

## Zusammenfassung

Repräsentationen spielen in den Naturwissenschaften, besonders in der Chemie, eine zentrale Rolle, da sie eine Kommunikation über und eine Erklärung von Phänomenen auf einer nicht erfassbaren Ebene ermöglichen. Sie umfassen beispielsweise Graphen und Diagramme sowie, kennzeichnend für die Chemie, Repräsentationen von Atomen, Molekülen und Ionen, Reaktionsgleichungen und -mechanismen. In Lehr-Lern-Prozessen zeigt sich, dass Repräsentationen eine Herausforderung für Lernende darstellen. Zum einen zeigt sich, dass das Lernen *von* und das Lernen *über* Repräsentationen gleichzeitig stattfindet. Lernende müssen also unbekannte fachliche Inhalte von Repräsentationen lernen, ohne zu verstehen, wie diese Repräsentationen die Inhalte vermitteln. Dieses Problem wird als Repräsentationsdilemma bezeichnet. Um dieses zu überwinden, müssen Lernende Repräsentationskompetenzen entwickeln, wobei die *Interpretation*, *Translation* und *Konstruktion* (Kozma & Russell, 1997, 2005) grundlegende Fähigkeiten zum erfolgreichen Umgang mit Repräsentationen darstellen. Zum anderen sind Repräsentationen in der Chemie häufig sehr abstrakt und räumlich anspruchsvoll. Daher benötigen Lernende zusätzlich ausgeprägte räumliche Fähigkeiten, beispielsweise zwei- und dreidimensionale mentale Rotationsfähigkeiten.

**Forschungsanliegen I** – In Bezug auf die Repräsentationskompetenzen *Interpretation*, *Translation* und *Konstruktion* ist bisher nicht abschließend geklärt, inwieweit sich diese empirisch trennen lassen und sie ein zum Fachwissen distinktes Konstrukt darstellen. Die Beantwortung dieser Fragen ist für die Optimierung repräsentationsbasierter Lehr-Lern-Prozesse von essenzieller Bedeutung. Zur Untersuchung der Forschungsfragen wurde das *Chemical Representation Inventory: Translation, Interpretation, Construction* (CRI:TIC) entwickelt und mittels multidimensionaler Raschanalysen evaluiert. Dieses Instrument wurde von  $N = 185$  Studierenden eines Chemievorkurses im Wintersemester 2023/24 bearbeitet. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die *Interpretation*, *Translation* und *Konstruktion* stark interkorrelierte und, empirisch nicht trennbare Fähigkeiten darstellen, obwohl diese unterschiedliche Anforderungen mit sich bringen. Zusätzlich zum CRI:TIC wurde das deklarative Fachwissen erhoben und durch vergleichbare Methoden die Abgrenzung zu den Repräsentationskompetenzen geprüft. Hier zeigt sich eindeutig, dass die beiden Konstrukte im Rahmen dieser Studie empirisch trennbar sind.

**Forschungsanliegen II** – Zwar liegen bereits Evidenzen zum Zusammenhang einzelner räumlicher Faktoren mit der Leistung in der Chemie und der Bearbeitung repräsentationsbasierter Chemieaufgaben vor, diese Studien berücksichtigen jedoch nicht die Interkorrelation zwischen den räumlichen Faktoren. Neben den Repräsentationskompetenzen (CRI:TIC) und dem deklarativen Fachwissen wurden acht räumliche Faktoren erhoben und der Zusammenhang der Konstrukte mittels einer Pfadanalyse untersucht. Insgesamt nahmen an der Studie  $N = 494$  Studierende dreier Chemie-Vorkurse im Wintersemester 2024/25 teil. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass das Fachwissen den deutlichsten und höchsten Zusammenhang mit den repräsentationsbasierten Chemieaufgaben aufweist. Daneben zeigen sich auch die zwei- und dreidimensionale mentale Rotationsfähigkeit sowie die mentale Manipulationsfähigkeit als relevant für die Bearbeitung dieser Aufgaben. In einer differenzierten Betrachtung für die *Interpretation*, *Translation* und *Konstruktion* zeigt sich, dass sich die Ausprägung der relevanten Faktoren unterscheidet. Somit lässt sich darauf schließen, dass für die *Interpretation*, *Translation* und *Konstruktion* unterschiedliche kognitive Prozesse und Fähigkeiten relevant sind.

**Forschungsanliegen III** – Um die Ergebnisse der ersten beiden Forschungsanliegen zu vertiefen, wurden Hindernisse bei der Bearbeitung repräsentationsbasierter Chemieaufgaben untersucht. Dadurch sollten Rückschlüsse auf die kognitiven Prozesse und Fähigkeiten bei der *Interpretation*, *Translation* und *Konstruktion* möglich werden. Hierzu wurde eine qualitative Studie unter Anwendung der Methode des lauten Denkens mit  $N = 25$  Lehramtsstudierenden des Fachs Chemie durchgeführt. Es zeigt sich, dass das Fachwissen für alle drei Fähigkeiten eine zentrale Rolle spielt, räumliche Fähigkeiten jedoch eher für die *Translation* und *Konstruktion* chemischer Repräsentationen relevant sind.

Das Projekt knüpft an bestehende Forschung zum Lernen und Arbeiten mit Repräsentationen in der Chemie an und trägt zur empirischen Fundierung der Struktur von Repräsentationskompetenzen bei. Zudem ermöglicht es eine differenzierte Abgrenzung dieses Konstrukts vom chemischen Fachwissen, indem die zugrunde liegenden Konstrukte klar und theoriegeleitet operationalisiert werden – ein Aspekt, der in bisherigen Studien häufig unzureichend berücksichtigt worden ist. Darüber hinaus stellt der CRI:TIC ein objektives, valides und reliables Instrument zur Erfassung von Repräsentationskompetenzen bereit. Durch die Identifikation zentraler räumlicher Faktoren und Hindernisse bei der Bearbeitung repräsentationsbasierter Chemieaufgaben leistet das

Projekt einen wichtigen Beitrag zur Erweiterung des aktuellen Forschungsstandards.

Daraus ergeben sich sowohl praxisrelevante Implikationen für die Gestaltung von Lehr-Lern-Prozessen als auch richtungsweisende Perspektiven für künftige Forschungsanliegen. Hinsichtlich der Praxis wird deutlich, dass Repräsentationskompetenzen neben dem chemischen Fachwissen als zentrales Element in den Lehr-Lern-Prozess integriert werden müssen. Räumliche Fähigkeiten spielen dabei eine ebenso wichtige Rolle. Insbesondere räumlich anspruchsvolle Aufgaben sollten gezielt durch das Training räumlicher Faktoren sowie durch zusätzliches Material (z. B. haptische oder virtuelle Modelle) ergänzt werden, um Lernende im Bearbeitungsprozess optimal zu unterstützen. Aus forschungsbezogener Perspektive stellen sich weiterführende Fragen nach der hierarchischen Struktur der Repräsentationskompetenzen, insbesondere im Hinblick auf die Fähigkeiten *Interpretation*, *Translation* und *Konstruktion*. Ebenso gilt es zu untersuchen, inwiefern ein gezieltes Training zwei- und dreidimensionaler mentaler Rotations- sowie Manipulationsfähigkeiten zu einer signifikanten Leistungssteigerung bei der Bearbeitung repräsentationsbasierter Chemieaufgaben führen kann.

# 1

## Einleitung und Problemorientierung

Das Unterrichtsfach Chemie stößt nach wie vor bei vielen Lernenden auf wenig Beliebtheit, ähnlich wie die anderen „harten“ MINT-Fächer Mathematik und Physik – und das sowohl im nationalen (z. B. Jansen et al., 2019; Maaß et al., 2022; SINUS, 2024) als auch im internationalen Kontext (z. B. Mansour, 2024). In verschiedenen Studien wurden von Lernenden vielfältige Gründe hierfür genannt. So wird Chemie häufig als ein komplexes und herausforderndes Fach beschrieben, dessen Inhalte als abstrakt, wenig lebensweltbezogen und mitunter als langweilig gelten. Zudem wurde ein Mangel an Vorstellungsvermögen in Bezug auf chemische Konzepte genannt (Cardellini, 2012; Mansour, 2024). Chemie befasst sich mit der Erklärung beobachtbarer Phänomene auf einer submikroskopischen Ebene, die der direkten Wahrnehmung nicht zugänglich ist und daher durch externe Repräsentationen vermittelt werden muss. Wu und Shah (2004) bezeichnen Chemie daher als „visual science“ (S. 465), was Bucat und Mocerino (2009) treffend ergänzen mit der Charakterisierung der submikroskopischen Ebene als „[...] unobservable world, accessible only by imagination“ (S. 12). Aus dieser Perspektive erscheinen die von Lernenden genannten Schwierigkeiten nachvollziehbar und erklärbar.

Die submikroskopische Ebene wird durch Repräsentationen epistemologisch zugänglich gemacht, weshalb die Chemie durch eine hohe Dichte und Vielfalt unterschiedlicher Repräsentationen geprägt ist. Lernende sind daher darauf angewiesen, spezifische Fähigkeiten im Umgang mit diesen zu entwickeln – sogenannte Repräsentationskompetenzen. Diese befähigen sie, Informationen aus chemischen Repräsentationen zu extrahieren und für die Entwicklung chemischer Konzepte zu nutzen (z. B. Kozma & Russell, 1997, 2005; Rau, 2017c). Repräsentationskompetenzen und chemisches Fachwissen stehen in einer engen, wechselseitigen Beziehung und sind in der Praxis kaum voneinander zu trennen. Diese enge Verbindung äußert sich unter anderem im sogenannten Repräsentationsdilemma (Rau, 2018). Die empirische Trennbarkeit der beiden Konstrukte ist bislang nicht abschließend geklärt. Ebenso besteht

Forschungsbedarf bezüglich der Differenzierung spezifischer Fähigkeiten innerhalb der Repräsentationskompetenz. Diese offenen Fragen bilden den Schwerpunkt des ersten Forschungsanliegens.

Neben Repräsentationskompetenzen und Fachwissen haben sich räumliche Fähigkeiten als wichtige Prädiktoren für die Leistung in der Chemie und beim Arbeiten mit chemischen Repräsentationen herausgestellt (z. B. Buckley et al., 2018; Harle & Towns, 2011; Stieff et al., 2012). Einzelne räumliche Faktoren erwiesen sich in diesem Kontext als besonders relevant, beispielsweise die zwei- und dreidimensionale mentale Rotationsfähigkeit sowie die Fähigkeit zur mentalen Manipulation. Es mangelt jedoch an Studien, die räumliche Faktoren systematisch und umfassend erheben und deren Einfluss auf die Bearbeitung repräsentationsbasierter Chemieaufgaben unter Berücksichtigung des Fachwissens sowie möglicher Interkorrelationen untersuchen – dies stellt den Fokus in Forschungsanliegen II dar.

Forschungsanliegen III zielt darauf ab, vertiefte Einblicke in die Bearbeitung repräsentationsbasierter Chemieaufgaben zu gewinnen. Dies soll durch die Identifikation und Analyse der dabei auftretenden Hindernisse geschehen. Ziel ist es, zentrale kognitive Prozesse und Fähigkeiten herauszuarbeiten, die für eine erfolgreiche Bearbeitung solcher Aufgaben erforderlich sind.

# 2

## Repräsentationen und ihre Bedeutung für das Lernen

Repräsentationen spielen in unserem Alltag eine maßgebliche Rolle. Sie ermöglichen es, Gedanken in Form von Sprache, Symbolen, Bildern oder Gesten zu externalisieren und eröffnen uns damit die Kommunikation mit anderen Menschen (Ainsworth, 2006; Krey & Schwanewedel, 2018). Besonders in den Naturwissenschaften sind Repräsentationen entscheidend. Sie dienen der Darstellung einer visuell nicht erfassbaren oder beobachtbaren Ebene, beispielsweise der Atome und Moleküle in der Chemie (Bucat & Mocerino, 2009; Chiu & Wu, 2009). Repräsentationen erlauben es uns somit, unsichtbare Phänomene anschaulich zu erklären (Chiu & Wu, 2009; Rapp, 2005).

In diesem Kapitel wird die Bedeutung des Lernens mit Repräsentationen in der Chemie dargestellt, damit einhergehende Anforderungen und Herausforderungen herausgearbeitet und ein Überblick über aktuelle Forschung in diesem Kontext gegeben. Dazu werden zunächst die Konzeptualisierung und Kategorisierung von Repräsentationen näher beleuchtet und grundlegende Theorien zum diesbezüglichen Lernen erläutert.

### 2.1 Klassifikation von Repräsentationen

Mit dem Gemälde *La trahison des images* (Der Verrat der Bilder, Abbildung 1), auf dem eine Pfeife mit dem Schriftzug „*Ceci n'est pas une pipe*“ („Dies ist keine Pfeife“) zu sehen ist, verdeutlicht der belgische Künstler René Magritte (1929) die Beziehung zwischen einem Objekt (der Pfeife), seiner ikonischen Darstellung und dem Wort „Pfeife“. Weder die abgebildete Pfeife noch das Wort „Pfeife“ lassen sich stopfen oder rauchen. Sie sind lediglich Repräsentationen des realen Gegenstands.



**Abbildung 1:** La trahison des images (Der Verrat der Bilder) mit dem Schriftzug „Ceci n’est pas une pipe“ („Dies ist keine Pfeife“) von René Magritte (1929).

Magritte (1929) veranschaulicht hier die Perspektive der Semiotik: Repräsentationen sind Zeichen, die für einen Gegenstand oder einen Prozess stehen (Schnotz et al., 2010). Sie sind durch einen spezifischen Code (verbal, ikonisch oder numerisch) sowie eine spezifische Modalität (sinnliche Wahrnehmung, vor allem auditiv, visuell oder haptisch) gekennzeichnet (Schanze & Girwitz, 2018). Absichtlich erzeugte Zeichen dienen der Kommunikation mit anderen Personen und der Wissensvermittlung: Personen externalisieren ihre Vorstellungen von einem Gegenstand oder Prozess, indem sie Zeichen beziehungsweise Repräsentationen produzieren (Schnotz et al., 2010).

Hier lässt sich eine grundlegende Unterscheidung zwischen *internen* und *externen* Repräsentationen treffen. Aus kognitionspsychologischer Sicht werden *interne* Repräsentationen als mentale Abbilder der Umwelt verstanden, die erzeugt werden, um diese gedanklich zu verarbeiten. Dabei beeinflussen bereits bestehende *interne* Repräsentationen diesen Prozess. Durch die Erzeugung von Zeichen können *interne* Repräsentationen in *externe* überführt werden; diese externen Repräsentationen wiederum dienen als Grundlage für die Konstruktion neuer *interner* Repräsentationen. Somit stehen *interne* und *externe* Repräsentationen in einer fortwährenden Wechselbeziehung zueinander (Krey & Schwanewedel, 2018; Schnotz et al., 2010; Zhang, 2001).

Externe Repräsentationen können weiter anhand ihrer Kodalität differenziert werden. Schnotz und Bannert (2003) teilen sie grob in *depiktionale* und *deskriptionale* Repräsentationen ein. Gemälde, Bilder und physische Modelle beispielsweise basieren auf ikonischen Zeichen und werden daher als *depiktionale* Repräsentationen bezeichnet. Geschriebene und gesprochene Texte sowie mathematische Formeln setzen sich hingegen aus Symbolen zusammen, die einen Gegenstand beschreiben und werden daher als *deskriptionale* Repräsentationen bezeichnet. Die verwendeten Symbole besitzen eine willkürliche Struktur, wodurch sie nicht direkt, sondern durch spezifische Konventionen mit dem repräsentierten Gegenstand verbunden sind (z. B. Wörter). Solche Symbole finden sich bei *depiktionalen* Repräsentationen nicht wieder (Krey & Schwanewedel, 2018; Schnotz & Bannert, 2003; Talanquer, 2022).

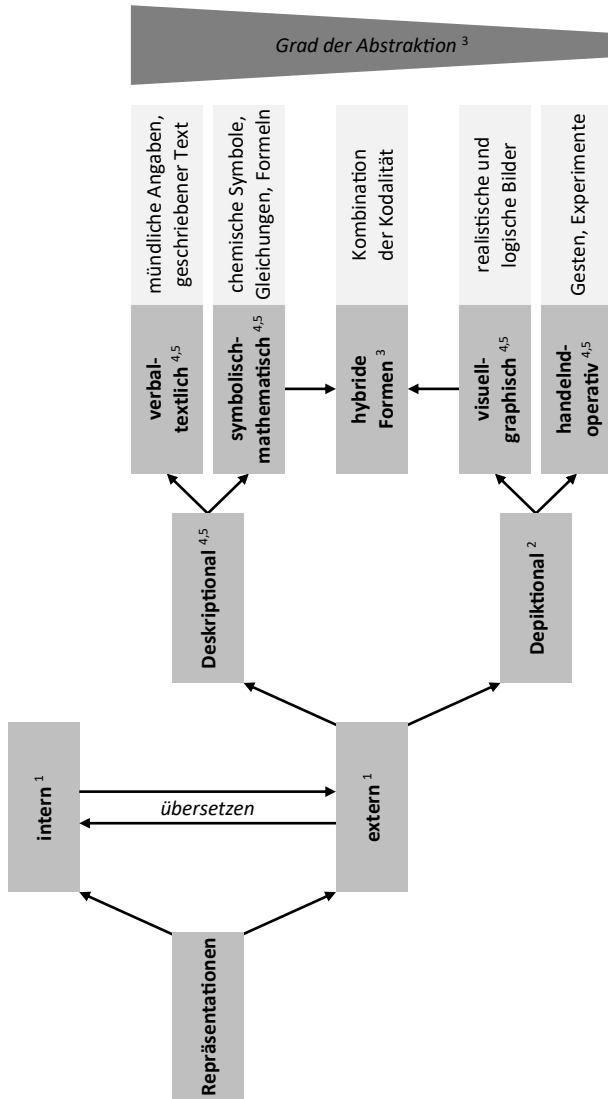
Auf dieser Grundlage können Repräsentationen weiter und feiner differenziert werden. Die *depiktionalen* Repräsentationen lassen sich in *visuell-graphische* Repräsentationen (realistische und logische Bilder) sowie *handelnd-operative* Repräsentationen (etwa Gesten, physische Modelle, Experimente) unterscheiden. Die *deskriptionalen* Repräsentationen können in *verbal-textliche* Repräsentationen (gesprochener und geschriebener Text) und *symbolisch-mathematische* Repräsentationen (etwa Gleichungen, Formeln) gegliedert werden (Tsui, 2003; Wu & Puntambekar, 2012).

Eine vergleichbare Klassifikation beschreibt Gilbert (2005) mit den fünf *Modes of Representations*: (1) *concrete* bzw. *material mode* (haptische, materielle Repräsentationen), (2) *verbal mode* (gesprochener und geschriebener Text), (3) *symbolic mode* (chemische Symbole, Formeln, Gleichungen usw.), (4) *visual mode* (Graphen, Diagramme, Animationen usw.) und (5) *gestural mode* (Gesten, Körperbewegungen). Diese Kategorisierung ist nicht gänzlich neu und wurde im Laufe der Jahre immer wieder adaptiert und weiter ausdifferenziert. Bereits Bruner (1966) unterschied zum Beispiel zwischen enaktiven, ikonischen, symbolischen Repräsentationen, wobei die enaktive Repräsentation vollzogene Handlungen beschreiben.

Die vier Kategorien nach Tsui (2003) bzw. Wu und Puntambekar (2012) lassen sich anhand des Abstraktionsgrades weiter charakterisieren. Repräsentationen, die über einen hohen symbolischen Anteil mit willkürlicher Struktur verfügen und daher nur über Konventionen mit einem repräsentierten Gegenstand oder Prozess verknüpft sind, weisen einen hohen Abstraktionsgrad auf.

Dies gilt besonders für *mathematisch-symbolische* Repräsentationen (Müller et al., 2017; Talanquer, 2022). *Verbal-textliche* Repräsentationen können als eine Art Intermediat verstanden werden, das die Interpretation des Zusammenhangs der Symbole in einer *mathematisch-symbolischen* Repräsentation unterstützt (Müller et al., 2017). Verwenden Repräsentationen hingegen ikonische Zeichen, die in direkter Beziehung zum dargestellten Gegenstand oder Prozess stehen, ist ihr Abstraktionsgrad gering. Bei *visuell-graphischen* Repräsentationen, im Sinne von logischen Bildern, beruhen diese ikonischen Zeichen häufig auf Analogien, z. B. die Darstellung eines Atoms als Kugel (Talanquer, 2022). Dadurch stellen sie einen direkten Bezug zum repräsentierten Gegenstand her und sind folglich konkreter und weniger abstrakt. Demnach weisen realistische Bilder wie Fotografien eine höhere Konkretheit auf als logische Bilder; reale Experimente im Sinne *handelnd-operativer* Repräsentationen sind noch konkreter (Müller et al., 2017; Nitz, Ainsworth, et al., 2014; Taber, 2009; Talanquer, 2022). Entsprechend kann statt des Begriffs „Abstraktionsgrad“ auch „Grad der Ikonizität“ verwendet werden (Talanquer, 2022), wobei dieser invers dazu eingesetzt werden muss.

Häufig lassen sich Repräsentationen nicht eindeutig einer Kategorie zuordnen, da sie die Kodalität und Charakteristika verschiedener Kategorien vereinen. Dies gilt besonders in der Chemie für *mathematisch-symbolische* und auch *visuell-graphische* Repräsentationen (Dickmann, 2019; Talanquer, 2022). Daher wird diese Kategorisierung um eine „hybride Form“ erweitert, um zu verdeutlichen, dass Repräsentationen hinsichtlich ihrer Zuordnung häufig nicht trennscharf sind bzw. nicht exakt einer Kategorie zugeordnet werden können. Eine Synthese der bisher beschriebenen Kategorisierung ist in Abbildung 2 dargestellt.



**Abbildung 2:** Synthese der Kategorisierung von Repräsentationen und Charakterisierung durch den Abstraktionsgrad (<sup>1</sup>Krey & Schwanewedel, 2018; <sup>2</sup>Schnotz & Bannert, 2003; <sup>3</sup>Talanquer, 2022; <sup>4</sup>Tsui, 2003; <sup>5</sup>Wu & Puntambekar, 2012), adaptiert nach Nickel et al. (2025).

Eine weitere Klassifikation bzw. Konzeptualisierung von Repräsentationen, die besonders in der Chemie Anwendung findet, basiert nicht auf Charakteristika der Repräsentationen selbst, sondern auf der Art des dargestellten Wissens (Krey & Schwanewedel, 2018). Repräsentationen werden dabei auf drei Levels betrachtet: *macro*, *submicro* und *symbolic* (Gilbert & Treagust, 2009; Russell et al., 1997; Talanquer, 2011; Treagust et al., 2003). Diese werden im *Johnstone-Dreieck* (Johnstone, 1991) zueinander in Beziehung gesetzt, wobei jedes Level gleichermaßen relevant ist und diese sich gegenseitig ergänzen. Unter dem *macroscopic level* (häufig auch *phenomenological level*) werden beobachtbare Phänomene verstanden, die im Alltag oder im Labor wahrnehmbar und somit messbar sind. Dazu zählen Eigenschaften wie die Masse, Temperatur oder der pH-Wert (Gilbert & Treagust, 2009). Um diese Phänomene zu erklären, müssen Chemiker:innen auf eine Ebene zurückgreifen, die mit den Sinnen nicht direkt wahrnehmbar ist: die submikroskopische Ebene der Atome, Ionen und Moleküle. Diese ist nur indirekt zugänglich und kann ausschließlich durch Repräsentationen dargestellt und kommuniziert werden (Bucat & Mocerino, 2009; Chiu & Wu, 2009). Diesen Zusammenhang zwischen dem *macroscopic level* und dem *submicroscopic level* beschreibt Bent (1984) treffend: „Evidently there’s more to seeing than meets the eye. To see what a chemist sees one needs to know what a chemist knows“ (Bent, 1984, S. 774).

Letztlich lassen sich sowohl das *macroscopic* als auch das *submicroscopic level* auf ein *symbolic level* abstrahieren, indem man Symbole verwendet und diesen bestimmte Bedeutungen zuordnet: Symbole zur Kennzeichnung von Atomen oder Verbindungen (H für ein Wasserstoffatom), der elektrischen Ladungen ( $H^+$ , wobei das hochgestellte + eine einfache positive Ladung des Ions angibt), der Anzahl von Atomen, Ionen oder Molekülen durch Koeffizienten und Indizes (zum Beispiel  $2 H_2O$ ; der vorangestellte Koeffizient gibt die Anzahl der Wassermoleküle an, der Index die Anzahl der Atome des vorangehenden Elements in der Verbindung), Buchstaben zur Kennzeichnung des Aggregatzustandes ( $H_2O_{(l)}$ , l für flüssig), sowie spezielle Konventionen für komplette chemische Reaktionsgleichungen ( $2 H_{2(g)} + O_{2(g)} \rightarrow 2 H_2O_{(l)}$ ). Die drei Level ergänzen sich gegenseitig und können ineinander übersetzt werden (Gilbert & Treagust, 2009; Johnstone, 2000). Beispielsweise lässt sich das Sieden von Wasser auf dem *macroscopic level* beobachten und die Siedetemperatur messen. Auf dem *submicroscopic level* kann der Prozess durch ein Teilchenmodell veranschaulicht oder mittels einer Siedekurve graphisch dargestellt werden.