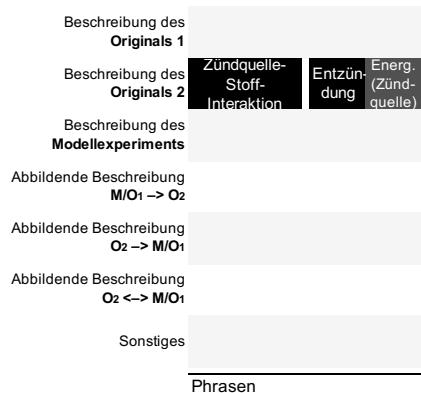


## Schülerexperiment-Gruppe

AC3005\_trans.xlsx



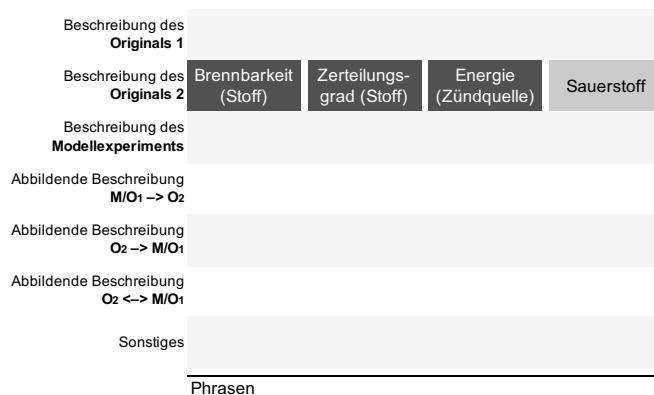
AE1401\_trans.xlsx



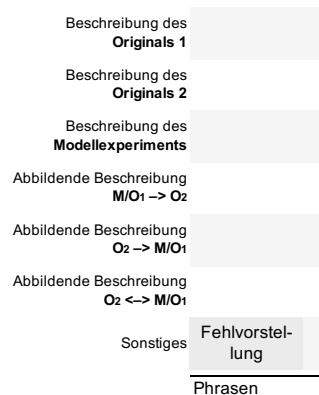
## I2 Anhang

---

AI2309\_trans.xlsx



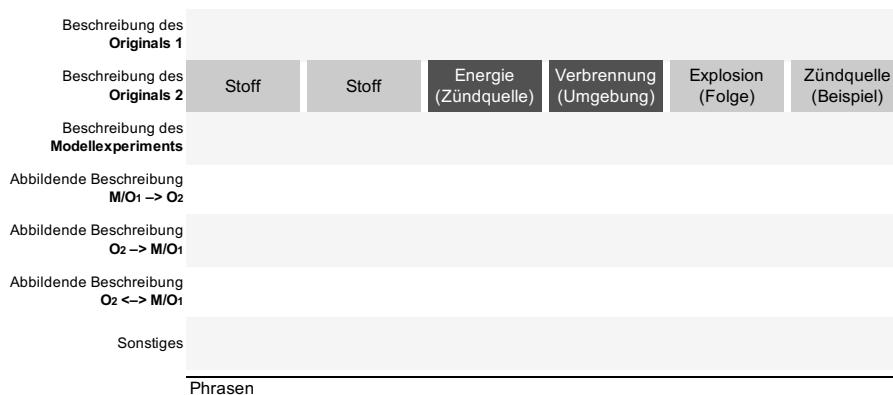
AO0805\_trans.xlsx



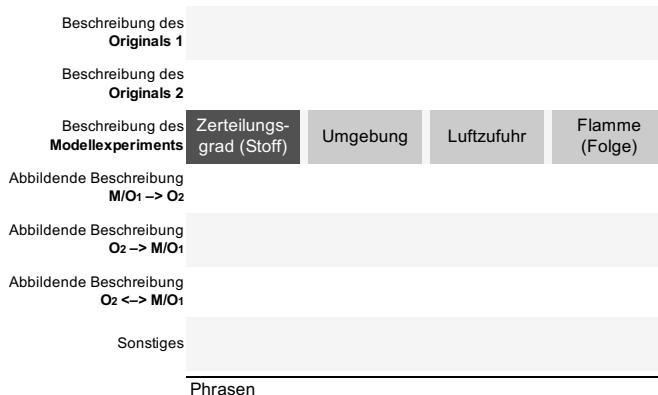
AO2507\_trans.xlsx



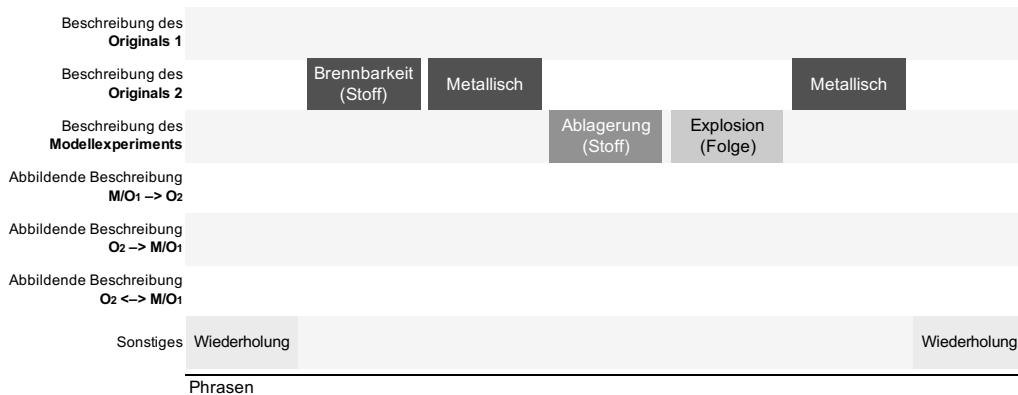
AR1712\_trans.xlsx



BA0103\_trans.xlsx



CA2602\_trans.xlsx

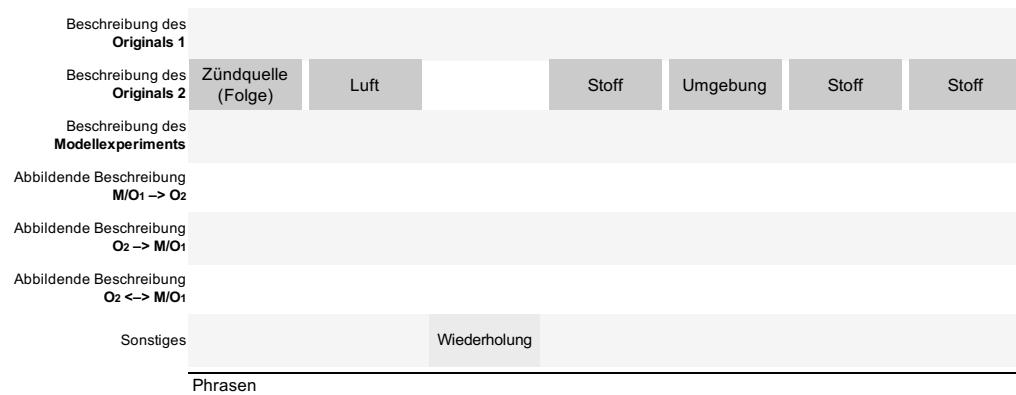


## I2 Anhang

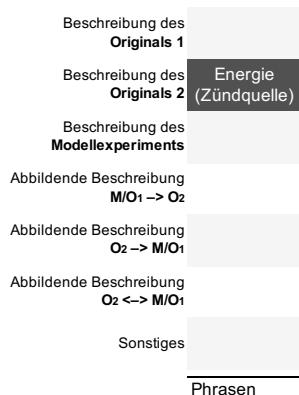
CS0406\_trans.xlsx



EE2604\_trans.xlsx



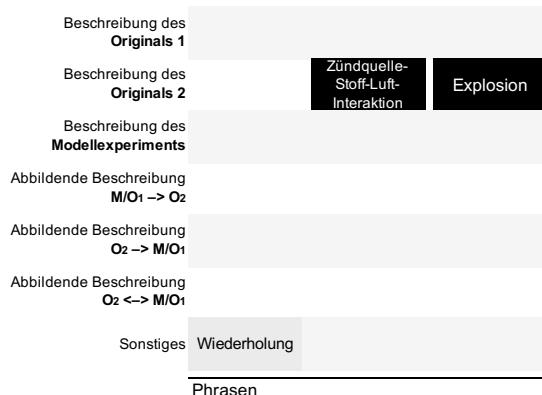
EO2707\_trans.xlsx



EW2709\_trans.xlsx



FI0401\_trans.xlsx



## I2 Anhang

---

HI0308\_trans.xlsx

Beschreibung des Originals 1			
Beschreibung des Originals 2	Zündquelle (Beispiel)	Stoff	Entzündbar- keit (Stoff)
Beschreibung des Modellexperiments			
Abbildende Beschreibung $M/O_1 \rightarrow O_2$			
Abbildende Beschreibung $O_2 \rightarrow M/O_1$			
Abbildende Beschreibung $O_2 \leftrightarrow M/O_1$			
Sonstiges	Wiederholung		
Phrasen			

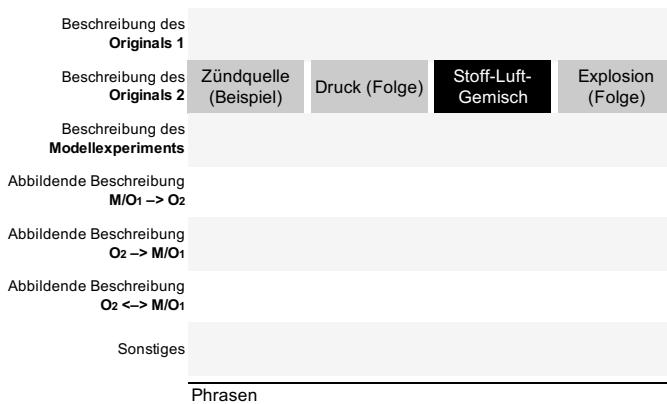
HO0806\_trans.xlsx

Beschreibung des Originals 1					
Beschreibung des Originals 2	Umgebung		Flamme (Folge)		
Beschreibung des Modellexperiments	Zerteilungs- grad (Stoff)	Zerteilungs- grad (Stoff)			
Abbildende Beschreibung $M/O_1 \rightarrow O_2$					
Abbildende Beschreibung $O_2 \rightarrow M/O_1$					
Abbildende Beschreibung $O_2 \leftrightarrow M/O_1$					
Sonstiges	Wiederholung				
Phrasen					

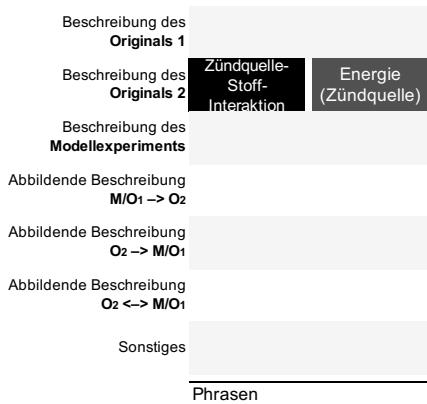
HR0305\_trans.xlsx

Beschreibung des Originals 1		
Beschreibung des Originals 2	Leitfähigkeit (Zündquelle)	Zündquelle (Beispiel)
Beschreibung des Modellexperiments		
Abbildende Beschreibung $M/O_1 \rightarrow O_2$		
Abbildende Beschreibung $O_2 \rightarrow M/O_1$		
Abbildende Beschreibung $O_2 \leftrightarrow M/O_1$		
Sonstiges		
Phrasen		

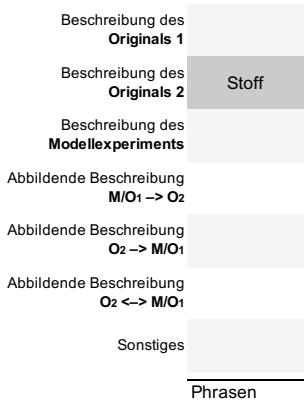
JC1006\_trans.xlsx



JE1804\_trans.xlsx



JE2109\_trans.xlsx



## I2 Anhang

---

JE3103\_trans.xlsx

Beschreibung des Originals 1				
Beschreibung des Originals 2	Entzündbar- keit (Stoff)	Zerstörung (Folge)	Energie (Zündquelle)	Verbrennung (Umgebung)
Beschreibung des <b>Modellexperiments</b>				
Abbildende Beschreibung $M/O_1 \rightarrow O_2$				
Abbildende Beschreibung $O_2 \rightarrow M/O_1$				
Abbildende Beschreibung $O_2 \leftrightarrow M/O_1$				
Sonstiges				
Phrasen				

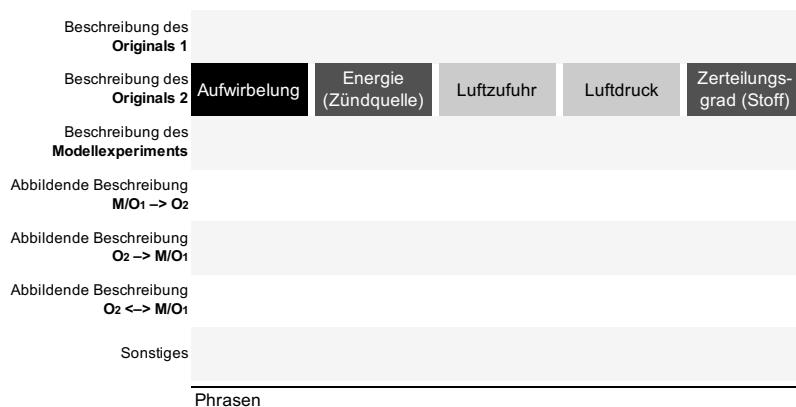
JI0403\_trans.xlsx

Beschreibung des Originals 1				
Beschreibung des Originals 2	Aufwirbelung		Explosion (Folge)	
Beschreibung des <b>Modellexperiments</b>				
Abbildende Beschreibung $M/O_1 \rightarrow O_2$				
Abbildende Beschreibung $O_2 \rightarrow M/O_1$				
Abbildende Beschreibung $O_2 \leftrightarrow M/O_1$				
Sonstiges				
Phrasen				

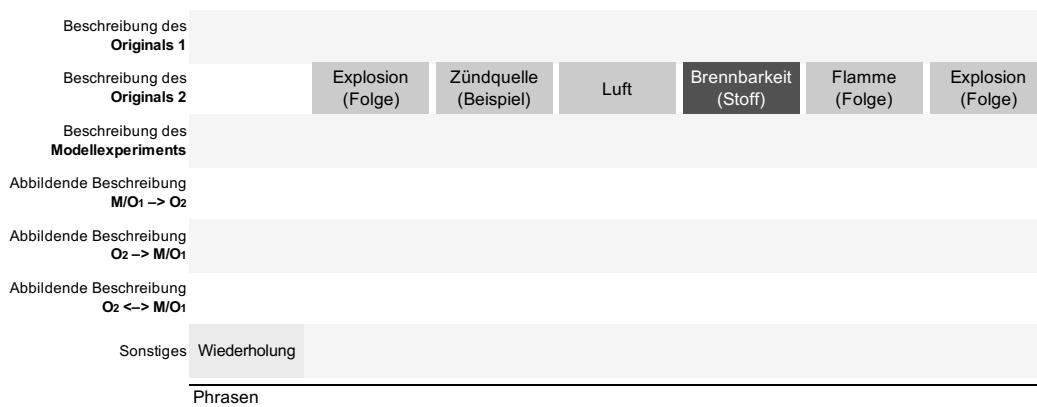
JI3005\_trans.xlsx

Beschreibung des Originals 1				
Beschreibung des Originals 2	Brennbarkeit (Stoff)	Energie (Zündquelle)	Explo- sion	Energ- (Zünd- quelle)
Beschreibung des <b>Modellexperiments</b>				
Abbildende Beschreibung $M/O_1 \rightarrow O_2$				
Abbildende Beschreibung $O_2 \rightarrow M/O_1$				
Abbildende Beschreibung $O_2 \leftrightarrow M/O_1$				
Sonstiges				
Phrasen				

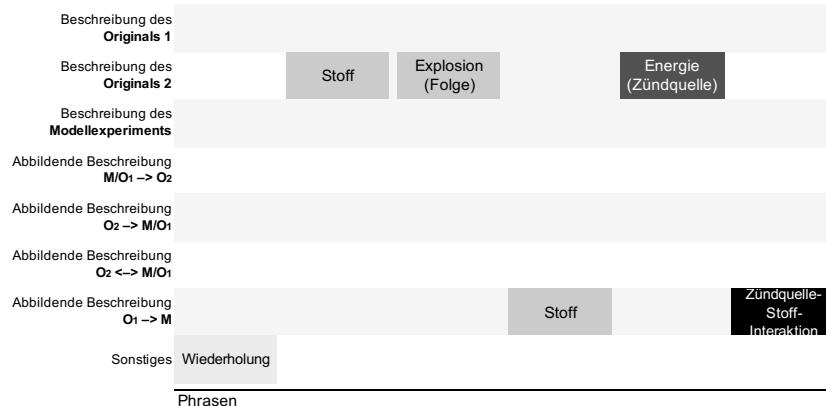
JR1012\_trans.xlsx



JU1305\_trans.xlsx



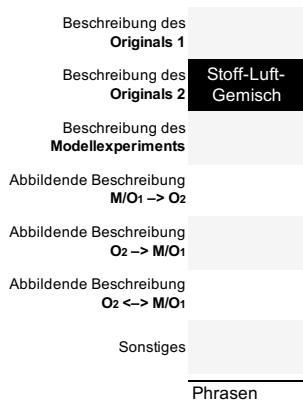
LD0904\_trans.xlsx



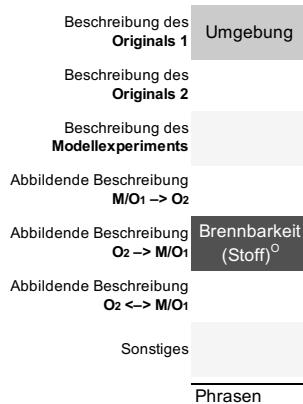
## I2 Anhang

---

LI0409\_trans.xlsx

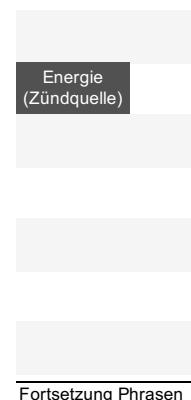


LL2109\_trans.xlsx

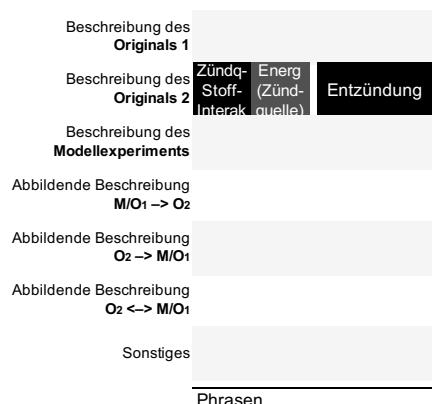


LO0612\_trans.xlsx





LO1607\_trans.xlsx



LÖ2810\_trans.xlsx



## I2 Anhang

---

LR1703\_trans.xlsx

Beschreibung des Originals 1				
Beschreibung des Originals 2	Stoff-Luft- Gemisch	Entzündung	Zündquelle (Beispiel)	
Beschreibung des Modellperiments				
Abbildende Beschreibung $M/O_1 \rightarrow O_2$				
Abbildende Beschreibung $O_2 \rightarrow M/O_1$		Stoff <sup>0</sup>		
Abbildende Beschreibung $O_2 \leftrightarrow M/O_1$				
Sonstiges				
Phrasen				

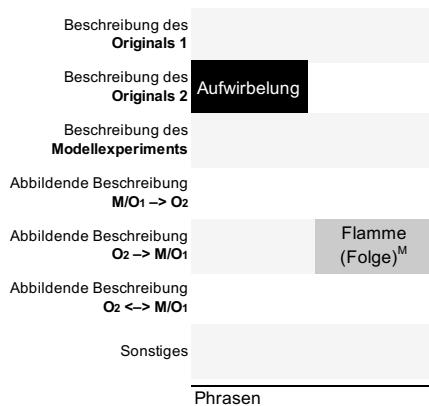
LT2205\_trans.xlsx

Beschreibung des Originals 1				
Beschreibung des Originals 2	Explosion (Folge)	Stoff-Luft- Gemisch	Zündquelle (Beispiel)	Explosion
Beschreibung des Modellperiments				
Abbildende Beschreibung $M/O_1 \rightarrow O_2$				
Abbildende Beschreibung $O_2 \rightarrow M/O_1$				
Abbildende Beschreibung $O_2 \leftrightarrow M/O_1$				
Sonstiges				
Phrasen				

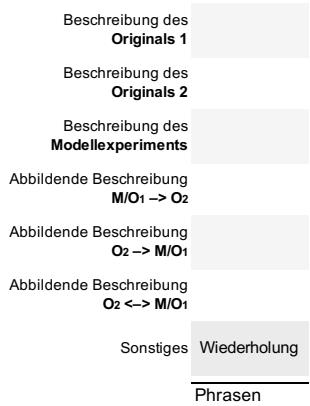
MA1602\_trans.xlsx

Beschreibung des Originals 1						
Beschreibung des Originals 2	Explosions- fähigkeit (Stoff)	Zündquelle (Beispiel)	Aktiv (Zündquelle)	Zündq- Stoff- Interak.	Zerteil (Stoff)	Entzündbar- keit (Stoff)
Beschreibung des Modellperiments						Entzündung
Abbildende Beschreibung $M/O_1 \rightarrow O_2$						
Abbildende Beschreibung $O_2 \rightarrow M/O_1$						
Abbildende Beschreibung $O_2 \leftrightarrow M/O_1$						
Sonstiges						
Phrasen						

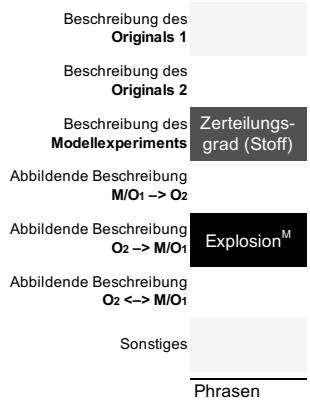
MA1603\_trans.xlsx



ME0510\_trans.xlsx

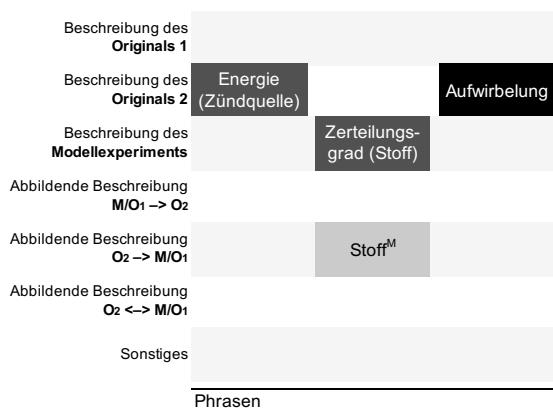


MI0202\_trans.xlsx

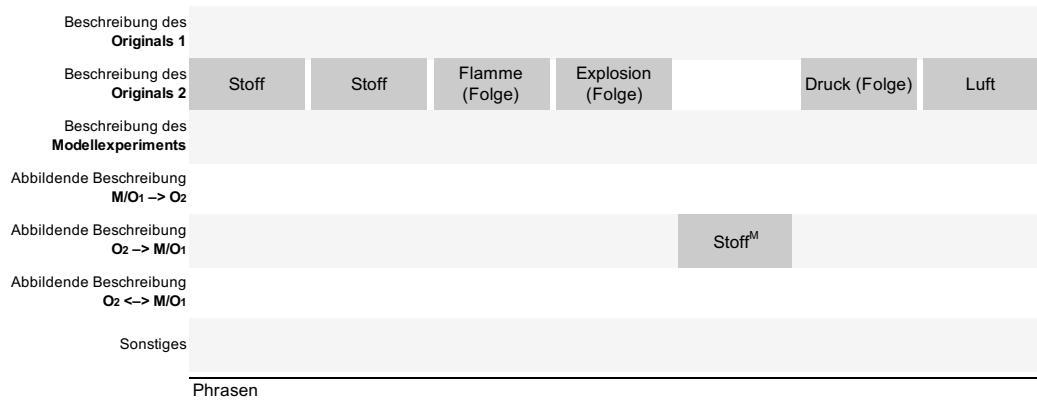


## I2 Anhang

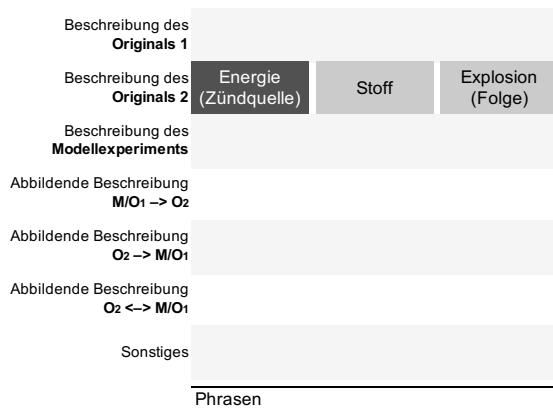
MIC502\_trans.xlsx



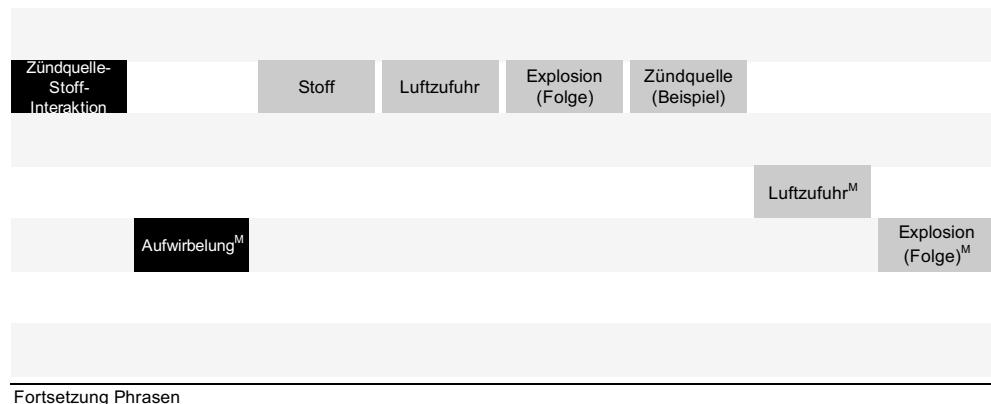
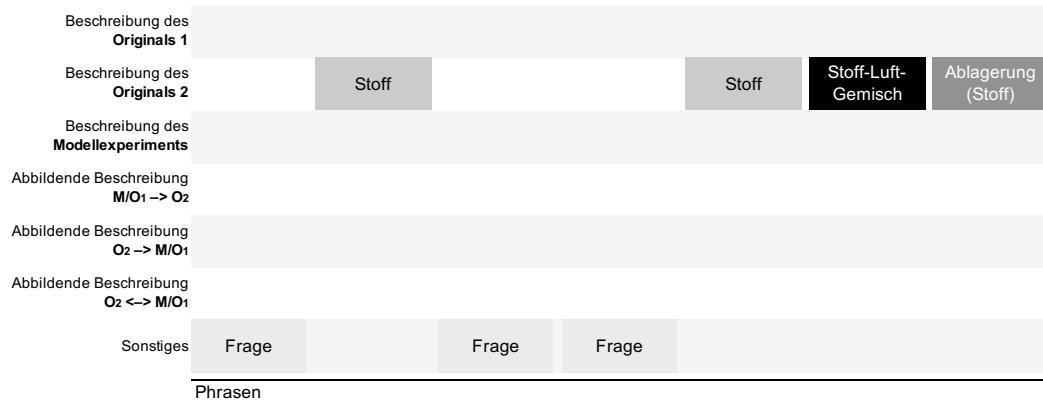
MÖ0106\_trans.xlsx



MS0107\_trans.xlsx



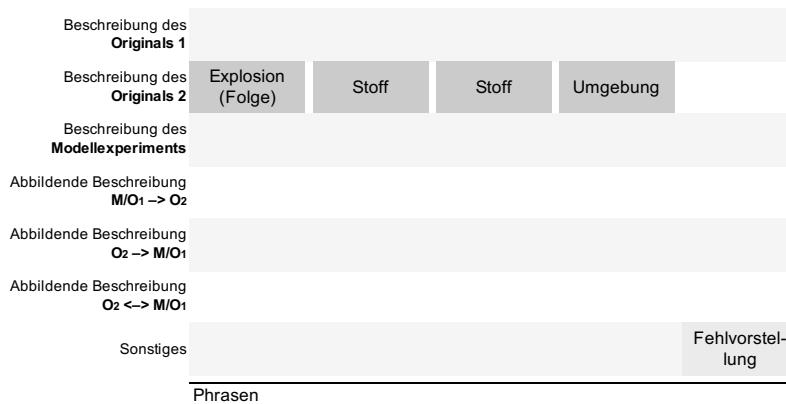
MS2409\_trans.xlsx



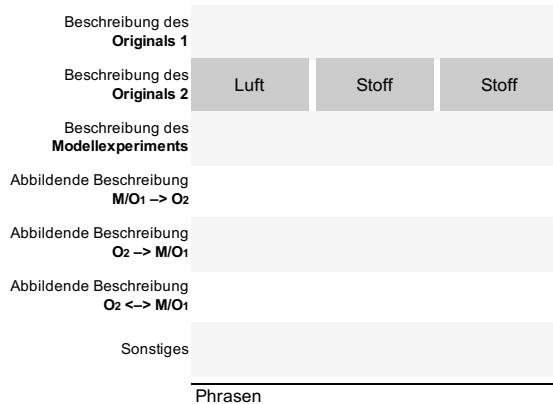
## I2 Anhang

---

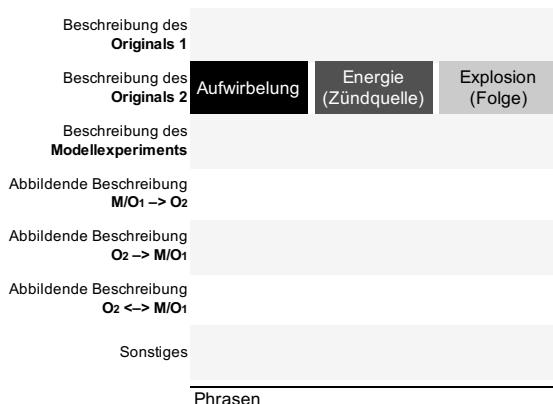
MÜ2907\_trans.xlsx



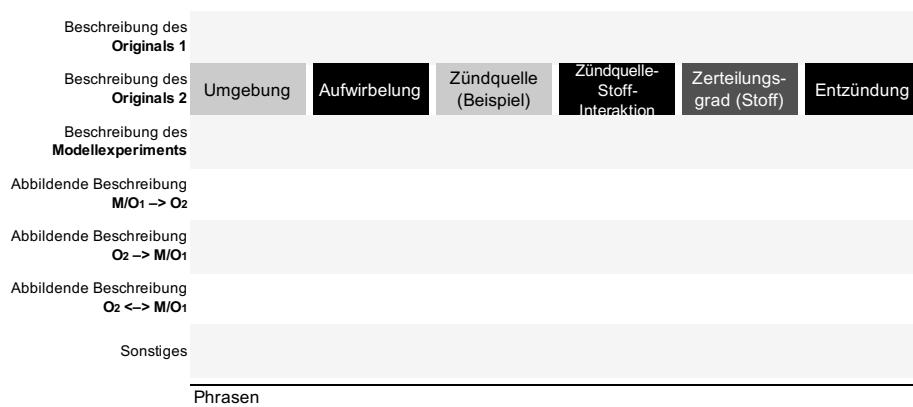
NA1001\_trans.xlsx



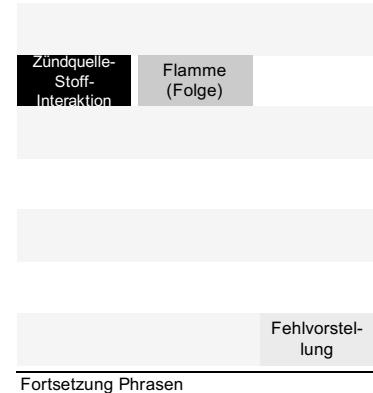
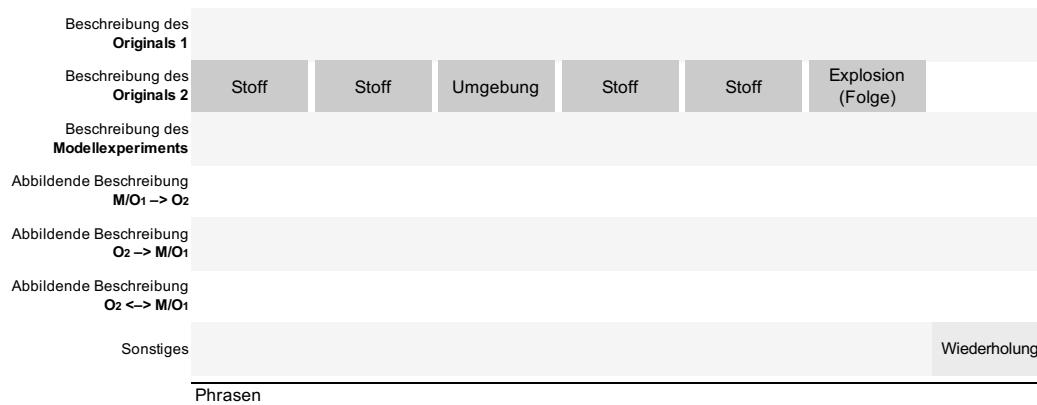
NC1704\_trans.xlsx



NC1807\_trans.xlsx

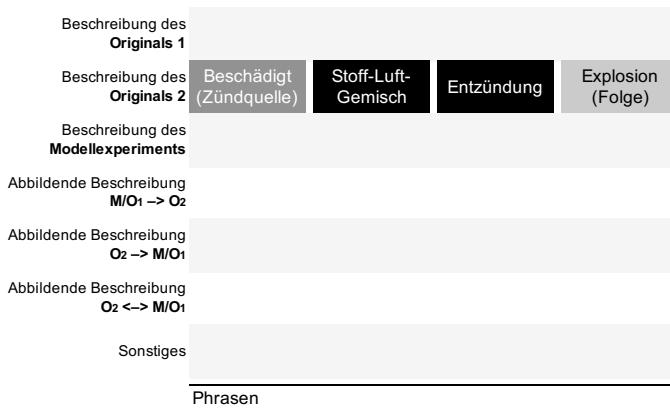


NE2203\_trans.xlsx

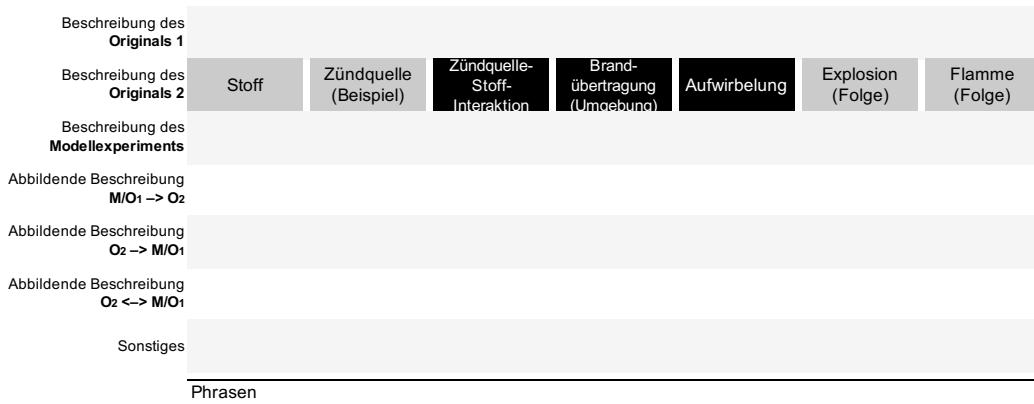


## I2 Anhang

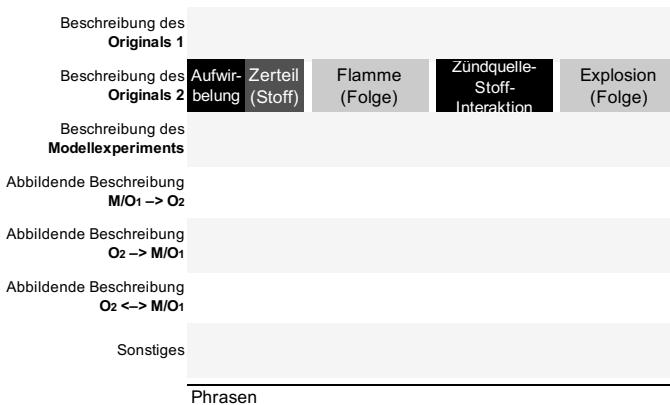
PA1006\_trans.xlsx



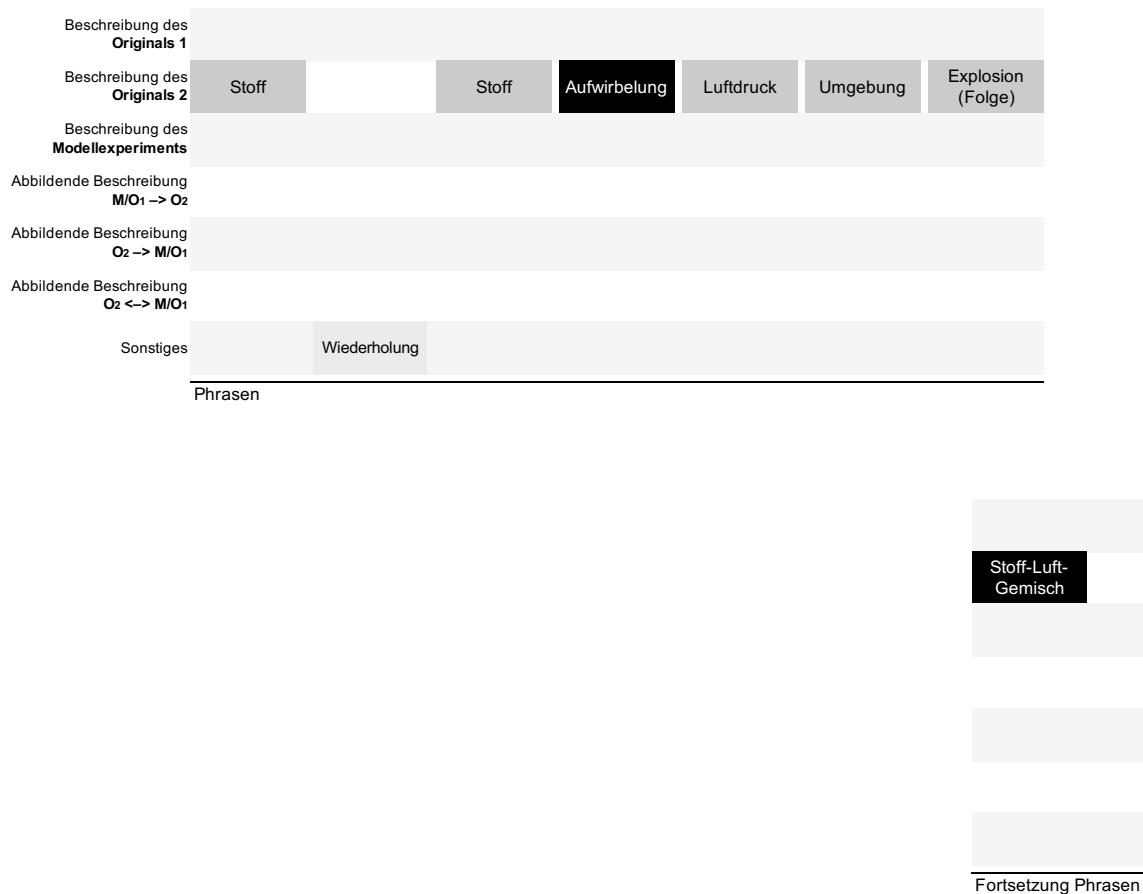
PO0707\_trans.xlsx



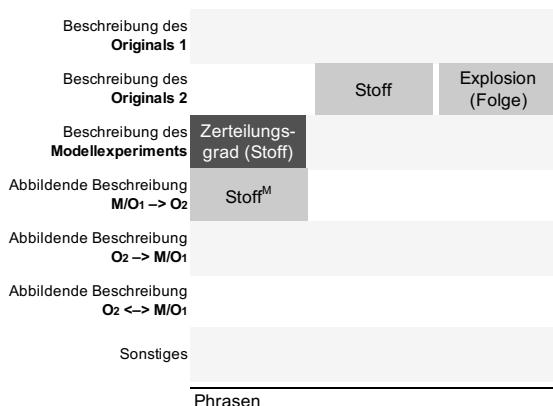
PO1404\_trans.xlsx



SÖ0503\_trans.xlsx

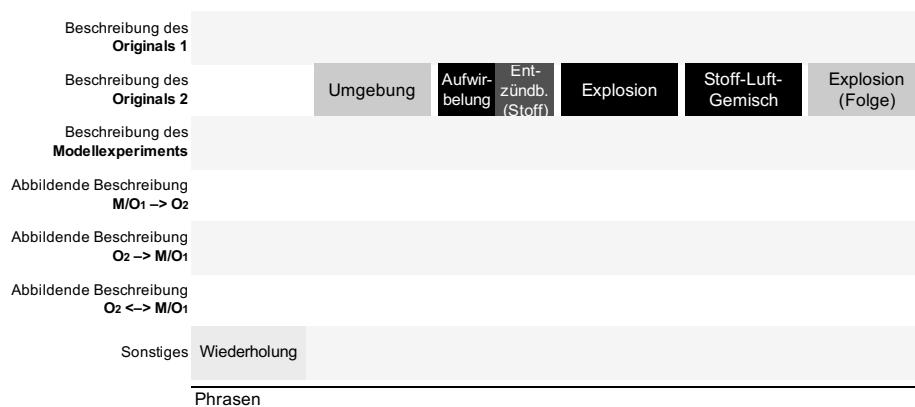


T10201\_trans.xlsx

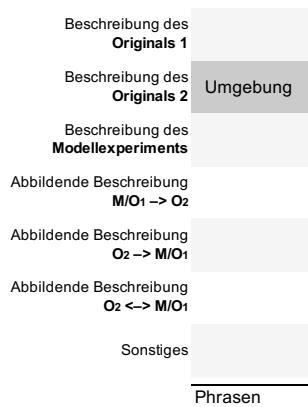


## I2 Anhang

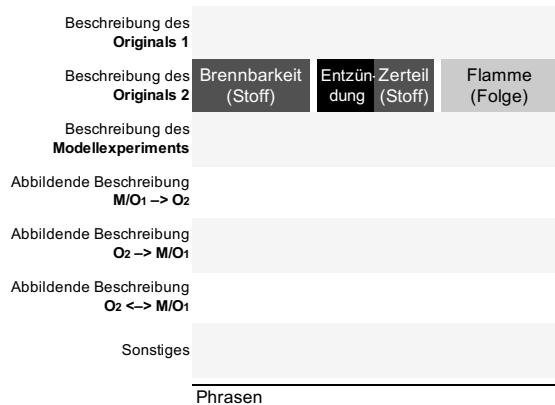
TI1412\_trans.xlsx



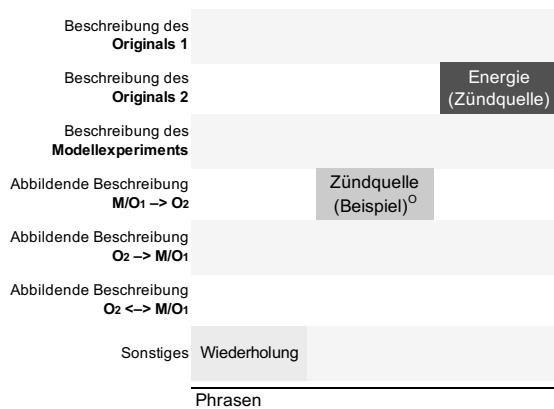
TU0301\_trans.xlsx



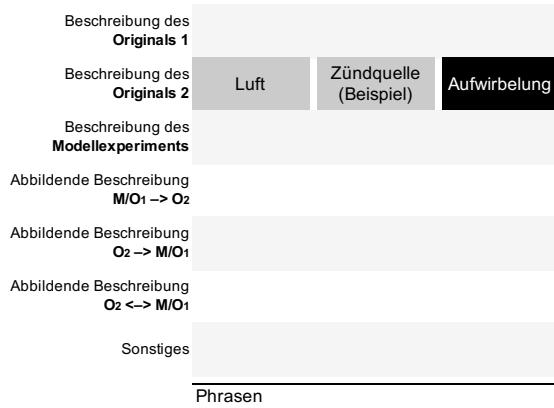
TV0904\_trans.xlsx



VE2607\_trans.xlsx



YA1304\_trans.xlsx



## 12.18 Zusammenhänge zwischen den Bedingungen während der Anwendung

Tabelle 57: Signifikante Korrelationen nach Spearman zwischen den einzelnen Bedingungen des Explosionspentagons während der Anwendung. \*  $p < .05$ , \*\*  $p < .01$ .

	2	3	4	6	8	9	10	11
<b>1 Brennstoff</b>	.27*	1.00**						
2 Stoff		.27*	.24*					.28**
3 Brennbarkeit								
<b>4 Oxidationsmittel</b>							.64**	-.24*
<b>5 Umgebung</b>				.35**				
6 Geschlossene Umgebung								
<b>7 Zündquelle</b>					.45**	.37**		
8 Energie der Zündquelle								
<b>9 Aufwirbelung</b>								
10 Luftzufuhr								
11 Zerteilungsgrad								

## Danksagung

Für die Möglichkeit zu promovieren, ihre Betreuung und Unterstützung sowie den fachlichen Rat danke ich Prof. Dr. Katrin Sommer. Dabei danke ich ihr besonders für ihr großes Vertrauen, ihr offenes Ohr und die Möglichkeit, in neue Richtungen zu denken. Herrn Prof. Dr. Axel Rosenhahn danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens und die kreativen Anmerkungen.

Für ihre Spontanität und ihr Interesse sowie den fachlichen Rat im Gebiet des Eye-Trackings und die technische Unterstützung, die erst die Möglichkeit der Durchführung einer Eye-Tracking Studie ermöglicht hat, danke ich Dr. Johanna Renker vom Fachbereich Ergonomie des Leibniz-Institutes für Arbeitsforschung an der TU Dortmund (IfaDo) ganz herzlich und dem Fachbereichsleiter PD Dr. Gerhard Rinckenauer für die Bereitstellung des Remote Eye-Trackers und die kreativen Anmerkungen.

Dem Team des Alfried Krupp-Schülerlabors, insbesondere Jeannette Blau, danke ich für ihre Unterstützung vor allem bei der Vorbereitung der Projekttage.

Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls für Didaktik der Chemie der Ruhr-Universität Bochum danke ich für die zahlreichen Anregungen und Unterstützungen sowie die großartige gemeinsame Zeit.

Auch danke ich den Student\*innen, die von mir bei ihren Bachelor- und Masterarbeiten betreut wurden sowie meiner Hilfskraft, Dominik Weber, die mir durch ihre Fragen und Anmerkungen neue Gedankenanstöße gegeben haben sowie interessante Perspektiven aufgezeigt haben.

Bei allen Probanden und den zugehörigen Lehrpersonen möchte ich mich für die Teilnahme und Unterstützung von ganzem Herzen bedanken.

Auch möchte ich mich beim Team des Lehrstuhls für Laseranwendungstechnik der RUB für ihre emotionale und herzliche Unterstützung bedanken. Dabei vor allem bei Jan Hoppius, der mich u.a. mit seinem technischen Know-how bei kleinen technischen Kniffeligkeiten unterstützt hat.

Ich danke vor allem meiner Familie, insbesondere meinem Freund, für die kreativen Gedanken, sein Hinterfragen und die Geduld mit der er mich bei meinen ganzen Projekten in allen Belangen unterstützt hat. Und ich danke meiner Mutter und meinen Freunden für die ganz unterschiedliche, liebevolle Unterstützung in Dingen des alltäglichen Lebens.

Gleichzeitig möchte ich auch den Trainerinnen des Rollkunstlauf Spvgg. Herten und meinen Rollschuh-Mädels dafür danken, dass sie mich durch ihre offene und fröhliche Art immer auf andere Gedanken gebracht haben.

Bisher erschienene Bände der Reihe „*Studien zum Physik- und Chemielernen*“

ISSN 1614-8967 (vormals *Studien zum Physiklernen* ISSN 1435-5280)

- 1 Helmut Fischler, Jochen Peuckert (Hrsg.): Concept Mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie  
ISBN 978-3-89722-256-4 40.50 EUR
- 2 Anja Schoster: Bedeutungsentwicklungsprozesse beim Lösen algorithmischer Physik-aufgaben. *Eine Fallstudie zu Lernprozessen von Schülern im Physiknachhilfeunterricht während der Bearbeitung algorithmischer Physikaufgaben*  
ISBN 978-3-89722-045-4 40.50 EUR
- 3 Claudia von Aufschnaiter: Bedeutungsentwicklungen, Interaktionen und situatives Erleben beim Bearbeiten physikalischer Aufgaben  
ISBN 978-3-89722-143-7 40.50 EUR
- 4 Susanne Haeberlen: Lernprozesse im Unterricht mit Wasserstromkreisen. *Eine Fallstudie in der Sekundarstufe I*  
ISBN 978-3-89722-172-7 40.50 EUR
- 5 Kerstin Haller: Über den Zusammenhang von Handlungen und Zielen. *Eine empirische Untersuchung zu Lernprozessen im physikalischen Praktikum*  
ISBN 978-3-89722-242-7 40.50 EUR
- 6 Michaela Horstendahl: Motivationale Orientierungen im Physikunterricht  
ISBN 978-3-89722-227-4 50.00 EUR
- 7 Stefan Deylitz: Lernergebnisse in der Quanten-Atomphysik. *Evaluation des Bremer Unterrichtskonzepts*  
ISBN 978-3-89722-291-5 40.50 EUR
- 8 Lorenz Hucke: Handlungsregulation und Wissenserwerb in traditionellen und computergestützten Experimenten des physikalischen Praktikums  
ISBN 978-3-89722-316-5 50.00 EUR
- 9 Heike Theyßen: Ein Physikpraktikum für Studierende der Medizin. *Darstellung der Entwicklung und Evaluation eines adressatenspezifischen Praktikums nach dem Modell der Didaktischen Rekonstruktion*  
ISBN 978-3-89722-334-9 40.50 EUR
- 10 Annette Schick: Der Einfluß von Interesse und anderen selbstbezogenen Kognitionen auf Handlungen im Physikunterricht. *Fallstudien zu Interessenhandlungen im Physikunterricht*  
ISBN 978-3-89722-380-6 40.50 EUR
- 11 Roland Berger: Moderne bildgebende Verfahren der medizinischen Diagnostik. *Ein Weg zu interessanterem Physikunterricht*  
ISBN 978-3-89722-445-2 40.50 EUR

- 12 Johannes Werner: Vom Licht zum Atom. *Ein Unterrichtskonzept zur Quantenphysik unter Nutzung des Zeigermodells*  
ISBN 978-3-89722-471-1 40.50 EUR
- 13 Florian Sander: Verbindung von Theorie und Experiment im physikalischen Praktikum. *Eine empirische Untersuchung zum handlungsbezogenen Vorverständnis und dem Einsatz grafikorientierter Modellbildung im Praktikum*  
ISBN 978-3-89722-482-7 40.50 EUR
- 14 Jörn Gerdes: Der Begriff der physikalischen Kompetenz. *Zur Validierung eines Konstrukt*  
ISBN 978-3-89722-510-7 40.50 EUR
- 15 Malte Meyer-Arndt: Interaktionen im Physikpraktikum zwischen Studierenden und Betreuern. *Feldstudie zu Bedeutungsentwicklungsprozessen im physikalischen Praktikum*  
ISBN 978-3-89722-541-1 40.50 EUR
- 16 Dietmar Höttecke: Die Natur der Naturwissenschaften historisch verstehen. *Fachdidaktische und wissenschaftshistorische Untersuchungen*  
ISBN 978-3-89722-607-4 40.50 EUR
- 17 Gil Gabriel Mavanga: Entwicklung und Evaluation eines experimentell- und phänomenorientierten Optikcurriculums. *Untersuchung zu Schülervorstellungen in der Sekundarstufe I in Mosambik und Deutschland*  
ISBN 978-3-89722-721-7 40.50 EUR
- 18 Meike Ute Zastrow: Interaktive Experimentieranleitungen. *Entwicklung und Evaluation eines Konzeptes zur Vorbereitung auf das Experimentieren mit Messgeräten im Physikalischen Praktikum*  
ISBN 978-3-89722-802-3 40.50 EUR
- 19 Gunnar Friege: Wissen und Problemlösen. *Eine empirische Untersuchung des wissenszentrierten Problemlösens im Gebiet der Elektrizitätslehre auf der Grundlage des Experten-Novizen-Vergleichs*  
ISBN 978-3-89722-809-2 40.50 EUR
- 20 Erich Starauschek: Physikunterricht nach dem Karlsruher Physikkurs. *Ergebnisse einer Evaluationsstudie*  
ISBN 978-3-89722-823-8 40.50 EUR
- 21 Roland Paatz: Charakteristika analogiebasierten Denkens. *Vergleich von Lernprozessen in Basis- und Zielbereich*  
ISBN 978-3-89722-944-0 40.50 EUR
- 22 Silke Mikelskis-Seifert: Die Entwicklung von Metakonzepten zur Teilchenvorstellung bei Schülern. *Untersuchung eines Unterrichts über Modelle mithilfe eines Systems multipler Repräsentationsebenen*  
ISBN 978-3-8325-0013-9 40.50 EUR
- 23 Brunhild Landwehr: Distanzen von Lehrkräften und Studierenden des Sachunterrichts zur Physik. *Eine qualitativ-empirische Studie zu den Ursachen*  
ISBN 978-3-8325-0044-3 40.50 EUR

- 24 Lydia Murmann: Physiklernen zu Licht, Schatten und Sehen. *Eine phänomenografische Untersuchung in der Primarstufe*  
ISBN 978-3-8325-0060-3 40.50 EUR
- 25 Thorsten Bell: Strukturprinzipien der Selbstregulation. *Komplexe Systeme, Elementarisierungen und Lernprozessstudien für den Unterricht der Sekundarstufe II*  
ISBN 978-3-8325-0134-1 40.50 EUR
- 26 Rainer Müller: Quantenphysik in der Schule  
ISBN 978-3-8325-0186-0 40.50 EUR
- 27 Jutta Roth: Bedeutungsentwicklungsprozesse von Physikerinnen und Physikern in den Dimensionen Komplexität, Zeit und Inhalt  
ISBN 978-3-8325-0183-9 40.50 EUR
- 28 Andreas Saniter: Spezifika der Verhaltensmuster fortgeschrittener Studierender der Physik  
ISBN 978-3-8325-0292-8 40.50 EUR
- 29 Thomas Weber: Kumulatives Lernen im Physikunterricht. *Eine vergleichende Untersuchung in Unterrichtsgängen zur geometrischen Optik*  
ISBN 978-3-8325-0316-1 40.50 EUR
- 30 Markus Rehm: Über die Chancen und Grenzen moralischer Erziehung im naturwissenschaftlichen Unterricht  
ISBN 978-3-8325-0368-0 40.50 EUR
- 31 Marion Budde: Lernwirkungen in der Quanten-Atom-Physik. *Fallstudien über Resonanzen zwischen Lernangeboten und SchülerInnen-Vorstellungen*  
ISBN 978-3-8325-0483-0 40.50 EUR
- 32 Thomas Reyer: Oberflächenmerkmale und Tiefenstrukturen im Unterricht. *Exemplarische Analysen im Physikunterricht der gymnasialen Sekundarstufe*  
ISBN 978-3-8325-0488-5 40.50 EUR
- 33 Christoph Thomas Müller: Subjektive Theorien und handlungsleitende Kognitionen von Lehrern als Determinanten schulischer Lehr-Lern-Prozesse im Physikunterricht  
ISBN 978-3-8325-0543-1 40.50 EUR
- 34 Gabriela Jonas-Ahrend: Physiklehrervorstellungen zum Experiment im Physikunterricht  
ISBN 978-3-8325-0576-9 40.50 EUR
- 35 Dimitrios Stavrou: Das Zusammenspiel von Zufall und Gesetzmäßigkeiten in der nicht-linearen Dynamik. *Didaktische Analyse und Lernprozesse*  
ISBN 978-3-8325-0609-4 40.50 EUR
- 36 Katrin Engeln: Schülerlabors: authentische, aktivierende Lernumgebungen als Möglichkeit, Interesse an Naturwissenschaften und Technik zu wecken  
ISBN 978-3-8325-0689-6 40.50 EUR
- 37 Susann Hartmann: Erklärungsvielfalt  
ISBN 978-3-8325-0730-5 40.50 EUR

- 38 Knut Neumann: Didaktische Rekonstruktion eines physikalischen Praktikums für Physiker  
ISBN 978-3-8325-0762-6 40.50 EUR
- 39 Michael Späth: Kontextbedingungen für Physikunterricht an der Hauptschule.  
*Möglichkeiten und Ansatzpunkte für einen fachübergreifenden, handlungsorientierten und berufsorientierten Unterricht*  
ISBN 978-3-8325-0827-2 40.50 EUR
- 40 Jörg Hirsch: Interesse, Handlungen und situatives Erleben von Schülerinnen und Schülern beim Bearbeiten physikalischer Aufgaben  
ISBN 978-3-8325-0875-3 40.50 EUR
- 41 Monika Hüther: Evaluation einer hypermedialen Lernumgebung zum Thema Gasgesetze.  
*Eine Studie im Rahmen des Physikpraktikums für Studierende der Medizin*  
ISBN 978-3-8325-0911-8 40.50 EUR
- 42 Maike Tesch: Das Experiment im Physikunterricht. *Didaktische Konzepte und Ergebnisse einer Videostudie*  
ISBN 978-3-8325-0975-0 40.50 EUR
- 43 Nina Nicolai: Skriptgeleitete Eltern-Kind-Interaktion bei Chemiehausaufgaben. *Eine Evaluationsstudie im Themenbereich Säure-Base*  
ISBN 978-3-8325-1013-8 40.50 EUR
- 44 Antje Leisner: Entwicklung von Modellkompetenz im Physikunterricht  
ISBN 978-3-8325-1020-6 40.50 EUR
- 45 Stefan Rumann: Evaluation einer Interventionsstudie zur Säure-Base-Thematik  
ISBN 978-3-8325-1027-5 40.50 EUR
- 46 Thomas Wilhelm: Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung – mit CD-ROM  
ISBN 978-3-8325-1046-6 45.50 EUR
- 47 Andrea Maier-Richter: Computerunterstütztes Lernen mit Lösungsbeispielen in der Chemie. *Eine Evaluationsstudie im Themenbereich Löslichkeit*  
ISBN 978-3-8325-1046-6 40.50 EUR
- 48 Jochen Peuckert: Stabilität und Ausprägung kognitiver Strukturen zum Atombegriff  
ISBN 978-3-8325-1104-3 40.50 EUR
- 49 Maik Walpuski: Optimierung von experimenteller Kleingruppenarbeit durch Strukturierungshilfen und Feedback  
ISBN 978-3-8325-1184-5 40.50 EUR
- 50 Helmut Fischler, Christiane S. Reiners (Hrsg.): Die Teilchenstruktur der Materie im Physik- und Chemieunterricht  
ISBN 978-3-8325-1225-5 34.90 EUR
- 51 Claudia Eysel: Interdisziplinäres Lehren und Lernen in der Lehrerbildung. *Eine empirische Studie zum Kompetenzerwerb in einer komplexen Lernumgebung*  
ISBN 978-3-8325-1238-5 40.50 EUR

- 52 Johannes Günther: Lehrerfortbildung über die Natur der Naturwissenschaften. *Studien über das Wissenschaftsverständnis von Grundschullehrkräften*  
ISBN 978-3-8325-1287-3 40.50 EUR
- 53 Christoph Neugebauer: Lernen mit Simulationen und der Einfluss auf das Problemlösen in der Physik  
ISBN 978-3-8325-1300-9 40.50 EUR
- 54 Andreas Schnirch: Gendergerechte Interessen- und Motivationsförderung im Kontext naturwissenschaftlicher Grundbildung. *Konzeption, Entwicklung und Evaluation einer multimedial unterstützten Lernumgebung*  
ISBN 978-3-8325-1334-4 40.50 EUR
- 55 Hilde Köster: Freies Explorieren und Experimentieren. *Eine Untersuchung zur selbstbestimmten Gewinnung von Erfahrungen mit physikalischen Phänomenen im Sachunterricht*  
ISBN 978-3-8325-1348-1 40.50 EUR
- 56 Eva Heran-Dörr: Entwicklung und Evaluation einer Lehrerfortbildung zur Förderung der physikdidaktischen Kompetenz von Sachunterrichtslehrkräften  
ISBN 978-3-8325-1377-1 40.50 EUR
- 57 Agnes Szabone Varnai: Unterstützung des Problemlösens in Physik durch den Einsatz von Simulationen und die Vorgabe eines strukturierten Kooperationsformats  
ISBN 978-3-8325-1403-7 40.50 EUR
- 58 Johannes Rethfeld: Aufgabenbasierte Lernprozesse in selbstorganisationsoffenem Unterricht der Sekundarstufe I zum Themengebiet ELEKTROSTATIK. *Eine Feldstudie in vier 10. Klassen zu einer kartenbasierten Lernumgebung mit Aufgaben aus der Elektrostatik*  
ISBN 978-3-8325-1416-7 40.50 EUR
- 59 Christian Henke: Experimentell-naturwissenschaftliche Arbeitsweisen in der Oberstufe. *Untersuchung am Beispiel des HIGHSEA-Projekts in Bremerhaven*  
ISBN 978-3-8325-1515-7 40.50 EUR
- 60 Lutz Kasper: Diskursiv-narrative Elemente für den Physikunterricht. *Entwicklung und Evaluation einer multimedialen Lernumgebung zum Erdmagnetismus*  
ISBN 978-3-8325-1537-9 40.50 EUR
- 61 Thorid Rabe: Textgestaltung und Aufforderung zu Selbsterklärungen beim Physiklernen mit Multimedia  
ISBN 978-3-8325-1539-3 40.50 EUR
- 62 Ina Glemnitz: Vertikale Vernetzung im Chemieunterricht. *Ein Vergleich von traditionellem Unterricht mit Unterricht nach Chemie im Kontext*  
ISBN 978-3-8325-1628-4 40.50 EUR
- 63 Erik Einhaus: Schülerkompetenzen im Bereich Wärmelehre. *Entwicklung eines Testinstruments zur Überprüfung und Weiterentwicklung eines normativen Modells fachbezogener Kompetenzen*  
ISBN 978-3-8325-1630-7 40.50 EUR

- 64 Jasmin Neuroth: Concept Mapping als Lernstrategie. *Eine Interventionsstudie zum Chemielernen aus Texten*  
ISBN 978-3-8325-1659-8 40.50 EUR
- 65 Hans Gerd Hegeler-Burkhart: Zur Kommunikation von Hauptschülerinnen und Hauptschülern in einem handlungsorientierten und fächerübergreifenden Unterricht mit physikalischen und technischen Inhalten  
ISBN 978-3-8325-1667-3 40.50 EUR
- 66 Karsten Rincke: Sprachentwicklung und Fachlernen im Mechanikunterricht. *Sprache und Kommunikation bei der Einführung in den Kraftbegriff*  
ISBN 978-3-8325-1699-4 40.50 EUR
- 67 Nina Strehle: Das Ion im Chemieunterricht. *Alternative Schülervorstellungen und curriculare Konsequenzen*  
ISBN 978-3-8325-1710-6 40.50 EUR
- 68 Martin Hopf: Problemorientierte Schülerexperimente  
ISBN 978-3-8325-1711-3 40.50 EUR
- 69 Anne Beerewinkel: Fostering conceptual change in chemistry classes using expository texts  
ISBN 978-3-8325-1721-2 40.50 EUR
- 70 Roland Berger: Das Gruppenpuzzle im Physikunterricht der Sekundarstufe II. *Eine empirische Untersuchung auf der Grundlage der Selbstbestimmungstheorie der Motivation*  
ISBN 978-3-8325-1732-8 40.50 EUR
- 71 Giuseppe Colicchia: Physikunterricht im Kontext von Medizin und Biologie. *Entwicklung und Erprobung von Unterrichtseinheiten*  
ISBN 978-3-8325-1746-5 40.50 EUR
- 72 Sandra Winheller: Geschlechtsspezifische Auswirkungen der Lehrer-Schüler-Interaktion im Chemieanfangsunterricht  
ISBN 978-3-8325-1757-1 40.50 EUR
- 73 Isabel Wahser: Training von naturwissenschaftlichen Arbeitsweisen zur Unterstützung experimenteller Kleingruppenarbeit im Fach Chemie  
ISBN 978-3-8325-1815-8 40.50 EUR
- 74 Claus Brell: Lernmedien und Lernerfolg - reale und virtuelle Materialien im Physikunterricht. *Empirische Untersuchungen in acht Klassen an Gymnasien (Laborstudie) zum Computereinsatz mit Simulation und IBE*  
ISBN 978-3-8325-1829-5 40.50 EUR
- 75 Rainer Wackermann: Überprüfung der Wirksamkeit eines Basismodell-Trainings für Physiklehrer  
ISBN 978-3-8325-1882-0 40.50 EUR
- 76 Oliver Tepner: Effektivität von Aufgaben im Chemieunterricht der Sekundarstufe I  
ISBN 978-3-8325-1919-3 40.50 EUR

- 77 Claudia Geyer: Museums- und Science-Center-Besuche im naturwissenschaftlichen Unterricht aus einer motivationalen Perspektive. *Die Sicht von Lehrkräften und Schülerinnen und Schülern*  
ISBN 978-3-8325-1922-3 40.50 EUR
- 78 Tobias Leonhard: Professionalisierung in der Lehrerbildung. *Eine explorative Studie zur Entwicklung professioneller Kompetenzen in der Lehrererstausbildung*  
ISBN 978-3-8325-1924-7 40.50 EUR
- 79 Alexander Kauertz: Schwierigkeitserzeugende Merkmale physikalischer Leistungs-  
testaufgaben  
ISBN 978-3-8325-1925-4 40.50 EUR
- 80 Regina Hübinger: Schüler auf Weltreise. *Entwicklung und Evaluation von Lehr-/ Lernmaterialien zur Förderung experimentell-naturwissenschaftlicher Kompetenzen für die Jahrgangsstufen 5 und 6*  
ISBN 978-3-8325-1932-2 40.50 EUR
- 81 Christine Waltner: Physik lernen im Deutschen Museum  
ISBN 978-3-8325-1933-9 40.50 EUR
- 82 Torsten Fischer: Handlungsmuster von Physiklehrkräften beim Einsatz neuer Medien. *Fallstudien zur Unterrichtspraxis*  
ISBN 978-3-8325-1948-3 42.00 EUR
- 83 Corinna Kieren: Chemiehausaufgaben in der Sekundarstufe I des Gymnasiums. *Fragebogenerhebung zur gegenwärtigen Praxis und Entwicklung eines optimierten Hausaufgabendesigns im Themenbereich Säure-Base*  
978-3-8325-1975-9 37.00 EUR
- 84 Marco Thiele: Modelle der Thermohalinen Zirkulation im Unterricht. *Eine empirische Studie zur Förderung des Modellverständnisses*  
ISBN 978-3-8325-1982-7 40.50 EUR
- 85 Bernd Zinn: Physik lernen, um Physik zu lehren. *Eine Möglichkeit für interessanteren Physikunterricht*  
ISBN 978-3-8325-1995-7 39.50 EUR
- 86 Esther Klaes: Außerschulische Lernorte im naturwissenschaftlichen Unterricht. *Die Perspektive der Lehrkraft*  
ISBN 978-3-8325-2006-9 43.00 EUR
- 87 Marita Schmidt: Kompetenzmodellierung und -diagnostik im Themengebiet Energie der Sekundarstufe I. *Entwicklung und Erprobung eines Testinventars*  
ISBN 978-3-8325-2024-3 37.00 EUR
- 88 Gudrun Franke-Braun: Aufgaben mit gestuften Lernhilfen. *Ein Aufgabenformat zur Förderung der sachbezogenen Kommunikation und Lernleistung für den naturwissenschaftlichen Unterricht*  
ISBN 978-3-8325-2026-7 38.00 EUR
- 89 Silke Klos: Kompetenzförderung im naturwissenschaftlichen Anfangsunterricht. *Der Einfluss eines integrierten Unterrichtskonzepts*  
ISBN 978-3-8325-2133-2 37.00 EUR

- 90 Ulrike Elisabeth Burkard: Quantenphysik in der Schule. *Bestandsaufnahme, Perspektiven und Weiterentwicklungsmöglichkeiten durch die Implementation eines Medienservers*  
ISBN 978-3-8325-2215-5 43.00 EUR
- 91 Ulrike Gromadecki: Argumente in physikalischen Kontexten. *Welche Geltungsgründe halten Physikanfänger für überzeugend?*  
ISBN 978-3-8325-2250-6 41.50 EUR
- 92 Jürgen Bruns: Auf dem Weg zur Förderung naturwissenschaftsspezifischer Vorstellungen von zukünftigen Chemie-Lehrenden  
ISBN 978-3-8325-2257-5 43.50 EUR
- 93 Cornelius Marsch: Räumliche Atomvorstellung. *Entwicklung und Erprobung eines Unterrichtskonzeptes mit Hilfe des Computers*  
ISBN 978-3-8325-2293-3 82.50 EUR
- 94 Maja Brückmann: Sachstrukturen im Physikunterricht. *Ergebnisse einer Videostudie*  
ISBN 978-3-8325-2272-8 39.50 EUR
- 95 Sabine Fechner: Effects of Context-oriented Learning on Student Interest and Achievement in Chemistry Education  
ISBN 978-3-8325-2343-5 36.50 EUR
- 96 Clemens Nagel: eLearning im Physikalischen Anfängerpraktikum  
ISBN 978-3-8325-2355-8 39.50 EUR
- 97 Josef Riese: Professionelles Wissen und professionelle Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräften  
ISBN 978-3-8325-2376-3 39.00 EUR
- 98 Sascha Bernholt: Kompetenzmodellierung in der Chemie. *Theoretische und empirische Reflexion am Beispiel des Modells hierarchischer Komplexität*  
ISBN 978-3-8325-2447-0 40.00 EUR
- 99 Holger Christoph Stawitz: Auswirkung unterschiedlicher Aufgabenprofile auf die Schülerleistung. *Vergleich von Naturwissenschafts- und Problemlöseaufgaben der PISA 2003-Studie*  
ISBN 978-3-8325-2451-7 37.50 EUR
- 100 Hans Ernst Fischer, Elke Sumfleth (Hrsg.): nwu-essen – 10 Jahre Essener Forschung zum naturwissenschaftlichen Unterricht  
ISBN 978-3-8325-3331-1 40.00 EUR
- 101 Hendrik Härtig: Sachstrukturen von Physikschulbüchern als Grundlage zur Bestimmung der Inhaltsvalidität eines Tests  
ISBN 978-3-8325-2512-5 34.00 EUR
- 102 Thomas Grüß-Niehaus: Zum Verständnis des Löslichkeitskonzeptes im Chemieunterricht. *Der Effekt von Methoden progressiver und kollaborativer Reflexion*  
ISBN 978-3-8325-2537-8 40.50 EUR

- 103 Patrick Bronner: Quantenoptische Experimente als Grundlage eines Curriculums zur Quantenphysik des Photons  
ISBN 978-3-8325-2540-8 36.00 EUR
- 104 Adrian Voßkühler: Blickbewegungsmessung an Versuchsaufbauten. *Studien zur Wahrnehmung, Verarbeitung und Usability von physikbezogenen Experimenten am Bildschirm und in der Realität*  
ISBN 978-3-8325-2548-4 47.50 EUR
- 105 Verena Tobias: Newton'sche Mechanik im Anfangsunterricht. *Die Wirksamkeit einer Einführung über die zweidimensionale Dynamik auf das Lehren und Lernen*  
ISBN 978-3-8325-2558-3 54.00 EUR
- 106 Christian Rogge: Entwicklung physikalischer Konzepte in aufgabenbasierten Lernumgebungen  
ISBN 978-3-8325-2574-3 45.00 EUR
- 107 Mathias Ropohl: Modellierung von Schülerkompetenzen im Basiskonzept Chemische Reaktion. *Entwicklung und Analyse von Testaufgaben*  
ISBN 978-3-8325-2609-2 36.50 EUR
- 108 Christoph Kulgemeyer: Physikalische Kommunikationskompetenz. *Modellierung und Diagnostik*  
ISBN 978-3-8325-2674-0 44.50 EUR
- 109 Jennifer Olszewski: The Impact of Physics Teachers' Pedagogical Content Knowledge on Teacher Actions and Student Outcomes  
ISBN 978-3-8325-2680-1 33.50 EUR
- 110 Annika Ohle: Primary School Teachers' Content Knowledge in Physics and its Impact on Teaching and Students' Achievement  
ISBN 978-3-8325-2684-9 36.50 EUR
- 111 Susanne Mannel: Assessing scientific inquiry. *Development and evaluation of a test for the low-performing stage*  
ISBN 978-3-8325-2761-7 40.00 EUR
- 112 Michael Plomer: Physik physiologisch passend praktiziert. *Eine Studie zur Lernwirksamkeit von traditionellen und adressatenspezifischen Physikpraktika für die Physiologie*  
ISBN 978-3-8325-2804-1 34.50 EUR
- 113 Alexandra Schulz: Experimentierspezifische Qualitätsmerkmale im Chemieunterricht. *Eine Videostudie*  
ISBN 978-3-8325-2817-1 40.00 EUR
- 114 Franz Boczianowski: Eine empirische Untersuchung zu Vektoren im Physikunterricht der Mittelstufe  
ISBN 978-3-8325-2843-0 39.50 EUR
- 115 Maria Ploog: Internetbasiertes Lernen durch Textproduktion im Fach Physik  
ISBN 978-3-8325-2853-9 39.50 EUR

- 116 Anja Dhein: Lernen in Explorier- und Experimentiersituationen. *Eine explorative Studie zu Bedeutungsentwicklungsprozessen bei Kindern im Alter zwischen 4 und 6 Jahren*  
ISBN 978-3-8325-2859-1 45.50 EUR
- 117 Irene Neumann: Beyond Physics Content Knowledge. *Modeling Competence Regarding Nature of Scientific Inquiry and Nature of Scientific Knowledge*  
ISBN 978-3-8325-2880-5 37.00 EUR
- 118 Markus Emden: Prozessorientierte Leistungsmessung des naturwissenschaftlich-experimentellen Arbeitens. *Eine vergleichende Studie zu Diagnoseinstrumenten zu Beginn der Sekundarstufe I*  
ISBN 978-3-8325-2867-6 38.00 EUR
- 119 Birgit Hofmann: Analyse von Blickbewegungen von Schülern beim Lesen von physikbezogenen Texten mit Bildern. *Eye Tracking als Methodenwerkzeug in der physikdidaktischen Forschung*  
ISBN 978-3-8325-2925-3 59.00 EUR
- 120 Rebecca Knobloch: Analyse der fachinhaltlichen Qualität von Schüleräußerungen und deren Einfluss auf den Lernerfolg. *Eine Videostudie zu kooperativer Kleingruppenarbeit*  
ISBN 978-3-8325-3006-8 36.50 EUR
- 121 Julia Hostenbach: Entwicklung und Prüfung eines Modells zur Beschreibung der Bewertungskompetenz im Chemieunterricht  
ISBN 978-3-8325-3013-6 38.00 EUR
- 122 Anna Windt: Naturwissenschaftliches Experimentieren im Elementarbereich. *Evaluation verschiedener Lernsituationen*  
ISBN 978-3-8325-3020-4 43.50 EUR
- 123 Eva Kölbach: Kontexteinflüsse beim Lernen mit Lösungsbeispielen  
ISBN 978-3-8325-3025-9 38.50 EUR
- 124 Anna Lau: Passung und vertikale Vernetzung im Chemie- und Physikunterricht  
ISBN 978-3-8325-3021-1 36.00 EUR
- 125 Jan Lamprecht: Ausbildungswege und Komponenten professioneller Handlungskompetenz. *Vergleich von Quereinsteigern mit Lehramtsabsolventen für Gymnasien im Fach Physik*  
ISBN 978-3-8325-3035-8 38.50 EUR
- 126 Ulrike Böhm: Förderung von Verstehensprozessen unter Einsatz von Modellen  
ISBN 978-3-8325-3042-6 41.00 EUR
- 127 Sabrina Dollny: Entwicklung und Evaluation eines Testinstruments zur Erfassung des fachspezifischen Professionswissens von Chemielehrkräften  
ISBN 978-3-8325-3046-4 37.00 EUR
- 128 Monika Zimmermann: Naturwissenschaftliche Bildung im Kindergarten. *Eine integrative Längsschnittstudie zur Kompetenzentwicklung von Erzieherinnen*  
ISBN 978-3-8325-3053-2 54.00 EUR

- 129 Ulf Saballus: Über das Schlussfolgern von Schülerinnen und Schülern zu öffentlichen Kontroversen mit naturwissenschaftlichem Hintergrund. *Eine Fallstudie*  
ISBN 978-3-8325-3086-0 39.50 EUR
- 130 Olaf Krey: Zur Rolle der Mathematik in der Physik. *Wissenschaftstheoretische Aspekte und Vorstellungen Physiklernender*  
ISBN 978-3-8325-3101-0 46.00 EUR
- 131 Angelika Wolf: Zusammenhänge zwischen der Eigenständigkeit im Physikunterricht, der Motivation, den Grundbedürfnissen und dem Lernerfolg von Schülern  
ISBN 978-3-8325-3161-4 45.00 EUR
- 132 Johannes Börlin: Das Experiment als Lerngelegenheit. *Vom interkulturellen Vergleich des Physikunterrichts zu Merkmalen seiner Qualität*  
ISBN 978-3-8325-3170-6 45.00 EUR
- 133 Olaf Uhden: Mathematisches Denken im Physikunterricht. *Theorieentwicklung und Problemanalyse*  
ISBN 978-3-8325-3170-6 45.00 EUR
- 134 Christoph Gut: Modellierung und Messung experimenteller Kompetenz. *Analyse eines large-scale Experimentiertests*  
ISBN 978-3-8325-3213-0 40.00 EUR
- 135 Antonio Rueda: Lernen mit ExploMultimedial in kolumbianischen Schulen. *Analyse von kurzzeitigen Lernprozessen und der Motivation beim länderübergreifenden Einsatz einer deutschen computergestützten multimedialen Lernumgebung für den naturwissenschaftlichen Unterricht*  
ISBN 978-3-8325-3218-5 45.50 EUR
- 136 Krisztina Berger: Bilder, Animationen und Notizen. *Empirische Untersuchung zur Wirkung einfacher visueller Repräsentationen und Notizen auf den Wissenserwerb in der Optik*  
ISBN 978-3-8325-3238-3 41.50 EUR
- 137 Antony Crossley: Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher physikalischer Konzepte auf den Wissenserwerb in der Thermodynamik der Sekundarstufe I  
ISBN 978-3-8325-3275-8 40.00 EUR
- 138 Tobias Viering: Entwicklung physikalischer Kompetenz in der Sekundarstufe I. *Validierung eines Kompetenzentwicklungsmodells für das Energiekonzept im Bereich Fachwissen*  
ISBN 978-3-8325-3277-2 37.00 EUR
- 139 Nico Schreiber: Diagnostik experimenteller Kompetenz. *Validierung technologiegestützter Testverfahren im Rahmen eines Kompetenzstrukturmodells*  
ISBN 978-3-8325-3284-0 39.00 EUR
- 140 Sarah Hundertmark: Einblicke in kollaborative Lernprozesse. *Eine Fallstudie zur reflektierenden Zusammenarbeit unterstützt durch die Methoden Concept Mapping und Lernbegleitbogen*  
ISBN 978-3-8325-3251-2 43.00 EUR

- 141 Ronny Scherer: Analyse der Struktur, Messinvarianz und Ausprägung komplexer Problemlösekompetenz im Fach Chemie. *Eine Querschnittsstudie in der Sekundarstufe I und am Übergang zur Sekundarstufe II*  
ISBN 978-3-8325-3312-0 43.00 EUR
- 142 Patricia Heitmann: Bewertungskompetenz im Rahmen naturwissenschaftlicher Problemlöseprozesse. *Modellierung und Diagnose der Kompetenzen Bewertung und analytisches Problemlösen für das Fach Chemie*  
ISBN 978-3-8325-3314-4 37.00 EUR
- 143 Jan Fleischhauer: Wissenschaftliches Argumentieren und Entwicklung von Konzepten beim Lernen von Physik  
ISBN 978-3-8325-3325-0 35.00 EUR
- 144 Nermin Özcan: Zum Einfluss der Fachsprache auf die Leistung im Fach Chemie. *Eine Förderstudie zur Fachsprache im Chemieunterricht*  
ISBN 978-3-8325-3328-1 36.50 EUR
- 145 Helena van Vorst: Kontextmerkmale und ihr Einfluss auf das Schülerinteresse im Fach Chemie  
ISBN 978-3-8325-3321-2 38.50 EUR
- 146 Janine Cappell: Fachspezifische Diagnosekompetenz angehender Physiklehrkräfte in der ersten Ausbildungsphase  
ISBN 978-3-8325-3356-4 38.50 EUR
- 147 Susanne Bley: Förderung von Transferprozessen im Chemieunterricht  
ISBN 978-3-8325-3407-3 40.50 EUR
- 148 Cathrin Blaes: Die übungsgestützte Lehrerpräsentation im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Evaluation der Effektivität*  
ISBN 978-3-8325-3409-7 43.50 EUR
- 149 Julia Suckut: Die Wirksamkeit von piko-OWL als Lehrerfortbildung. Eine Evaluation zum Projekt *Physik im Kontext* in Fallstudien  
ISBN 978-3-8325-3440-0 45.00 EUR
- 150 Alexandra Dorschu: Die Wirkung von Kontexten in Physikkompetenztestaufgaben  
ISBN 978-3-8325-3446-2 37.00 EUR
- 151 Jochen Scheid: Multiple Repräsentationen, Verständnis physikalischer Experimente und kognitive Aktivierung: *Ein Beitrag zur Entwicklung der Aufgabenkultur*  
ISBN 978-3-8325-3449-3 49.00 EUR
- 152 Tim Plasa: Die Wahrnehmung von Schülerlaboren und Schülerforschungszentren  
ISBN 978-3-8325-3483-7 35.50 EUR
- 153 Felix Schoppmeier: Physikkompetenz in der gymnasialen Oberstufe. *Entwicklung und Validierung eines Kompetenzstrukturmodells für den Kompetenzbereich Umgang mit Fachwissen*  
ISBN 978-3-8325-3502-5 36.00 EUR

- 154 Katharina Groß: Experimente alternativ dokumentieren. *Eine qualitative Studie zur Förderung der Diagnose- und Differenzierungskompetenz in der Chemielehrerbildung*  
ISBN 978-3-8325-3508-7 43.50 EUR
- 155 Barbara Hank: Konzeptwandelprozesse im Anfangsunterricht Chemie. *Eine quasiexperimentelle Längsschnittstudie*  
ISBN 978-3-8325-3519-3 38.50 EUR
- 156 Katja Freyer: Zum Einfluss von Studieneingangsvoraussetzungen auf den Studienerfolg Erstsemesterstudierender im Fach Chemie  
ISBN 978-3-8325-3544-5 38.00 EUR
- 157 Alexander Rachel: Auswirkungen instruktionaler Hilfen bei der Einführung des (Ferro-)Magnetismus. *Eine Vergleichsstudie in der Primar- und Sekundarstufe*  
ISBN 978-3-8325-3548-3 43.50 EUR
- 158 Sebastian Ritter: Einfluss des Lerninhalts Nanogrößeneffekte auf Teilchen- und Teilchenmodellvorstellungen von Schülerinnen und Schülern  
ISBN 978-3-8325-3558-2 36.00 EUR
- 159 Andrea Harbach: Problemorientierung und Vernetzung in kontextbasierten Lernaufgaben  
ISBN 978-3-8325-3564-3 39.00 EUR
- 160 David Obst: Interaktive Tafeln im Physikunterricht. *Entwicklung und Evaluation einer Lehrerfortbildung*  
ISBN 978-3-8325-3582-7 40.50 EUR
- 161 Sophie Kirschner: Modellierung und Analyse des Professionswissens von Physiklehrkräften  
ISBN 978-3-8325-3601-5 35.00 EUR
- 162 Katja Stief: Selbstregulationsprozesse und Hausaufgabenmotivation im Chemieunterricht  
ISBN 978-3-8325-3631-2 34.00 EUR
- 163 Nicola Meschede: Professionelle Wahrnehmung der inhaltlichen Strukturierung im naturwissenschaftlichen Grundschulunterricht. *Theoretische Beschreibung und empirische Erfassung*  
ISBN 978-3-8325-3668-8 37.00 EUR
- 164 Johannes Maximilian Barth: Experimentieren im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe. *Eine Rekonstruktion übergeordneter Einbettungsstrategien*  
ISBN 978-3-8325-3681-7 39.00 EUR
- 165 Sandra Lein: Das Betriebspraktikum in der Lehrerbildung. *Eine Untersuchung zur Förderung der Wissenschafts- und Technikbildung im allgemeinbildenden Unterricht*  
ISBN 978-3-8325-3698-5 40.00 EUR
- 166 Veranika Maiseyenka: Modellbasiertes Experimentieren im Unterricht. *Praxistauglichkeit und Lernwirkungen*  
ISBN 978-3-8325-3708-1 38.00 EUR

- 167 Christoph Stolzenberger: Der Einfluss der didaktischen Lernumgebung auf das Erreichen geforderter Bildungsziele am Beispiel der W- und P-Seminare im Fach Physik  
ISBN 978-3-8325-3708-1 38.00 EUR
- 168 Pia Altenburger: Mehrebenenregressionsanalysen zum Physiklernen im Sachunterricht der Primarstufe. *Ergebnisse einer Evaluationsstudie.*  
ISBN 978-3-8325-3717-3 37.50 EUR
- 169 Nora Ferber: Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zur Erfassung von Kompetenzentwicklung im Fach Chemie in der Sekundarstufe I  
ISBN 978-3-8325-3727-2 39.50 EUR
- 170 Anita Stender: Unterrichtsplanung: Vom Wissen zum Handeln.  
Theoretische Entwicklung und empirische Überprüfung des Transformationsmodells der Unterrichtsplanung  
ISBN 978-3-8325-3750-0 41.50 EUR
- 171 Jenna Koenen: Entwicklung und Evaluation von experimentunterstützten Lösungsbeispielen zur Förderung naturwissenschaftlich-experimenteller Arbeitsweisen  
ISBN 978-3-8325-3785-2 43.00 EUR
- 172 Teresa Henning: Empirische Untersuchung kontextorientierter Lernumgebungen in der Hochschuldidaktik. *Entwicklung und Evaluation kontextorientierter Aufgaben in der Studieneingangsphase für Fach- und Nebenfachstudierende der Physik*  
ISBN 978-3-8325-3801-9 43.00 EUR
- 173 Alexander Pusch: Fachspezifische Instrumente zur Diagnose und individuellen Förderung von Lehramtsstudierenden der Physik  
ISBN 978-3-8325-3829-3 38.00 EUR
- 174 Christoph Vogelsang: Validierung eines Instruments zur Erfassung der professionellen Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräften. *Zusammenhangsanalysen zwischen Lehrerkompetenz und Lehrerperformanz*  
ISBN 978-3-8325-3846-0 50.50 EUR
- 175 Ingo Brebeck: Selbstreguliertes Lernen in der Studieneingangsphase im Fach Chemie  
ISBN 978-3-8325-3859-0 37.00 EUR
- 176 Axel Eghtessad: Merkmale und Strukturen von Professionalisierungsprozessen in der ersten und zweiten Phase der Chemielehrerbildung. *Eine empirisch-qualitative Studie mit niedersächsischen Fachleiter\_innen der Sekundarstufenlehrämter*  
ISBN 978-3-8325-3861-3 45.00 EUR
- 177 Andreas Nehring: Wissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen im Fach Chemie. Eine kompetenzorientierte Modell- und Testentwicklung für den Bereich der Erkenntnisgewinnung  
ISBN 978-3-8325-3872-9 39.50 EUR
- 178 Maike Schmidt: Professionswissen von Sachunterrichtslehrkräften. Zusammenhangsanalyse zur Wirkung von Ausbildungshintergrund und Unterrichtserfahrung auf das fachspezifische Professionswissen im Unterrichtsinhalt „Verbrennung“  
ISBN 978-3-8325-3907-8 38.50 EUR

- 179 Jan Winkelmann: Auswirkungen auf den Fachwissenszuwachs und auf affektive Schülermerkmale durch Schüler- und Demonstrationsexperimente im Physikunterricht  
ISBN 978-3-8325-3915-3 41.00 EUR
- 180 Iwen Kobow: Entwicklung und Validierung eines Testinstrumentes zur Erfassung der Kommunikationskompetenz im Fach Chemie  
ISBN 978-3-8325-3927-6 34.50 EUR
- 181 Yvonne Gramzow: Fachdidaktisches Wissen von Lehramtsstudierenden im Fach Physik. Modellierung und Testkonstruktion  
ISBN 978-3-8325-3931-3 42.50 EUR
- 182 Evelin Schröter: Entwicklung der Kompetenzerwartung durch Lösen physikalischer Aufgaben einer multimedialen Lernumgebung  
ISBN 978-3-8325-3975-7 54.50 EUR
- 183 Inga Kallweit: Effektivität des Einsatzes von Selbsteinschätzungsbögen im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Individuelle Förderung durch selbstreguliertes Lernen*  
ISBN 978-3-8325-3965-8 44.00 EUR
- 184 Andrea Schumacher: Paving the way towards authentic chemistry teaching. *A contribution to teachers' professional development*  
ISBN 978-3-8325-3976-4 48.50 EUR
- 185 David Woitkowski: Fachliches Wissen Physik in der Hochschulausbildung. *Konzeptualisierung, Messung, Niveaubildung*  
ISBN 978-3-8325-3988-7 53.00 EUR
- 186 Marianne Korner: Cross-Age Peer Tutoring in Physik. *Evaluation einer Unterrichtsmethode*  
ISBN 978-3-8325-3979-5 38.50 EUR
- 187 Simone Nakoinz: Untersuchung zur Verknüpfung submikroskopischer und makroskopischer Konzepte im Fach Chemie  
ISBN 978-3-8325-4057-9 38.50 EUR
- 188 Sandra Anus: Evaluation individueller Förderung im Chemieunterricht. *Adaptivität von Lerninhalten an das Vorwissen von Lernenden am Beispiel des Basiskonzeptes Chemische Reaktion*  
ISBN 978-3-8325-4059-3 43.50 EUR
- 189 Thomas Roßbegalle: Fachdidaktische Entwicklungsorschung zum besseren Verständnis atmosphärischer Phänomene. *Treibhauseffekt, saurer Regen und stratosphärischer Ozonabbau als Kontexte zur Vermittlung von Basiskonzepten der Chemie*  
ISBN 978-3-8325-4059-3 45.50 EUR
- 190 Kathrin Steckenmesser-Sander: Gemeinsamkeiten und Unterschiede physikbezogener Handlungs-, Denk- und Lernprozesse von Mädchen und Jungen  
ISBN 978-3-8325-4066-1 38.50 EUR
- 191 Cornelia Geller: Lernprozessorientierte Sequenzierung des Physikunterrichts im Zusammenhang mit Fachwissenserwerb. *Eine Videostudie in Finnland, Deutschland und der Schweiz*  
ISBN 978-3-8325-4082-1 35.50 EUR

- 192 Jan Hofmann: Untersuchung des Kompetenzaufbaus von Physiklehrkräften während einer Fortbildungsmaßnahme  
ISBN 978-3-8325-4104-0 38.50 EUR
- 193 Andreas Dickhäuser: Chemiespezifischer Humor. *Theoriebildung, Materialentwicklung, Evaluation*  
ISBN 978-3-8325-4108-8 37.00 EUR
- 194 Stefan Korte: Die Grenzen der Naturwissenschaft als Thema des Physikunterrichts  
ISBN 978-3-8325-4112-5 57.50 EUR
- 195 Carolin Hülsmann: Kurswahlmotive im Fach Chemie. Eine Studie zum Wahlverhalten und Erfolg von Schülerinnen und Schülern in der gymnasialen Oberstufe  
ISBN 978-3-8325-4144-6 49.00 EUR
- 196 Caroline Körbs: Mindeststandards im Fach Chemie am Ende der Pflichtschulzeit  
ISBN 978-3-8325-4148-4 34.00 EUR
- 197 Andreas Vorholzer: Wie lassen sich Kompetenzen des experimentellen Denkens und Arbeitens fördern? *Eine empirische Untersuchung der Wirkung eines expliziten und eines impliziten Instruktionsansatzes*  
ISBN 978-3-8325-4194-1 37.50 EUR
- 198 Anna Katharina Schmitt: Entwicklung und Evaluation einer Chemielehrerfortbildung zum Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung  
ISBN 978-3-8325-4228-3 39.50 EUR
- 199 Christian Maurer: Strukturierung von Lehr-Lern-Sequenzen  
ISBN 978-3-8325-4247-4 36.50 EUR
- 200 Helmut Fischler, Elke Sumfleth (Hrsg.): Professionelle Kompetenz von Lehrkräften der Chemie und Physik  
ISBN 978-3-8325-4523-9 34.00 EUR
- 201 Simon Zander: Lehrerfortbildung zu Basismodellen und Zusammenhänge zum Fachwissen  
ISBN 978-3-8325-4248-1 35.00 EUR
- 202 Kerstin Arndt: Experimentierkompetenz erfassen.  
*Analyse von Prozessen und Mustern am Beispiel von Lehramtsstudierenden der Chemie*  
ISBN 978-3-8325-4266-5 45.00 EUR
- 203 Christian Lang: Kompetenzorientierung im Rahmen experimentalchemischer Praktika  
ISBN 978-3-8325-4268-9 42.50 EUR
- 204 Eva Cauet: Testen wir relevantes Wissen? *Zusammenhang zwischen dem Professionswissen von Physiklehrkräften und gutem und erfolgreichem Unterrichten*  
ISBN 978-3-8325-4276-4 39.50 EUR
- 205 Patrick Löffler: Modellanwendung in Problemlöseaufgaben. *Wie wirkt Kontext?*  
ISBN 978-3-8325-4303-7 35.00 EUR

- 206 Carina Gehlen: Kompetenzstruktur naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung im Fach Chemie  
ISBN 978-3-8325-4318-1 43.00 EUR
- 207 Lars Oettinghaus: Lehrerüberzeugungen und physikbezogenes Professionswissen.  
*Vergleich von Absolventinnen und Absolventen verschiedener Ausbildungswege im Physikreferendariat*  
ISBN 978-3-8325-4319-8 38.50 EUR
- 208 Jennifer Petersen: Zum Einfluss des Merkmals Humor auf die Gesundheitsförderung im Chemieunterricht der Sekundarstufe I.  
*Eine Interventionsstudie zum Thema Sonnenschutz*  
ISBN 978-3-8325-4348-8 40.00 EUR
- 209 Philipp Straube: Modellierung und Erfassung von Kompetenzen naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung bei (Lehramts-) Studierenden im Fach Physik  
ISBN 978-3-8325-4351-8 35.50 EUR
- 210 Martin Dickmann: Messung von Experimentierfähigkeiten. *Validierungsstudien zur Qualität eines computerbasierten Testverfahrens*  
ISBN 978-3-8325-4356-3 41.00 EUR
- 211 Markus Bohlmann: Science Education. Empirie, Kulturen und Mechanismen der Didaktik der Naturwissenschaften  
ISBN 978-3-8325-4377-8 44.00 EUR
- 212 Martin Draude: Die Kompetenz von Physiklehrkräften, Schwierigkeiten von Schülerninnen und Schülern beim eigenständigen Experimentieren zu diagnostizieren  
ISBN 978-3-8325-4382-2 37.50 EUR
- 213 Henning Rode: Prototypen evidenzbasierten Physikunterrichts. *Zwei empirische Studien zum Einsatz von Feedback und Blackboxes in der Sekundarstufe*  
ISBN 978-3-8325-4389-1 42.00 EUR
- 214 Jan-Henrik Kechel: Schülerschwierigkeiten beim eigenständigen Experimentieren.  
*Eine qualitative Studie am Beispiel einer Experimentieraufgabe zum Hooke'schen Gesetz*  
ISBN 978-3-8325-4392-1 55.00 EUR
- 215 Katharina Fricke: Classroom Management and its Impact on Lesson Outcomes in Physics. *A multi-perspective comparison of teaching practices in primary and secondary schools*  
ISBN 978-3-8325-4394-5 40.00 EUR
- 216 Hannes Sander: Orientierungen von Jugendlichen beim Urteilen und Entscheiden in Kontexten nachhaltiger Entwicklung. *Eine rekonstruktive Perspektive auf Bewertungskompetenz in der Didaktik der Naturwissenschaft*  
ISBN 978-3-8325-4434-8 46.00 EUR
- 217 Inka Haak: Maßnahmen zur Unterstützung kognitiver und metakognitiver Prozesse in der Studieneingangsphase. *Eine Design-Based-Research-Studie zum universitären Lernzentrum Physiktreff*  
ISBN 978-3-8325-4437-9 46.50 EUR

- 218 Martina Brandenburger: Was beeinflusst den Erfolg beim Problemlösen in der Physik?  
*Eine Untersuchung mit Studierenden*  
ISBN 978-3-8325-4409-6 42.50 EUR
- 219 Corinna Helms: Entwicklung und Evaluation eines Trainings zur Verbesserung der Erklärqualität von Schülerinnen und Schülern im Gruppenpuzzle  
ISBN 978-3-8325-4454-6 42.50 EUR
- 220 Viktoria Rath: Diagnostische Kompetenz von angehenden Physiklehrkräften. *Modellierung, Testinstrumentenentwicklung und Erhebung der Performanz bei der Diagnose von Schülervorstellungen in der Mechanik*  
ISBN 978-3-8325-4456-0 42.50 EUR
- 221 Janne Krüger: Schülerperspektiven auf die zeitliche Entwicklung der Naturwissenschaften  
ISBN 978-3-8325-4457-7 45.50 EUR
- 222 Stefan Mutke: Das Professionswissen von Chemiereferendarinnen und -referendaren in Nordrhein-Westfalen. *Eine Längsschnittstudie*  
ISBN 978-3-8325-4458-4 37.50 EUR
- 223 Sebastian Habig: Systematisch variierte Kontextaufgaben und ihr Einfluss auf kognitive und affektive Schülerfaktoren  
ISBN 978-3-8325-4467-6 40.50 EUR
- 224 Sven Liepertz: Zusammenhang zwischen dem Professionswissen von Physiklehrkräften, dem sachstrukturellen Angebot des Unterrichts und der Schülerleistung  
ISBN 978-3-8325-4480-5 34.00 EUR
- 225 Elina Platova: Optimierung eines Laborpraktikums durch kognitive Aktivierung  
ISBN 978-3-8325-4481-2 39.00 EUR
- 226 Tim Reschke: Lesegeschichten im Chemieunterricht der Sekundarstufe I zur Unterstützung von situationalem Interesse und Lernerfolg  
ISBN 978-3-8325-4487-4 41.00 EUR
- 227 Lena Mareike Walper: Entwicklung der physikbezogenen Interessen und selbstbezogenen Kognitionen von Schülerinnen und Schülern in der Übergangsphase von der Primar- in die Sekundarstufe. *Eine Längsschnittanalyse vom vierten bis zum siebten Schuljahr*  
ISBN 978-3-8325-4495-9 43.00 EUR
- 228 Stefan Anthofer: Förderung des fachspezifischen Professionswissens von Chemielehramtsstudierenden  
ISBN 978-3-8325-4498-0 39.50 EUR
- 229 Marcel Bullinger: Handlungsorientiertes Physiklernen mit instruierten Selbsterklärungen in der Primarstufe. *Eine experimentelle Laborstudie*  
ISBN 978-3-8325-4504-8 44.00 EUR
- 230 Thomas Amenda: Bedeutung fachlicher Elementarisierungen für das Verständnis der Kinematik  
ISBN 978-3-8325-4531-4 43.50 EUR

- 231 Sabrina Milke: Beeinflusst *Priming* das Physiklernen?  
*Eine empirische Studie zum Dritten Newtonschen Axiom*  
ISBN 978-3-8325-4549-4 42.00 EUR
- 232 Corinna Erfmann: Ein anschaulicher Weg zum Verständnis der elektromagnetischen Induktion. *Evaluation eines Unterrichtsvorschlags und Validierung eines Leistungsdiagnoseinstruments*  
ISBN 978-3-8325-4550-5 49.50 EUR
- 233 Hanne Rautenstrauch: Erhebung des (Fach-)Sprachstandes bei Lehramtsstudierenden im Kontext des Faches Chemie  
ISBN 978-3-8325-4556-7 40.50 EUR
- 234 Tobias Klug: Wirkung kontextorientierter physikalischer Praktikumsversuche auf Lernprozesse von Studierenden der Medizin  
ISBN 978-3-8325-4558-1 37.00 EUR
- 235 Mareike Bohrmann: Zur Förderung des Verständnisses der Variablenkontrolle im naturwissenschaftlichen Sachunterricht  
ISBN 978-3-8325-4559-8 52.00 EUR
- 236 Anja Schödl: FALKO-Physik – Fachspezifische Lehrerkompetenzen im Fach Physik.  
*Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zur Erfassung des fachspezifischen Professionswissens von Physiklehrkräften*  
ISBN 978-3-8325-4553-6 40.50 EUR
- 237 Hilda Scheuermann: Entwicklung und Evaluation von Unterstützungsmaßnahmen zur Förderung der Variablenkontrollstrategie beim Planen von Experimenten  
ISBN 978-3-8325-4568-0 39.00 EUR
- 238 Christian G. Strippel: Naturwissenschaftliche Erkenntnisgewinnung an chemischen Inhalten vermitteln. *Konzeption und empirische Untersuchung einer Ausstellung mit Experimentierstation*  
ISBN 978-3-8325-4577-2 41.50 EUR
- 239 Sarah Rau: Durchführung von Sachunterricht im Vorbereitungsdienst. *Eine längsschnittliche, videobasierte Unterrichtsanalyse*  
ISBN 978-3-8325-4579-6 46.00 EUR
- 240 Thomas Plotz: Lernprozesse zu nicht-sichtbarer Strahlung. *Empirische Untersuchungen in der Sekundarstufe 2*  
ISBN 978-3-8325-4624-3 39.50 EUR
- 241 Wolfgang Aschauer: Elektrische und magnetische Felder. *Eine empirische Studie zu Lernprozessen in der Sekundarstufe II*  
ISBN 978-3-8325-4625-0 50.00 EUR
- 242 Anna Donhauser: Didaktisch rekonstruierte Materialwissenschaft. *Aufbau und Konzeption eines Schülerlabors für den Exzellenzcluster Engineering of Advanced Materials*  
ISBN 978-3-8325-4636-6 39.00 EUR

- 243 Katrin Schüßler: Lernen mit Lösungsbeispielen im Chemieunterricht. *Einflüsse auf Lernerfolg, kognitive Belastung und Motivation*  
ISBN 978-3-8325-4640-3 42.50 EUR
- 244 Timo Fleischer: Untersuchung der chemischen Fachsprache unter besonderer Berücksichtigung chemischer Repräsentationen  
ISBN 978-3-8325-4642-7 46.50 EUR
- 245 Rosina Steininger: Concept Cartoons als Stimuli für Kleingruppendiskussionen im Chemieunterricht. *Beschreibung und Analyse einer komplexen Lerngelegenheit*  
ISBN 978-3-8325-4647-2 39.00 EUR
- 246 Daniel Rehfeldt: Erfassung der Lehrqualität naturwissenschaftlicher Experimentalpraktika  
ISBN 978-3-8325-4590-1 40.00 EUR
- 247 Sandra Puddu: Implementing Inquiry-based Learning in a Diverse Classroom: Investigating Strategies of Scaffolding and Students' Views of Scientific Inquiry  
ISBN 978-3-8325-4591-8 35.50 EUR
- 248 Markus Bliersbach: Kreativität in der Chemie. *Erhebung und Förderung der Vorstellungen von Chemielehramtsstudierenden*  
ISBN 978-3-8325-4593-2 44.00 EUR
- 249 Lennart Kimpel: Aufgaben in der Allgemeinen Chemie. *Zum Zusammenspiel von chemischem Verständnis und Rechenfähigkeit*  
ISBN 978-3-8325-4618-2 36.00 EUR
- 250 Louise Bindel: Effects of integrated learning: explicating a mathematical concept in inquiry-based science camps  
ISBN 978-3-8325-4655-7 37.50 EUR
- 251 Michael Wenzel: Computereinsatz in Schule und Schülerlabor. *Einstellung von Physiklehrkräften zu Neuen Medien*  
ISBN 978-3-8325-4659-5 38.50 EUR
- 252 Laura Muth: Einfluss der Auswertephase von Experimenten im Physikunterricht. *Ergebnisse einer Interventionsstudie zum Zuwachs von Fachwissen und experimenteller Kompetenz von Schülerinnen und Schülern*  
ISBN 978-3-8325-4675-5 36.50 EUR
- 253 Annika Fricke: Interaktive Skripte im Physikalischen Praktikum. *Entwicklung und Evaluation von Hypermedien für die Nebenfachausbildung*  
ISBN 978-3-8325-4676-2 41.00 EUR
- 254 Julia Haase: Selbstbestimmtes Lernen im naturwissenschaftlichen Sachunterricht. *Eine empirische Interventionsstudie mit Fokus auf Feedback und Kompetenzerleben*  
ISBN 978-3-8325-4685-4 38.50 EUR
- 255 Antje J. Heine: Was ist Theoretische Physik? *Eine wissenschaftstheoretische Betrachtung und Rekonstruktion von Vorstellungen von Studierenden und Dozenten über das Wesen der Theoretischen Physik*  
ISBN 978-3-8325-4691-5 46.50 EUR

- 256 Claudia Meinhardt: Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zu Selbstwirksamkeitserwartungen von (angehenden) Physiklehrkräften in physikdidaktischen Handlungsfeldern  
ISBN 978-3-8325-4712-7 47.00 EUR
- 257 Ann-Kathrin Schlüter: Professionalisierung angehender Chemielehrkräfte für einen Gemeinsamen Unterricht  
ISBN 978-3-8325-4713-4 53.50 EUR
- 258 Stefan Richtberg: Elektronenbahnen in Feldern. Konzeption und Evaluation einer webbasierten Lernumgebung  
ISBN 978-3-8325-4723-3 49.00 EUR
- 259 Jan-Philipp Burde: Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells  
ISBN 978-3-8325-4726-4 57.50 EUR
- 260 Frank Finkenberg: Flipped Classroom im Physikunterricht  
ISBN 978-3-8325-4737-4 42.50 EUR
- 261 Florian Treisch: Die Entwicklung der Professionellen Unterrichtswahrnehmung im Lehr-Lern-Labor Seminar  
ISBN 978-3-8325-4741-4 41.50 EUR
- 262 Desiree Mayr: Strukturiertheit des experimentellen naturwissenschaftlichen Problemlöseprozesses  
ISBN 978-3-8325-4757-8 37.00 EUR
- 263 Katrin Weber: Entwicklung und Validierung einer Learning Progression für das Konzept der chemischen Reaktion in der Sekundarstufe I  
ISBN 978-3-8325-4762-2 48.50 EUR
- 264 Hauke Bartels: Entwicklung und Bewertung eines performanznahen Videovignetten- tests zur Messung der Erklärfähigkeit von Physiklehrkräften  
ISBN 978-3-8325-4804-9 37.00 EUR
- 265 Karl Marniok: Zum Wesen von Theorien und Gesetzen in der Chemie. *Begriffsanalyse und Förderung der Vorstellungen von Lehramtsstudierenden*  
ISBN 978-3-8325-4805-6 42.00 EUR
- 266 Marisa Holzapfel: Fachspezifischer Humor als Methode in der Gesundheitsbildung im Übergang von der Primarstufe zur Sekundarstufe I  
ISBN 978-3-8325-4808-7 50.00 EUR
- 267 Anna Stolz: Die Auswirkungen von Experimentiersituationen mit unterschiedlichem Öffnungsgrad auf Leistung und Motivation der Schülerinnen und Schüler  
ISBN 978-3-8325-4781-3 38.00 EUR
- 268 Nina Ulrich: Interaktive Lernaufgaben in dem digitalen Schulbuch eChemBook. *Einfluss des Interaktivitätsgrads der Lernaufgaben und des Vorwissens der Lernenden auf den Lernerfolg*  
ISBN 978-3-8325-4814-8 43.50 EUR

- 269 Kim-Alessandro Weber: Quantenoptik in der Lehrerfortbildung. *Ein bedarfsgeprägtes Fortbildungskonzept zum Quantenobjekt „Photon“ mit Realexperimenten*  
ISBN 978-3-8325-4792-9 55.00 EUR
- 270 Nina Skorsetz: Empathisierer und Systematisierer im Vorschulalter. *Eine Fragebogen- und Videostudie zur Motivation, sich mit Naturphänomenen zu beschäftigen*  
ISBN 978-3-8325-4825-4 43.50 EUR
- 271 Franziska Kehne: Analyse des Transfers von kontextualisiert erworbenem Wissen im Fach Chemie  
ISBN 978-3-8325-4846-9 45.00 EUR
- 272 Markus Elsholz: Das akademische Selbstkonzept angehender Physiklehrkräfte als Teil ihrer professionellen Identität. *Dimensionalität und Veränderung während einer zentralen Praxisphase*  
ISBN 978-3-8325-4857-5 37.50 EUR
- 273 Joachim Müller: Studienerfolg in der Physik. *Zusammenhang zwischen Modellierungskompetenz und Studienerfolg*  
ISBN 978-3-8325-4859-9 35.00 EUR
- 274 Jennifer Dörschelln: Organische Leuchtdioden. *Implementation eines innovativen Themas in den Chemieunterricht*  
ISBN 978-3-8325-4865-0 59.00 EUR
- 275 Stephanie Strelow: Beliefs von Studienanfängern des Kombi-Bachelors Physik über die Natur der Naturwissenschaften  
ISBN 978-3-8325-4881-0 40.50 EUR
- 276 Dennis Jaeger: Kognitive Belastung und aufgabenspezifische sowie personenspezifische Einflussfaktoren beim Lösen von Physikaufgaben  
ISBN 978-3-8325-4928-2 50.50 EUR
- 277 Vanessa Fischer: Der Einfluss von Interesse und Motivation auf die Messung von Fach- und Bewertungskompetenz im Fach Chemie  
ISBN 978-3-8325-4933-6 39.00 EUR
- 278 René Dohrmann: Professionsbezogene Wirkungen einer Lehr-Lern-Labor-Veranstaltung. *Eine multimethodische Studie zu den professionsbezogenen Wirkungen einer Lehr-Lern-Labor-Blockveranstaltung auf Studierende der Bachelorstudiengänge Lehramt Physik und Grundschulpädagogik (Sachunterricht)*  
ISBN 978-3-8325-4958-9 40.00 EUR
- 279 Meike Bergs: Can We Make Them Use These Strategies? *Fostering Inquiry-Based Science Learning Skills with Physical and Virtual Experimentation Environments*  
ISBN 978-3-8325-4962-6 39.50 EUR
- 280 Marie-Therese Hauerstein: Untersuchung zur Effektivität von Strukturierung und Binendifferenzierung im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Evaluation der Strukturierungshilfe Lernleiter*  
ISBN 978-3-8325-4982-4 42.50 EUR

- 281 Verena Zucker: Erkennen und Beschreiben von formativem Assessment im naturwissenschaftlichen Grundschulunterricht. *Entwicklung eines Instruments zur Erfassung von Teilsfähigkeiten der professionellen Wahrnehmung von Lehramtsstudierenden*  
ISBN 978-3-8325-4991-6 38.00 EUR
- 282 Victoria Telser: Erfassung und Förderung experimenteller Kompetenz von Lehrkräften im Fach Chemie  
ISBN 978-3-8325-4996-1 50.50 EUR
- 283 Kristine Tschirschky: Entwicklung und Evaluation eines gedächtnisorientierten Aufgabendesigns für Physikaufgaben  
ISBN 978-3-8325-5002-8 42.50 EUR
- 284 Thomas Elert: Course Success in the Undergraduate General Chemistry Lab  
ISBN 978-3-8325-5004-2 41.50 EUR
- 285 Britta Kalthoff: Explizit oder implizit? *Untersuchung der Lernwirksamkeit verschiedener fachmethodischer Instruktionen im Hinblick auf fachmethodische und fachinhaltliche Fähigkeiten von Sachunterrichtsstudierenden*  
ISBN 978-3-8325-5013-4 37.50 EUR
- 286 Thomas Dickmann: Visuelles Modellverständnis und Studienerfolg in der Chemie. *Zwei Seiten einer Medaille*  
ISBN 978-3-8325-5016-5 44.00 EUR
- 287 Markus Sebastian Feser: Physiklehrkräfte korrigieren Schülertexte. *Eine Explorationsstudie zur fachlich-konzeptuellen und sprachlichen Leistungsfeststellung und -beurteilung im Physikunterricht*  
ISBN 978-3-8325-5020-2 49.00 EUR
- 288 Matylda Dudzinska: Lernen mit Beispielaufgaben und Feedback im Physikunterricht der Sekundarstufe 1. *Energieerhaltung zur Lösung von Aufgaben nutzen*  
ISBN 978-3-8325-5025-7 47.00 EUR
- 289 Ines Sonnenschein: Naturwissenschaftliche Denk- und Arbeitsprozesse Studierender im Labor  
ISBN 978-3-8325-5033-2 52.00 EUR
- 290 Florian Simon: Der Einfluss von Betreuung und Betreuenden auf die Wirksamkeit von Schülerlaborbesuchen. *Eine Zusammenhangsanalyse von Betreuungsqualität, Betreuermerkmalen und Schülerlaborzielen sowie Replikationsstudie zur Wirksamkeit von Schülerlaborbesuchen*  
ISBN 978-3-8325-5036-3 49.50 EUR
- 291 Marie-Annette Geyer: Physikalisch-mathematische Darstellungswechsel funktionaler Zusammenhänge. *Das Vorgehen von SchülerInnen der Sekundarstufe 1 und ihre Schwierigkeiten*  
ISBN 978-3-8325-5047-9 46.50 EUR
- 292 Susanne Digel: Messung von Modellierungskompetenz in Physik. *Theoretische Herleitung und empirische Prüfung eines Kompetenzmodells physikspezifischer Modellierungskompetenz*  
ISBN 978-3-8325-5055-4 41.00 EUR

- 293 Sönke Janssen: Angebots-Nutzungs-Prozesse eines Schülerlabors analysieren und gestalten. *Ein design-based research Projekt*  
ISBN 978-3-8325-5065-3 57.50 EUR
- 294 Knut Wille: Der Productive Failure Ansatz als Beitrag zur Weiterentwicklung der Aufgabenkultur  
ISBN 978-3-8325-5074-5 49.00 EUR
- 295 Lisanne Kraeva: Problemlösestrategien von Schülerinnen und Schülern diagnostizieren  
ISBN 978-3-8325-5110-0 59.50 EUR
- 296 Jenny Lorentzen: Entwicklung und Evaluation eines Lernangebots im Lehramtsstudium Chemie zur Förderung von Vernetzungen innerhalb des fachbezogenen Professionswissens  
ISBN 978-3-8325-5120-9 39.50 EUR
- 297 Micha Winkelmann: Lernprozesse in einem Schülerlabor unter Berücksichtigung individueller naturwissenschaftlicher Interessenstrukturen  
ISBN 978-3-8325-5147-6 48.50 EUR
- 298 Carina Wöhlke: Entwicklung und Validierung eines Instruments zur Erfassung der professionellen Unterrichtswahrnehmung angehender Physiklehrkräfte  
ISBN 978-3-8325-5149-0 43.00 EUR
- 299 Thomas Schubatzky: Das Amalgam Anfangs-Elektrizitätslehreunterricht. *Eine multiperspektivische Betrachtung in Deutschland und Österreich*  
ISBN 978-3-8325-5159-9 50.50 EUR
- 300 Amany Annaggar: A Design Framework for Video Game-Based Gamification Elements to Assess Problem-solving Competence in Chemistry Education  
ISBN 978-3-8325-5150-6 52.00 EUR
- 301 Alexander Engl: CHEMIE PUR – Unterrichten in der Natur: *Entwicklung und Evaluation eines kontextorientierten Unterrichtskonzepts im Bereich Outdoor Education zur Änderung der Einstellung zu „Chemie und Natur“*  
ISBN 978-3-8325-5174-2 59.00 EUR
- 302 Christin Marie Sajons: Kognitive und motivationale Dynamik in Schülerlaboren. *Kontextualisierung, Problemorientierung und Autonomieunterstützung der didaktischen Struktur analysieren und weiterentwickeln*  
ISBN 978-3-8325-5155-1 56.00 EUR
- 303 Philipp Bitzenbauer: Quantenoptik an Schulen. *Studie im Mixed-Methods Design zur Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik*  
ISBN 978-3-8325-5123-0 59.00 EUR
- 304 Malte S. Ubben: Typisierung des Verständnisses mentaler Modelle mittels empirischer Datenerhebung am Beispiel der Quantenphysik  
ISBN 978-3-8325-5181-0 43.50 EUR
- 305 Wiebke Kuske-Janßen: Sprachlicher Umgang mit Formeln von LehrerInnen im Physikunterricht am Beispiel des elektrischen Widerstandes in Klassenstufe 8  
ISBN 978-3-8325-5183-4 47.50 EUR

- 306 Kai Bliesmer: Physik der Küste für außerschulische Lernorte. *Eine Didaktische Rekonstruktion*  
ISBN 978-3-8325-5190-2 58.00 EUR
- 307 Nikola Schild: Eignung von domänenspezifischen Studieneingangsvariablen als Prädiktoren für Studienerfolg im Fach und Lehramt Physik  
ISBN 978-3-8325-5226-8 42.00 EUR
- 308 Daniel Averbeck: Zum Studienerfolg in der Studieneingangsphase des Chemiestudiums. *Der Einfluss kognitiver und affektiv-motivationaler Variablen*  
ISBN 978-3-8325-5227-5 51.00 EUR
- 309 Martina Strübe: Modelle und Experimente im Chemieunterricht. *Eine Videostudie zum fachspezifischen Lehrerwissen und -handeln*  
ISBN 978-3-8325-5245-9 45.50 EUR
- 310 Wolfgang Becker: Auswirkungen unterschiedlicher experimenteller Repräsentationen auf den Kenntnisstand bei Grundschulkindern  
ISBN 978-3-8325-5255-8 50.00 EUR
- 311 Marvin Rost: Modelle als Mittel der Erkenntnisgewinnung im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Entwicklung und quantitative Dimensionalitätsanalyse eines Testinstruments aus epistemologischer Perspektive*  
ISBN 978-3-8325-5256-5 44.00 EUR
- 312 Christina Kobl: Förderung und Erfassung der Reflexionskompetenz im Fach Chemie  
ISBN 978-3-8325-5259-6 41.00 EUR
- 313 Ann-Kathrin Beretz: Diagnostische Prozesse von Studierenden des Lehramts – *eine Videostudie in den Fächern Physik und Mathematik*  
ISBN 978-3-8325-5288-6 45.00 EUR
- 314 Judith Breuer: Implementierung fachdidaktischer Innovationen durch das Angebot materialgestützter Unterrichtskonzeptionen. *Fallanalysen zum Nutzungsverhalten von Lehrkräften am Beispiel des Münchener Lehrgangs zur Quantenmechanik*  
ISBN 978-3-8325-5293-0 50.50 EUR
- 315 Michaela Oettle: Modellierung des Fachwissens von Lehrkräften in der Teilchenphysik. *Eine Delphi-Studie*  
ISBN 978-3-8325-5305-0 57.50 EUR
- 316 Volker Brüggemann: Entwicklung und Pilotierung eines adaptiven Multistage-Tests zur Kompetenzerfassung im Bereich naturwissenschaftlichen Denkens  
ISBN 978-3-8325-5331-9 40.00 EUR
- 317 Stefan Müller: Die Vorläufigkeit und soziokulturelle Eingebundenheit naturwissenschaftlicher Erkenntnisse. *Kritische Reflexion, empirische Befunde und fachdidaktische Konsequenzen für die Chemielehrer\*innenbildung*  
ISBN 978-3-8325-5343-2 63.00 EUR
- 318 Laurence Müller: Alltagsentscheidungen für den Chemieunterricht erkennen und Entscheidungsprozesse explorativ begleiten  
ISBN 978-3-8325-5379-1 59.00 EUR

- 319 Lars Ehlert: Entwicklung und Evaluation einer Lehrkräftefortbildung zur Planung von selbstgesteuerten Experimenten  
ISBN 978-3-8325-5393-71 41.50 EUR
- 320 Florian Seiler: Entwicklung und Evaluation eines Seminarkonzepts zur Förderung der experimentellen Planungskompetenz von Lehramtsstudierenden im Fach Chemie  
ISBN 978-3-8325-5397-5 47.50 EUR
- 321 Nadine Boele: Entwicklung eines Messinstruments zur Erfassung der professionellen Unterrichtswahrnehmung von (angehenden) Chemielehrkräften hinsichtlich der Lernunterstützung  
ISBN 978-3-8325-5402-6 46.50 EUR
- 322 Franziska Zimmermann: Entwicklung und Evaluation digitalisierungsbezogener Kompetenzen von angehenden Chemielehrkräften  
ISBN 978-3-8325-5410-1 49.50 EUR
- 323 Lars-Frederik Weiß: Der Flipped Classroom in der Physik-Lehre. *Empirische Untersuchungen in Schule und Hochschule*  
ISBN 978-3-8325-5418-7 51.00 EUR
- 324 Tilmann Steinmetz: Kumulatives Lehren und Lernen im Lehramtsstudium Physik. *Theorie und Evaluation eines Lehrkonzepts*  
ISBN 978-3-8325-5421-7 51.00 EUR
- 325 Kübra Nur Celik: Entwicklung von chemischem Fachwissen in der Sekundarstufe I. *Validierung einer Learning Progression für die Basiskonzepte „Struktur der Materie“, „Chemische Reaktion“ und „Energie“ im Kompetenzbereich „Umgang mit Fachwissen“*  
ISBN 978-3-8325-5431-6 55.00 EUR
- 326 Matthias Unger: Förderung des Verständnisses von Nature of Science und der experimentellen Kompetenz im Schüler\*innen-Labor Physik in Abgrenzung zum Regelunterricht  
ISBN 978-3-8325-5442-2 55.50 EUR
- 327 Christoph Hoyer: Multimedial unterstütztes Experimentieren im webbasierten Labor zur Messung, Visualisierung und Analyse des Feldes eines Permanentmagneten  
ISBN 978-3-8325-5453-8 45.00 EUR
- 328 Tobias Schüttler: Schülerlabore als interessefördernde authentische Lernorte für den naturwissenschaftlichen Unterricht nutzen  
ISBN 978-3-8325-5454-5 50.50 EUR
- 329 Christopher Kurth: Die Kompetenz von Studierenden, Schülerschwierigkeiten beim eigenständigen Experimentieren zu diagnostizieren  
ISBN 978-3-8325-5457-6 58.50 EUR
- 330 Dagmar Michna: Inklusiver Anfangsunterricht Chemie *Entwicklung und Evaluation einer Unterrichtseinheit zur Einführung der chemischen Reaktion*  
ISBN 978-3-8325-5463-7 49.50 EUR
- 331 Marco Seiter: Die Bedeutung der Elementarisierung für den Erfolg von Mechanikunterricht in der Sekundarstufe I  
ISBN 978-3-8325-5471-2 66.00 EUR

- 332 Jörn Hägele: Kompetenzaufbau zum experimentbezogenen Denken und Arbeiten. *Videobasierte Analysen zu Aktivitäten und Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern der gymnasialen Oberstufe bei der Bearbeitung von fachmethodischer Instruktion*  
ISBN 978-3-8325-5476-7 56.50 EUR
- 333 Erik Heine: Wissenschaftliche Kontroversen im Physikunterricht. *Explorationsstudie zum Umgang von Physiklehrkräften und Physiklehramtsstudierenden mit einer wissenschaftlichen Kontroverse am Beispiel der Masse in der Speziellen Relativitätstheorie*  
ISBN 978-3-8325-5478-1 48.50 EUR
- 334 Simon Goertz: Module und Lernzirkel der Plattform FLEXKom zur Förderung experimenteller Kompetenzen in der Schulpraxis *Verlauf und Ergebnisse einer Design-Based Research Studie*  
ISBN 978-3-8325-5494-1 66.50 EUR
- 335 Christina Toschka: Lernen mit Modellexperimenten *Empirische Untersuchung der Wahrnehmung und des Denkens in Analogien beim Umgang mit Modellexperimenten*  
ISBN 978-3-8325-5495-8 50.00 EUR
- 336 Alina Behrendt: Chemiebezogene Kompetenzen in der Übergangsphase zwischen dem Sachunterricht der Primarstufe und dem Chemieunterricht der Sekundarstufe I  
ISBN 978-3-8325-5498-9 40.50 EUR
- 337 Manuel Daiber: Entwicklung eines Lehrkonzepts für eine elementare Quantenmechanik *Formuliert mit In-Out Symbolen*  
ISBN 978-3-8325-5507-8 48.50 EUR
- 338 Felix Pawlak: Das Gemeinsame Experimentieren (an-)leiten *Eine qualitative Studie zum chemiespezifischen Classroom-Management*  
ISBN 978-3-8325-5508-5 46.50 EUR
- 339 Liza Dopatka: Konzeption und Evaluation eines kontextstrukturierten Unterrichtskonzeptes für den Anfangs-Elektrizitätslehreunterricht  
ISBN 978-3-8325-5514-6 69.50 EUR
- 340 Arne Bewersdorff: Untersuchung der Effektivität zweier Fortbildungsformate zum Experimentieren mit dem Fokus auf das Unterrichtshandeln  
ISBN 978-3-8325-5522-1 39.00 EUR
- 341 Thomas Christoph Münster: Wie diagnostizieren Studierende des Lehramtes physikbezogene Lernprozesse von Schüler\*innen? Eine Videostudie zur Mechanik  
ISBN 978-3-8325-5534-4 44.50 EUR
- 342 Ines Komor: Förderung des symbolisch-mathematischen Modellverständnisses in der Physikalischen Chemie  
ISBN 978-3-8325-5546-7 46.50 EUR
- 343 Verena Petermann: Überzeugungen von Lehrkräften zum Lehren und Lernen von Fachinhalten und Fachmethoden und deren Beziehung zu unterrichtsnahem Handeln  
ISBN 978-3-8325-5545-0 47.00 EUR

- 344 Jana Heinze: Einfluss der sprachlichen Konzeption auf die Einschätzung der Qualität instruktionaler Unterrichtserklärungen im Fach Physik  
ISBN 978-3-8325-5545-0 47.00 EUR
- 345 Jannis Weber: Mathematische Modellbildung und Videoanalyse zum Lernen der Newtonschen Dynamik im Vergleich  
ISBN 978-3-8325-5566-5 68.00 EUR
- 346 Fabian Sterzing: Zur Lernwirksamkeit von Erklärvideos in der Physik *Eine Untersuchung in Abhängigkeit von ihrer fachdidaktischen Qualität und ihrem Einbettungsformat*  
ISBN 978-3-8325-5576-4 52.00 EUR
- 347 Lars Greitemann: Wirkung des Tablet-Einsatzes im Chemieunterricht der Sekundarstufe I unter besonderer Berücksichtigung von Wissensvermittlung und Wissenssicherung  
ISBN 978-3-8325-5580-1 50.00 EUR
- 348 Fabian Poensgen: Diagnose experimenteller Kompetenzen in der laborpraktischen Chemielehrer\*innenbildung  
ISBN 978-3-8325-5587-0 48.00 EUR
- 349 William Lindlahr: Virtual-Reality-Experimente *Entwicklung und Evaluation eines Konzepts für den forschend-entwickelnden Physikunterricht mit digitalen Medien*  
ISBN 978-3-8325-5595-5 49.00 EUR
- 350 Bert Schlüter: Teilnahmemotivation und situationales Interesse von Kindern und Eltern im experimentellen Lernsetting KEMIE  
ISBN 978-3-8325-5598-6 43.00 EUR
- 351 Katharina Nave: Charakterisierung situativer mentaler Modellkomponenten in der Chemie und die Bildung von Hypothesen *Eine qualitative Studie zur Operationalisierung mentaler Modell-komponenten für den Fachbereich Chemie*  
ISBN 978-3-8325-5599-3 43.00 EUR

Alle erschienenen Bücher können unter der angegebenen ISBN direkt online (<http://www.logos-verlag.de>) oder per Fax (030 - 42 85 10 92) beim Logos Verlag Berlin bestellt werden.



# Studien zum Physik- und Chemielernen

Herausgegeben von Martin Hopf, Hans Niedderer, Mathias Ropohl und Elke Sumfleth

Die Reihe umfasst inzwischen eine große Zahl von wissenschaftlichen Arbeiten aus vielen Arbeitsgruppen der Physik- und Chemiedidaktik und zeichnet damit ein gültiges Bild der empirischen physik- und chemiedidaktischen Forschung im deutschsprachigen Raum.

Die Herausgeber laden daher Interessenten zu neuen Beiträgen ein und bitten sie, sich im Bedarfsfall an den Logos-Verlag oder an ein Mitglied des Herausgeberteams zu wenden.

## Kontaktadressen:

**Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf**  
Universität Wien,  
Österreichisches Kompetenzzentrum  
für Didaktik der Physik,  
Porzellangasse 4, Stiege 2,  
1090 Wien, Österreich,  
Tel. +43-1-4277-60330,  
e-mail: martin.hopf@univie.ac.at

**Prof. Dr. Hans Niedderer**  
Inst. f. Didaktik der Naturwissenschaften,  
Abt. Physikdidaktik,  
FB Physik/ Elektrotechnik,  
Universität Bremen,  
Postfach 33 04 40, 28334 Bremen  
Tel. 0421-218 4695 (Sekretariat),  
e-mail: niedderer@physik.uni-bremen.de

**Prof. Dr. Mathias Ropohl**  
Didaktik der Chemie,  
Fakultät für Chemie,  
Universität Duisburg-Essen,  
Schützenbahn 70, 45127 Essen,  
Tel. 0201-183 2704,  
e-mail: mathias.ropohl@uni-due.de

**Prof. Dr. Elke Sumfleth**  
Didaktik der Chemie,  
Fakultät für Chemie,  
Universität Duisburg-Essen,  
Schützenbahn 70, 45127 Essen  
Tel. 0201-183 3757/3761,  
e-mail: elke.sumfleth@uni-due.de

In der vorliegenden Arbeit wird der Umgang mit Modellexperimenten zur Entwicklung des Verständnisses eines originalen chemischen Sachverhaltes über zugrundeliegende Analogien analysiert.

Ziel der empirischen Studie ist die Untersuchung der Wahrnehmung, des zeitlichen Ablaufs des Prozesses des Denkens in Analogien sowie des Zusammenhangs zwischen Wahrnehmung und Denken in Analogien beim Umgang mit einem Modellexperiment zur Staubexplosion. Die Stichprobe umfasst  $N = 141$  Lernende der 7. Jahrgangsstufe. Die Wahrnehmung wird mittels Eye-Tracking-Technologie erhoben und ausgewertet. Der Prozess des Denkens in Analogien wird mit der Methode des Lauten Denkens erhoben. Die ermittelten audiographierten Laut-Denk-Protokolle werden mittels qualitativer Inhaltsanalyse, Denkgraphen sowie statistischen Tests ausgewertet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Wahrnehmung des Modellexperiments durch die Handlungsschritte während der Durchführung gesteuert wird. Zudem erfahren prägnante Effekte, wie zum Beispiel die Ausbreitung einer Flamme nach der Entzündung, einen erhöhten Grad an Informationsaufnahme. Weiter zeigt sich, dass die Lernenden Analogien bereits im Anfangsunterricht erkennen und nutzen sowie die relevanten Ähnlichkeiten zwischen Modellexperiment und Original über unterschiedliche Denkwege identifizieren können. Darüber hinaus sind Zusammenhänge zwischen der Wahrnehmung und dem Denken in Analogien erkennbar. Die Ergebnisse der Studie geben Hinweise auf Möglichkeiten zur Unterstützung von Lernprozessen mittels Modellexperimenten.

Logos Verlag Berlin

---

ISBN 978-3-8325-5495-8