

Abstract

Das Konzept Self-assembly gilt als eines der wichtigsten naturwissenschaftlichen Konzepte des 21. Jahrhunderts [1]. Trotzdem findet es in der chemiedidaktischen Fachliteratur kaum Beachtung. Dies lässt sich in nochmals verstärkter Weise für den deutschsprachigen Raum feststellen. Die Curriculare Innovationsforschung widmet sich eben solcher fachwissenschaftlicher Inhalte, verknüpft sie mit obligatorischen Inhalten der Lehrpläne und bereitet sie didaktisch auf, indem ein sinnhaftes Zusammenspiel von Experimenten, Modellen und Konzepten in Form von erstellten, konkreten Materialien geschaffen wird. [2]. Auf diese Weise lässt sich die aus der stetigen Weiterentwicklung der Fachwissenschaft entstehende Lücke zwischen Schul- und Fachchemie überwindbar machen. Im Zuge der Entwicklungsarbeit, aber auch darüber hinaus bieten Schülerlabore die Möglichkeit, entsprechende Experimente und Materialien zu erproben und zu optimieren, sowie die Gelegenheit den Lernenden entsprechende fachwissenschaftlich-chemische Inhalte und Themen näher zu bringen. [3]

So ergibt es sich, dass im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Entwicklung, Erprobung und Optimierung einer curricular innovativen Schülerlaboreinheit für die Sekundarstufe II zum Thema Self-assembly mit dem Namen Self-assemblyLAB dargelegt wird. Dabei wird sich nach der Vorgehensweise der Curricularen Innovationsforschung [2, 3] gerichtet. Wie in der Fachchemie werden dabei Experimente (und Modelle) entwickelt und erforscht. Im Rahmen von Erprobungen werden verschiedene Methoden der qualitativen Bildungsforschung angewendet.

Im Verlauf der diese Dissertationsschrift schwerpunktmäßig bestimmenden Entwicklungsarbeit wird dabei eine für die Legitimierung und der damit einhergehenden Darstellung der wissenschaftlichen Relevanz neuartige Vorgehensweise erfolgreich angewendet. Basierend auf fachwissenschaftlicher und fachdidaktischer Theorie wird die Konzeption des Self-assemblyLABs beschrieben. Dieses beinhaltet die erstmalige Entwicklung einer deutschsprachigen Definition des Self-assembly-Begriffs und die Formulierung sogenannter Elemente, welche sich in jedem Self-assembly-Prozess identifizieren

lassen.

Das Setting der Schülerlaboreinheit lässt sich in einen schulgeeigneten und einen universitätstypischen Teil unterteilen. Im schulgeeigneten Teil findet zunächst ein Experiment statt, das auf der Basis schwimmender Reißwecken und des Cheerios-Effekts einen makroskopischen Self-assembly-Prozess darstellt. Im Anschluss wird mit Hilfe von α -Cyclodextrin eine Öl-Wasser-Emulsion stabilisiert. Der zugrundeliegende Self-assembly-Prozess findet hier wie auch bei den nachfolgenden Experimenten auf submikroskopischer Ebene statt. Die anschließenden Experimente gehören dem universitätstypischen Teil des Self-assemblyLABs an und werden im Laufe der Laboreinheit von unterschiedlichen Kleingruppen parallel bearbeitet und dokumentiert, sodass sich die Lernenden die dabei von ihnen durchgeführten, kontextualisierten Versuche und die dabei ablaufenden Self-assembly-Prozesse zum Abschluss des Self-assemblyLABs gegenseitig vorstellen können. Bei den umfangreicheren und komplexeren Experimenten handelt es sich um die pH-abhängige Bildung von Mizellen beziehungsweise Vesikeln auf Basis von Ölsäure-Molekülen, die Bildung unterschiedlicher Gelnetzwerke basierend auf den Makromolekülen der Hydrokolloide Alginat und Gellan und die Entstehung eines Self-assembled Monolayers (SAM) aus Hexadecanethiol-Molekülen auf einer Goldoberfläche.

Zur modellhaften Darstellung der supramolekularen Prozesse bei den Experimenten, die auf submikroskopischen Self-assembly-Prozessen beruhen, wird ein neuartiges Modellkonzept für Anschauungsmodelle entwickelt. Dieses ist als erstes Modellkonzept in der Lage, alle schulrelevanten zwischenmolekularen Wechselwirkungen konsistent und auf unterschiedliche Art und Weise zu repräsentieren. Für das Self-assemblyLAB werden hierzu mit einem 3D-Drucker additiv gefertigte und dem Modellkonzept folgend funktionalisierte Modelle zu allen korrespondierenden Experimenten entwickelt und eingesetzt.

Um Lernende gewinnbringend durch das Self-assemblyLAB und seine Versuche mit den zugehörigen Anschauungsmodellen zu führen, wird Arbeitsmaterial konzipiert. Dieses kontextualisiert die entsprechenden Versuche des universitätstypischen Teils und folgt darüber hinaus der Idee, das Niveau der angesprochenen Modellkompetenz nach Upmeyer zu Belzen und Krüger [4] im Verlauf des Self-assemblyLABs zu steigern und so die Modellkompetenz zu fördern. Darüber hinaus sind die Themenschwerpunkte der Versuche und das zugehörige Lernmaterial mit den bundesweiten Bildungsstandards und dem Kernlehrplan des Landes Nordrhein-Westfalen verknüpft.

Im Rahmen der Beschreibung der Haupterprobung, welche auf eine kurze Vorerprobung folgte, wird der Fokus auf eine Optimierung der Schülerlaboreinheit gelegt. Dazu wird die Entwicklung eines in Anlehnung an die qualitative Inhaltsanalyse nach Kuckartz entstandenen Kategoriensystems zur Optimierung beschrieben. Mit Hilfe dieses Systems wird anschließend das Self-assembLAB strukturiert optimiert und so eine optimierte Version dieser Schülerlaboreinheit geschaffen. Darüber hinaus kann die beschriebene Vorgehensweise zur Optimierung nicht zuletzt wegen substanzieller Intercoderübereinstimmung seines Kategoriensystems als potenzielles Optimierungswerkzeug für weitere Projekte in der Curricularen Innovationsforschung angewendet werden.

Zur Generierung von ersten Informationen über vermittelte Kenntnisse werden verschiedene Erhebungen zur Modellkompetenz und zum Wissen über Self-assembly durchgeführt. Die dabei erhaltenen Ergebnisse werden in dieser Arbeit jeweils im Sinne einer Triangulation zusammengeführt. Resultierend daraus lässt sich ableiten, dass das Self-assembLAB sowohl zu einer Verbesserung der Modellkompetenz als auch zu einer Steigerung des Fachwissens zum Thema Self-assembly seitens der Lernenden führen kann.

1 Einleitung

Anfang 2019 bereiste der Forschende gemeinsam mit seiner Freundin die Nordinsel des Pazifikstaats Neuseeland. In der dünn besiedelten Region um das East Cape fanden sie am Strand der Te Rangiharu Bucht die Schale einer Paua. Zunächst dachten sie, dass es sich um das Gehäuse einer Muschel handele, jedoch klärte sich im Laufe der Reise, dass es sich bei Pauas um Schnecken handelt, die auch unter dem Namen Abalone oder Seeohr bekannt sind. Die Innenseite der gefundenen Schale glänzte durch das enthaltene Perlmutter abhängig vom Winkel des einfallenden Lichts bereits wunderschön in unterschiedlichen Grün- und Blautönen und erinnerte in der Art und der hervorgerufenen Faszination ihres Farbspiels an einen Opal. Nach der Rückkehr entschloss sich der Forschende, die mit Kalk besetzte Oberseite abzuschleifen und zu lackieren, um so den faszinierenden Glanz auch an der Oberseite zum Vorschein kommen zu lassen. Das Ergebnis dieser mehrstündigen Prozedur lässt sich in Abbildung 1.1 betrachten. Dabei fällt insbesondere auf, dass sich das Farbspiel bis hin zu unterschiedlichen Rottönen erweiterte.



Abbildung 1.1: *Fotografie der durch den Forschenden gefundenen, abgeschliffenen und lackierten Paua.*

Aus der reinen Beobachtung des faszinierenden Farbspiels dieser Paua entwickelte sich im Sinne Wagenscheins schnell eine nachdenkende Beobachtung [5] und somit wiederum der Wunsch, den naturwissenschaftlichen Grund für diese Ästhetik der Natur zu verstehen.

Hinter dem Glanz des Perlmutter steckt nämlich das Produkt eben der Art eines Prozesses, um den es im Rahmen dieser Dissertationsschrift gehen soll: Ein Self-assembly-Prozess. So werden bei der Bildung des Perlmutter zunächst kleine Plättchen aus Calciumcarbonat in einer ungeordneten Anordnung gebildet. Diese Plättchen ordnen sich nachfolgend jedoch, wie bei einem Flüssigkristall, zu geordneten Strukturen zusammen, aus denen sich dann makroskopisch der faszinierende Glanz des Perlmutter ergibt [6, 7].

Der hier nur kurz angeschnittene Prozess stellt durch seine Ästhetik ein attraktives Beispiel für einen Self-assembly-Prozess dar. Das diesen Prozessen zugrundeliegende Konzept des Self-assemblys gilt als eines der wichtigsten naturwissenschaftlichen Konzepte des 21. Jahrhunderts [1], wie es auch an den in Abschnitt 2 gezeigten weiteren Beispielen und Analysen deutlich wird.

Hier wären vorausgreifend beispielsweise der Einsatz von Self-assembly und insbesondere das Wissen über eine potenzielle Steuerung dieses Prozesses zur Reduktion der Notwendigkeit von Tierversuchen im Bereich von künstlichem Herzgewebe in der Forschung zu nennen. So lässt sich der Self-assembly-Prozess der Bildung entsprechenden Gewebes durch Wissen über das zugrundeliegende Konzept aktiv steuern. [8]

Die vorliegende Arbeit beschreibt im Rahmen der Curricularen Innovationsforschung die Entwicklung, Erprobung und Optimierung einer Schülerlaboreinheit für Lernende der Sekundarstufe II zu besagtem Thema Self-assembly.

Dabei wird Kapitel 2 zunächst die Wahl dieses Inhalts, wie es durch die Curriculare Innovationsforschung (Abschnitt 3.1) gefordert wird, in umfangreicher Art und Weise legitimiert. Hierzu findet einerseits eine Legitimation auf inhaltlicher Ebene (Abschnitt 2.1) statt. Andererseits wird die wissenschaftliche Relevanz mit Hilfe einer nach Kenntnisstand des Autors neuartigen Vorgehensweise dargelegt (Abschnitt 2.2). Im sich anschließenden Kapitel 3 erfolgt dann eine Darstellung des dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungsdesigns der Curricularen Innovation (Abschnitt 3.1), deren Ideen nun eine Formulierung der Ziele dieser Arbeit (Abschnitt 3.2) ermöglichen.

In Kapitel 4 wird die der Arbeit zugrundeliegende Theorie beschrieben. Hierbei wird unterteilt in Fachwissenschaftliche Theorie (Abschnitt 4.1) und Fachdidaktische Theo-

rie (Abschnitt 4.2). Darüber hinaus findet in diesem Kapitel auch eine Darstellung der für dieses Forschungsprojekt wichtigen Technologie des 3D-Drucks (Abschnitt 4.3) statt. Im fachwissenschaftlichen Theorieteil werden dabei die Grundlagen für das tiefergehende Verständnis der fachwissenschaftlichen Zusammenhänge der im Self-assemblyLAB durchzuführenden Experimente beschrieben. Der fachdidaktische Teil befasst sich dagegen mit zugrunde liegenden didaktischen Theorien zu Experimenten, Modellen und Schülerlaboren.

Innerhalb des Kapitels 5 erfolgt eine Darstellung der Konzeption des gesamten Self-assemblyLABs. Diese beginnt in Abschnitt 5.1 mit einer Beschreibung des Lehrkonzepts, welche eine Darstellung der Entwicklung einer erstmaligen deutschsprachigen Definition des Self-assembly-Begriffs und der für das Verständnis eines Self-assembly-Prozesses unerlässlichen Elemente beinhaltet. Darüber hinaus werden das grundsätzliche Setting des Self-assemblyLABs und für die Curriculare Innovation unerlässliche Bezüge zum Curriculum des Fachs Chemie beschrieben. Nachfolgend werden die Experimente, welche im Self-assemblyLAB durchgeführt werden, und ihre Entwicklung dargestellt, sowie zuvor Anforderungen an diese formuliert (Abschnitt 5.2). Ebenfalls Teil dieses Kapitels ist die Beschreibung der für das Self-assemblyLAB notwendigen Anschauungsmodelle und ihrer Entwicklung. Dies beruht auf einem im Rahmen dieses Promotionsprojekts entwickelten neuartigen Modellkonzept für zwischenmolekulare Wechselwirkungen, das auch außerhalb des Self-assemblyLABs sinnhafte Anwendungsmöglichkeiten zu haben vermag (Abschnitt 5.3). Zum Ende des Kapitels erfolgt auf Basis all dessen eine Beschreibung der Entwicklung des Arbeitsmaterials (Abschnitt 5.4).

In Kapitel 6 findet eine Darstellung der wichtigsten im Rahmen der Erprobung angewendeten Forschungsmethoden statt.

Im sich daran anschließenden Kapitel 7 wird zunächst die Vorerprobung des Self-assemblyLABs kurz dargestellt (Abschnitt 7.1), bevor in umfangreicher und tiefgängiger Form eine Darlegung der Haupterprobung zusammen mit Erhebungen zur Optimierung, der Entwicklung der Modellkompetenz und des Verständnisses der Teilnehmenden zum Thema Self-assembly (Abschnitt 7.2) erfolgt.

Die dabei gewonnenen Erkenntnisse finden in Kapitel 8 unterteilt in die Bereiche des Experimentierens, des Lernmaterials und der Modelle hinsichtlich einer Optimierung des Schülerlabors Anwendung. Darüber hinaus werden in diesem Kapitel zwei Betriebsmodi der Schülerlaboreinheit vorgeschlagen.

Einige Schwerpunkte dieser Arbeit lassen sich darüber hinaus auch losgelöst von der

gesamten Dissertationsschrift betrachten und sich somit auch leicht auf andere Zusammenhänge übertragen:

So wird in dieser Arbeit der Curricularen Innovationsforschung (vgl. Abschnitt 3.1) nachgegangen, unter anderem indem die ihr innewohnende Vorgehensweise auf eine umfangreiche und fächerübergreifende Thematik angewendet wird (vgl. Abschnitt 2) und indem die Optimierung des so entstandenen Materials auf eine strukturierte Weise erfolgt (vgl. Abschnitt 8), welche in Abschnitt 7.2.8 genauer betrachtet wird.

Ein neuartiges Modellkonzept zu zwischenmolekularen Wechselwirkungen wurde speziell für das Self-assemblyLAB entwickelt und im Rahmen dieser Arbeit in Kapitel 5.3 umfangreich beschrieben. Eine Übertragbarkeit auf andere Fachinhalte zu zwischenmolekularen Wechselwirkungen ist dabei als gegeben anzusehen.

Auch verschiedenste Experimente zum Thema Self-assembly wurden entwickelt und in Abschnitt 5.2 beschrieben, sowie in Abschnitt 8.1 optimiert. Sie lassen sich auch entkoppelt vom Self-assemblyLAB anwenden.

Da es sich um ein fachinhaltlich sehr anspruchsvolles und in sich sehr umfangreiches Thema handelt, wird im Rahmen dieser Dissertationsschrift eine Haupterprobung beschrieben, die detailliert analysiert wurde. Entsprechende Beschreibungen finden sich in Abschnitt 7.2, welcher in verschiedenste Unterabschnitte unterteilt ist.

2 Legitimierung

Self-assembly gilt, wie auch in verschiedenen Review-Artikeln deutlich wird [9–12], als eines der wichtigsten naturwissenschaftlichen Konzepte des 21. Jahrhunderts [1], und dennoch findet es als Konzept in der chemiedidaktischen Fachliteratur für den schulischen Kontext kaum Beachtung. Dies gilt insbesondere für den deutschsprachigen Raum (vgl. Abschnitt 4.1.1).

Das im Rahmen dieser Arbeit beschriebene Projekt zum Schülerlabor Self-assemblyLAB folgt der Idee der Curricularen Innovationsforschung (vgl. Abschnitt 3.1), die es zum Ziel hat, die Anschlussfähigkeit der Schulchemie an aktuelle Forschung zu erhöhen und in der Folge mehr Schüler:innen für eine zukünftige Berufswahl im chemischen Arbeitsumfeld zu begeistern [3]. Dabei ist es von besonderem Interesse, die Bedeutung des fachwissenschaftlichen Themas darzustellen, was in diesem Kapitel sowohl durch die inhaltliche Darstellung einiger wichtiger Forschungsinhalte, die auf Self-assembly-Prozessen basieren (vgl. Abschnitt 2.1), als auch durch einen qualitativ-quantitativen Ansatz zur wissenschaftlichen Relevanz (vgl. Abschnitt 2.2) geschieht. Umfassende inhaltliche Grundlagen zu Self-assembly finden sich in Abschnitt 4.1.1.

2.1 Inhaltliche Legitimierung

Nach Whitesides und Grzybowski ist Self-assembly im Allgemeinen aus sechs verschiedenen Gründen von Interesse. Diese lauten:

1. Menschen sind durch die Entstehung von Ordnung aus Unordnung fasziniert.
2. Da auch unter oder in Zellen Self-assembly-Prozesse stattfinden, ist ein Verständnis über Self-assembly eine Voraussetzung für ein Verständnis über das Leben als solches. Darüber hinaus bieten Self-assembly-Prozesse in Zellen unzählige Beispiele für eine Übertragung dieser auf nicht-lebende Systeme.

3. Da Self-assembly eine der wenigen Methoden zur Schaffung von Anordnungen von Nanostrukturen ist, stellt es einen essenziellen Teil der Nanotechnologie dar.
4. Produktionsprozesse und Robotertechnik werden von Anwendungen von Self-assembly-Prozessen profitieren.
5. Self-assembly ist in vielen dynamischen Multikomponentensystemen von „smart materials“ über selbstheilende Strukturen bis hin zu Netzsensoren und Computernetzwerken verbreitet.
6. Die Fokussierung auf die spontane Bildung organisierter Strukturen verbindet die Untersuchung einzelner Komponenten mit der Untersuchung von Systemen mit vielen interagierenden Komponenten. [9]

Bezüglich des erstgenannten Grundes lässt sich vorausgreifend auf Abschnitt 3.1 eine weitere Brücke zu den Zielen der Curricularen Innovation schlagen. So soll hier das Interesse von Schüler:innen an chemischen Inhalten gestärkt werden. Gerade dazu kann eben die im ersten Grund beschriebene Faszination von Menschen im Allgemeinen führen, weswegen sich das Konzept Self-assembly auch auf einer Metaebene selbst legitimiert.

Inhaltlich prägnanter sind dagegen die unter zweitens angesprochenen Self-assembly-Prozesse unter oder in Zellen und die Übertragung dieser auf nicht-lebende Systeme, was letztlich der Bionik entspricht. Ein Beispiel hierfür stellt eine von Lind et al. entwickelte und 2017 in *Nature Materials* veröffentlichte Alternative zu Tierversuchen und konventionellen Zellkulturexperimenten in der biomedizinischen Forschung dar. Sie optimierten hier die häufig zum Einsatz kommenden mikrophysiologischen Systeme (MPS, engl.: microphysiological systems oder auch: „organs on chips“) auf Basis des Wissens über einen Self-assembly-Prozess. Bis dato hatten MPS zwei Hauptprobleme. Zum einen ließ sich nur eine geringe Anzahl Sensoren verbauen und zum anderen setzte ihre Herstellung einen mehrstufigen lithografischen Prozess voraus. Insbesondere bezüglich des zweiten Problems konnten Lind et al. basierend auf dem Konzept Self-assembly tätig werden. Sie entwickelten mehrere multifunktionale Tinten (Filamente) mit eingebauten Sensoren für den 3D-Druck, die wiederum den Self-assembly-Prozess von künstlichem Herzgewebe (Zellen) leiten können. Auf diese Weise konnte durch Wissen über das Konzept Self-assembly eine wichtige biomedizinische Anwendung entwickelt werden, die die Notwendigkeit von Tierversuchen zu Forschungszwecken zu reduzieren vermag. [8]

Im unter drittens genannten Grund wird die Nanotechnologie thematisiert, in der sich Self-assembly-Prozesse nutzen lassen, um zu einer Anordnung der Nanostrukturen zu gelangen. Ma et al. veröffentlichten im Jahr 2019 im Journal of the American Chemical Society ein entsprechendes Paper, welches sich erneut dem medizinischen Bereich zuordnen lässt und dessen Erkenntnisse großes Potenzial für die Brustkrebsbehandlung aufzeigen. Sie stellen hier Nanopartikel vor, die spezifisch mit der Tumormikroumgebung („tumor microenvironment“ TME) reagieren und somit in der Lage sind, entsprechende Krebszellen mit minimaler Gewebeschädigung und hoher Spezifität abzutöten. Dies geschieht dabei durch die eine Reaktion des Nanopartikels mit Stoffen der TME, die zur Bildung von Kupfer-(I)-Ionen führt, welche wiederum mit den in der TME lokal vermehrt auftretenden Wasserstoffperoxid-Molekülen reagieren, sodass sich für die Tumorzelle tödliche Hydroxy-Radikale bilden. Der Nanopartikel selbst wiederum ist das Resultat eines Self-assembly-Prozesses mit einzelnen Kupfer-Cystein-Komplexen als Komponenten. [13]

Hinsichtlich des unter viertens angesprochenen Grundes ist im Bereich der Robotertechnik eine Veröffentlichung von Rubenstein et al. aus dem Jahr 2014 in Science erwähnenswert. Darin wird ein makroskopischer Self-assembly-Prozess in Anlehnung an das Schwarmverhalten aus der Tierwelt beschrieben. Es wurde ein System entwickelt, das einen programmierbaren Self-assembly-Prozess darstellt, der zur Anordnung mehrerer tausend Roboter in komplexe zweidimensionale Formen auf einer Ebene führt. Eine zukünftige und sehr spannende Anwendung, die sich aus dieser Veröffentlichung ergeben könnte, wird in Anlehnung an den Brückenbau von Wanderameisen in Form von sich ähnlich anordnenden Robotern genannt, die in der Folge stabile und belastbare Strukturen wie eben beispielsweise begehbare Brücken bilden könnten. [14]

Unter den fünften von Whitesides und Grzybowski beschriebenen Grund fallen diverse Multikomponentensysteme wie zum Beispiel das in Xiao et al. 's 2017 in Nature Photonics erschienenen Veröffentlichung behandelte Perowskit. Insbesondere wird hier organisch-anorganisches Hybrid-Perowskit behandelt, das neben seiner bekannten Anwendung in der Photovoltaik auch ein vielversprechendes Material für LEDs darstellt. Gründe dafür sind die hohe Farbreinheit, die geringe Rekombinationsrate und eine einstellbare Bandlücke. Das beschriebene Perowskit ist das Resultat eines Self-assembly-Prozesses zu nanometergroßen Kristallen, und das so erhaltene Material gilt als sehr zukunftsweisend. [15]

Der letztgenannte Grund zeigt sich beispielsweise im von Lahann et al. 2003 in Science