

## 1 Einleitung

Aktuelle Berichte zum Studienabbruch zeigen, dass sich die Studienabbruchquoten von Studierenden mit deutscher Staatsangehörigkeit an deutschen Universitäten über alle Studiengänge hinweg in den Absolventenjahrgängen 2010, 2012, 2014, 2016 und 2018 mit Werten zwischen 31 % und 35 % auf einem unverändert hohen Niveau befinden (Heublein, Richter & Schmelzer, 2020). In der Mathematik und den Naturwissenschaften liegen die Abbruchquoten noch deutlich über dem Durchschnitt und zeigen gleichzeitig eine steigende Tendenz (Absolventenjahrgang 2014: 37 %; 2016: 41 % und 2018: 43 %). Noch dramatischer wird die Situation, wenn man ausschließlich das Fach Chemie betrachtet: Die Abbruchquote steigt von 42 % im Jahr 2014 über 45 % im Jahr 2016 auf 47 % im Absolventenjahrgang 2018. Um diese Entwicklung in einem ersten Schritt zunächst näher zu untersuchen und Prädiktoren für den (ausbleibenden) Studienerfolg und damit auch für den Studienabbruch zu identifizieren, wurde die Forschergruppe ALSTER I ins Leben gerufen (FOR 2242; für einen Überblick siehe Averbek, 2021). Hier zeigte sich beispielsweise, dass der Wissenserwerb in den Bereichen Anorganische, Organische, Physikalische und Analytische Chemie vom Fachwissen in der Allgemeinen Chemie determiniert wird (Averbek, 2021). Die Tatsache, dass die Studierenden ohne Chemiegrund- oder -leistungskurs in der Oberstufe in der Allgemeinen Chemie de facto keine Chance haben, ihre Defizite gegenüber den anderen Studierenden aufzuholen (Averbek, 2021), deutet auf einen erhöhten Förderbedarf auf dem unteren Vorwissens- und Leistungsniveau hin. Daraus ergibt sich die Forderung nach Unterstützungsmaßnahmen für Studierende ohne hinreichende Vorkenntnisse im Fach Chemie während der Studieneingangsphase, so dass dieser Studierendengruppe die Möglichkeit geboten wird, ihre Wissenslücken zu schließen. An diese Ausgangssituation knüpft das hier vorgestellte Projekt an, welches das Ziel der Entwicklung eines Trainings in der Physikalischen Chemie verfolgt. Bei der Entwicklung des Trainings liegt ein besonderer Fokus auf der Verwendung von Repräsentationen und Modellen. Im Allgemeinen sind verschiedene Repräsentationen, ihre Nutzung und der Wechsel zwischen den Repräsentationen kennzeichnend für die Chemie und notwendig für den Wissenserwerb in dieser Disziplin (Kozma & Russell, 1997). Beim Blick in klassische Lehrbücher zur Physikalischen Chemie, entsprechende Vorlesungsskripte und Übungsblätter wird die Relevanz der Mathematik und symbolisch-mathematischer Repräsentationen und Modelle für diese Teildisziplin der Chemie schnell ersichtlich (siehe auch Dickmann, 2019). Averbek (2021) konnte zudem die Rechenfähigkeit als stärksten Prädiktor für das Vorwissen in der Physikalischen Chemie im ersten Semester identifizieren. Vor dem Hintergrund der Ergebnisse von Kimpel (2017), welche belegen, dass Studierenden selbst in der Allgemeinen Chemie der Transfer ihrer mathematischen Kenntnisse in einen chemischen Kontext nicht ohne Weiteres

gelingt, kann angenommen werden, dass mathematische Kenntnisse und ihre Anwendung potenzielle Hürden für den Wissenserwerb in der Physikalischen Chemie darstellen. Gleichzeitig ist zur Bearbeitung typischer Aufgabenstellungen in der Physikalischen Chemie die Entwicklung und Nutzung mathematischer Modelle, also das mathematische Modellieren, von besonderer Bedeutung. Der Prozess des mathematischen Modellierens in der Chemie wird von Goldhausen (2015) durch ein Kreislaufmodell beschrieben, welches sich vom mathematischen Modellierungskreislauf aus der Mathematikdidaktik von Blum und Leiß (2005) ableitet. Die Fähigkeiten, die notwendig sind, um den beschriebenen mathematischen Modellierungsprozess in der Physikalischen Chemie erfolgreich zu durchlaufen, werden im Rahmen dieser Arbeit zusammenfassend als *symbolisch-mathematisches Modellverständnis* bezeichnet. Es beinhaltet das Vermögen, das chemische Problem zu erfassen, die relevanten chemischen Inhalte mithilfe einer mathematischen Formel auszudrücken, mathematische Umformungen durchzuführen, einen konkreten Wert zu berechnen und diesen in Bezug zum ursprünglichen Problem zu setzen. Welche dieser Schritte den Studierenden in der Physikalischen Chemie Schwierigkeiten bereiten und wie die Studierenden bei der Bewältigung eben dieser Schritte gefördert werden können, war zunächst unklar. Während Goldhausen (2015) für den Chemieunterricht in der Schule und Kimpel (2017) für die Allgemeine Chemie an der Hochschule schon zeigen konnten, dass Lernende verschiedene Schwierigkeiten beim Durchlaufen des mathematischen Modellierungsprozesses haben, stand diese Untersuchung für die Physikalische Chemie noch aus. Im Rahmen einer qualitativen Interviewstudie wurden daher die schwierigkeiterzeugenden Schritte beim mathematischen Modellieren in der Physikalischen Chemie untersucht (Komor, van Vorst und Sumfleth, im Druck). Hier zeigte sich, dass den Studierenden insbesondere der Schritt der Mathematisierung chemischer Sachverhalte große Schwierigkeiten bereitet. Ein möglicher Grund könnte ein unzureichendes chemisches Verständnis sein. Während im darauffolgenden Schritt des mathematischen Arbeitens einfache Äquivalenzumformungen sowie das Berechnen von Werten mit einer gegebenen Formel kein Problem darstellten, erwies sich die Integration, eine komplexere, aber für die Physikalische Chemie typische mathematische Operation, für die meisten Studierenden als unüberwindbare Hürde. Dementsprechend wurden bei der Entwicklung des Trainings zur Förderung des symbolisch-mathematischen Modellverständnisses insbesondere diese Schritte berücksichtigt. Eine Möglichkeit zur Gestaltung dieses zu entwickelnden Trainings stellt die Verwendung von Lösungsbeispielen dar, welche sich insbesondere für Anfängerinnen und Anfänger auf einem Gebiet als lernwirksam erwiesen haben (Renkl, 2014). Der Einsatz von beispielbasierten Selbstlernmaterialien zur Förderung des symbolisch-mathematischen Modellverständnisses in der Physikalischen Chemie wurde bis jetzt noch nicht untersucht und soll daher im Rahmen dieser Studie analysiert werden. Um die Effektivität des entwickelten Trainings adäquat messen zu

können, wurde zusätzlich ein entsprechendes Diagnoseinstrument zum symbolisch-mathematischen Modellverständnis entwickelt.

Im Folgenden werden zunächst die drei Begriffe Repräsentationen, Modelle und Visualisierungen erläutert und ihre Relevanz für die Chemie dargelegt (Kapitel 2). Anschließend wird in Kapitel 3, aufgrund ihrer besonderen Bedeutung für die Physikalische Chemie, der Fokus auf mathematische Modelle und den Prozess des mathematischen Modellierens gelegt. Da der Lösungsbeispiel-Ansatz zur Förderung des symbolisch-mathematischen Modellverständnisses ausgewählt wurde, wird dieser im letzten Teil des theoretischen Hintergrunds dargelegt (Kapitel 4). In Kapitel 5 werden die Forschungsfragen und das übergeordnete Ziel der Studie formuliert. Es folgt eine Beschreibung des entwickelten Trainings und der eingesetzten Testinstrumente sowie der für die Analyse ausgewählten Methoden (Kapitel 6). Die Ergebnisse der Pilot- und Hauptstudie werden in den Kapiteln 7 und 8 dargelegt und diskutiert. Im Rahmen von Kapitel 9 erfolgt eine zusammenfassende Darstellung der vorliegenden Arbeit.

## 2 Repräsentationen, Modelle und Visualisierungen in der Chemie

Die drei Begriffe *Repräsentationen*, *Modelle* und *Visualisierungen* sind eng miteinander verknüpft und werden einzeln oder auf verschiedene Art und Weise kombiniert, z. B. als visuelle Modelle oder visuelle Repräsentationen. Sie weisen in ihrer Bedeutung, je nach Blickwinkel, mehr oder weniger große inhaltliche Überschneidungen auf und werden daher zum Teil auch synonym verwendet. An dieser Stelle werden zunächst die Begriffe definiert und zueinander in Bezug gesetzt. Es wird mit der Definition des Begriffs *Repräsentation* begonnen, da dieser in seiner Bedeutung den größten Umfang aufweist und auch die anderen beiden Begriffe miteinschließt. Er kann somit als Oberbegriff verstanden werden. Das Verb *repräsentieren* bedeutet in einer etymologischen Betrachtungsweise *etwas oder jemanden vertreten bzw. darstellen* (Pfeifer et al., 1993). In diesem Sinne können Repräsentationen allgemein als „stellvertretende Darstellungen [eines] Gegenstandes oder Sachverhaltes“ verstanden werden (Scheid, Müller, Hettmannsperger & Kuhn, 2017, S. 181). Sie stehen also für etwas (Rau, 2017). Man kann zwischen externalen, außerhalb des eigenen Kopfes verfügbaren Repräsentationen und internalen, also mentalen Repräsentationen unterscheiden (Opfermann, Schmeck & Fischer, 2017; Peterson, 1996; Rau, 2017; Scheid et al., 2017; Schnotz, 2005). Da das Verständnis chemischer Inhalte maßgeblich davon abhängt, Zusammenhänge auf der Teilchenebene zu erfassen, die man nicht direkt über Sinnesorgane wahrnehmen kann (Kozma & Russell, 1997), setzt das Lernen chemischer Inhalte die Auseinandersetzung mit dem chemischen Phänomen und den entsprechenden Repräsentationen voraus (Gilbert & Treagust, 2009).

Dem Begriff *Visualisierung* (engl. *visualization*) werden in der Literatur verschiedene Bedeutungen zugeschrieben, sodass er für diese Arbeit zunächst inhaltlich abgesteckt werden muss. Während Gilbert (2005b, 2008) unter Visualisierung die metakognitive Fähigkeit, einer Repräsentation eine Bedeutung zuzuweisen und externale in internale Repräsentationen zu überführen, versteht, definieren beispielsweise Rapp und Kurby (2008) Visualisierungen als bestimmte externale, zumeist visuelle Repräsentationen. Auch Uttal und O' Doherty (2008, S. 53) deuten Visualisierungen als jede beliebige Art von Repräsentationen zur Sichtbarmachung abstrakter Inhalte. In diesem Sinne stellen Visualisierungen eine Teilmenge von Repräsentationen dar.

Ein *Modell* kann sowohl als Abbild von etwas als auch als Repräsentation eines Originals verstanden werden, wobei dieses Original z. B. eine Idee, ein Objekt, ein Ereignis, ein Prozess oder ein System sein kann (Gilbert & Boulter, 2017; Stachowiak, 1973). Modelle dienen als Hilfsmittel zur Erklärung von Sachverhalten und fordern von den Lernenden die Herstellung von Verbindungen zwischen dem Objekt und der verwendeten Analogie (Chittleborough &

Treagust, 2007). Sie stellen einen Teil der Welt in verkürzter Form dar (Büchter & Leuders, 2016). Nach Stachowiak (1973) zeichnen sich Modelle durch ein Abbildungsmerkmal, ein Verkürzungsmerkmal und ein pragmatisches Merkmal aus. Das Abbildungsmerkmal besagt, dass Modelle immer Abbildungen natürlicher oder künstlicher Originale sind (Stachowiak, 1973, S. 131). Im Sinne des Verkürzungsmerkmals beinhalten Modelle im Regelfall nur die Eigenschaften des Originals, die für die erschaffende und/oder nutzende Person des Modells von Bedeutung sind (Stachowiak, 1973). Zudem sind Modelle gemäß dem pragmatischen Merkmal dem zugrunde liegenden Original nicht automatisch 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. 132–133). Gleichzeitig dienen Modelle der Veranschaulichung chemischer Inhalte und ermöglichen damit die Kommunikation über diese Inhalte (Bindernagel & Eilks, 2008). Im Sinne der dargelegten Definition des Modellbegriffs können Modelle somit sowohl als externale als auch als internale Repräsentationen dargestellt werden (Gilbert, 2008). Folglich handelt es sich bei Modellen um spezielle Repräsentationen, welche die soeben genannten Eigenschaften erfüllen. Solche Repräsentationen können beispielsweise Bilder, Diagramme, statische und dynamische Modelle, Analogien, Metaphern und ähnliches, also im Prinzip alles das, was von Lernenden zur Entwicklung eines mentalen Modells genutzt werden kann, sein (Treagust & Chittleborough, 2001).

Die Entwicklung und die Nutzung von Modellen sind für die Naturwissenschaften und dadurch auch für die naturwissenschaftliche Bildung von großer Bedeutung (Gilbert, 2005a; Harrison & Treagust, 2000). Sie stellen eine Brücke zwischen der Welt um uns herum und den zugehörigen naturwissenschaftlichen Theorien dar (Gilbert, 2004, S. 116). Die Fähigkeit, chemische Modelle zu nutzen und zu interpretieren, beeinflusst das chemische Verständnis (Chittleborough & Treagust, 2007, S. 288). Somit sind Modelle auch im Chemieunterricht wichtig (Bindernagel & Eilks, 2008), da chemische Phänomene ohne Modelle nicht erklärt werden können (Treagust & Chittleborough, 2001). Gilbert (2004) unterscheidet verschiedene Arten von Modellen: Mentale Modelle sind individuelle Repräsentationen, die ein Lernender selbst entwickelt. Es handelt sich dabei um die persönliche Wahrnehmung der Welt. Entsprechend sind diese Modelle anderen Menschen nicht zugänglich. Dem gegenüber stehen Varianten von (mentalen) Modellen, die anderen in irgendeiner Form zugänglich gemacht werden (*expressed model*, Gilbert, 2004). Wird ein solches Modell in einer Gemeinschaft einheitlich anerkannt, so bezeichnet man dieses als Konsensmodell (*consensus model*, Gilbert, 2004). Handelt es sich bei dieser Gemeinschaft um eine wissenschaftliche Community, so spricht man von einem wissenschaftlichen Modell (*scientific model*, Gilbert, 2004). Wissenschaftliche Modelle dienen

in erster Linie dazu, wissenschaftliche Hypothesen zu testen oder neue Hypothesen zu generieren, nicht aber zur Visualisierung von Theorien (Bindernagel & Eilks, 2008). Wird ein wissenschaftliches Modell beispielsweise durch neue oder andere Erkenntnisse überholt, so wird es zu einem historischen Modell (Gilbert, 2004). Sowohl wissenschaftliche als auch historische Modelle können vereinfacht in Form von sogenannten curricularen Modellen dargestellt werden, um das Lernen zu erleichtern (Gilbert, 2004). Weiterhin unterteilt Gilbert (2004) unterschiedliche Modelle nach ihren Modi: Es gibt beispielsweise dreidimensionale, plastische Modelle, die man (zumindest theoretisch) anfassen kann. Verbale Modelle dienen – geschrieben oder gesprochen – zur Beschreibung von Gegenständen und deren Verbindung in der Repräsentation. Symbolische Modelle umfassen chemische Symbole, Formeln und Gleichungen sowie mathematische Ausdrücke. Visuelle Modelle umfassen zweidimensionale Repräsentationen wie Graphen, Diagramme und analoge oder virtuelle Animationen (Gilbert, 2004).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Definitionen die enge Verbundenheit der drei Begriffe widerspiegeln. Entsprechend der zuvor dargelegten Eigenschaften sind Repräsentationen ganz allgemein stellvertretende Darstellungen. Modelle sind in diesem Sinne die verkürzte und fokussierte Darstellung eines Originals. Sie können als internale, mentale Repräsentation eines einzelnen Individuums oder als externale, für jeden verfügbare Repräsentation vorliegen (Gilbert, 2008). Analog wird zwischen externalen Visualisierungen, die Modelle so repräsentieren, dass diese visuell verarbeitet werden können, und internalen Visualisierungen, die das mentale Produkt der Verarbeitung der dargebotenen Repräsentation des Modells darstellen, unterschieden (Gilbert, 2005a, S. 2). Werden zur Wissensvermittlung verschiedene (externale) Repräsentationen verwendet, so wird dies auch als *multimedia learning* bezeichnet (Schnotz, 2005). Es findet statt, wenn Lernende aus unterschiedlichen externalen Repräsentationen individuelle internale Repräsentationen des Lerninhalts entwickeln und im Langzeitgedächtnis speichern (Schnotz, 2005).

In der Literatur gibt es diverse weitere Ansätze, Repräsentationen, Visualisierungen und Modelle nach unterschiedlichen Merkmalen zu klassifizieren. Schnotz (2005) unterscheidet depiktionale (*depictive*) und deskriptionale (*descriptive*) Repräsentationen. Depiktionale, also bildhafte Repräsentationen, zeichnen sich durch die Verwendung ikonischer Zeichen aus und zeigen die charakteristischen Eigenschaften des abgebildeten Inhalts. Demgegenüber werden bei deskriptionalen Repräsentationen symbolische Darstellungsformen verwendet, die die charakteristischen Eigenschaften des abgebildeten Inhalts beschreiben. Dickmann (2019) hat diese Unterteilung nach Schnotz (2005) aufgegriffen und in Kombination mit den Ausführungen von Mayer (2009) ein Schema zur Klassifikation von externalen Visualisierungen in der