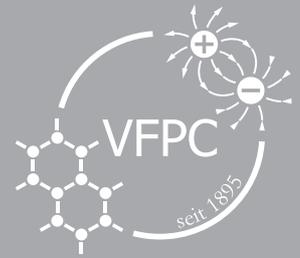


plusLucis

Verein zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts



Modelle und Modellnutzung

Impressum

PLUS LUCIS, Mitteilungsblatt des Vereins zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts und des Fachausschusses Physik & Schule der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft (VZR: 668472729)
Erscheint vierteljährlich

Medieninhaber:

Verein zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts
Adr.: AECC Physik Universität Wien, Porzellangasse 4, Stiege 2, 1090 Wien
Web: <https://www.pluslucis.org>
Mail: schriftenleitung@pluslucis.org

Redaktion:

Mag. Dr. Thomas Plotz (Leitung)
Mag. Sarah Zloklikovits

Verantwortlicher Herausgeber

dieser Ausgabe:

Dr. Marvin Rost
Universität Wien, Österreichisches Kompetenzzentrum für Didaktik der Chemie (AECC Chemie)
E-Mail: marvin.rost@univie.ac.at
Univ.-Prof. Dr. Anja Lembens
Universität Wien, Österreichisches Kompetenzzentrum für Didaktik der Chemie (AECC Chemie)
E-Mail: anja.lembens@univie.ac.at

HerausgeberInnenteam:

Univ.-Prof. Dr. Claudia Haagen-Schützenhöfer
Universität Graz, Physikdidaktik
E-Mail: claudia.haagen@uni-graz.at
Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf
Universität Wien, Physikdidaktik
E-Mail: martin.hopf@univie.ac.at
Univ.-Prof. Dr. Anja Lembens
Universität Wien, Chemiedidaktik
E-Mail: anja.lembens@univie.ac.at
Univ.-Prof. Dr. Thomas Wilhelm
Universität Frankfurt, Physikdidaktik
E-Mail: wilhelm@physik.uni-frankfurt.de

Bezugshinweise:

Das Abonnement der Zeitschrift ist für Vereinsmitglieder im Mitgliedsbeitrag inkludiert.

Ein institutionelles Abonnement (z. B. für Bibliotheken) ist zum Bezugspreis von 40 Euro im Jahr möglich.

Offenlegung nach § 25 des Mediengesetzes Grundlegende Richtung: Fortbildung und fachliche Information für Physik- und ChemielehrerInnen, organisatorische Mitteilungen, Vereinsinterna.

Für die Inhalte der Artikel sind ausschließlich die namentlich genannten AutorInnen verantwortlich.

Titelbild (Umschlag):

succo aus Pixabay

Inhalt

Bohrs Atomvorstellungen im Chemie- und Physikunterricht.....	4
<i>Steffen Wagner und Vanessa Lang</i>	
Von den „scharfen Wässern“ zu den „harten Säuren“	8
<i>Rita Krebs und Elisabeth Hofer</i>	
Experimente für den Unterricht über das Teilchenmodell.....	12
<i>Florian Budimaier</i>	
Förderung von Modellkompetenz durch erkenntnisgewinnendes Experimentieren und Modellieren im Chemieunterricht am Beispiel des Teilchenmodells.....	16
<i>Alexander Wittenstein</i>	
Modelle und Simulationen elektrischer Stromkreise	21
<i>Jan-Philipp Burde, Thomas S. Weatherby, Arthur Kronenberger und Thomas Wilhelm</i>	
Ein Concept Cartoon als Einstieg ins Thema „Modelle“	26
<i>Rosina Steininger</i>	
„Ich fühle was, was du nicht siehst“	29
<i>Philipp Lindenstruth</i>	
„Das ist ja nur ein Modell!“	34
<i>Marvin Rost und Anja Lembens</i>	

Editorial

Liebe Leser*innen,

es ist bemerkenswert: Modelle sind in den Naturwissenschaften genauso allgegenwärtig wie im naturwissenschaftlichen Unterricht und gleichzeitig scheint es unter Lehrpersonen an Schulen und Universitäten wenig Konsens darüber zu geben, was unter diesem Begriff zu verstehen ist. In solchen Fällen lohnt es sich, nicht nur wissenschaftstheoretische Überlegungen anzustellen, sondern diese durch die gelebte Unterrichtspraxis empirisch zu untermauern und damit zu einem institutionenübergreifenden Diskurs beizutragen. Mit diesem Heft machen wir Ihnen die Zusammenführung der Erfahrungen verschiedener Akteur*innen zugänglich, die sich explizit mit Modellen beschäftigt haben.

Im ersten Beitrag öffnen wir das Feld. Vanessa Lang und Steffen Wagner diskutieren das Bohr'sche Atommodell aus chemiedidaktischer sowie physikdidaktischer Perspektive. Die Autor*innen denken eine historische Linie mit Erkenntnisgewinnungsprozessen moderner Curricula zusammen und arbeiten vor allem die Gemeinsamkeiten heraus. Eine einander ergänzende Nutzung des Modells in beiden Fächern wird dabei in den Blick gerückt.

Weil sie sich mit einer ganz konkreten historischen Argumentation auseinandersetzen und ebenfalls einen Fokus auf Erkenntnisgewinnung bei Lernenden setzen, schließen Rita Krebs und Elisabeth Hofer sich mit der Entwicklung von Säure-Base-Modellen in der Geschichte der Chemie an. Lassen Sie Ihre Aufmerksamkeit doch einmal auf die sehr betont ausgeführte Problemstellung lenken: Was wollen wir eigentlich mit der Nutzung von Modellen im Unterricht bezwecken?

Florian Budimaier macht in seinem Beitrag Vorschläge, um einen wesentlichen Zweck von Modellen in den Mittelpunkt zu stellen, nämlich die Erklärung und Vorhersage von Prozessen, die wir nicht direkt wahrnehmen können. Er präsentiert, wie Lehrende das Teilchenmodell plausibel machen können, indem es – unter den beschriebenen experimentellen Bedingungen – als bestmögliche Erklärung für verschiedene Beobachtungen dient.

In diesem Sinne wird es dann zusehends konkreter. Alexander Wittenstein teilt eine Unterrichtsreihe mit uns, in der er über die Kompetenzzuwächse von Schüler*innen in modellzentriertem Unterricht berichtet. Er legt Wert auf den iterativen Charakter von Modellen, d. h., dass es wichtig ist, modellierende Überlegungen und experimentelle Übungen von Lernenden im Wechselspiel miteinander kombinieren zu lassen. Dabei werden



Marvin Rost



Anja Lembens

auch Herausforderungen diskutiert und dankenswerterweise auch das eingesetzte Material zur Verfügung gestellt.

Jan-Philipp Burde, Thomas Weatherby, Arthur Kronenberger und Thomas Wilhelm führen uns in die Welt der Elektrizitätslehre. Wie können Lernende ein konzeptuelles Verständnis von elektrischem Strom entwickeln? Ausführlich werden im Artikel frei verfügbare digitale Tools vorgestellt, die mit Hilfe von Analogien versuchen, eine Brücke zwischen der Welt und unseren Fach- oder Denkmodellen zu schlagen. Probieren Sie die vorgestellten Tools doch einfach selbst aus!

Lernendenvorstellungen sind das Stichwort für Rosina Steininger, die Concept Cartoons nutzt, um eben jene Vorstellungen systematisch zu artikulieren. Unser Vorschlag an dieser Stelle: Setzen Sie sich selbst einmal mit den Aussagen zu Modellen im Concept Cartoon des Artikels auseinander und fragen Sie sich, ob ihr Verstehen von Modellen so gefestigt ist, wie Sie glauben. Wir sind sicher, dass der Beitrag der Autorin auch auf der didaktischen Meta-Ebene wertvoll ist.

Und wo wir gerade bei Horizonterweiterungen sind, ist es eine besondere Freude, den Artikel von Philipp Lindenstruth ankündigen zu dürfen. Es werden haptische Modelle für den Umgang mit Reaktionsmechanismen durch sehbeeinträchtigte Menschen vorgestellt. Unser üblicher Fokus auf Modelle als Abbildungen kommt hier ins Wanken und zwingt geradezu zum Weiterdenken.

Wir schließen das Heft mit einer hochschuldidaktischen Anwendung aus unserem eigenen Erfahrungsbereich, bei der Lehramtsstudierende durch den Umgang mit verschiedenen Modellobjekten eine reflexive Haltung bezüglich ihrer eigenen Vorstellungen zur submikroskopischen Ebene entwickeln sollen und ziehen Bilanz darüber, dass hier in der Lehrpersonenbildung noch viel Arbeit vor uns liegt.

Alle Beteiligten hoffen auf Freude und Erkenntnis beim Lesen der Beiträge und wünschen sich vertiefte Dialoge zur Verknüpfung von Modellen, Fach und Fachlernen.

Marvin Rost & Anja Lembens

Bohrs Atomvorstellungen im Chemie- und Physikunterricht

Steffen Wagner und Vanessa Lang

1. Einleitung

Modelle spielen sowohl in den Naturwissenschaften als auch im naturwissenschaftlichen Unterricht eine zentrale Rolle. In ihrer Funktion als „geistige Werkzeuge zur Ordnung, Deutung und Systematisierung unserer Erfahrungen“ [1, S. 4] begleiten sie Wissenschaftler*innen, indem sie mit ihrer Hilfe Phänomene und Theorien miteinander verknüpfen [2,3]. Deswegen sind sie auch für das Lernen von Naturwissenschaften von großer Bedeutung. Ein besonderer Vertreter ist dabei das Bohr'sche Atommodell, zum einen aufgrund seiner historischen Bedeutung und zum anderen, weil es sowohl im Chemie- als auch im Physikunterricht thematisiert wird. Ein didaktischer Blick aus dem jeweiligen Fachunterricht hinüber in die Nachbardisziplin lohnt sich, um die eigene fachliche Perspektive zu konturieren, Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu kennen und aus der historischen Bedeutung heraus Potenziale für eine gewinnbringende Nutzung in der Schule aufzuzeigen. Deswegen soll nachfolgend zunächst ein kurzer Überblick über die historische Entwicklung Orientierung bieten. Danach wird aus Sicht der beiden Fachdisziplinen die Verwendung von Modellen allgemein, sowie von Bohrs Atommodell im Besonderen beleuchtet, um in einem anschließenden Vergleich eben jene Gemeinsamkeiten, Unterschiede und Potenziale zu skizzieren.

2. Historische Orientierung von Bohrs Atommodell

Bereits vor 2500 Jahren entstand im alten Griechenland die Idee, dass Materie aus unwandelbaren Teilchen aufgebaut ist [4]. Der junge dänische Physiker Niels Bohr hatte im frühen 20. Jahrhundert das ambitionierte Ziel, die Vorstellungen vom inneren Aufbau dieser Teilchen so weit wie möglich zu präzisieren [5]. Die Existenz von Atomen war in der damaligen wissenschaftlichen Community zwar weitgehend akzeptiert, der innere Aufbau wurde allerdings viel diskutiert. Bohr strebte danach, die sich am Anfang des 20. Jahrhunderts rasant entwickelnden, abstrakten Konzepte vom Aufbau der Materie mit verschiedenen Entwicklungen verträglich zu machen. Diese physik- und chemiegeschichtlichen Entwicklungslinien liefen in den Jahren um 1910 aufeinander zu und ermöglichten zusammen den Schritt, den Bohr mit seinen Überlegungen vollzog.

Auf einer solchen Linie lagen die Spektraluntersuchungen, ausgehend von Fraunhofer über Kirchhoff und Bunsen bis hin zu Balmer, der den mathematischen Ausdruck für den Zusammenhang der Spektrallinien des Wasserstoffs fand.

Auf einer zweiten Linie standen die Teilchenstrahl- und Streuversuche bis Thomson und Rutherford. Nachdem Joseph John Thomson in Teilchenstrahlversuchen der Nachweis für die Existenz von Elektronen gelang, ging er der Frage nach, wie Atome aufgebaut sind und wie die Elektronen in Atomen verteilt sein müssen, um bis dahin bekannte Phänomene wie die Radioaktivität und die periodischen Eigenschaften der Stoffe erklären zu können. Dafür entwickelte er 1903 das später als „Rosinenkuchen“ (eng. plum pudding) bezeichnete Modell, welches die Verteilung der negativen Punktladungen in einer positiv ausgedehnten Elektrifikation vorsieht. Einer seiner Schüler, Ernest Rutherford, konnte 1911 experimentell die Konzentration der positiven Ladung auf einen winzigen Kern in Atomen feststellen. Nils Bohr nahm an Vorlesungen und Praktika bei Thomson teil und traf Rutherford im Herbst 1911. Er entwickelte auf Basis der neu gewonnen Vorstellung vom Atomkern im Jahre 1913 schließlich die Zusammenfassung seiner Kenntnisse über den inneren Aufbau von Atomen in der sog. „Bohr'schen Trilogie“ [6-8]. Beeinflusst wurde er dabei außerdem von einer dritten Entwicklungslinie, nämlich den Untersuchungen und Systematisierungen des Aufbaus der Elemente von Demokrit über Dalton bis Mendelejev.

Im ersten Teil seiner Trilogie erklärte Bohr bereits bekannte Spektrallinien des Wasserstoffatoms (Balmer- und Paschen-Serien) und sagte die später entdeckten Lyman-, Brackett- und Pfund-Serien voraus. Darüber hinaus leitete Bohr den Wert der Rydberg-Konstanten aus anderen Naturkonstanten ab. In Teil II betrachtete Bohr Mehrelektronensysteme. Hier lagen Bohrs Postulate teilweise deutlich daneben, dennoch bildet dieser Teil die Grundlage für die zukünftige physikalische Erklärung des Periodensystems [5]. Auch Bohrs Erklärungsansätze für chemische Bindungen in Teil III erwiesen sich später als unzureichend. Mit der Weiterentwicklung durch Arnold Sommerfeld gilt es dennoch als „Markstein für die Entwicklung der Atom- und Quantentheorie“ [9, S. 172].

Kennzeichnend für diese Zeit war zudem eine weitere Entwicklung, nämlich das Divergieren der öffentlichen, bildlichen Vorstellungen von etwas so Substanziellem wie den Bausteinen unserer Welt auf der einen Seite und den wissenschaftlichen Konzepten zu ihrer Beschreibung und der Erklärung und Vorhersage von damit assoziierten Phänomenen auf der anderen Seite. Bohrs Originalveröffentlichung im Teil I seiner berühmten Essays enthielt keine Abbildung vom Atom als Planetensystem. Andererseits machte genau diese Darstellung mit Elektronen auf Planetenbahnen um den Atomkern als Zentralgestirn unabhängig von Bohr schon

Jahre zuvor, in teils populären Zeitungen und Magazinen, die Runde. Wissenschaftliche Erkenntnisgewinnung (über die Struktur der Materie) und deren öffentliche Kommunikation und Vermittlung klappten gerade mit der Entstehung der Quantenphysik immer weiter auseinander. Bohr stand somit an einer Gelenkstelle zweier wissenschaftshistorisch bedeutsamer Entwicklungen, bei denen es Fort- und Rückschritte, Entdeckungen und Irrtümer, gezielte Untersuchungen, zufällige Begebenheiten und Menschen mit unterschiedlicher Herkunft, Ausbildung und persönlichen Motiven gab, die jedoch alle mit einem bestimmten Erkenntnisinteresse die Vorstellungen über den Aufbau unserer Welt vorantrieben.

3. Das Atommodell nach Bohr im Physikunterricht

Aus Perspektive der Physikdidaktik sind Modelle allgemein dadurch gekennzeichnet, dass sie als wissenschaftliche Werkzeuge erkenntnisorientierten Zwecken dienen [10], zum Beispiel um Phänomene zu strukturieren, zu erklären oder vorherzusagen [11]. Mit ihrer Hilfe werden Phänomene und Theorien zueinander in Beziehung gesetzt. Außerdem sind Modelle und ihre externen (bildlichen, gegenständlichen, sprachlichen) Darstellungen nicht identisch [12]. Gerade in Bezug auf Teilchenvorstellungen haben Lernende jedoch Probleme, zwischen der bildlichen Vorstellungswelt und physikalisch relevanten Konzepten zu unterscheiden [13].

In Rahmenvorgaben für die Schule werden sie – neben dem Fachwissensbereich bzw. der Sachkompetenz – vorwiegend dem Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung zugeordnet, wo Daten und Phänomene mithilfe von Modellen interpretiert bzw. erklärt sowie Vorhersagemöglichkeiten und Grenzen von Modellen erkannt werden sollen.

Das Bohr'sche Atommodell taucht in curricularen Rahmenvorgaben für den Physikunterricht in Österreich [14] und Deutschland [15] mehr oder weniger explizit auf. In Österreich wird ein „Modell der Atomhülle“ in der Sekundarstufe II im Zusammenhang mit Emission und Absorption von Licht in qualitativen Betrachtungen diskutiert. In Deutschland kommt

dies (wenn überhaupt) ebenfalls in der Sekundarstufe II vor. Dann stehen im Wesentlichen folgende Aspekte im Mittelpunkt:

1. Das Elektron des Wasserstoffatoms kann sich nur auf diskreten Energieniveaus bewegen.
2. Ein Wechsel zwischen den Niveaus geht mit einer quantenhaften Emission oder Absorption von Licht einher, wobei die Frequenz des Lichts und ihre Energiedifferenz in Beziehung zueinander stehen.
3. Das Modell versagt bei größeren Atomen.

Typischerweise zeigen Lehrbücher für die Sekundarstufe II an dieser Stelle eine schematische Planetendarstellung des Wasserstoffatoms (siehe Abbildung 1, links) sowie Energieniveau-Schemata (rechts). Begleitaufgaben widmen sich mathematischen Basteleien zur Herleitung der Balmer-Formel, Bahnradien oder dem Verhältnis von Gravitations- und Coulombkraft. Bohrs Ideen werden dabei zwar oft explizit, aber nur knapp in die historische Entwicklung von Atomvorstellungen eingeordnet und mit dem Versagen seines Modells bei größeren Atomen abgeschlossen. Während im Physikunterricht Modelle allgemein eher dem Kompetenzbereich der Erkenntnisgewinnung zugeordnet werden, dominiert bei Bohrs Atommodell also eher der Aspekt des Fachwissens bzw. der Sachkompetenz. Nicht unerwähnt bleiben soll, dass es zur Legitimation von Bohrs Atommodell im Unterricht eine Kontroverse innerhalb der Physikdidaktik gibt bzw. gab. Diese Kontroverse dreht sich im Wesentlichen um die Fragen, ob die mit dem Modell vermittelten mechanistischen Vorstellungen das weitere Lernen von Quantenphysik behindern und warum ein Modell, das sich als weitgehend nicht tragfähig erwiesen hat, überhaupt in den Unterricht eingebunden werden soll. Entsprechende Vorschläge zur Einführung in die Quantenphysik werden unter anderem durch die sogenannten Berliner (ohne Bohrs Atommodell) und Münchner Unterrichtskonzepte (mit Bohrs Atommodell) gemacht.

4. Das Atommodell nach Bohr im Chemieunterricht

Modelle werden im Chemieunterricht allgemein eingesetzt, um ihre Bedeutung für die Entwicklung der Zivilisation und Kultur

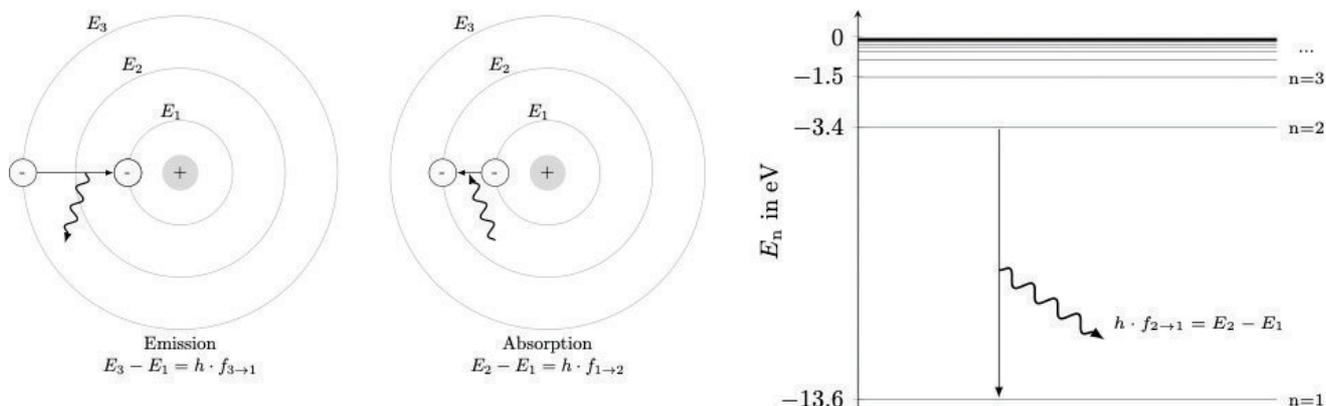


Abbildung 1: Typische Abbildung des Wasserstoff-Atoms bei Emission bzw. Absorption von Licht als Planetendarstellung (links) und als Energieniveauschema für die Emission (rechts)

darzustellen, zu erläutern und zu diskutieren; generierte Daten und Beobachtungen sowie Phänomene zu erklären und zuletzt ihre Funktion im Problemlöseprozess kritisch zu reflektieren [9]. Dieser Bedeutungsumfang ist vielen Schüler*innen allerdings nicht gänzlich bewusst: Sie haben zwar Spaß beim Umgang mit Modellen, sehen diese allerdings häufig nur als Spielzeuge [16].

Das Bohr'sche Atommodell wird im Chemieunterricht häufig mit dem Schalenmodell gleichgesetzt. Es bildet die Grundlage zur Erklärung des Periodensystems der Elemente und der chemischen Bindung. Zu seinen Hauptaussagen zählen folgende [17]:

1. Elektronen in der Atomhülle sind verschiedenen Energieniveaus zuzuordnen, die als definierte, stabile Bahnen um den Kern veranschaulicht werden.
2. Je weiter entfernt die Elektronen vom Kern liegen, desto höher ist das Energieniveau und desto leichter können sie abgespalten werden.
3. In jeder Schale finden $z=2n^2$ Elektronen Platz (n entspricht der Anzahl der Schalen von innen ausgehend).

Das Bohr'sche Atommodell taucht in curricularen Rahmenvorgaben für den Chemieunterricht in Österreich [14] und Deutschland [18] in der achten Jahrgangsstufe in unterschiedlicher Explizitheit auf. So heißt es beispielsweise im Lehrplan für Chemie im Saarland „erläutern den Schalenaufbau der Atomhülle und definieren den Begriff Valenzelektron“ [18], während im österreichischen Lehrplan von einer „Einsicht in ein altersgemäßes Teilchen- bzw. Atommodell“ [14, S. 93] die Rede ist. Grundsätzlich lassen allerdings beide Rahmenvorgaben Spielräume bei den Darstellungsweisen, sodass sich zwei weit verbreitete Varianten unterscheiden lassen. Bei einer Variante werden Elektronen in Elektronenschalen dargestellt (Abb. 2 links) und bei einer weiteren auf Bahnen in einer Art Planetendarstellung (Abb. 2 rechts).

5. Gemeinsamkeiten und Unterschiede von Bohrs Atommodell im Chemie- und Physikunterricht

Vergleicht man, wie Bohrs Atommodell in Unterricht und Didaktik der Chemie und Physik verwendet wird, fallen in Schulbüchern zunächst die ähnlichen bildlichen

Darstellungsweisen auf, die auf die Planetenvorstellungen von Atomen zurückgehen. Während in der Chemie zudem die Schalenmodellierung präsent ist, findet man in der Physik noch die Energieniveauschemata. Beide Fächer greifen in erster Linie auf die Aussage über die Existenz stabiler Energieniveaus zurück. Der Physikunterricht nutzt diese Aussage, um darauf den Wechsel der Energieniveaus und die damit verbundenen Emissions- und Absorptionsvorgänge zu assoziieren und verschiedene Berechnungen durchzuführen. Im Chemieunterricht werden dagegen mithilfe des Modells primär die Elemente systematisiert und damit Ordnungs- und Hauptgruppennummern motiviert. Teilweise gibt es in beiden Fächern einen kurzen historischen Exkurs. Sowohl in den Schulbüchern als auch in Unterrichtskonzepten und bildungspolitischen Rahmendokumenten wird mit dem Bohr'schen Atommodell vorwiegend der Fachwissensbereich bzw. die Sachkompetenz adressiert. Genau an dieser Stelle liegt ungenutztes Potenzial für die Einbindung des Modells in den Unterricht. Dabei bieten sich mehrere, einander ergänzende Möglichkeiten.

6. Potenziale für den Chemie- und Physikunterricht

Ein Potenzial des Bohr'schen Atommodells besteht darin, es stärker dort einzusetzen, wo es sowohl im Einklang mit seiner historischen Bedeutung als auch gemäß der Rolle von Modellen in curricularen Rahmenvorgaben seine Stärken ausspielen kann. Dies zeigt sich vor allem im Kompetenzbereich der Erkenntnisgewinnung und weniger im Fachwissensbereich, wo mehrere Lernmaterialien in Lehrbüchern und bestehenden Unterrichtskonzeptionen aktuell den Schwerpunkt setzen. Dazu kann das Modell zum Beispiel für empirische Fragestellungen in Bezug auf Emissionsspektren genutzt und deren Erfolg bzw. Misserfolg in realen Experimenten überprüft werden. Der experimentelle Aufwand hierfür ist überschaubar. Aus chemischer Sicht könnte der Kompetenzbereich der Erkenntnisgewinnung durch das Bohr'sche Atommodell vor allem im Hinblick auf die Modellbildung (Erstellen, Überprüfen und Ändern von Modellen) als naturwissenschaftliche Arbeitsweise profitieren.

Eine zweite Möglichkeit ist eine historische Einbettung in mehr als nur die zeitliche Abfolge des Erscheinens einzelner Atom-

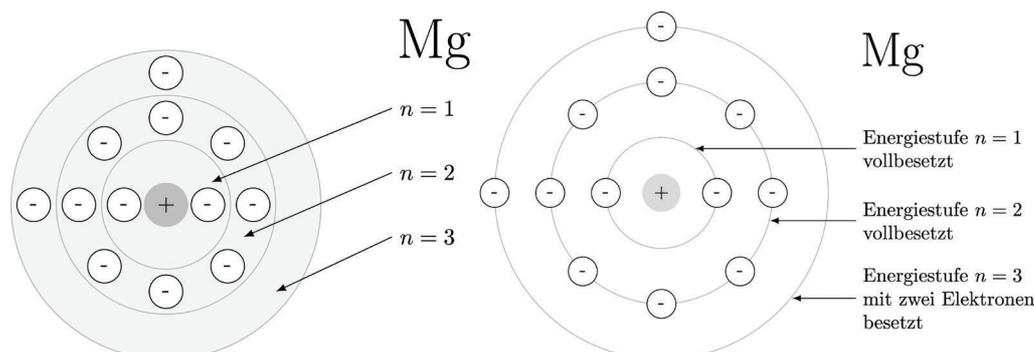


Abbildung 2: Darstellung eines Magnesium-Atoms in der Schalenmodellierung (links) und der Planetendarstellung (rechts)

vorstellungen. Vielmehr lassen sich hier – wie im Abschnitt zur historischen Orientierung skizziert – Entwicklungslinien übergreifend über die Einzeldisziplinen Chemie und Physik nachverfolgen. Dabei können bedeutende Fragestellungen auch im Rahmen des Schulunterrichts diskutiert werden, wie z. B.: Welche Voraussetzungen waren notwendig, damit Bohr seine Überlegungen anstellen konnte? Welchen sehr unterschiedlichen wissenschaftlichen Fragestellungen gingen die handelnden Personen (Dalton, Thomson, Rutherford, Bohr usw.) eigentlich nach? Welche Rolle spielten Theorie, Experimente, Institutionen, Personen und manchmal sogar der Zufall bei der Evolution der Atomvorstellungen? Für eine stärkere Orientierung an der Erkenntnisgewinnungs- und Bewertungskompetenz können das fruchtbare Leitfragen sein. Drittens bietet gerade die Tatsache, dass wir alle uns an bildliche Vorstellungen klammern, Gelegenheit zu einer metakognitiven Reflexion im Chemie- und Physikunterricht. Viele Menschen – nicht nur Schüler*innen – hatten und haben ein Planetensystem-ähnliches Bild im Kopf. Dieses Bild ist jedoch kein wissenschaftliches und es schafft Grenzen. Diese Grenzen sind nicht in erster Linie die Grenzen von Bohrs Atommodell, sondern eben die der bildlichen Vorstellung. Modelle sind schließlich nicht mit ihren Darstellungen identisch. Die Planetendarstellung des Atoms ist älter als Bohrs Atommodell und geht nicht (wie verschiedentlich behauptet)

auf Bohr zurück. Die Abhandlung des Modells in Band 1 seiner drei Essays enthielt – wie bereits erwähnt – diese Abbildung noch nicht einmal. Diese Diskrepanz ließe sich somit sogar im Kompetenzbereich Kommunizieren z. B. über folgende Fragestellungen gewinnbringend einbetten: Wozu nutzen wir in Chemie und Physik überhaupt solche Darstellungen? Sind Planeten-, Schalen- und Energieniveaudarstellungen ein Mittel zur unmittelbaren Erkenntnisgewinnung oder Kommunikation untereinander bzw. für Lehrzwecke entwickelt?

Gerade an der Stelle, an der Bohr und sein Atommodell die Bühne betreten, liegen für den Chemie- und Physikunterricht gewinnbringende Möglichkeiten, deren Nutzung und Ausgestaltung bislang weitgehend den Lehrkräften überlassen bleiben. In beiden Fächern können diese Möglichkeiten besser genutzt werden. Hierfür müssen weitere Unterrichtsvorschläge und Materialien entwickelt werden, um Lehrende dabei zu unterstützen, Lernenden ein besseres Verständnis von Erkenntniswegen in der Chemie und Physik vermitteln zu können.

Steffen Wagner *Humboldt-Universität zu Berlin,*

Didaktik der Physik

Vanessa Lang *Universität des Saarlandes, Didaktik der Chemie*

Literatur

- [1] Graf E. Modelle im Chemieunterricht. NiU. 2002;13(67):4-9.
- [2] Passmore C. Models. In: Gunstone R, Herausgeber. *Encyclopedia of Science Education*. Dordrecht: Springer Netherlands; 2015. S. 659-62.
- [3] Morgan MS, Morrison M, Herausgeber. *Models as Mediators: Perspectives on Natural and Social Sciences*. New York: Cambridge University Press; 1999.
- [4] Stükelberger A, Herausgeber. *Antike Atomphysik*. Berlin: De Gruyter; 2014. 336 S. (Tusculum).
- [5] Schwarz WHE. 100 Jahre Bohrsches Atommodell. *Angew Chem*. 18. November 2013;125(47):12450-60.
- [6] Bohr N. I. On the constitution of atoms and molecules. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. Juli 1913;26(151):1-25.
- [7] Bohr N. XXXVII. On the constitution of atoms and molecules. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. September 1913;26(153):476-502.
- [8] Bohr N. LXXIII. On the constitution of atoms and molecules. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. November 1913;26(155):857-75.
- [9] Eckert M. Die Geburt der modernen Atomtheorie: Hundert Jahre Bohrsches Atommodell. *Physik in unserer Zeit*. Juli 2013;44(4):168-73.
- [10] Gouvea J, Passmore C. 'Models of' versus 'Models for': Toward an Agent-Based Conception of Modeling in the Science Classroom. *Sci & Educ*. März 2017;26(1-2):49-63.
- [11] Wagner S. *Erklärung physikalischer Phänomene mit Modellen [Dissertation]*. [Berlin]: Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät; 2018.
- [12] Passmore C, Gouvea JS, Giere R. Models in Science and in Learning Science: Focusing Scientific Practice on Sense-making. In: Matthews MR, Herausgeber. *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching* [Internet]. Dordrecht: Springer Netherlands; 2014. S. 1171-202. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/978-94-007-7654-8_36
- [13] Mikelskis-Seifert S. Modelle – Schlüsselbegriff für Forschungs- und Lernprozesse in der Physik. *PhyDid B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung* [Internet]. 2010 [zitiert 30. Mai 2017]; Verfügbar unter: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/154>
- [14] Bundesministerium Bildung, Wissenschaft und Forschung. *Verordnung des Bundesministers für Unterricht und Kunst vom 14. November 1984 über die Lehrpläne der allgemeinbildenden höheren Schulen; Bekanntmachung der Lehrpläne für den Religionsunterricht an diesen Schulen* [Internet]. StF: BGBl. Nr. 88/1985 Nov 14, 1984. Verfügbar unter: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung/Bundesnormen/10008568/Lehrpläne%20-%20Allgemeinbildende%20höhere%20Schulen%2c%20Fassung%20vom%2004.03.2022.pdf>
- [15] Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland, Humboldt-Universität zu Berlin, Herausgeber. *Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife: Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18.06.2020*. 1. Auflage. Köln: Carl Link Verlag; 2020.
- [16] Barke HD, Harsch G, Kröger S, Marohn A. *Chemiedidaktik kompakt* [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2018 [zitiert 12. November 2020]. Verfügbar unter: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-56492-9>
- [17] Kilian L, Beilner C, Pistohl B. *Chemie – Mittelstufe. 1: Aufgaben mit Lösungen für G 8*. Stark Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG; 2014. 256 S. (Training Grundwissen: Chemie).
- [18] Ministerium für Bildung und Kultur Saarland. *Lehrplan Chemie Gymnasium Klassenstufen 8 und 9 Naturwissenschaftlicher Zweig* [Internet]. 2012 [zitiert 26. November 2021]. Verfügbar unter: https://www.saarland.de/SharedDocs/Downloads/DE/mbk/Lehrplaene/Lehrplaene_Gymnasium/Chemie/Chemie_8_und_9_nw_Zweig.pdf?__blob=publicationFile&v=5

Von den „scharfen Wässern“ zu den „harten Säuren“

Ein Streifzug durch die Geschichte der Säure-Base-Modelle

Rita Krebs und Elisabeth Hofer

„Säuren und Basen“ sind eine Stoffklasse, die eine enorme Fülle an Modellen und Konzepten aufweist. Ihre Entwicklungsgeschichte reicht zurück bis ins Altertum, und je nach Kontext sind die verschiedenen Modelle und Konzepte passender oder weniger passend [1]. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die historischen Säure-Base-Modelle – wie für wissenschaftliche Modelle üblich [2] – erarbeitet wurden, um eine konkrete Theorie in Bezug auf einen jeweils definierten Anwendungsbereich (z. B. eingegrenzt auf ein bestimmtes Lösungsmittel) zu entwickeln, zu erklären oder zu überprüfen. Und dies erfolgte logischerweise auf Basis des jeweils gegenwärtigen Erkenntnisstands. Jedes Säure-Base-Modell besitzt demnach nur eine begrenzte Aussagekraft und eine eingeschränkte Gültigkeit [1,3]. Doch auch, wenn viele der historischen Säure-Base-Modelle nach heutigem Erkenntnisstand als nicht mehr adäquat angesehen werden und längst in Vergessenheit geraten sind, so ist deren Betrachtung doch aus mehrerlei Hinsicht von Interesse: Sie gibt einen Einblick in parallele, anschließende oder gegensätzliche Entwicklungen, ermöglicht die Abgrenzung verschiedener Modelle voneinander, zeigt die sukzessive Erweiterung des angestrebten Anwendungsbereiches auf und spiegelt die Entwicklung der Chemie als wissenschaftliche Disziplin wider. Häufig werden aber nur die Modelle nach Brønsted-Lowry und Lewis genauer behandelt, da sie in vielen Zusammenhängen am adäquatesten sind. Trotzdem stellt die Kenntnis verschiedener historischer Modelle und Konzepte sowie die Geschichte ihrer Entwicklung einen wichtigen Aspekt in der Betrachtung des Themenfeldes „Säuren und Basen“ dar. Für den Unterricht kann dies aus zweierlei Sicht von Interesse sein: Einerseits stellen die verschiedenen Modelle und Konzepte unterschiedliche Möglichkeiten der Verknüpfung von Teilchen- und Stoffebene dar, und andererseits ist die Modellbildung bei den „Säuren und Basen“ besonders interessant, da sich viele historische Modelle ohne evidenzbasierte Hypothesen zur Teilchenebene entwickelt haben.

In diesem Artikel geben wir einen knappen Überblick über die Entwicklung von Säure-Base-Modellen von der Antike bis zur Gegenwart und zeigen Möglichkeiten auf, wie die Betrachtung historischer und aktueller Säure-Base-Modelle in den Chemieunterricht der Sekundarstufe II in einer an Nature of Science (NoS) angelehnten Herangehensweise integriert werden kann.

1. Eine historische Entwicklung aus der Antike und dem Mittelalter

Essigsäure als das „Gärungsprodukt alkoholhaltiger Flüssigkeiten“ war im Altertum die einzig bekannte Säure bzw. saure Lösung und wurde vermutlich als gleichbedeutend mit Säure allgemein angesehen [1,4]. Eine etymologische Betrachtung der Begriffe für Säure und Essig legen diesen Schluss nahe: Im Altgriechischen bedeutet *oxos* Essig und *oxys* sauer, im Lateinischen *acetum* Essig oder Essigsäure und *acidus* sauer [1,4]. Im Vergleich zu den „Säuren“ waren mehrere neutrale und basische Substanzen – bzw. Salze – bekannt: Kochsalz (NaCl), Natriumcarbonat (Soda, Na_2CO_3), unreine Pottasche (K_2CO_3 , gewonnen aus Pflanzenasche) und Alaun (Kaliumaluminiumsulfat; $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2$), sowie gebrannter (CaO) und gelöschter ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) Kalk, Arsenoxide (As_2O_3 , As_2O_4 bzw. As_2O_5) und beide Kupferoxide (Cu_2O bzw. CuO) [5]. Zusätzlich verwendeten arabische Alchimist*innen „scharfe Wässer“ (basische Lösungen) zur ‚Auflösung‘ von Stoffen. Basis dieser ‚Wässer‘ waren gebrannter Kalk, Soda, Pottasche und Urin (welches gemeinsam Ammoniumalaun $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$ ergab), sowie später Kalilauge (wässrige Lösung von Kaliumhydroxid KOH) aus der Seifensiederei und Kaliumsulfat (K_2SO_4) aus der Salpetersäureherstellung [5]. Der erste Name der Basen, Alkalien, stammt auch aus dieser Zeit, er leitet sich vom arabischen *al-qaly* (auch: *al-qily*) ab [5]. Mit *al-qaly* wurde die Asche der Salzkrauter (*Kali turgidum*) bezeichnet, da in der Asche dieser Pflanze basisch reagierendes Natriumcarbonat (Soda, Na_2CO_3) enthalten ist. Infolgedessen führten weitere Untersuchungen von Stoffen im Mittelalter zur Entdeckung verschiedener Mineralsäuren, der Salpetersäure (Aqua fortis, HNO_3), der Schwefelsäure (Oleum vitrioli, H_2SO_4 , wässrige Lösung von Schwefeltrioxid SO_3) und der Salzsäure (Spiritus salis, wässrige Lösung von Chlorwasserstoff HCl), des Königswassers (Aqua regis, Gemisch aus konzentrierter Salzsäure und konzentrierter Salpetersäure im Verhältnis 3:1) sowie des Ethans ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) [5], wodurch die Geschichte der Säuren und Basen schlagartig komplexer wurde.

1.1 ‚Säuren und Basen‘ in der Neuzeit: Die Phlogiston-Theorie und Sauerstoff als die „Grundlage“ von Säuren

Mit dem Ende des Mittelalters und dem Beginn der Neuzeit ungefähr im Jahr 1500 entwickelte sich auch die Geschichte der „Säuren und Basen“ weiter. Während zuvor noch hauptsächlich Essigsäure und drei Mineralsäuren sowie einige Salze im Vordergrund standen, wurden in der Neuzeit Phosphorsäure (H_3PO_4 , wässrige Lösung von

Phosphorpentoxid P_4O_{10}), Flußsäure (wässrige Lösung von Fluorwasserstoff HF) und Borsäure (H_3BO_3) sowie einige organische Säuren entdeckt (Benzoesäure, Methylalkohol, Aceton, Ameisensäure, Oxalsäure, Weinsäure, Citronensäure, Milchsäure, Harnsäure, Glycerol, ...) und in Experimenten verwendet [5]. Durch diese Untersuchungen gelang Glauber 1648 eine erste Verallgemeinerung und Modellierung, die für ein späteres kohärentes Säure-Base-Konzept von Interesse war: Glauber erkannte sauer und alkalisch als Gegensätze und ein Salz als Produkt einer Säure-Base-Reaktion (Rychtmann, 1979) [6]. Letzteres wurde unter anderem auch von Tachenius (1668) postuliert [4].

Eine viel zitierte Definition, die auch heute noch Relevanz hat, ist die von Boyle um 1680. Boyle stellte fest, dass Säuren bei der Reaktion mit Basen zu Salzen ihre typischen Eigenschaften verlieren, sodass sie einen Pflanzenfarbstoff nicht mehr oder anders färben [1,4,5]. Umgekehrt beobachtete man bei Basen genauso den Verlust oder die Veränderung der färbenden Eigenschaften nach der Reaktion mit einer Säure [5]. Rouelle erweiterte diese Definition 1744 durch die Idee, dass die Salzbildung das wichtigste Charakteristikum der Säure-Base-Reaktion darstellte und stellte den Namen „Base“ (Base als Basis für Salzbildung) für die neue Stoffklasse vor [6]. Erweitert wurde dieses Konzept durch Nikolaus Lemery 1754; er meinte, dass Säuren Spitzen aufweisen, die auf der Zunge stechen und mit dem Gegenstück, der Base, zu einem Salz reagieren würden [4].

Die Namensherkunft von Base kann zum Beispiel anhand von Pierre Joseph Macquers Dictionnaire de Chymie aus dem Jahr 1766 nachvollzogen werden. Kaliumchlorid bezeichnet er als *sel commun à base d'alkali végétal* [gewöhnliches Salz auf Basis von pflanzlichem Alkali] und Natriumacetat als *sel acéteux à base d'alkali marin* [essigsäures Salz auf Basis von Meeresalkali] [5]. Das Wort Base hängt somit etymologisch tatsächlich mit „Basis“ zusammen, es bezeichnet die ‚Basis‘ der Salze und Salzbildung.

Becher, der Begründer der Phlogiston-Theorie, postulierte um 1680 eine Gegentheorie zu jener von Boyle. Seiner Theorie zufolge gibt es einen Bestandteil, den alle Säuren enthalten müssen, die „Ursäure“ [4]. Diese Theorie wurde von Stahl um 1700 weiter experimentell untersucht. Bei seiner Suche nach der Ursäure meinte Stahl unter anderem, dass er Schwefelsäure in Salzsäure umwandeln könnte und somit den Grundbaustein von Säuren entdeckt hätte [4]. Dieses Konzept der Ursäure ist zwar fachwissenschaftlich aus heutiger Sicht unzulänglich, war aber insofern wichtig für die geschichtliche Entwicklung von Säure-Base-Modellen, als dass sich alle nachfolgenden Chemiker*innen auf die Suche nach dem ureigenen Bestandteil von Säuren machten und so ein allgemeingültiges Säure-Base-Modell aufzustellen versuchten. Den Umbruch von der neuzeitlichen zur modernen Chemie stellte letztendlich Lavoisier dar, der 1789 seinen *Traité élémentaire de chimie* publizierte. Lavoisier vermutete den ureigenen Bestandteil, das

principe acidifiant, der Säure im Sauerstoff, was wiederum den Namen „Sauerstoff“ erklärt.

1.2 Moderne Säure-Base-Modelle: Elektrische Ladung und Wasserstoff

Als Folge der Suche nach dem einen Bestandteil von Säuren rückten kleine Teilchen, wie Elektronen, Sauerstoffatome und Wasserstoffatome, immer stärker in den Fokus. Jöns Jacob Berzelius postulierte beispielsweise 1802, dass Säuren Substanzen mit überschüssiger negativer Elektrizität seien, Basen hätten einen elektropositiven Charakter. Säure-Base-Reaktionen stellen demnach also Neutralisationen zwischen elektrisch positiven (basischen) und elektrisch negativen (sauren) Teilchen dar [6]. Seine Forschung, unter anderem mit Cyanwasserstoff (HCN) sowie seiner wässrigen Lösung, der Blausäure, stellte die Basis für moderne Säure-Base-Modelle dar [4]. Sir Humphrey Davy widerlegte 1810 Lavoisiers Vorschlag des Sauerstoffs als des „säuremachenden Stoffes“, indem er gemeinsam mit Gay-Lussac und Thénard bewies, dass Chlorwasserstoff (HCl) keinen Sauerstoff enthält, mit Wasser aber dennoch sauer reagiert [4]. 1815 schlug Davy schließlich vor, dass kein einzelnes säurebildendes Element existiere, sondern Azidität stattdessen durch die Anordnung von Elementen entstünde [6].

Beginnend mit Dulong rückte Wasserstoff im Jahr 1815 als die Basis von Säuren in den Fokus [6]. 1816 unterstützte Davy diese Idee, obwohl sie aufgrund des sauren Charakters von Schwefeltrioxid (SO_3) sehr umstritten war [6]. 1838 meinte von Liebig aufgrund seiner Forschung mit Mineralsäuren und organischen Säuren schließlich, dass Säuren einen Säurerest und Wasserstoff enthalten würden, wobei Wasserstoff durch Metallatome ersetzt werden könne; Basen definierte er als Hydroxide bzw. Metallhydroxide, die Säuren neutralisieren und dabei ein Salz erzeugen würden [6]. Anschließend an diese Idee stellte Arrhenius sein heute noch verwendetes Säure-Base-Konzept auf, welches auf seiner Forschung zur Leitfähigkeit der Lösungen von Säuren, Basen und Salzen beruht [4,6]. Er postulierte 1884, dass Säuren Stoffe darstellen würden, die Wasserstoff enthalten und in Wasser zu H^+ -Ionen und negativem Säurerest dissoziieren, während Basen Stoffe seien, die eine Hydroxidgruppe enthalten und in Wasser zu OH^- -Ionen und positivem Basenrest dissoziieren. Nach Arrhenius ist eine Säure-Base-Reaktion als eine Neutralisation mit Salzbildung charakterisiert. Germann erweiterte dieses Modell 1925 auf aprotische Lösungsmittel (Moleküle verfügen über keine funktionelle Gruppe, aus der Wasserstoffatome als H^+ -Ionen (Protonen) abgespalten werden können; z. B. Kohlenwasserstoffe, Ketone, Ester) [6,7].

1.3 Brønsted-Lowry und Lewis

Im Jahr 1923 beschäftigten sich Johannes Nicolaus Brønsted, Thomas Martin Lowry und Gilbert Lewis eingehender mit Säure-Base-Reaktionen und stellten unabhängig voneinander

zwei verschiedene Modelle auf. Das Konzept von Brønsted [8] und Lowry [9] drehte sich um Wasserstoff als das *principe acidifiant* und die Säure-Base-Reaktion wurde über den Transfer von H^+ -Ionen definiert. Lewis schlug ein ähnliches, wenn auch breiter gefächertes, Donator-Akzeptor-Modell vor, da er den Fokus auf Wasserstoff noch immer als zu reduziert ansah [6]. Er publizierte letztendlich im Jahr 1938 ein eigenes Säure-Base-Konzept, demzufolge Lewis-Basen ein freies Elektronenpaar zur Verfügung stellen und so eine koordinative Bindung zu Lewis-Säuren in Form eines Lewis-Säure-Base-Komplexes ausbilden können [10].

1.4 Das Säure-Base-Konzept nach Lux und Flood

Das Säure-Base-Konzept nach Lux und Flood wurde erstmals 1939 von Hermann Lux in deutscher Sprache publiziert und durch den Artikel von Håkon Flood und Tormod Førlund 1947 einem internationalen Publikum zugänglich gemacht [11]. Bei dem Modell handelt es sich wiederum um ein Donator-Akzeptor-Konzept. Im Vergleich zu Brønsted, Lowry und Lewis fokussiert dieses Modell aber – in Anlehnung an Lavoisiers Theorie, dass Säuren Sauerstoff enthalten würden – auf Sauerstoffionen: Säuren werden als Oxidionen- (O_2^-) -Akzeptoren und Basen als Oxidionen- (O_2^-) -Donatoren definiert. Mit diesem Säure-Base-Konzept können, ähnlich wie für Brønsted-Säuren und -Basen, Gleichgewichtskonstanten und respektive Säure- und Basenstärken der wässrigen Lösungen bestimmt werden [11]. Die Definition ist auch heute noch relevant für geochemische Untersuchungen von Salzschnmelzen sowie für die Geochemie allgemein, in der klassischen allgemeinen Chemie findet sie aber weniger Beachtung.

1.5 Säuren und Basen nach Usanovich

Eines der modernsten Säure-Base-Konzepte, jenes von Mikhail Usanovich (1938), scheint in vielerlei Hinsicht etwas exotisch zu sein. Im Vergleich zu bisherigen Konzepten, die sich auf Protolysen und Komplexbildungsreaktionen beschränken, schließt Usanovich alle Reaktionen mit ein, bei denen Ionen abgegeben, aufgenommen oder auf andere Art übertragen werden [12]. So zählen nach dieser Definition auch Redoxreaktionen zu den Säure-Base-Reaktionen. Laut Rychtmann (1979) [6] zählt Usanovich jeglichen Prozess, der in einer Salzbildung resultiert, zu den Säure-Base-Reaktionen, unabhängig davon, welchem Mechanismus der Prozess folgt. Diese Theorie wurde von ihm experimentell untersucht und in Ansätzen gestützt, da bei vielen der untersuchten Redoxreaktionen tatsächlich pH-Wert-Änderungen auftreten; es gibt jedoch Widersprüchlichkeiten hinsichtlich komplexer Oxidationsmittel wie dem Permanganat (MnO_4^-), bei dem die gemessenen und errechneten pH-Werte nicht übereinstimmen [6].

1.6 Das HSAB-Modell – harte und weiche Säuren und Basen

Um die Stärke von Lewis-Säuren und -Basen erfassen zu können, veröffentlichte der amerikanische Chemiker Ralph Pearson 1963 [13] – in Analogie zur Säuren-/Basenstärke im Modell von Brønsted – das Modell der harten und weichen Säuren und Basen (hard and soft acids and bases). Grundlage des Modells ist die Unterscheidung zwischen harten und weichen Säuren und Basen. „Hart“ beschreibt hier Teilchen (Atome, Ionen und Moleküle), die eine hohe Ladungsdichte aufweisen, kleine Radien haben und wenig polarisierbar

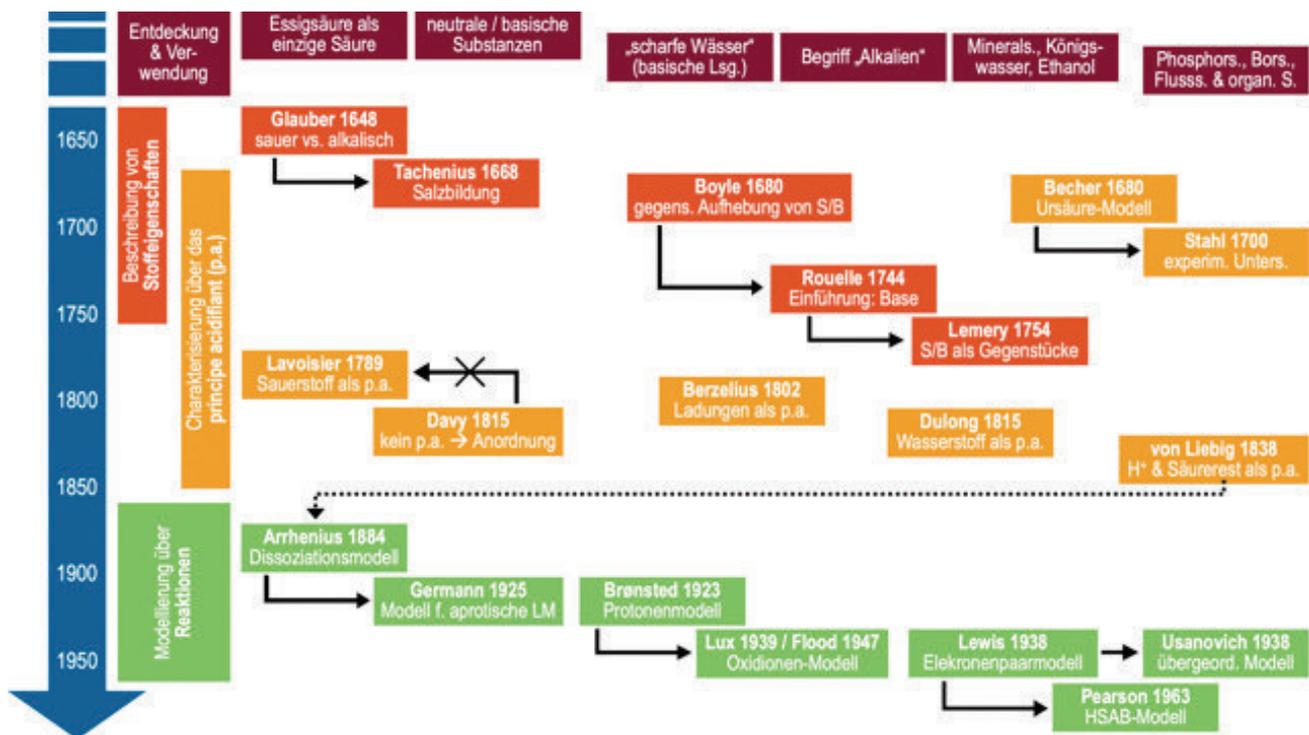


Abbildung 1: Ein Überblick über die historische Entwicklung von Säure-Base-Modellen von der Antike bis zur Gegenwart

sind, d. h. deren Bindung überwiegend ionischen Charakter aufweist. „Weiche“ Säuren und Basen weisen im Gegensatz dazu eine niedrige Ladungsdichte und große Radien auf und sind leicht polarisierbar, weil deren Bindung einen überwiegend kovalenten Charakter aufweist. Mit Hilfe des HSAB-Modells ist es möglich, die Stabilität von Lewis-Säure-Base-Komplexen abzuschätzen und dadurch den Ablauf von Säure-Base-Reaktionen nach Lewis vorherzusagen. Als Grundprinzip wird festgelegt, dass stabile Lewis-Säure-Base-Komplexe entstehen, wenn eine harte Säure mit einer harten Base oder eine weiche Säure mit einer weichen Base reagiert.

Auch wenn mit dem HSAB-Modell, insbesondere in Kombination mit dem Säure-Base-Modell nach Lewis, eine Vielzahl von Säure-Base-Reaktionen richtig vorhergesagt werden kann, so besitzt auch dieses Modell Grenzen und kann zu falschen Abschätzungen führen, wenn beispielsweise Hydratations- oder Mesomerieeffekte überwiegen.

2. Anwendungsmöglichkeiten in der Sekundarstufe

In der Schule wird oftmals das Säure-Base-Konzept nach Brønsted-Lowry aufgrund seiner breit gefächerten Anwendbarkeit, ausreichenden Komplexität und des Einsatzes vom Donator-Akzeptor-Konzept vorgestellt. Während diese Herangehensweise aus Gründen der Anschlussfähigkeit (Donator-Akzeptor-Prinzip als ein zentrales Basiskonzept der Chemie) für gut praktikabel befunden wird, so kann es aus Perspektive von Nature of Science auch von Interesse sein, auf die historischen Modelle und Konzepte der „Säuren und Basen“ einzugehen, um auf Alltagsvorstellungen (Säuren „neutralisieren“ Basen, Basen sind die „Basis“ von Salzen) einzugehen und diese aufzuklären. In weiterer Folge bieten sich Konzepte wie das von Usanovich außerdem dazu an, um über die Kontextgebundenheit von Modellen zu diskutieren und diese als eine der zentralen Eigenschaften von Säure-Base-Modellen hervorzuheben [12]. Insgesamt kann der Einbezug historischer Aspekte in den Chemieunterricht dazu beitragen, Schüler*innen die Vorläufigkeit von Modellen, Theorien und Erklärungen zu verdeutlichen und die oft langwierigen und

komplexen Schritte bis zur Entwicklung eines anerkannten Modells aufzuzeigen.

Die Betrachtung und Gegenüberstellung verschiedener Säure-Base-Modelle können dazu verwendet werden, problemorientierte Zugänge in den Naturwissenschaften zu thematisieren. Den Schüler*innen können beispielsweise Materialien zu zwei oder mehreren aufeinander aufbauenden Modellen zur Verfügung gestellt werden, um diese anschließend zu analysieren. Dabei könnten z. B. folgende Fragen leitend sein:

1. Was sind die Grundaussagen der betrachteten Modelle?
2. Worin liegen die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der betrachteten Modelle?
3. Welche Weiterentwicklung weist Modell Y im Vergleich zu Modell X auf? Was kann mithilfe von Modell Y erklärt werden, was mit Modell X nicht möglich war? Wurde der Anwendungsbereich von Modell X in Modell Y erweitert oder vollkommen verändert?
4. Wo liegen die Grenzen und Einschränkungen von Modell Y? Welche Aspekte müsste eine Weiterentwicklung dieses Modells adressieren, um den Anwendungs- bzw. Gültigkeitsbereich des Modells zu erweitern?

Darüber hinaus können historische Säure-Base-Modelle im Sinne eines historisch-genetischen Ansatzes dazu genutzt werden, die historischen Entwicklungen in der Wissenschaft der eigenen Wissens-/Kompetenzentwicklung gegenüberzustellen. So kann beispielsweise darauf eingegangen werden, dass sich die historischen Säure-Base-Modelle von der Beschreibung beobachteter Phänomene (makroskopische Ebene) sukzessive zu evidenzbasierten und komplexeren Modellen auf der submikroskopischen Ebene entwickelt haben, ähnlich wie dies im Unterricht von der Primarstufe über die Sekundarstufe I bis hin zur Sekundarstufe II – und ggf. darüber hinaus – der Fall ist.

Rita Krebs *Universität Wien, AECC Chemie*

Elisabeth Hofer *Leuphana Universität Lüneburg,*

Didaktik der Naturwissenschaften

Literatur

Die Literatur zum Artikel finden Sie auf <https://www.pluslucis.org/Zeitschrift.html>

Experimente für den Unterricht über das Teilchenmodell

Florian Budimaier

1. Einleitung

Schüler*innen kommen in der Regel hervorragend durchs Leben, ohne, dass sie sich jemals Gedanken zur diskreten Natur der Materie gemacht haben müssen. Ihre alltäglichen Erfahrungen sind bestimmt durch Interaktionen mit der makroskopischen Welt. Demensprechend ist es nicht verwunderlich, dass sie von sich aus ein kontinuierliches Modell der Materie bevorzugen [1]. Für die naturwissenschaftlichen Didaktiken ist dies problematisch, sind doch Atome und Moleküle basal für die Erklärung sehr vieler Phänomene im Physik- und Chemieunterricht. Es gilt daher Schüler*innen an die Idee der diskreten Natur der Materie heranzuführen und sie von der argumentativen Überlegenheit dieser Sichtweise im Kontext der Naturwissenschaften zu überzeugen. Eine große Schwierigkeit ist dabei vor allem die mangelnde Anschaulichkeit des Teilchenmodells. Auch wenn Rastertunnelmikroskope mittlerweile sehr genaue Strukturanalysen möglich machen, ist und bleibt es unmöglich ein Atom zu „sehen“. Dieser Artikel geht der Frage nach, inwiefern Experimente, trotz des Problems mangelnder Anschaulichkeit, überzeugende Argumente für das Teilchenmodell darstellen.

2. Die Rolle von Experimenten für das Teilchenmodell

Allgemein können Experimente verschiedene Funktionen im naturwissenschaftlichen Unterricht einnehmen, im vorliegenden Fall lässt sich diese am besten durch „Hypothesen testen“ beschreiben [2]. Die Atomhypothese sollte durch Beobachtungen am Experiment bekräftigt werden, was jedoch nur indirekt möglich ist. Da Experimente im Schulunterricht keinen direkten Rückschluss auf die Existenz von Atomen ermöglichen, ist es notwendig die Argumentation von der anderen Seite her zu führen. Ausgehend von der Annahme, dass die Materie kontinuierlich sei, versucht man diese Hypothese zu falsifizieren. Das Experiment muss dafür so gestaltet sein, dass es sich nur schwer oder gar nicht im Rahmen eines kontinuierlichen Modells erklären lässt. Das Scheitern des einen Modells ist dann die Motivation für den Einsatz eines anderen, auf Teilchenvorstellungen basierenden Modells.

In der Literatur [1,3-5] findet sich eine Vielzahl an Experimenten, welche das Teilchenmodell im Unterricht motivieren können. Am Beispiel des Ölfleckversuchs sollte die grundlegende argumentative Herangehensweise dazu veranschaulicht werden. Für dieses Experiment füllt man einen größeren Behälter mit Wasser und gibt in die Mitte der Wasseroberfläche einen winzigen Tropfen Öl, worauf sich

innerhalb weniger Augenblicke eine kreisförmige Ölschicht auf dem Wasser bildet. Diese Beobachtung lässt sich auf folgende Weise interpretieren: geht man von einem kontinuierlichen Aufbau der Materie und somit des Öls aus, müsste sich der Ölfilm auf der Wasseroberfläche eigentlich bis zum Rand des Beckens hin ausbreiten. Da er das aber offensichtlich nicht tut, kann diese Annahme verworfen werden. Nimmt man dagegen an, dass die Materie diskontinuierlich aufgebaut ist, lässt sich die Beobachtung dahingehend erklären, dass auch eine sehr große Zahl an Molekülen immer nur eine begrenzte Fläche einnehmen kann. Da der mittlere Abstand zwischen den Molekülen konstant angenommen werden kann und auch ihre Anzahl unveränderlich ist, muss theoretisch bei einer Schichtdicke von einem Moleküldurchmesser die größtmögliche Ausdehnung erreicht sein. Verwendet man reine Ölsäure lässt sich mit diesem Versuch sogar die ungefähre Größe eines Ölsäure-Moleküls und daraus die Größenordnung des Atomdurchmessers abschätzen.

Natürlich muss die Argumentation für andere Experimente an das jeweils sichtbare Phänomen angepasst werden. Im Folgenden dazu einige Beispiele:

a) *Bewegung der Teilchen*

Historisch gesehen gilt die Erklärung der Brown'schen Bewegung durch Albert Einstein als eines der entscheidendsten Argumente für die Teilchennatur der Materie. Die Beobachtung, dass kleine Partikel in einer Flüssigkeit oder einem Gas zufällige Bewegungen ausführen, lässt sich am besten durch das Vorhandensein von sich stetig bewegenden Molekülen erklären. Die angenommene ständige Bewegung der Teilchen ist auch die Grundlage für das Modell des Idealen Gases. Experimentell am einfachsten lässt sich der Effekt bei mit Wasser verdünnter Milch unter dem Mikroskop beobachten [5].

b) *Leerer Raum zwischen Teilchen*

Die Idee eines leeren Raums, der sich zwischen den Atomen befindet, geht bereits auf Demokrit zurück. Gelingt es die Annahme des leeren Raums experimentell zu stützen, ist das im Umkehrschluss auch ein Beleg für die Teilchennatur der Materie, da diese Vorstellung in einem kontinuierlichen Modell keinen Sinn ergeben würde. Ein Experiment, das dieses Argument unterstützt, ist die Ausdehnung eines mit Brennspritus gefüllten Quetschbeutels in einem heißen Wasserbad [6]. Dazu drückt man so gut wie möglich die Luft aus einem leeren Quetschbeutel und gibt dann einige Tropfen Brennspritus hinein. Hält man den Quetschbeutel dann in Wasser, das kurz zuvor gesiedet hat, bläht sich dieser

deutlich auf. Zieht man den Quetschbeutel aus dem Wasser, zieht er sich wieder zusammen. Erklären lässt sich das mit dem Verdampfen des Brennschneidspiritus, wobei sich der Abstand zwischen den Molekülen deutlich vergrößert. Aus dem Wasser gezogen kondensiert der Brennschneidspiritus wieder und der leere Raum zwischen den Teilchen verkleinert sich.

c) Bindungskräfte zwischen Teilchen

Viele beobachtbaren Phänomene können mit dem Vorhandensein von Bindungen zwischen Atomen und Molekülen beziehungsweise auch innerhalb von Molekülen erklärt werden. So lässt sich beispielsweise Salz in Wasser lösen, wobei die Gitterstruktur des Salzkristalls verschwindet und die Na^+ und Cl^- Ionen sich frei bewegen können. Dieser Prozess ist reversibel – lässt man das Wasser bei Raumtemperatur verdunsten bilden sich wiederum Salzkristalle. Die Löslichkeit und Kristallisation von Stoffen sind in einem kontinuierlichen Modell kaum zu erklären, lassen sich aber im Teilchenmodell gut darstellen. Eine weitere mögliche Veranschaulichung der anziehenden Kräfte zwischen Teilchen sind Experimente zur Oberflächenspannung [4].

3. Schwierigkeiten bei Experimenten zum Teilchenmodell

Auch wenn, wie im letzten Abschnitt beschrieben, eine Vielzahl an Experimenten zum Teilchenmodell zur Verfügung steht, zeigen sich bei der Auswahl und Einbettung der Experimente im Unterricht Schwierigkeiten auf unterschiedlichen Ebenen. Diese werden im Folgenden kurz erläutert.

a) fachliche Schwierigkeiten

Für die Erklärung naturwissenschaftlicher Phänomene im Teilchenmodell werden oft Vereinfachungen gemacht, welche bei genauerer Betrachtung nicht im Einklang mit fachlichen Erklärungen stehen. Ein Beispiel dafür ist die Volumenreduktion bei Mischversuchen: vermischt man gleiche Volumina von Wasser und Ethanol zeigt sich, dass das Gesamtvolumen nicht der Summe der beiden einzelnen Volumina entspricht, sondern um einige Prozent darunter liegt. In Schulbüchern oder auf Lernseiten im Internet finden sich dazu Erklärungen wie die folgende: „Stellt man sich die Teilchen insgesamt als Kugeln vor, befinden sich zwischen den Ethanolteilchen große Zwischenräume. In diese Zwischenräume können sich die kleineren Wasserteilchen einlagern“ [7]. Diese intuitiv logisch erscheinende Erklärung greift jedoch zu kurz. Der Grund für die Volumenkontraktion ist nicht das Füllen der Lücken zwischen den Molekülen des Ethanols mit Wassermolekülen, sondern die Längenänderung der Wasserstoffbrückenbindungen. Diese sind zwischen dem partiell negativ geladenen Sauerstoffatom des Ethanol-Moleküls und dem partiell positiv geladenen Wasserstoffatom des Wassermoleküls ausgebildet. Durch die Wasserstoffbrückenbindung kann sich der Abstand zwischen den Molekülen deutlich unterhalb des Van-der-Waals-Abstands verringern. Infolgedessen verringert sich auch das Gesamtvolumen des Gemischs. Darüber hinaus gibt es sogar

Mischversuche, bei denen es zu einer Volumendilatation kommt. Gibt man jeweils die gleiche Menge an Methylcyclohexan und 2-Pentanol in ein Gefäß ergibt sich ein Gesamtvolumen, das leicht über der Summe der beiden einzelnen Volumina liegt. In diesem Fall verringern sich die intermolekularen Kräfte bei der Mischung und der mittlere Abstand zwischen zwei Molekülen steigt an [8].

Ein weiterer experimenteller Klassiker zur Demonstration des Teilchenmodells ist die Diffusion einer farbigen Lösung in einem Wasserglas. Dabei wird in ein mit Wasser gefülltes Behältnis vorsichtig etwas Kaliumpermanganatlösung gegeben, welche sich am Boden des Gefäßes absetzt. Um die Bewegung der Wassermoleküle zu verdeutlichen, vergleicht man Wasser unterschiedlicher Temperaturen miteinander, wobei sich eine deutliche schnellere Ausbreitung der farbigen Flüssigkeit bei höheren Temperaturen zeigt. Dies wird mit der stärkeren thermischen Bewegung der Wassermoleküle erklärt. Auch wenn die Molekularbewegung zweifelsfrei mit der Temperatur zunimmt, ist die Stärke des im Experiment beobachteten Effekts um ein Vielfaches größer als es theoretische Vorhersagen des Diffusionsgesetzes nahelegen würden. Die schnellere Durchmischung im Wasser mit höherer Temperatur ist dementsprechend überwiegend auf Konvektionsströmungen zurückzuführen [9]. Es ist daher sinnvoll, klar zwischen den beiden Phänomenen im Unterricht zu unterscheiden und diese jeweils didaktisch sinnvoll in eine passende Lernumgebung einzubetten.

b) didaktische Schwierigkeiten

Hat man sich in der Unterrichtsplanung nun für ein Experiment entschieden und sämtliche fachlichen Fragen geklärt, ist es als Lehrkraft naheliegend zu denken, dass Schüler*innen nun durch die Beobachtung des Experiments vom Teilchenmodell überzeugt werden. Diese Annahme ist jedoch trügerisch, da diese häufig ein kontinuierliches Modell der Materie bevorzugen. Es zeigt sich, dass Schüler*innen von sich aus Experimente zum Teilchenmodell fast ausschließlich ohne Begriffe wie Teilchen, Atom oder Molekül erklären. Dies ist auch unabhängig vom Vorwissen der Schüler*innen und kann sowohl in der Sekundarstufe I als auch in der Sekundarstufe II beobachtet werden. Wird die Demonstration des Experiments jedoch um eine Erklärung der Lehrperson ergänzt, ist die Mehrheit der Schüler*innen in der Lage, diese zumindest teilweise korrekt wiederzugeben. Eine vollständig im Einklang mit dem Teilchenmodell stehende Erklärung können trotzdem nur einige wenige Schüler*innen abgeben [10]. Daraus lässt sich schließen, dass es vielen Schüler*innen unabhängig von ihrem Alter schwerfällt, nur anhand der Beobachtung und Erklärung eines Experiments die Kernargumente des Teilchenmodells zu abstrahieren.

Um diese Lernschwierigkeiten besser zu verstehen, lohnt sich ein Blick auf die Forschung zu Lernendenvorstellungen im Kontext des Teilchenmodells. Ein grundlegendes Problem beim Lernen dieses Themas ist, dass Schüler*innen häufig dazu tendieren, Eigenschaften makroskopischer Gegenstände

als Eigenschaften der Atome und Moleküle anzunehmen. Beispielsweise gehen sie davon aus, dass Teilchen eine Farbe besitzen oder sich bei Erwärmung des Gegenstands ausdehnen und somit dessen Volumenveränderung bewirken [11]. Des Weiteren ist die Vorstellung verbreitet, zwischen den Teilchen eines Stoffes befände sich derselbe Stoff nur in verdünnter Form. Häufig denken Schüler*innen zum Beispiel, dass sich die Moleküle der Luft in der Luft befinden, anstatt, dass es die Moleküle selbst sind, welche die Luft aufbauen. Zu diesen Vorstellungen ist anzumerken, dass sie zum Teil durch den Unterricht entsteht, da Darstellungen zum Teilchenmodell in Schulbüchern oft genau diesen Aufbau der Materie nahe legen [1]. Einerseits werden Teilchen als kugelförmige Objekte dargestellt, wobei unterschiedliche Moleküle oder Elemente verschiedenfarbig dargestellt werden. Andererseits werden diese kleinen Kügelchen in das Medium, das sie aufbauen, einfach hineingezeichnet, was bei Schüler*innen die Vorstellung hervorrufen kann, die Teilchen würden sich innerhalb eines kontinuierlichen Mediums befinden.

c) erkenntnistheoretische Schwierigkeiten

Das Denken in Modellen ist für das Verstehen der Teilchenatur der Materie eine notwendige Voraussetzung. Der Zweck von Modellen ist der Versuch, sich einer komplexen Natur anzunähern und Fragen, die sich aus der Beobachtung derselben stellen, mit Hilfe der Modellvorstellung zu erklären. Dafür müssen Vereinfachungen gemacht und zentrale Eigenschaften des Modells definiert werden. Die Qualität des Modells erschließt sich in seiner Nützlichkeit und Anwendbarkeit auf neue Problemstellungen. Die Frage, ob das Modell richtig oder falsch sei, ist dagegen wenig zielführend, da jeder Modellbildung eine Idealisierung inhärent ist [12].

Im schulischen Kontext wirft diese erkenntnistheoretische Sichtweise jedoch Schwierigkeiten auf. Schüler*innen empfinden Modelle häufig als unbefriedigend, sie wollen wissen, was Teilchen wirklich sind [11]. Die Kategorie „Richtigkeit“ ist somit in ihrem Denken eher verhaftet als die Kategorie „Anwendbarkeit“. Eine Auseinandersetzung mit dem Modellierungsprozess ist demnach notwendige Voraussetzung für die Akzeptanz des Teilchenmodells. Die Studie von Peuckert [13] hat gezeigt, dass Schüler*innen eher auf die Übertragung makroskopischer Eigenschaften auf submikroskopische Teilchen verzichten, wenn sie während des Unterricht explizit über Modelle reflektiert haben.

Literatur

- [1] Harrison, A. G., Treagust, D. F., Particles and Matter: Problems in Learning about the Submicroscopic World. In: Die Teilchenstruktur der Materie im Physik- und Chemieunterricht. Fischler, H. (Hrsg.), 2006, Logos-Verl.: Berlin, S. 53-76.
- [2] Rincke, K., 2016, Experimente in ihren Funktionen für das Lernen. Universität Regensburg, Regensburg.

4. Folgerungen für den Unterricht

Zusammenfassend lässt sich die Frage, inwiefern Experimente überzeugende Argumente für das Teilchenmodell darstellen, nicht abschließend beantworten. Es hat sich gezeigt, dass diese im naturwissenschaftlichen Unterricht erhebliche Herausforderungen bergen. Als Lehrkraft muss man sich einerseits mit fachlichen Hintergründen zu den Experimenten sowie den technischen Details zu deren Durchführung auseinandersetzen. Andererseits gilt es, die Vorstellungen von Schüler*innen zu diesem Thema zu berücksichtigen. Da diese von sich selbst aus kaum das Teilchenmodell zur Erklärung von Experimenten anwenden, sollte im Unterricht anfangs auch von einem kontinuierlichen Aufbau der Materie ausgegangen werden. Das Experiment sollte dann einen Widerspruch in dieser Annahme herbeiführen. Darauf aufbauend kann man das Teilchenmodell einführen und zeigen, dass es mit diesem möglich ist, die experimentelle Beobachtung zu erklären.

Des Weiteren sollten einerseits die Unterschiede zwischen den Eigenschaften der modellhaften Teilchenebene und der beobachtbaren Ebene der Phänomene hervorgehoben, aber gleichzeitig auch auf deren Verbindung eingegangen werden. Phänomene wie die Temperatur oder der Aggregatzustand eines Stoffes sind emergente Eigenschaften der Materie, sie entstehen aus dem gemeinsamen Agieren aller Konstituenten eines Stoffes. Gemäß der kinetischen Gastheorie ist Temperatur ein indirektes Maß für die mittlere Geschwindigkeit der Moleküle. Aggregatzustände ergeben sich aus den Bindungen zwischen den Atomen oder Molekülen sowie deren mittleren Abständen zueinander. Durch Fragen wie „Kann ein Teilchen allein schon eine Temperatur haben?“ oder „Kannst du entscheiden, ob ein Teilchen fest, flüssig oder gasförmig ist?“ kann man versuchen auch bereits Schüler*innen der Sekundarstufe I anzuregen, über diese emergenten Eigenschaften nachzudenken.

Zusatzmaterial

Ein Sammlung von Experimenten zum Teilchenmodell wurde vom Autor zusammengestellt und kann online unter <https://www.pluslucis.org/Zeitschrift.html> abgerufen werden.

Florian Budimaier PH Wien & Universität Wien, AECC Physik

- [3] Vogelzang, M., Wir brauchen einen Atombegriff – Aber welchen und wann? Entwicklung eines Atombegriffs in der Sekundarstufe I. Naturwissenschaften im Unterricht Chemie, 2009, 20 (114), S. 26-29.
- [4] Fischler, H., Rothenhagen, A., Experimente zum Teilchenmodell. Naturwissenschaften im Unterricht Physik, 1997, 41, S. 27-33.
- [5] Hofmann, M., Erb, R., Zur Überzeugungskraft von Experimenten zum Teilchenmodell. PhyDid B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung; 2018: Würzburg, 2018.

- [6] Sieve, B. , Modellversuch zur Teilchenvorstellung. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 2016, 153.
- [7] Duden Learnattack GmbH, Erklären, 2021. URL: <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/chemie/artikel/erklaren>.
- [8] Winkelmann, J., Behle, J., Erklärt das Teilchenmodell die Volumenreduktion bei Mischversuchen? In: *Stolpersteine überwinden im Physikunterricht. Anregungen zu fachgerechten Elementarisierungen*. Wilhelm, T. (Hrsg.), 2018, Aulis-Verl., S. 86-88.
- [9] Riegel, S. , Sieht man die Molekularbewegung im Wasserglas? In: *Stolpersteine überwinden im Physikunterricht. Anregungen zu fachgerechten Elementarisierungen*. Wilhelm, T. (Hrsg.), 2018, Aulis-Verl., S. 83-85.
- [10] Budimaier, F., Hopf, M. , Welche Argumente überzeugen Schüler*innen vom Teilchenmodell? In: *Unsicherheit als Element von naturwissenschaftsbezogenen Bildungsprozessen*. Habig, S., van Vorst, H. (Hrsg.), 2022, S. 740-743.
- [11] Fischler, H., Schecker, H. , Schülervorstellungen zu Teilchen und Wärme. In: *Schülervorstellungen und Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*. Wilhelm, T., Hopf, M., Duit, R., Schecker, H. (Hrsg.). 2018, . Berlin, Heidelberg, S. 139-161.
- [12] Winkelmann, J. , On Idealizations and Models in Science Education. *Sci & Educ*, 2021.
- [13] Peuckert, J. , Stabilität und Ausprägung von Teilchenvorstellungen. In: *Die Teilchenstruktur der Materie im Physik- und Chemieunterricht*. Fischler, H. (Hrsg.), 2006, Logos-Verl.: Berlin, S. 77-108.

Förderung von Modellkompetenz durch erkenntnisgewinnendes Experimentieren und Modellieren im Chemieunterricht am Beispiel des Teilchenmodells

Alexander Wittenstein

1. Bedeutung von Modellkompetenz für den Chemieunterricht

Die Chemie untersucht, beschreibt und erklärt den Aufbau, die Eigenschaften und die Umwandlung von chemischen Stoffen [1]. „Ein wesentliches Ziel des Chemieunterrichts an allgemeinbildenden Schulen ist es, den Schüler*innen ein vielseitiges und anschlussfähiges Chemieverständnis zu vermitteln“ [2]. Nach Johnstone werden chemische Inhalte auf drei Ebenen betrachtet: auf einer erfahrbaren Makroebene, auf einer unsichtbaren Mikroebene sowie einer mathematisch-symbolischen Ebene [3]. Nach Leisen werden naturwissenschaftliche Unterrichtsinhalte auf fünf Darstellungsebenen mit zunehmendem Abstraktionsgrad repräsentiert: gegenständlich, bildlich, sprachlich, symbolisch und mathematisch [4]. Die Tatsache, dass im Chemieunterricht diese Ebenen gleichzeitig betrachtet werden sowie häufig und schnell zwischen ihnen gewechselt wird, führt zu Verständnis- und Lernschwierigkeiten bei Schüler*innen [5]. Neben eines reflektierten Umgangs und eines fachdidaktisch funktionalen Wechsels zwischen den Darstellungsebenen, stellt die Nutzung von Modellen eine Möglichkeit dar den Wechsel der Darstellungsebenen zu erleichtern und das Verstehen von Chemie zu fördern [6]. Folglich wird in den deutschen Bildungsstandards für den Mittleren Schulabschluss für das Fach Chemie der besondere Beitrag des Fachs Chemie für die Bildung darin gesehen, dass Lernende „experimentelle“ Ergebnisse mit Modellvorstellungen (verknüpfen) und im Teilchenbereich ein tieferes Verständnis der chemischen Reaktionen und der Stoffeigenschaften (erlangen)“ [7]. In Österreich besteht die Aufgabe des Chemieunterrichts am Gymnasium darin, Schüler*innen zu einem chemisch-naturwissenschaftlichen Denken durch Schulung einfachen Modelldenkens unter Einbeziehung vorhandener Alltagsvorstellungen hinzuführen [8].

Unter Modellkompetenz wird die Fähigkeit verstanden, „mit Modellen Erkenntnisse zu gewinnen, über Modelle zu urteilen und den Prozess der Erkenntnisgewinnung modellbezogen vollziehen und reflektieren zu können“ [9]. Modellkompetenz geht einher mit einem Modellverständnis, das sowohl auf einem konzeptuellen Modellwissen und als auch auf einer prozeduralen Modellarbeit beruht [10]. Unter Modellwissen werden Kenntnisse von Schüler*innen über grundlegende Modelle der Chemie verstanden (z. B. das Bohrsche Atommodell), die ihnen ein Verstehen chemischer Inhalte

ermöglichen (z. B. den Atombau). Das Nutzen vorgegebener Modelle und die (Weiter-)Entwicklung eigener Modelle als Mittel der Erkenntnisgewinnung wird als Modellarbeit verstanden. Ein vertieftes Verstehen von Modellen und damit von Chemie hängt insbesondere von der Modellarbeit ab [11].

2. Didaktische Analyse

Mit dem Begriff „Teilchen“ wird in der Chemie undifferenziert auf den diskontinuierlichen Aufbau der Materie hingewiesen [12]. Als Sammelbegriff wird dabei nicht zwischen Atomen, Molekülen und Ionen unterschieden. Insofern stellt der Teilchenbegriff einen Übergangsbegriff dar, da er anschlussfähig für eine weitere Ausdifferenzierung zu einem späteren Zeitpunkt ist. „Teilchen“ repräsentieren die Modellwelt der atomaren Struktur und sind anders als Stoffe und ihre Eigenschaften erfahrungsbasiert, zugänglich. Die gedankliche Verknüpfung von Stoff und Teilchen, aber auch das bewusste Auseinanderhalten dieser beiden Sichtweisen wird als Stoff-Teilchen-Konzept bezeichnet. Das Stoff-Teilchen-Konzept wird im Zusammenhang diverser Unterrichtsinhalte verwendet und stellt ein Schlüsselkonzept für den Chemieunterricht dar [13].

Nach Barke gehen Schüler*innen aufgrund der fehlenden erfahrungsbasierten Zugänglichkeit in Bezug auf den Aufbau der Materie von einem Kontinuum aus [14]. Daraus ergeben sich diverse Lernschwierigkeiten insbesondere im Hinblick auf eine konsistente Verwendung des Teilchenkonzeptes. „Für die erfolgreiche Vermittlung der Teilchenvorstellung ist dementsprechend im Unterricht konsequent mit diesem Modell zu arbeiten und es vielfach an unterschiedlichen Beispielen zu vertiefen“ [15]. Das Teilchenmodell stellt typischerweise die erste Modellvorstellung dar, die im Anfangsunterricht eingeführt wird. Nach seiner Einführung sollten Sachverhalte mit diesem Modell interpretiert werden. Mit dem Teilchenmodell lassen sich beispielsweise Lösungsvorgänge von Zucker in Wasser lernförderlich interpretieren, während es beispielsweise bei der Deutung von Stoffumwandlungen an seine Grenzen stößt [16]. Eine mangelnde Unterscheidung zwischen der stofflichen Ebene und der Teilchenebene stellt eine wesentliche Ursache für Verstehensschwierigkeiten dar [17]. In der bewussten und expliziten Auseinandersetzung mit diesen Herausforderungen liegt ein großes Potential zur Förderung eines grundlegenden

Verstehens von Chemie. Da das Interesse und die Motivation für den Chemieunterricht auch vom Verstehen der Unterrichtsinhalte abhängen, sollte der Einsatz von Modellen wie dem Teilchenmodell insbesondere unter dem Fokus der Vermeidung von Verstehensschwierigkeiten erfolgen.

3. Erkenntnisgewinnendes Experimentieren und Modellieren

Die Kompetenz, Beobachtungen auf der Stoffebene mit Vorstellungen auf der Teilchenebene zu verknüpfen, stellt neben dem besonderen Beitrag des Fachs Chemie zur Bildung zugleich eine große fachdidaktische Herausforderung für die Gestaltung der Lehr-Lern-Prozesse im Chemieunterricht dar [18]. Dementsprechend muss der Unterricht geeignete Lernanlässe bieten, um Erklärungen auf der Teilchenebene heranziehen zu können. Gleichzeitig müssen die erworbenen Teilchenvorstellungen zur Anwendung gebracht werden, indem stoffliche Phänomene mit ihrer Hilfe erklärbar gemacht werden.

Das Prozessmodell zum erkenntnisgewinnenden Experimentieren und Modellieren stellt eine Strukturierungshilfe für die Planung, Durchführung und Evaluation von Lehr-Lern-Prozessen im Chemieunterricht dar (siehe Abbildung 1). Es wurde in der Arbeitsgruppe Bildungsstandards der Fachgruppe Chemieunterricht in der Gesellschaft Deutscher Chemiker aufbauend auf dem Förderkreis nach Zaugg entwickelt [19]. Phasen der pädagogischen Diagnostik und der (individuellen) Förderung sind dabei so miteinander verzahnt, dass mit Hilfe fachdidaktisch geeigneter Phänomene Präkonzepte bewusst gemacht, an ihre Nutzbarkeitsgrenzen geführt und darauf aufbauend Lernendenvorstellungen um fachlich angemessenere Konzepte erweitert werden. Durch einen hohen Anwendungsbezug und Phasen der Zwischenreflexion und individueller Passung entwickeln die Lernenden ihre Vorstellungen bewusst weiter, indem sie die Gelegenheit zu wiederholter Explikation erhalten. Die Lehrkraft kann diagnosebasiert Einblick in die Vorstellungen und damit in den

Erkenntnisgewinnend Experimentieren und Modellieren

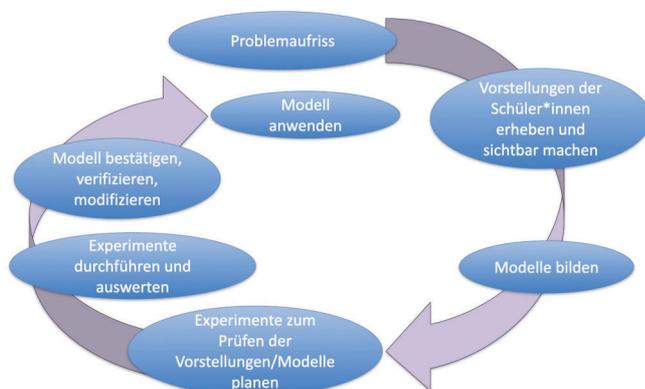


Abbildung 1: Das Prozessmodell zum erkenntnisgewinnenden Experimentieren und Modellieren (Quelle: AG Bildungsstandards der Fachgruppe Chemieunterricht in der Gesellschaft Deutscher Chemiker).

Stand der Kompetenzentwicklung nehmen und so die Lehr-Lern-Prozesse gezielter und lernerfolgsorientierter steuern [20].

4. Unterrichtskonzeption

Für Unterrichtskonzeptionen nach dem Förderkreis nach Zaugg, bei denen pädagogische Diagnostik und individuelle Förderung miteinander verzahnt sind, liegen verschiedene Beispiele für den Chemie- und auch den Biologieunterricht vor [21, 22]. Aufbauend auf der Struktur dieser Unterrichtsbeispiele wird im vorliegenden Konzept die Modellbildung und -nutzung am Beispiel des Teilchenmodells in den Mittelpunkt der Kompetenzförderung gestellt. Die Phasen der pädagogischen Diagnostik und Förderung beziehen sich dabei insbesondere auf die zu fördernde Kompetenz der Lernenden, stoffliche Beobachtungen mit Modellvorstellungen auf der Teilchenebene zu verknüpfen.

Für dieses Vorhaben wurden die Lehr-Lern-Prozesse in sieben Lernschritten eingeteilt.

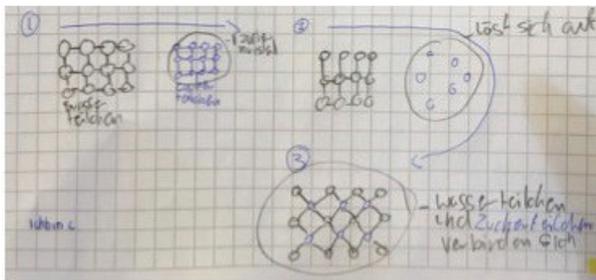
Der **erste Lernschritt** besteht darin, dass die Lernenden ein Stück Zucker in Wasser lösen und den Löseprozess beobachten (siehe Material M1). Sie beschreiben dabei, dass die Zuckerkristalle immer kleiner werden bis sie auch mit der Lupe nicht mehr zu erkennen sind. Auf Grund der Alltagserfahrung, dass beispielsweise gezuckerter Tee süß schmeckt, obwohl Zucker als Stoff im Tee nicht zu erkennen ist, kann ein kognitiver Konflikt entstehen. Dieser soll auf der Modellebene gedeutet werden. Dazu werden die Lernenden aufgefordert, ihre Vorstellungen vom Lösevorgang von Zucker in Wasser mit Hilfe einer Skizze zu erklären.

Die Vorstellungen, die die Lernenden in den Skizzen zum Ausdruck brachten, wurden in Bezug auf die artikulierte Vorstellung für die Ursache des o. g. Phänomens miteinander verglichen. Diese Vorstellungen ließen sich zu folgenden Typen zusammenfassen (siehe Abbildung 2):

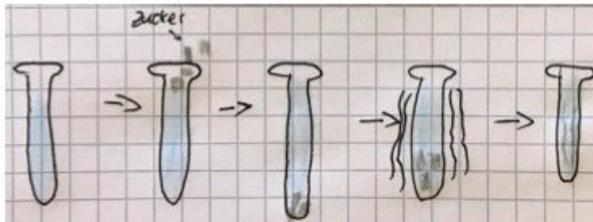
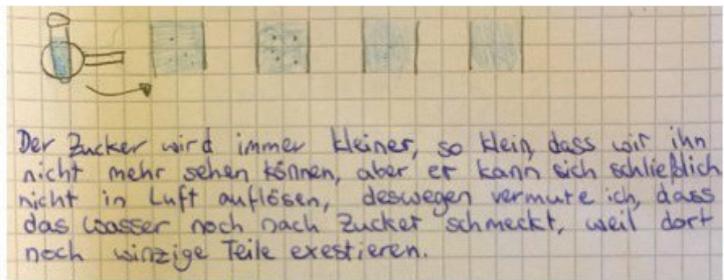
- 1.) Der Stoff Zucker verschwindet.
- 2.) Der Stoff Zucker wird unendlich klein (und verteilt sich).
- 3.) Die Zuckerteilchen lösen sich (im Sinne von verschwinden) im Wasser auf.
- 4.) Die Zuckerteilchen verbinden sich mit den Wasserteilchen.

Die Präkonzepte erscheinen sehr heterogen. Sie unterscheiden sich insbesondere dahingehend, ob sich die Lernenden die Materie als Kontinuum oder als Diskontinuum vorstellen (23).

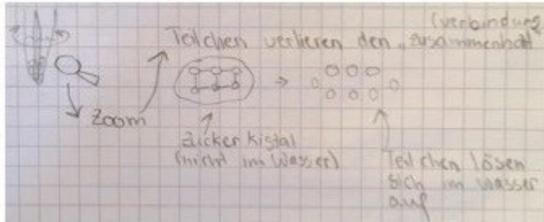
Die Lernenden beschreiben und vergleichen ihre unterschiedlichen Vorstellungen miteinander. Daraus kann sich der Anlass für weitergehende Untersuchungen ergeben. Zur Prüfung dieser Vorstellungen dampfen die Lernenden in einem **zweiten Lernschritt** (siehe Material M2) die Zuckerlösung (bzw. Salzlösung; beim Eindampfen von Kochsalzlösung



Der Zuckerteilchen verbinden sich mit den Wasserteilchen. Der Zucker wird kleiner.



Der Zucker verschwindet.



Die Zuckerteilchen lösen sich im Wasser auf.

Abbildung 2: Präkonzepte zum Lösen von Zucker in Wasser.

entsteht tatsächlich wieder ein weißer Feststoff, während im Falle von Zuckerwasser ein Karamelisieren bzw. Verkohlen fast gar nicht vermeidbar ist und Anlass für Verwirrung sein könnte). Sie beobachten, dass das Wasser siedet und verdampft. Wenn das Wasser verdampft ist, setzt sich ein weißer Feststoff am Reagenzglasrand ab. Nun können die Lernenden ihre Vorstellungen dahingehend prüfen, welche davon plausibel die Beobachtung erklären können. Sie können schlussfolgern, dass der Kristall aus kleinsten Teilchen aufgebaut sein muss, die sich beim Verdampfen des Wassers zusammenlagern und das weiße Pulver bilden.

Im **dritten Lernschritt** beschreiben die Lernenden die Annahmen des Teilchenmodells. Dazu nennen sie zunächst typische Modelle aus dem Alltag und beschreiben ihre Eigenschaften. Sie vergleichen die Absicht bzw. den Zweck von Modellen im Alltag mit denen in der Wissenschaft. Entsprechende Lernmaterialien dazu finden sich in gängigen Schulbüchern. Diese können von den Lernenden auch dazu genutzt werden, die Annahmen des Teilchenmodells zu beschreiben, den Modellcharakter des Teilchenmodells zu begründen und den Aufbau eines Kristalls mit Hilfe des Teilchenmodells zu beschreiben.

In einem **vierten Lernschritt** wenden die Lernenden das Teilchenmodell an, um die von ihnen getätigten Beobachtungen beim Lösen von Zucker bzw. Salz in Wasser zu deuten. Dazu entwickeln sie eine Filmleiste [24] und stellen ihre Beobachtungen auf der Stoffebene den entsprechenden Deutungen auf der Teilchenebene sowohl bildhaft als auch in Worten gegenüber (siehe Material M3). Es ist für die Lernenden hilfreich, wenn ihnen ein oder zwei Bilder zur Orientierung vorgegeben werden.

Nach dem Prozessmodell des Förderkreises endet der Unterricht nach diesem Schritt nicht. Es folgen Schritte der

Konsolidierung und Elaborierung [25]. Nach konstruktivistischen Vorstellungen des Lernens entwickeln die Lernenden ihre Vorstellungen individuell weiter. Diese Unterschiede im Hinblick auf die fachliche Angemessenheit der erweiterten Vorstellungen können im Rahmen einer Zwischenbilanz bewusst gemacht werden [26]. Dazu kann den Lernenden im Demonstrationsversuch noch einmal das Eindampfen von Kochsalzlösung gezeigt werden. Sie erhalten dann in einem **fünften Lernschritt** den Auftrag, erneut eine Filmleiste zu erstellen, die Vorgänge beim Eindampfen einer Kochsalzlösung auf der Stoffebene beschreibt und auf der Teilchenebene erklärt (siehe Material M4). Auch hier ist es für die Lernenden hilfreich, wenn ihnen ein oder zwei Bilder zur Orientierung vorgegeben werden. In der Sichtung dieser Arbeitsergebnisse zeigten sich drei Kompetenzniveaus: Es gab Lernende, die ihre Zeichnungen nur unvollständig beschrieben und teilweise in ihrer Darstellung Salzteilchen berücksichtigten. Eine zweite Gruppe Lernende konnte ihre Zeichnungen weitgehend korrekt beschreiben, aber noch nicht durchgängig zwischen Stoff- und Teilchenebene unterscheiden, d. h. die Lernenden schrieben Teilchen Stoffeigenschaften zu. Darüber hinaus gab es Lernende, die ihre Zeichnungen fachlich korrekt beschreiben und konsequent zwischen Stoff- und Teilchenebene unterscheiden konnten.

Durch diese (unbewertete!) Zwischendiagnose war es möglich, die Lernenden im Rahmen eines **sechsten Lernschrittes** individualisierter zu fördern. Für diese auch als Passung bezeichnete zweite Arbeitsphase erhielten die Lernenden jeweils Lernmaterialien, die an das bereits entwickelte Kompetenzniveau anknüpften (siehe Tabelle 1 und Material M5): Lernende aus der ersten Gruppen setzten sich noch einmal mit den Annahmen des Teilchenmodells auseinander, indem sie die verschiedenen Aggregatzustände auf der Teilchenebene darstellten. Lernende, die Teilchen bestimmte stoffliche Eigenschaften zuschrieben („Die Wasserteilchen

verdampfen.“), untersuchten die Diffusion von Parfüm im Reaktionsrohr und deuteten ihre Beobachtungen auf der Teilchenebene. Lernende, die schon konsequent zwischen Stoff- und Teilchenebene unterscheiden konnten, untersuchten die (ausbleibende) Volumenänderung von Wasser, in dem sich ein schmelzender Eiswürfel befindet, und deuteten dieses Phänomen durch unterschiedliche Abstände zwischen den Wasserteilchen in der Flüssigkeit und im Eis. Dabei ist im Vorfeld lerngruppenbezogen zu reflektieren, ob es ratsam ist, den Lernenden die Bezeichnung der Stufen (I, II, III) offenzulegen. Bei dem Lehrbuch, auf das in den Arbeitsaufträgen verwiesen wird, handelt es sich um das Lehrwerk *Elemente Chemie Mittelstufe* aus dem Klett Verlag [27].

Tabelle 1: Matrix zur Auswertung der Zwischenbilanz.

Du kannst bereits ...	Das entspricht ...	Du solltest heute üben ...
... deine Zeichnungen unvollständig beschreiben. ... die Zucker- bzw. Salzteilchen berücksichtigen.	Stufe I	... Schmelzen und Sieden im Teilchenmodell darzustellen.
... deine Zeichnungen weitgehend korrekt beschreiben. ... noch nicht durchgängig zwischen Stoff- und Teilchenebene unterscheiden, d. h. du schreibst Teilchen Stoffeigenschaften zu.	Stufe II	... erklären, wie Parfüm in die Nase gelangt.
... deine Zeichnungen fachlich korrekt beschreiben. ... konsequent zwischen Stoff- und Teilchenebene unterscheiden.	Stufe III	... das Schmelzen eines Eiswürfels untersuchen und mit dem Teilchenmodell erklären.

Als abschließender siebter Lernschritt erfolgt eine Schlussbilanz, anhand derer eine Leistungsbewertung vorgenommen werden kann. Die Lernenden erhalten die Aufgabe, mit Hilfe des Teilchenmodells das unterschiedliche Verhalten zweier Ballons zu erklären, von denen einer mit Wasserstoffgas und ein zweiter mit Kohlenstoffdioxidgas gefüllt war (siehe Material M6).

5. Diskussion der Lernergebnisse

In der Unterrichtsdurchführung hat sich gezeigt, dass die vorliegende Unterrichtskonzeption über einen herausragenden

motivationalen Charakter für die Schüler*innen verfügt. Durch das aus ihrer Sicht klare, einfache und leicht zugängliche Phänomen zu Beginn der Unterrichtssequenz zeigten alle Schüler*innen ein hohes Maß an Motivation, ihre Vorstellungen zu den Ursachen für den Lösevorgang zum Ausdruck zu bringen. Da die einzelnen Vorstellungen wertschätzend in der Lerngruppe besprochen und miteinander verglichen wurden, zeigte sich aus der Sicht der Schüler*innen, dass der Unterricht von ihren Ideen getragen wird. Die Fokussierung darauf, dass die unterschiedlichen Vorstellungen nicht als falsch oder richtig gewertet werden sollen, sondern im Hinblick darauf, ob sie möglichst auch andere Erscheinungen erklären können, erwies sich als förderlich im Hinblick auf das Verstehen von Modellarbeit.

Die Möglichkeit einer unbewerteten Zwischenbilanz erlebten die Schüler*innen als besonders wertvoll. Sie vermittelte ihnen den Eindruck, dass nach dem fünften Lernschritt nicht das Unverständene bilanziert werden soll, sondern das bereits Verstandene erfahrbar gemacht werden soll. Dabei wurde jedoch festgestellt, dass es nicht allen Lernenden gelang, ihr Verstehen für das Teilchenmodell in der zweiten Phase der Erarbeitung noch weiter auszubauen. Interessanterweise gelang dies insbesondere Schüler*innen, deren Modellverständnis durch die Zwischenbilanz einem mittleren Niveau zugeordnet wurde.

Die Durchführung des vorliegenden Unterrichtsvorhabens erwies sich aus den o.g. Gründen als lohnenswert. Einschränkungen ergeben sich allerdings aus dem vergleichsweise hohen zeitlichen Aufwand: Gerade im Anfangsunterricht ist die Unterrichtszeit vor dem Hintergrund der großen Zahl an Inhalten, die laut Lehrplan vermittelt werden sollen, eher knapp. Eine Lösung für dieses Problem könnte in einem noch stärker exemplarischen Vorgehen bestehen. Insofern erscheint es vielversprechend, die Unterrichtskonzeption auch auf andere Modelle im Chemieunterricht zu übertragen (z. B. Teilchenmodell). Erste Anregungen dazu finden sich auch bei Barke [28].

Alexander Wittenstein Georg-Christoph-
Lichtenberg-Schule, Leipzig

Literatur

- [1] Reiners, C.: Chemie vermitteln. Fachdidaktische Grundlagen und Implikationen. Springer Spektrum. Berlin Heidelberg. 2014: 25.
- [2] Sommer, K./Wambach-Laicher, J./Pfeifer, P.: Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht. Aulis. Seelze. 2018: 17.
- [3] Sommer, K./Wambach-Laicher, J./Pfeifer, P.: Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht. Aulis. Seelze. 2018: 247.
- [4] Leisen, J.: Handbuch Sprachförderung im Fach. Sprachsensibler Fachunterricht in der Praxis. Band 1. Klett. Stuttgart. 2013: 33ff.
- [5] Reid, N.: The Johnstone Triangle: The Key to Understanding Chemistry. Royal Society of Chemistry. 2021: 53f. Online in Internet ULR: <https://doi.org/10.1039/9781839163661>
- [6] Reiners, C.: Chemie vermitteln. Fachdidaktische Grundlagen und Implikationen. Springer Spektrum. Berlin Heidelberg. 2014: 95.

- [7] Kultusministerkonferenz (KMK): Bildungsstandards im Fach Chemie für den Mittleren Schulabschluss. Luchterhand. Neuwied. 2004: 7.
- [8] Lehrplan für die Allgemeinbildenden Höheren Schulen. Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung. Online in Internet ULR: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008568&FassungVom=2018-09-01>
- [9] Sommer, K./Wambach-Laicher, J./Pfeifer, P.: Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht. Aulis. Seelze. 2018: 530.
- [10] Sommer, K./Wambach-Laicher, J./Pfeifer, P.: Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht. Aulis. Seelze. 2018: 530.
- [11] Sommer, K./Wambach-Laicher, J./Pfeifer, P.: Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht. Aulis. Seelze. 2018: 540.
- [12] Sommer, K./Wambach-Laicher, J./Pfeifer, P.: Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht. Aulis. Seelze. 2018: 24.
- [13] Sommer, K./Wambach-Laicher, J./Pfeifer, P.: Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht. Aulis. Seelze. 2018: 25.
- [14] Barke, H.-D./Harsch, G./Kröger, S./Marohn, A.: Chemiedidaktik kompakt. Lernprozesse in Theorie und Praxis. 3. Auflage. Springer Spektrum. Berlin Heidelberg. 2018: 28.
- [15] Barke, H.-D./Harsch, G./Kröger, S./Marohn, A.: Chemiedidaktik kompakt. Lernprozesse in Theorie und Praxis. 3. Auflage. Springer Spektrum. Berlin Heidelberg. 2018: 29.
- [16] Barke, H.-D./Harsch, G./Kröger, S./Marohn, A.: Chemiedidaktik kompakt. Lernprozesse in Theorie und Praxis. 3. Auflage. Springer Spektrum. Berlin Heidelberg. 2018: 254.
- [17] Reiners, C.: Chemie vermitteln. Fachdidaktische Grundlagen und Implikationen. Springer Spektrum. Berlin Heidelberg. 2014: 101.
- [18] Reid, N.: The Johnstone Triangle: The Key to Understanding Chemistry. Royal Society of Chemistry. 2021: 49. Online in Internet ULR: <https://doi.org/10.1039/9781839163661>
- [19] Bauch, W./Maitzen, C./Katzenbach, M.: Auf dem Weg zum kompetenzorientierten Unterricht – Lehr- und Lernprozesse gestalten. Ein Prozessmodell zur Unterstützung der Unterrichtsentwicklung. Amt für Lehrerbildung. Frankfurt am Main. 2001: 8-12.
- [20] Streller, S./Bolte, C./Dietz, D./Noto La Diega, R.: Chemiedidaktik an Fallbeispielen. Anregungen für die Unterrichtspraxis. Springer Spektrum. Berlin. 2019: 27ff.
- [21] Raguse, K./Weber-Peukert, G./Woldt, P./Lotz, A.: Individuelle Förderung im Chemieunterricht – Der Förderkreis am Beispiel der Unterrichtseinheit „Laborführerschein“. In: chemkon. Chemie konkret. Forum für Didaktik und Unterricht. 4/2013. Wiley-VCH. Weinheim. 2013: 183-190.
- [22] Lotz, A.: Tauchen – alles eine Frage der Atmung? Mit dem Förderkreis das Üben unterstützen. In: Biologie 5-10. 13/2016. 2016: 28-31.
- [23] Barke, H.-D./Harsch, G./Kröger, S./Marohn, S.: Chemiedidaktik kompakt. Lernprozesse in Theorie und Praxis. 3. Auflage. Springer Spektrum. Berlin Heidelberg. 2018: 18f.
- [24] Leisen, J.: Handbuch Sprachförderung im Fach. Sprachsensibler Fachunterricht in der Praxis. Band 2. Klett. Stuttgart. 2013: 26.
- [25] Bauch, W./Maitzen, C./Katzenbach, M.: Auf dem Weg zum kompetenzorientierten Unterricht – Lehr- und Lernprozesse gestalten. Ein Prozessmodell zur Unterstützung der Unterrichtsentwicklung. Amt für Lehrerbildung. Frankfurt am Main. 2001: 26f.
- [26] Bauch, W./Maitzen, C./Katzenbach, M.: Auf dem Weg zum kompetenzorientierten Unterricht – Lehr- und Lernprozesse gestalten. Ein Prozessmodell zur Unterstützung der Unterrichtsentwicklung. Amt für Lehrerbildung. Frankfurt am Main. 2001: 22f.
- [27] Bee, U. et al. Elemente Chemie. Mittelstufe. Ernst Klett Verlag. Stuttgart Leipzig. 2019.
- [28] Barke, H.-D./Harsch, G./Kröger, S./Marohn, A.: Chemiedidaktik kompakt. Lernprozesse in Theorie und Praxis. 3. Auflage. Springer Spektrum. Berlin Heidelberg. 2018: 262.

Modelle und Simulationen elektrischer Stromkreise

Jan-Philipp Burde, Thomas S. Weatherby, Arthur Kronenberger und Thomas Wilhelm

1. Typische Verständnisschwierigkeiten

Die Entwicklung eines konzeptionellen Verständnisses von Gleichstromkreisen hat sich als sehr schwierig erwiesen [1-3]. Insbesondere gelingt es vielen Schüler*innen oftmals nicht, im Verlauf der Sekundarstufe I ein konzeptionelles Verständnis der elektrischen Spannung als Differenzgröße und Ursache des elektrischen Stroms zu entwickeln [4]. Statt die elektrische Spannung als eigenständige Größe zu begreifen, wird diese von den Lernenden nur allzu oft als Eigenschaft bzw. Bestandteil des elektrischen Stroms wahrgenommen. Damit einher geht die Entwicklung eines „übermächtigen Strombegriffs“ [5], in dessen Folge Lernende dazu tendieren, Stromkreise ausschließlich aus Sicht des Stroms zu analysieren. Dieser durchläuft in der Vorstellung der Lernenden den Stromkreis von der Batterie ausgehend Bauteil für Bauteil und muss sich an Verzweigungspunkten überlegen, wie er sich aufteilt und wird in elektrischen Geräten zumindest teilweise „verbraucht“ („Stromverbrauchsvorstellung“). Erkannt wird also nicht, dass es sich bei dem elektrischen Stromkreis um ein zusammenhängendes System handelt, bei dem eine Änderung an einer Stelle sich sofort auf den gesamten Stromkreis auswirkt.

Zurückgeführt werden diese Verständnisschwierigkeiten u. a. darauf, dass der Strombegriff die Auseinandersetzung mit Stromkreisen in der Sekundarstufe I aus historischen, nicht jedoch didaktischen Gründen zu Lasten einer Auseinandersetzung mit dem Potenzial- und Spannungsbegriff dominiert [6]. Ein weiterer Grund kann in der Unanschaulichkeit der elektrischen Spannung gesehen werden. Während der elektrische Strom für die meisten Kinder in Analogie zu einem Wasserstrom wie z. B. einem Fluss vergleichsweise leicht vorstellbar ist, erscheint die elektrische Spannung als Differenz zweier Potenzialwerte als wenig anschaulich [7].

2. Modelle und Analogien elektrischer Stromkreise

Um Lernenden dennoch ein qualitatives Verständnis elektrischer Stromkreise zu ermöglichen, bietet es sich in der Sekundarstufe I an, die elektrische Spannung mit Hilfe von Modellen und Analogien zu veranschaulichen [8]. Eine Analogie fungiert dabei als „Brücke zum Verständnis“, indem sie wie in Abbildung 1 dargestellt zwischen dem im Unterricht verwendeten Modell und dem elektrischen Stromkreis eine symmetrische Relation in Hinblick auf zentrale, übereinstimmende Eigenschaften und Strukturen herstellt [9].

Aus rein fachlicher Sicht ist das oftmals in der Schule genutzte Modell des ebenen, geschlossenen Wasserkreislaufs sehr

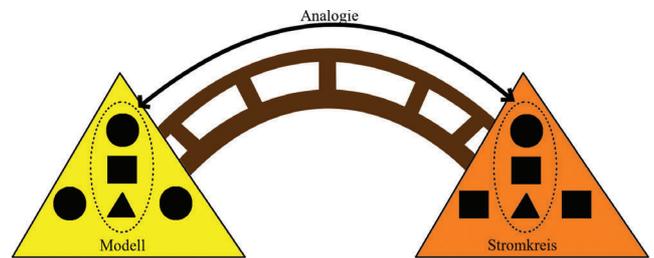


Abbildung 1: Eine Analogie fungiert als „Brücke zum Verständnis“ zwischen Modell und Stromkreis.

weittragend. Bei diesem Modell entspricht der Wasserdruck dem elektrischen Potenzial, der Wasserdruckunterschied dem Potenzialunterschied bzw. der elektrischen Spannung und die Wasserstromstärke der elektrischen Stromstärke. In didaktischen Studien hat sich das Modell jedoch als problematische Lernhilfe erwiesen, da Lernende zu ebenen, geschlossenen Wasserkreisläufen ganz ähnliche Fehlvorstellungen haben wie zu elektrischen Stromkreisen, u. a. da sie in ihrem Alltag keine Erfahrungen mit Wasserdruck in geschlossenen Rohrssystemen machen [10, 11].

Eine Alternative zum ebenen, geschlossenen Wasserkreislauf stellt das offene Wasserkreislaufmodell dar, bei dem Wasser auf eine gewisse Höhe gepumpt und von dort z. B. als Wasserfall, der ein Wasserrad antreibt, wieder nach unten fließt [12, 13], bzw. die Bike-Park-Analogie [14]. Bei diesen Modellen handelt es sich um Höhenmodelle, da hier die Höhe dem elektrischen Potenzial und der Höhenunterschied dem Potenzialunterschied bzw. der Spannung entspricht. Die Wasserstromstärke bzw. Anzahl der Biker pro Zeiteinheit entspricht der elektrischen Stromstärke. Soll im Unterricht lediglich der Differenzcharakter der elektrischen Spannung veranschaulicht werden, haben sich in der fachdidaktischen Forschung zwei weitere Höhenmodelle bewährt: Das Stäbchenmodell [6, 15] und das Mauermodell [16]. Bei diesen Modellen wird das elektrische Potenzial mithilfe unterschiedlich hoher Stäbchen bzw. Mauern dargestellt, wodurch Spannungen bzw. Potenzialunterschiede an Widerständen insbesondere beim Mauermodell visuell leicht erkennbar werden.

Die farbliche Kodierung von Leiterabschnitten gleichen Potentials in Schaltskizzen stellt eine weitere unkomplizierte Möglichkeit dar, den Differenzcharakter der elektrischen Spannung in Stromkreisen visuell hervorzuheben [7, 17]. Um Lernenden das Verständnis für den Zusammenhang zwischen Spannung und Stromstärke zu erleichtern, wurde vorgeschlagen, eine solche Farbkodierung in Kombination mit einer (Luft-)Druckanalogie zu verwenden [3]. Anknüpfend an Alltagserfahrungen mit Luftmatratzen oder Fahrradreifen,

bei denen ein Luftdruckunterschied eine Luftströmung bewirkt, hat es sich bewährt, im elektrischen Stromkreis zu argumentieren, dass ein „elektrischer Druckunterschied“ einen elektrischen Strom bewirkt und diesen „elektrischen Druckunterschied“ mittels Farbkodierung im Stromkreis visuell zu veranschaulichen. Grundsätzlich können die Farben aber je nach verwendeter Analogie auch andere Werte kodieren, z. B. den Wasserdruck beim ebenen, geschlossenen Wasserkreislauf oder auch die Höhe der Stäbchen bzw. der Mauern.

Soll im Unterricht der Systemcharakter von Stromkreisen betont und der Stromverbrauchsvorstellung entgegengewirkt werden, bietet sich die Fahrradkettenanalogie an [18]. Mit ihrer Hilfe kann den Lernenden plausibel gemacht werden, dass der elektrische Strom in Form bewegter Ladungen genauso wenig verbraucht wird wie die Glieder einer Fahrradkette und dass der elektrische Stromkreis ein zusammenhängendes System darstellt, bei dem sich z. B. nach dem Betätigen eines Schalters die Leitungselektronen im gesamten Stromkreis gleichzeitig in Bewegung setzen.

3. Modelldarstellungen in Simulationen

Die Veranschaulichung des elektrischen Potenzials z. B. mithilfe von Stäbchen aus Holz oder 3D-gedruckten Mauern [19] ist nicht nur verhältnismäßig aufwendig, sondern insofern auch unflexibel, als dass nicht leicht nachvollzogen werden kann, wie sich die verschiedenen Größen in einem Stromkreis verändern, wenn z. B. ein Widerstand vergrößert, verkleinert oder herausgenommen wird. Gegenüber solchen gegenständlichen Modellen haben Simulationen nicht nur den Vorteil, dass eine Vielzahl an Schaltungen unkompliziert betrachtet werden kann, sondern auch, dass sich Änderungen am Stromkreis viel leichter umsetzen und untersuchen lassen [20]. Vor diesem Hintergrund sollen im Folgenden zwei im Internet verfügbare, kostenfreie Simulationen vorgestellt werden, die aufgrund der genutzten Farb- bzw. Höhendarstellung dazu geeignet erscheinen, bei den Lernenden ein Verständnis für den Differenzcharakter der elektrischen Spannung zu fördern.

3.1 Eine HTML5-Simulation mit zwei Modelldarstellungen

Die auf der Webseite https://thomas-weatherby.com/simulation_dehtml verfügbare HTML5-Simulation von T. Weatherby unterstützt sowohl die Farb- als auch die Höhendarstellung des elektrischen Potenzials und bietet sich dementsprechend vor allem dazu an, den Differenzcharakter der elektrischen Spannung zu vermitteln [20]. Auch wenn die in der Simulation mögliche Darstellung des elektrischen Potenzials mittels Farben und Höhen über dem Schaltplan zunächst „modellfrei“ ist, bietet es sich an, die Farben bzw. Höhen im Unterricht im Rahmen einer anschaulichen Analogie wie z. B. der Luftdruck- bzw. Bike-Park- oder auch Wasserfall-Analogie zu interpretieren [3, 14]. Im Gegensatz zu der in 3.2 beschriebenen Simulation wird hier auf ein realitätsnahes Abbild der Bauteile eines

elektrischen Stromkreises sowie eine modellhafte Darstellung bewegter Ladungspakete oder Elektronen verzichtet, um die Aufmerksamkeit der Lernenden auf die elektrische Spannung als zentrale Größe zu lenken bzw. den Umgang mit Schaltplänen einzuüben.

Wird die Simulation aufgerufen, muss zunächst auf der Startseite (siehe Abb. 2) die gewünschte Schaltung per Mausklick erstellt werden, wobei praktisch alle in der Sekundarstufe I vorkommenden Schaltungen unterstützt werden (d. h. insbesondere Parallel- und Reihenschaltungen von bis zu drei Widerständen sowie auch offene Stromkreise). Durch Klicken auf einzelne Felder können Leiterstücke entfernt oder die Größe der Widerstände variiert werden. Zudem kann die Spannung der Batterie in Schritten von 1,5 V variiert und zwischen technischer und physikalischer Stromrichtung gewechselt werden. Ist der gewünschte Stromkreis zusammengestellt, muss noch die Darstellungsform („Farbe“ oder „Höhe“) gewählt und schließlich auf „Start“ geklickt werden, um die Simulation zu starten. Dabei werden nicht nur die Werte der an den Widerständen anliegenden Spannungen angezeigt, sondern auch die Stromstärken (gerundet auf zwei signifikante Stellen). Darüber hinaus wird die Richtung des Stroms – je nach Einstellung physikalisch oder technisch – mit Pfeilen dargestellt, bei denen die Dicke für die herrschende Stromstärke steht.

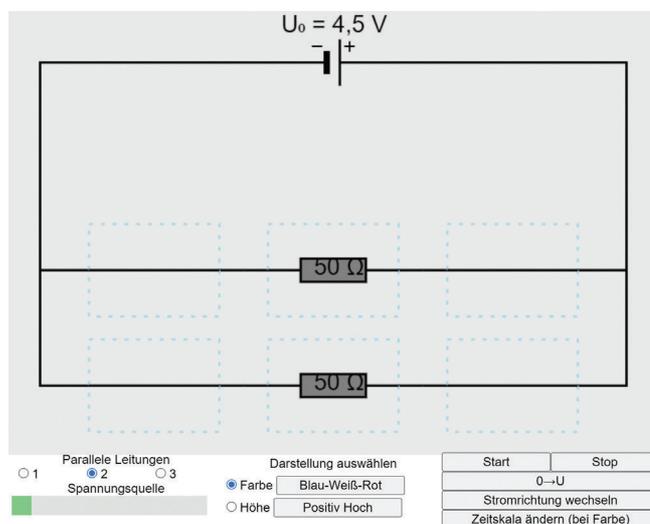


Abbildung 2: Die Startseite der Simulation. Durch Klicken auf einzelne Felder können Leiterstücke entfernt oder die Größe der Widerstände variiert werden.

Wird die Farbdarstellung gewählt, werden die Leitungen farbig umrandet, wobei festgelegt werden kann, ob entsprechend der üblichen Zuordnung das mit dem Minuspol verbundene Leitungsstück blau und das mit dem Pluspol verbundene Leitungsstück rot eingefärbt werden oder ob diese Zuordnung, wie z. B. in der Unterrichtskonzeption von Burde [3], invertiert werden soll. Dabei wird das Potenzial an den Polen der Batterie unabhängig von der eingestellten Klemmspannung der Batterie mit den kräftigen Farben markiert und die Potenzialzwischenwerte mit blässeren Farbtönen bzw. weiß

dargestellt. Liegt links und rechts von einem Widerstand die gleiche Farbe, d. h. das gleiche Potenzial an, ist für Lernende leicht einzusehen, dass an diesem Widerstand dann keine Spannung anliegt und es in der Folge zu keinem Strom durch diesen kommt (siehe Abb. 3). Ist hingegen wie in Abb. 4 an verschiedenen Widerständen jeweils auf der einen Seite die eine Farbe (z. B. rot) anzutreffen und auf der anderen Seite jeweils die gleiche andere Farbe (z. B. blau), wird deutlich, dass an all diesen Widerständen die gleiche Spannung anliegt und die Widerstände parallelgeschaltet sind [21].

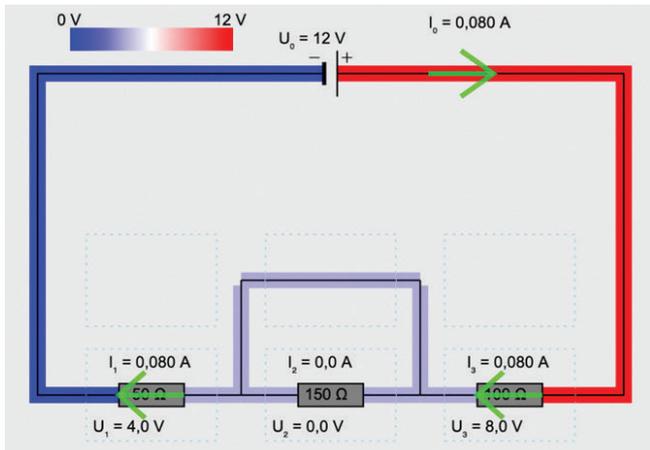


Abbildung 3: Anhand der Farbkodierung ist leicht erkennbar, dass am mittleren Widerstand keine Potenzialdifferenz anliegt und in der Folge durch diesen kein Strom fließt.

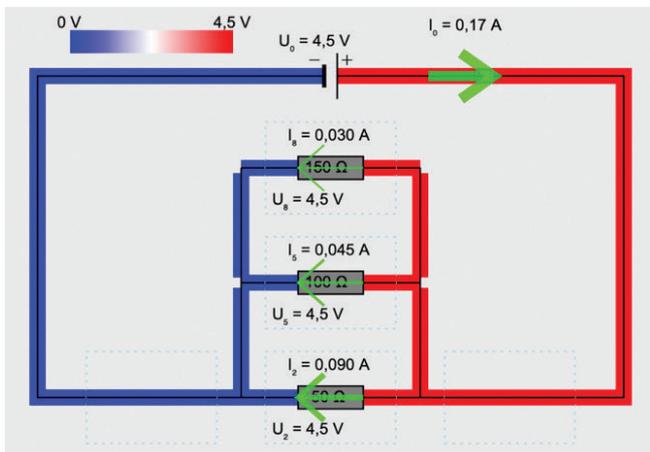


Abbildung 4: Anhand der Farbkodierung wird deutlich, dass an allen drei Widerständen der gleiche Potenzialunterschied anliegt, woraus folgt, dass die Widerstände parallelgeschaltet sind.

In der Höhendarstellung wird das Potenzial durch halbtransparente grüne Wände dargestellt, wobei die Oberkante dunkelgrün hervorgehoben wird und vor bzw. nach Widerständen gestrichelte senkrechte Linien eingezeichnet werden, um zu verdeutlichen, in welchen Abschnitten das Potenzial konstant ist bzw. sich ändert (siehe Abb. 5). Damit ist die in der Simulation verwendete Darstellung anschlussfähig an diverse Varianten des Höhenmodells, wie z. B. das Stäbchenmodell (durch die Darstellung der gestrichelten senkrechten Linien) und das Mauermodell (durch die Darstellung der grünen Wände). Mit Hilfe des Buttons „Positiv Hoch“ bzw. „Negativ

Hoch“ kann in der Höhendarstellung zudem festgelegt werden, ob am Plus- oder Minuspol die größere Höhe eingezeichnet wird, wodurch sichergestellt werden kann, dass auch bei einem Wechsel der Stromrichtung der Strom der Intuition folgend immer abwärts fließt. Eine detaillierte Beschreibung der Simulation findet sich in Wilhelm et al. [20].

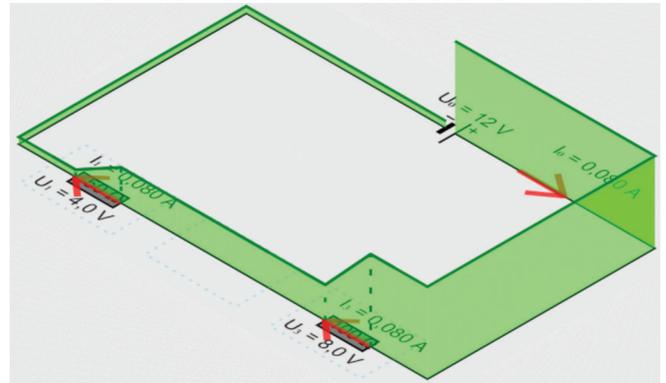


Abbildung 5: Die in der Simulation verwendete Höhendarstellung ist anschlussfähig an das Stäbchenmodell (gestrichelte senkrechte Linien) und die Mauerdarstellung (grüne Wände).

3.2 Eine 3D-Simulation mit bewegten Modellelektronen

Die auf <https://einfache-elehre.de/simulation/> kostenfreie 3D-Simulation von A. Kronenberger nutzt ebenfalls die Farbkodierung, hat jedoch die Möglichkeit, darüber hinaus auch die bewegten Ladungen in den Leitungen mithilfe des Modells einer bewegten Murmelkette darzustellen, wodurch neben dem Differenzcharakter der Spannung u. a. auch der Systemcharakter von Stromkreisen verdeutlicht werden kann [22]. Zudem können die Bauteile eines Stromkreises wie z. B. Batterien, Lämpchen und Kabel in der hier vorgestellten 3D-Simulation im Gegensatz zur ersten Simulation auch realitätsnah dargestellt werden.

Nach dem Start der Simulation stehen zunächst eine ganze Reihe an Stromkreisen in einer Art Galerie zur Auswahl bereit, wie sie in der Sekundarstufe I typischerweise thematisiert werden (u. a. Reihen- und Parallelschaltungen). Die Blickrichtung der Kamera kann durch Drücken der rechten Maustaste und gleichzeitige Bewegung der Maus verändert und die Position im Raum durch die Tasten W, A, S und D variiert werden. Wird ein vorgefertigter Stromkreis aus der Galerie durch Anklicken ausgewählt, so fliegen dessen Bestandteile auf die unten befindliche Tischoberfläche. Zur Erhöhung der Übersichtlichkeit bietet es sich nun an, auf den Button „Fokus“ zu drücken (linker Bildschirmrand), um den ausgewählten Stromkreis auf der Tischoberfläche aus der Vogelperspektive im Modus „Schaltplan“ zu betrachten (siehe Abb. 6). Bei Bedarf kann der Schaltplan in diesem Modul mit Hilfe der Buttons am unteren Bildschirmrand frei bearbeitet werden, wobei das jeweilige Bauteil (z. B. Widerstandselement) zunächst durch Anklicken ausgewählt und anschließend durch langes Klicken an der gewünschten Position des Stromkreises

platziert und gedreht werden kann. Eine besondere Funktion hat dabei die „Hacke“ unten links, mit der Elemente wieder entfernt werden können, sowie die Erdungsfahne unten rechts, mit der ein Abschnitt des Stromkreises gezielt geerdet werden kann (siehe Abb. 6).

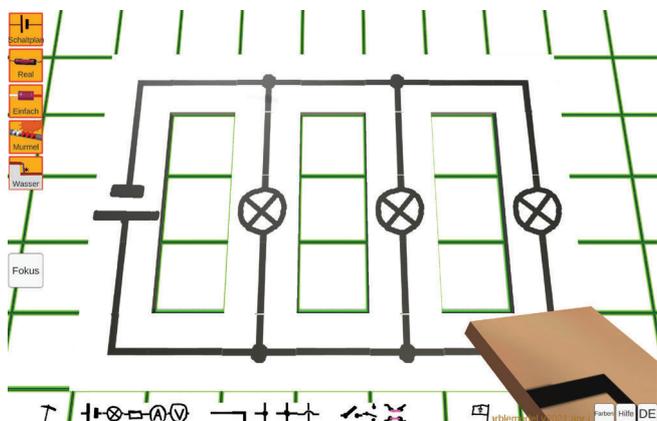


Abbildung 6: Im Modus „Schaltplan“ lässt sich ein elektrischer Stromkreis Bestandteil für Bestandteil über die am unteren Bildschirmrand befindlichen Elemente zusammenbauen.

Ist der Schaltplan erstellt, kann der Stromkreis in einem nächsten Schritt mit Hilfe des Buttons „Real“ (linker Bildschirmrand) in einer realitätsnahen Darstellung betrachtet werden, z. B. um sich zunächst Gedanken über die Potenziale und Stromstärken im Stromkreis machen zu können, die in diesem Modus noch nicht eingeblendet werden. Durch einen Klick auf „Einfach“ am linken Bildschirmrand werden die elektrischen Potenziale im Stromkreis mittels Farbkodierung kenntlich gemacht, wobei standardmäßig das mit dem Pluspol verbundene Leiterstück nach Burde [3] blau und das mit dem Minuspol verbundene Leiterstück rot eingefärbt werden. Mittels des Buttons „Farben“ unten rechts lässt sich aber u. a. auch die konventionelle Farbkodierung einstellen.

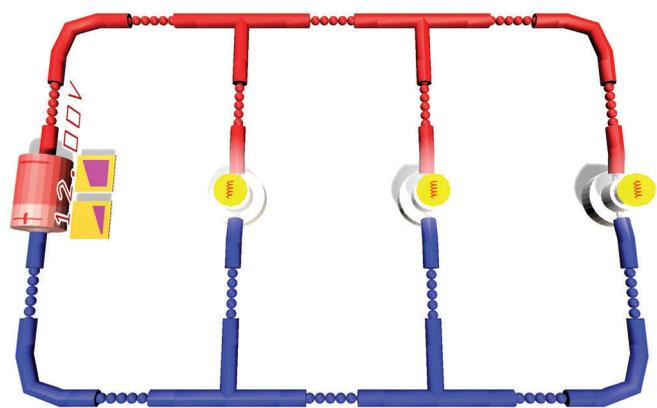


Abbildung 7: Kombination der Farbkodierung und Fahrradkettenanalogie in Form einer Murmelkette zur gleichzeitigen Veranschaulichung des Differenzcharakters der elektrischen Spannung und des Systemcharakters von Stromkreisen.

Während die Höhen- und Farbdarstellung zwar den Differenzcharakter der elektrischen Spannung visualisieren können, ist die Fahrradkettenanalogie allen voran zur Veranschaulichung

des Systemcharakters des elektrischen Stromkreises sowie zur Begegnung der Stromverbrauchsvorstellung geeignet. Ein Vorzug der hier vorgestellten Simulation besteht nun darin, dass sie die Vorteile der Farbdarstellung und der Fahrradkettenanalogie miteinander kombiniert (siehe Abb. 7). Hierzu muss lediglich auf den kleinen Button mit angedeuteten roten Murmeln in einer Leitung unter dem „Fokus“ Button am linken Bildschirmrand geklickt werden, wodurch eine sich bewegende Murmelkette in den geraden Leiterabschnitten sichtbar wird. Die Lernenden erhalten dadurch zusätzlich zu der mittels Farbkodierung sichtbaren Information über Potenzialunterschiede auch Informationen zur in den verschiedenen Leiterabschnitten herrschenden Stromstärke. Qualitativ wird so z. B. an Hand der sich vor und nach einem Widerstand mit gleicher Geschwindigkeit bewegenden Murmelkette deutlich, dass der elektrische Strom nicht verbraucht wird. Insbesondere wird Lernenden durch die sich in den Leitungen bewegende Murmelkette aber der Systemcharakter von Stromkreisen vor Augen geführt, z. B. wenn sich beim Schließen eines Schalters die Murmelkette in Analogie zum elektrischen Strom im gesamten Stromkreis gleichzeitig in Bewegung setzt oder beim Öffnen im gesamten Stromkreis gleichzeitig anhält. Für eine detaillierte Beschreibung der Simulation sei an dieser Stelle auf Burde et al. [22] verwiesen.

4. Fazit

Elektrische Stromkreise sind ein wichtiges, aber für Schüler*innen oftmals schwieriges Thema im Physikunterricht. Die Nutzung von geeigneten Modellen und Analogien kann Lernenden das Verständnis zentraler Konzepte elektrischer Stromkreise erleichtern, sofern diese gezielt an fruchtbares Vorwissen bzw. Vorerfahrungen der Lernenden anknüpfen. Während sich Höhenmodelle wie das Stäbchen- bzw. Mauermodell oder die Farbdarstellung z. B. in Kombination mit einer Luftdruckanalogie bewährt haben, den Lernenden ein Verständnis für den Differenzcharakter der elektrischen Spannung zu vermitteln, ist die Fahrradkettenanalogie insbesondere zur Veranschaulichung des Systemcharakters elektrischer Stromkreise sowie der Entkräftung der Stromverbrauchsvorstellung geeignet. Gegenüber gegenständlichen Modellen haben Simulationen nicht nur den Vorteil, dass verschiedene Schaltungen schnell und unkompliziert erstellt und betrachtet werden können, sondern auch, dass sich Änderungen am Stromkreis, wie z. B. das Vergrößern eines Widerstands, viel leichter untersuchen lassen. Die vorgestellten Simulationen nutzen nicht nur die in diesem Artikel diskutierten und grundsätzlich lernförderlichen Modelldarstellungen, sondern kombinieren teils auch deren Vorteile. Auf diese Weise kann nicht nur ein Verständnis für den Differenzcharakter der elektrischen Spannung sowie den Systemcharakter elektrischer Stromkreise gefördert, sondern die Stromverbrauchsvorstellung auch entkräftet werden. Beide vorgestellten Simulationen sind auf www.einfache-elehre.de verlinkt und können kostenfrei im Browser genutzt werden.

Jan-Philipp Burde *Universität Tübingen, AG Didaktik der Physik*

Thomas S. Weatherby *Goethe-Universität Frankfurt*

am Main, Institut für Didaktik der Physik

Arthur Kronenberger *Universität Salzburg,*

AG Didaktik der Physik

Thomas Wilhelm *Goethe-Universität Frankfurt*

am Main, Institut für Didaktik der Physik

Literatur

- [1] Shipstone DM, Rhöneck Cv, Jung W, Kärrqvist C, Dupin J-J, Johsua S, Licht P (1988) A study of secondary students' understanding of electricity in five European countries. *Int. J. Sci. Educ.* 10(3):303-316
- [2] McDermott LC, Shaffer PS (1992) Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part I: Investigation of student understanding. *Am. J. Phys.* 60(11):994-1013
- [3] Burde J-P (2018) Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells, Bd 259. Logos-Verlag, Berlin
- [4] Cohen R, Eylon B, Ganiel U (1983) Potential difference and current in simple electric circuits: A study of students' concepts. *Am. J. Phys.* 51(5):407-412
- [5] Rhöneck Cv (1986) Vorstellungen vom elektrischen Stromkreis und zu den Begriffen Strom, Spannung und Widerstand. *Naturwissenschaften im Unterricht – Physik* 34(13):10-14
- [6] Gleixner C (1998) Einleuchtende Elektrizitätslehre mit Potenzial. Dissertation, LMU München
- [7] Herrmann F, Schmäzle P (1984) Das elektrische Potential im Unterricht der Sekundarstufe I. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht* 37(8):476-482
- [8] Burde J-P, Wilhelm T (2017) Modelle in der Elektrizitätslehre. *Unterricht Physik* 28(157):8-13
- [9] Duit R, Glynn S (1995) Analogien – Brücken zum Verständnis. *Naturwissenschaften im Unterricht – Physik* 27(6):4-10
- [10] Schwedes H, Dudeck W-G, Seibel C (1995) Elektrizitätslehre mit Wassermodellen. *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 44(2):28-36
- [11] Burde J-P, Wilhelm T (2018) Hilft die Wasserkreislaufanalogie? In: Wilhelm T (Hrsg) *Stolpersteine überwinden im Physikunterricht. Anregungen für fachgerechte Elementarisierungen.* Aulis Verlag in Friedrich Verlag, Seelze, S 100-104
- [12] Wodzinski R (2013) Lernhilfe oder Lernhindernis? Modelle von Leitungsvorgängen in Stromkreisen unter der Lupe. *Unterricht Physik* 23(133):12-16
- [13] Burde J-P, Gottschlich B (akzeptiert) Höhenmodelle mit Strom-Analogen – Lernhilfe oder Lernhindernis? *MNU Journal*
- [14] Müller R, Mandler J (2022) Stromkreise besser verstehen mit Potenzial und Bikepark-Analogie. *PLUS LUCIS* (2)
- [15] Waltner C, Späth, S. K, D., Wiesner H (2009) Einführung von Stromstärke und Spannung – Ein Unterrichtskonzept und Ergebnisse einer Vergleichsstudie. In: Höttecke D (Hrsg) *Entwicklung naturwissenschaftlichen Denkens zwischen Phänomenen und Systematik. Jahrestagung der GDCP in Dresden 2009, Bd 30.* Lit-Verlag, Münster, S 182-184
- [16] Bierwirth R (2014) Untersuchung von Lernproblemen zum elektrischen Potential
- [17] Reeves T (2003) Potential difference in colour. *Phys. Educ.* 38:191-193
- [18] Härtel H (2012) Der alles andere als einfache elektrische Stromkreis. *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 61(5):17-24
- [19] Bodensiek O, Sonntag DA, Glawe I, Müller R (2019) 3D-printable height models for dc circuits. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1286:1-7. doi:10.1088/1742-6596/1286/1/012010
- [20] Wilhelm T, Weatherby TS, Burde J-P (2021) Eine Simulation zum elektrischen Potenzial bei einfachen Stromkreisen. *MNU Journal* 74(6):483-487
- [21] Burde J-P, Wilhelm T (2021) Vom Luftdruck zur Spannung. *MNU Journal* 74(1):34-39
- [22] Burde J-P, Weatherby TS, Kronenberger A (2021) An analogical simulation for teaching electric circuits: a rationale for use in lower secondary school. *Physics Education* 56(5). doi:10.1088/1361-6552/ac03fe

Ein Concept Cartoon als Einstieg ins Thema „Modelle“

Rosina Steininger

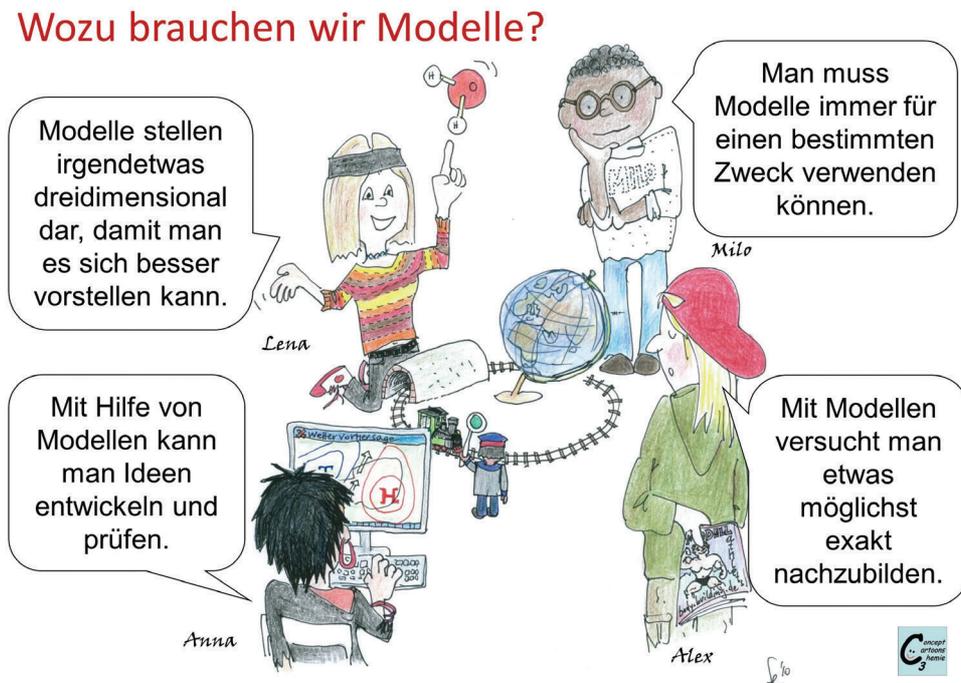


Abbildung 1: Concept Cartoon: „Wozu brauchen wir Modelle?“ (Eigene Abbildung)

1. Einleitung

Das vorliegende Heft widmet sich genau der Frage, die in Abbildung 1 im Zentrum steht. Beim Lehren und Lernen in den Naturwissenschaften nutzen wir Modelle selbstverständlich. Selten jedoch ist das Lernen über Modelle Gegenstand im Unterricht. Dabei ist unbestritten, dass der Umgang mit dieser Meta-Ebene sowohl erlernbar ist, als auch einen wesentlichen Bestandteil einer naturwissenschaftlichen Grundbildung darstellt [1]. In diesem Beitrag möchte ich skizzieren, wie ein Concept Cartoon dabei helfen kann, diesen Teilaspekt zu Modellen im Naturwissenschaftsunterricht zu thematisieren.

2. Cooles Tool

Ein Cartoon ist eine Grafik, die in einem Bild eine Geschichte erzählt. Ein Concept Cartoon ist eine Sonderform dieser Gattung. Er erzählt keine Geschichte, sondern wirft eine Frage auf. Diese Frage kann ein naturwissenschaftliches Phänomen oder ein Thema aus dem Bereich der Natur der Naturwissenschaften betreffen, aber auch soziale und ethische Belange [2]. Concept Cartoons sind vielfältig einsetzbare Unterrichtswerkzeuge. Sie wollen Lernende zum Nachdenken anregen und zum Mitdiskutieren einladen [3]. Lehrenden helfen sie, Einblicke in die Vorstellungen und das (Vor-)Wissen ihrer Schüler*innen zu erlangen.

Grafisch dargestellt zeigt ein Concept Cartoon eine Gruppe von diskutierenden Personen, die vor dem Hintergrund einer Alltagssituation eben dieser Frage nachgehen und versuchen, Antworten zu finden. Um es Schüler*innen und Lehrpersonen im Gespräch zu erleichtern, auf die Aussagen einzelner Personen im Cartoon Bezug zu nehmen, werden ihnen Namen gegeben. Die Aussagen der Personen – dargestellt in Form von Sprechblasen – enthalten unterschiedliche Diskussionsbeiträge. Unter ihnen sind sowohl fachlich angemessene als auch unangemessene Aussagen, Stellungnahmen und Erklärungsansätze. Anders als bei Multiple-Choice-Aufgaben enthält jedoch keine Sprechblase „die richtige Antwort“.

Um anregend zu wirken, muss ein Concept Cartoon ansprechend gestaltet sein. Die Grafik illustriert die Situation, in der die Frage entstanden ist und vermittelt gleichzeitig den Eindruck einer bereits begonnenen Diskussion. Neben den Aussagen in den Sprechblasen liefern auch Details der Abbildung den Lernenden Hinweise zum Thema und somit Anknüpfungspunkte.

Concept Cartoons eignen sich insbesondere für den Einstieg in ein neues Unterrichtsthema [4]. Mit ihrer Hilfe wird rasch klar, welches Wissen die Lernenden bereits mitbringen, wo sie damit

an ihre Grenzen stoßen und was zu wissen ihnen in diesem Zusammenhang wünschenswert erscheint.

Das Erzeugen und Sichtbarmachen von Fragen ist eine besondere Stärke dieses Unterrichtswerkzeugs. Die Fragen lassen sich dabei grob in zwei Kategorien einteilen: Zum einen muss die im Concept Cartoon aufgeworfene „große“ Frage in der Regel in „kleinere Unterfragen“ aufgedröseln werden, entlang derer sich die Lernenden einer fachlichen Klärung nähern. Zum anderen stellen die Schüler*innen im Zuge der Diskussion oft zahlreiche weiterführende Fragen, denen sie mit großem Interesse nachgehen.

3. Ein Bild sagt oft mehr als tausend Worte

Betrachten wir zunächst die Grafik des Concept Cartoons „Wozu brauchen wir Modelle?“. Vier einander zugewandte Personen scheinen sich dieser zentralen Frage intensiv zu widmen. Milo wirkt nachdenklich, Lena aufgeregt und Anna beschäftigt. Vor ihnen stehen eine Modelleisenbahn und ein Globus, beides Modelle, mit denen Kinder und Jugendliche in der Regel vertraut sind. Anhand dieser beiden Beispiele lassen sich erste wichtige Kennzeichen von Modellen thematisieren, und es wird deutlich, dass es sehr unterschiedliche Arten von Modellen gibt.

Das Modell des Wassermoleküls, mit dem Lena spielt, wird den Lernenden bekannt sein, sofern sie bereits mit einem Molekülbaukasten gearbeitet haben. Da die Modelle der Atome beschriftet sind, können aber auch Lernende, denen lediglich die Formel H_2O geläufig ist, eventuell erkennen, worum es sich handelt. In einer vergleichenden Gegenüberstellung mit dem Globus zu Milos Füßen kann erarbeitet werden, dass manche Modelle verwendet werden, um Objekte darzustellen, die entweder riesengroß oder winzig klein und/oder nicht direkt zugänglich sind.

Der Zusammenhang zwischen Modellen und dem Computerarbeitsplatz, vor dem Anna sitzt, ist auf den ersten Blick weniger offensichtlich. Auf den zweiten Blick jedoch lässt sich eine Wetterkarte mit Hoch- und Tiefdruckgebieten auf dem Bildschirm erkennen. Woher wissen wir, wie das Wetter morgen sein wird? Die Erkenntnis, dass Wetterprognosen stets Wettermodelle zugrunde liegen, führt zu einer wichtigen Erweiterung des Verständnisses von Modellen: Manche Modelle werden gebraucht, um Vorhersagen zu treffen.

Alex steht ein wenig abseits und wirkt ein bisschen abwesend. Er hält eine Zeitschrift in Händen, auf deren Titelseite ein Bodybuilder zu sehen ist. Dieses Detail der Abbildung greift die Tatsache auf, dass die Bedeutung eines Wortes vom Kontext abhängt. In der bildenden Kunst sowie der Film- und Modebranche braucht man auch Modelle. Das sind Personen, die sich zu künstlerischen oder kommerziellen Zwecken präsentieren und/oder abbilden lassen. Die deutsche

Bezeichnung „(Foto-)Modell“ wurde mittlerweile zum Teil vom englischen Wort „Model“ abgelöst.

Möchte die Lehrperson, dass die Lernenden ihre Aufmerksamkeit zunächst der Grafik und ihren Details widmen, so kann sie die Sprechblasen bei einer Präsentation via Beamer zunächst weglassen und erst nach einer ersten Diskussionsrunde einblenden.

4. Um zu diskutieren, bedarf es der Worte

Die Aussagen in den Sprechblasen sind in Alltagssprache gehalten und thematisieren unterschiedliche Aspekte des Themas. Sie greifen unter anderem epistemische Überlegungen von Lernenden beim Lernen über Modelle aus [5] auf. Diese Statements liefern den Lernenden – neben der Grafik – weitere wichtige Anhaltspunkte und machen deutlich, dass der Begriff „Modell“ vielschichtig ist. Es ist notwendig, zu differenzieren und die einzelnen Aussagen auf ihre Richtigkeit und ihren Gültigkeitsbereich hin zu überprüfen.

Lena bezieht sich mit ihrer Aussage auf gegenständliche Sachmodelle. Dazu zählen beispielsweise der Globus, das Modell des Wassermoleküls, aber auch – nicht abgebildet – der Knochenmann aus der Biologiesammlung oder ein Architekturmodell. Sie alle stellen „das Original“ *dreidimensional dar, damit man es sich besser vorstellen kann*. Dass gegenständliche Modelle auch zweidimensional sein können, wie etwa eine Landkarte, lässt Lena genauso außer Acht, wie ganz generell „dimensionslose“ gedankliche Modelle.

Milos Aussage, *man muss Modelle immer für einen bestimmten Zweck verwenden können*, zeugt von einem differenzierten Verstehen. Es umfasst alle Arten von Modellen und bringt das Wesentliche auf den Punkt: Modelle sind Werkzeuge. Modellersteller*innen versuchen ein „Original“ darzustellen. Das „Original“ kann ein gegenständliches Objekt, aber auch ein Phänomen oder ein Sachverhalt sein – beispielsweise die Planetenbewegung, die Entstehung eines Regenbogens, die Oberflächenspannung des Wassers oder die Wirkungsweise von Seife. Das bedeutet, das „Original“ muss unseren Sinnen nicht unbedingt direkt zugänglich sein. Die Modellersteller*innen konzentrieren sich auf jene Merkmale des „Originals“, die ihnen für ihr Vorhaben bedeutsam erscheinen. Andere Merkmale des „Originals“ lassen sie bewusst weg, sodass Modelle oft Vereinfachungen darstellen. Gleichzeitig weisen Modelle jedoch auch Eigenschaften auf, die das „Original“ nicht hat.

Für das Lehren und Lernen von Chemie sind vor allem jene Modelle von Bedeutung, mit deren Hilfe sich der Aufbau, die Eigenschaften und die Umwandlung von Stoffen beschreiben und erklären lassen. Dabei handelt es sich mehrheitlich um theoretische Denkmodelle, wie beispielsweise das Atommodell von Rutherford oder das Modell der Elektronenpaarbindung.

Die Aussage von Alex, mit *Modellen versuche man etwas möglichst exakt nachzubilden*, ist folglich fachlich nicht angemessen. Sie steht im Widerspruch zur Abstraktionsfunktion von Modellen und ihrer Orientierung am Gebrauchswert. Etwas möglichst exakt nachzubilden, entspricht dem Anfertigen einer Kopie. Kopieren lässt sich nur ein reales und zugängliches Objekt, Modelle hingegen können auch Darstellungen von unzugänglichen Objekten oder Phänomenen sein.

Anna nennt einen wichtigen Anwendungsbereich von Modellen: *Mit Hilfe von Modellen kann man Ideen entwickeln und prüfen*. Ein Modell kann als reales Ersatzobjekt dienen, um experimentelle Untersuchungen durchzuführen – wenn es beispielsweise zu gefährlich, zu zeitaufwändig oder zu kostspielig wäre, am „Original“ zu experimentieren. Bedeutsamer jedoch ist die Tatsache, dass das Erarbeiten von neuen Modellen in sich schon einen wichtigen Nutzen von Modellen darstellt – nämlich den, neues bzw. erweitertes Wissen zu generieren. Das gilt insbesondere für die Funktion von Modellen in der Wissenschaft. Die Bewährungsprobe derartiger Modelle besteht mitunter auch darin, ob mit ihrer Hilfe Vorhersagen getroffen werden können, die sich später bewahrheiten.

Wie immer beim Arbeiten mit Concept Cartoons wird deutlich, dass ein einfaches Schwarz-Weiß-Denken in den Kategorien „richtig – falsch“ zu kurz greift. Die Notwendigkeit zu differenzieren, zu spezifizieren, zu kombinieren und zu

argumentieren fördert sowohl die fachliche als auch die sprachliche Kompetenz der Lernenden – und das bereits in der Primarstufe [6].

5. Erfahrungen

Ich habe sowohl in der Sekundarstufe 1 als auch in der Sekundarstufe 2 durchwegs gute Erfahrungen beim Einsatz mit diesem Concept Cartoon gemacht. Er ermöglicht insbesondere das Modellverständnis der Schüler*innen zu erweitern, von Modellen als Abbildungen realer Objekte in verkleinertem oder vergrößertem Maßstab, hin zu gedanklichen Modellen und Modellen als Werkzeugen. Besonders hilfreich war es, Wochen und Monate später bei der Erarbeitung der Atommodelle und der Modelle der chemischen Bindung immer wieder an die in diesem Beitrag skizzierte Unterrichtseinheit zu erinnern. Die Schüler*innen stellten deutlich seltener Fragen wie z. B. „Was stimmt denn nun eigentlich?“ oder „Wie ist es wirklich?“. Auch die irritierten oder verzweifelten Blicke, wenn es ihnen etwa im Anfangsunterricht nicht gelang, die Strukturformel von Molekülen wie Schwefeldioxid oder Kohlenstoffmonoxid anzuschreiben, lichteteten sich rasch, wenn ich erklärte: „Die Modelle, mit denen wir bis jetzt gearbeitet haben, stoßen bei diesen Beispielen an ihre Grenzen.“

Rosina Steininger *Universität Wien, AECC Chemie*

Literatur

- [1] Billion-Kramer T. *Nature of Science – Lernen über das Wesen der Naturwissenschaften*. Wiesbaden: Springer VS; 2021.
- [2] Naylor S, Keogh B. *Concept Cartoons: what have we learnt?* World Conference on New Trends in Science Education; September 2011; Kusadasi, Turkey 2011.
- [3] Steininger R, Lembens A. *Warum wird Wein „sauer“? Concept Cartoons als Gesprächsanlässe im kompetenzorientierten Chemieunterricht. Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*. 2013;133:22-6.
- [4] Steininger R. *Unterrichtseinstieg via Concept Cartoons. Chemie & Schule (Salzbg)*. 2011(4):8-10.
- [5] Ke L, Schwarz CV. *Supporting students' meaningful engagement in scientific modeling through epistemological messages: A case study of contrasting teaching approaches. Journal of Research in Science Teaching*. 2021;58(3):335-65.
- [6] Convertini J. *An Interdisciplinary Approach to Investigate Preschool children's Implicit Inferential Reasoning in Scientific Activities. Research in Science Education*. 2021;51(1):171-86.

„Ich fühle was, was du nicht siehst“

Energie in 3D-Modellen haptisch erfahrbar machen

Philipp Lindenstruth

1. „Energie“ in Repräsentationen und Zugänge für blinde und sehbeeinträchtigte Lernende

Der energetische Verlauf einer chemischen Reaktion wird gewöhnlich in Form eines qualitativen Reaktionsenergiendiagramms dargestellt. Gemeinsam mit Lewis-Strukturformeln können diese Repräsentationen den Verlauf einer Reaktion in Bezug auf die strukturellen und energetischen Veränderungen darstellen [1]. Als abstrakte Repräsentationen beinhalten Reaktionsenergiendiagramme für Lernende jedoch häufig Zugangsprobleme, die den Aufbau einer Vorstellung von „Energie“ im Kontext von Reaktionsprozessen behindern können [2,3].

Zudem sind die im Fach Chemie verwendeten Repräsentationen zum großen Teil nur visuell erfahrbar und damit für blinde und sehbeeinträchtigte Lernende nicht bzw. nur begrenzt zugänglich. Neben verschiedenen haptisch erfahrbaren Adaptionen von Repräsentationen werden in Settings mit blinden und sehbeeinträchtigten Lernenden häufig 3D-Modelle als zusätzliche Repräsentationen für den räumlichen Aufbau von Teilchen eingesetzt. 3D-Modelle sind damit für Blinde und Sehbeeinträchtigte wichtige Lerngegenstände. Eine haptisch erfahrbare Darstellung ist in 3D-Modellen jedoch nicht nur für räumliche Informationen möglich: Über den Einbau von beweglichen und damit von Lernenden manipulierbaren Bauteilen lassen sich noch weitere Informationen in expliziterer und haptisch erfahrbarer Form zugänglich machen [4]. In diesem Beitrag soll am Beispiel eines 3D-Modells für den Einsatz in inklusiven Settings mit blinden und sehbeeinträchtigten Lernenden eine Möglichkeit diskutiert werden, wie Informationen zu energetischen Aspekten durch den Einsatz haptisch erfahrbarer Informationen explizit dargestellt und damit zugänglich gemacht werden können.

2. Das haptisch erfahrbare 3D-Prozessmodell – Aufbau und Funktion

Um blinde und sehbeeinträchtigte Lernende beim Zugang zu impliziten Informationen und komplexen chemischen Prozessen zu unterstützen, wurden in der AG Schween – Fachdidaktik der Organischen Chemie verschiedene haptisch erfahrbare 3D-Modelle entwickelt [5]. Von den entwickelten Modellen möchten wir an dieser Stelle eines gesondert vorstellen: das 3D-Prozessmodell [9] (Abb. 1). An diesem lassen sich nucleophile Substitutionsreaktionen (S_N1 und S_N2 -Mechanismus) als 3D-Prozess an einem einzigen Modell

darstellen und untersuchen. Dabei generiert das Modell ein haptisch erfahrbares Feedback, über das der Verlauf der dargestellten Reaktion sowie Einflussfaktoren auf diesen interpretiert werden können. Da die haptisch dargestellten Informationen des Modells auch von Sehenden erfahren werden können, eignet es sich für diese ebenfalls als Lernhilfe [4].

Das Modell stellt das reaktive Zentrum eines Substrats als Ausschnitt dar. Es werden nur das zentrale Kohlenstoffatom (C-Atom) sowie einzelne Elektronenpaare von Resten, Abgangsgruppen und Nucleophilen repräsentiert. Diese können je nach Fall als Elektronenpaare unterschiedlicher Teilchen interpretiert werden [4]. Es besteht zudem die Möglichkeit, das Modell über einen Molekülbaukasten zu erweitern und auch den vollständigen Aufbau der Teilchen darzustellen, dies macht das Modell jedoch unhandlicher. Aufgrund seiner Abstraktheit bezüglich der Struktur der vollständigen Teilchen ist es von Vorteil, das Modell gemeinsam mit anderen Repräsentationen einzusetzen, die diese expliziter darstellen können.

2.1 Aufbau des Modells

Das Modell besteht aus farbig und haptisch codierten eiförmigen Bauteilen. Diese repräsentieren ein bindendes oder in der Folge der dargestellten Reaktion bindend werdendes Elektronenpaar von Resten (grau, glatte Oberfläche), Abgangsgruppen (grün, unterbrochene Ringe) und Nucleophilen (rot, durchgehende Ringe). Die Anzahl der Ringe symbolisiert dabei die Stärke des verbauten Magneten (ein Ring = schwach, vier Ringe = stark). Drei Reste sind fest mit dem zentralen C-Atom, repräsentiert durch eine kleine Kugel in der Mitte des Modells, verbunden. Durch eine spezielle Mechanik in dieser können die Reste auf der Kugeloberfläche bewegt werden. Abgangsgruppen und Nucleophile können über verschieden starke Magnete an dieses „gebunden“ werden. Dazu sind zwei gegenüberliegende Eisenscheiben in der Kugel eingeklebt. Durch diesen Aufbau entsteht eine bewegliche räumliche Struktur, die in Abhängigkeit von den mit dem C-Atom verbundenen Bindungspartnern verändert werden kann (Abb. 1).

2.2 Funktion des Modells

Um am Modell [10] eine nucleophile Substitutionsreaktion nach dem S_N2 -Mechanismus darzustellen, wird eine grüne Abgangsgruppe an das Zentrum gehängt. Dann wird ein rotes Nucleophil auf das Zentrum zubewegt (vgl. Abb. 2, links). Dies kann nur von der gegenüberliegenden Seite geschehen,



Abbildung 1: Aufbau des 3D-Prozessmodells. Copyright Wiley-VCH GmbH. Reproduced with permission. [8]

da nur dort noch eine Bindungsmöglichkeit am Zentrum für den Magneten frei ist [11]. Die andere Bindungsposition ist bereits durch die Abgangsgruppe belegt. Aufgrund der für die Bauteile gewählten Größe berührt das Nucleophil bei dieser Bewegung die grauen Reste bereits, bevor es an der freien Stelle im Zentrum binden kann. Dabei entsteht ein fühlbarer Widerstand, der sich aus der magnetischen Bindungskraft der Abgangsgruppe und dem nicht ausreichenden Platz an der Bindungsposition des Nucleophils ergibt. Um das Nucleophil an das Zentrum zu binden, muss der Widerstand durch weiteren Druck überwunden werden. Dabei bewegen sich die grauen Reste auf der Kugeloberfläche des Zentrums in Richtung der Abgangsgruppe. Nachdem die magnetische Bindungskraft der Abgangsgruppe überwunden worden ist, löst sich diese aus dem Modell und gibt den Platz für die weitere Bewegung der Reste in diese Richtung frei. Es entsteht dabei ein labiler Zustand, in dem weder Abgangsgruppe noch Nucleophil an das zentrale Atom gebunden und alle Bindungspartner in einer bipyramidalen Form angeordnet sind (vgl. Abb. 2 Mitte). Dieser entspricht strukturell dem während einer S_N2 -Reaktion durchlaufenen Übergangszustand. Beim Durchlaufen dieses Zustandes wird auf der anderen Seite des Modells nun ausreichend Platz frei, sodass das Nucleophil an diese Stelle

binden kann. Die Abgangsgruppe wird dabei vollständig aus der Bindungsposition gedrückt und ist nun frei (vgl. Abb. 2, rechts). Dieser Schritt geschieht im Modell sehr schnell, kann aber auch langsam durchgeführt und eingehender betrachtet werden, wenn die Abgangsgruppe festgehalten wird.

3. Haptisch erfahrbare energetische Aspekte im Modell

Das 3D-Prozessmodell ermöglicht es Lernenden, die Reaktion als einen real ablaufenden Prozess darzustellen, zu verfolgen und die Dynamiken von S_N2 -Reaktionsverläufen über die unterschiedlich starken Nucleophile und Abgangsgruppen zu modellieren. So lassen sich im Modell die in der Lewis-Schreibweise zwischen den einzelnen Formeln stattfindenden Veränderungsprozesse expliziter darstellen und direkt erfahren (Vgl. [4]). Das Modell repräsentiert zudem auch Informationen zu energetischen Aspekten in einer S_N2 -Reaktion. Dies geschieht durch die erfühlbaren Widerstände, die bei der Verwendung des Modells auftreten. Für eine erfolgreiche Reaktion im Modell müssen diese durch den zusätzlichen Aufwand von Kraft überwunden werden, es muss also „fester gegen das Modell gedrückt“ werden. Die Widerstände ergeben sich dabei, wie beschrieben, aus der magnetischen Bindung der Abgangsgruppe an das Zentrum sowie dem nicht ausreichenden Platz im Modell, um das Nucleophil ebenfalls an das Zentrum zu bringen. Je nach verwendeten Modellbestandteilen (i.e. Reaktionspartnern) und dort verbauten Magneten ist der erfühlbare Widerstand dabei größer oder kleiner. Je größer dieser ist, desto mehr Kraft bzw. „Energie“ muss aufgewendet werden, um die Reaktion ablaufen zu lassen. Die Unterschiede werden im Modell am deutlichsten erfühlbar, wenn sie möglichst groß sind, z. B. durch die Verwendung der stärksten bzw. der schwächsten Abgangsgruppe. Während die Abgangsgruppe mit dem stärksten Magneten nur durch hohen Kraftaufwand aus dem Modell gedrückt werden kann, lässt sich die Abgangsgruppe mit dem schwächsten Magneten bereits durch ein leichtes Schütteln des Modells entfernen. Dies erlaubt auch die Darstellung von

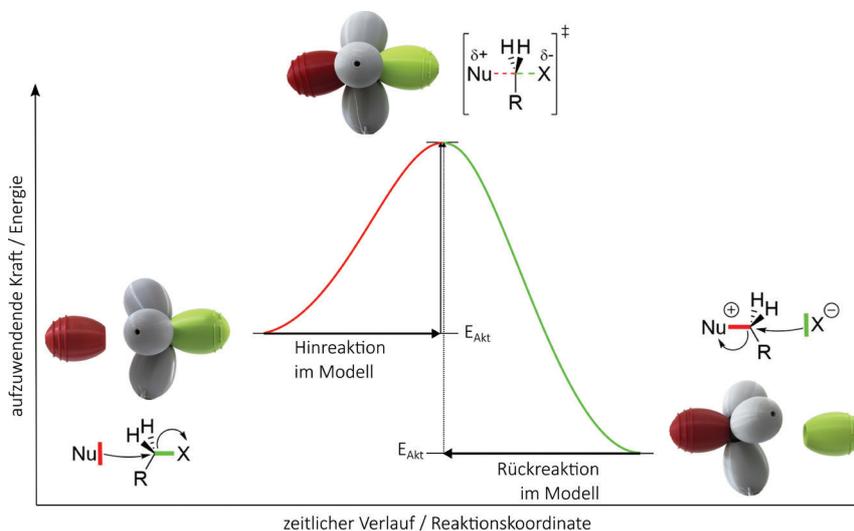


Abbildung 2: Auf Basis des Prozessmodells konstruiertes Reaktionsenergiediagramm einer S_N2 -Reaktion.

Reaktionen nach dem S_N1 -Mechanismus. Die erföhlbaren Widerstände lassen sich als „Energiebarrieren“ bzw. in der Folge als „Aktivierungsenergie“ (Hierbei handelt es sich um eine vereinfachte Repräsentation von Aktivierungsenergie im Modell!) interpretieren, die für den erfolgreichen Ablauf der Reaktion überwunden bzw. aufgebracht werden muss. Nach dem Ablauf der Reaktion ist auch eine Rückreaktion möglich, in der das nun gebundene Nucleophil wieder aus dem Teilchen verdrängt werden kann. Wenn dieses einen stärkeren Magneten besitzt und dadurch fester an das Modell gebunden ist, ist der erföhlbare Kraftaufwand und damit die interpretierbare „Aktivierungsenergie“ für diesen Reaktionsschritt entsprechend höher. Im Modell können auch unterschiedliche Bauteile und sich daraus ergebende unterschiedliche „Aktivierungsenergien“ miteinander verglichen werden. Der fühlbare Kraftaufwand lässt sich dabei von Lernenden in ein qualitatives Energiediagramm übertragen und kann dadurch auch einen Zugang zu dieser Repräsentation schaffen (vgl. Abb. 2).

4. Erfahrungen aus dem Einsatz des Modells

Das 3D-Prozessmodell wurde im Rahmen einer qualitativen Interviewstudie mit blinden und sehbeeinträchtigen Lernenden untersucht. Hierzu sollten die teilnehmenden Schüler*innen einen S_N2 -Reaktionsprozess zuerst an einer ihnen bekannten haptisch erföhlbaren Formel-Repräsentation und anschließend am ihnen unbekanntem 3D-Prozessmodell erläutern. Die Teilnehmenden stammten aus zwei Chemie-Leistungskursen in der 12. Jahrgangsstufe. Nucleophile Substitutionsreaktionen waren ca. drei Monate zuvor im Unterricht behandelt worden. Ebenso wurde Energie im Kontext von Reaktionsprozessen bereits thematisiert. Die Interviews wurden mit fünf Zweiergruppen durchgeführt, aufgezeichnet und transkribiert. Bei der Auswertung des Materials stehen die Beschreibungen des Reaktionsprozesses sowie von räumlichen und energetischen Aspekten mit dem Modell im Fokus. Eine Veröffentlichung der Ergebnisse steht aktuell noch aus. An dieser Stelle können jedoch bereits erste Einblicke gegeben werden, wie Lernende energetische Aspekte am Modell erkennen und beschreiben. Hierzu wurden alle Stellen in den Interviews codiert und ausgewertet, in denen die Teilnehmenden von „Kräften“, „Widerständen“, „Druck“ und „Energie“ oder vergleichbaren Aspekten sprechen oder sich auf diese beziehen.

Im Rahmen der Auswertung zeigt sich, dass die teilnehmenden Lernenden in allen Gruppen am Modell die fühlbaren Widerstände wahrnehmen und in einen Kontext mit der repräsentierten Reaktion setzen konnten. Dies geschieht zuerst in Bezug auf das Modell und dessen Funktionsweise. Hier finden sich zumeist Beschreibungen von „Kraft“ oder „Druck“, der für die Durchführung der Reaktion im Modell notwendig sei. Die Hintergründe für die erföhlten Widerstände und die damit zusammenhängende „Energie“ werden aus dem Modell abgeleitet. Diese beziehen die Lernenden auf die (Magnet-)Stärke der Bindung der Abgangsgruppe und den

fehlenden Platz für den Angriff des Nucleophils im Modell und übertragen sie auch auf die fachliche Ebene:

B2: (...) Es muss halt erst eine gewisse Energie aufgebracht werden, damit diese Reaktion abläuft.

I2: Wie meinst du das?

B2: Dadurch, dass man halt das Sauerstoff an den Magneten drücken muss, der von den drei Elektronenwolken-Ü-Eiern hier ein bisschen zugedeckt wird, damit man da besser rankommt, muss man halt ein bisschen Druck aufwenden, bis der Magnet einklinkt und durch diesen Druck wird halt auch das andere Elektron abgestoßen. (Interview Gruppe 3, Pos. 378-380).

Die erföhlbaren Widerstände scheinen den Teilnehmenden in der Folge die Möglichkeit zu bieten, Vorwissen zu „Energie“ zu aktivieren [12]. Dabei beziehen sich die Beschreibungen zumeist darauf, dass Energie bei Reaktionen eine wichtige Rolle spielt und aufgebracht werden müsse, damit eine Reaktion ablaufen könne:

B1: Um das Brom abzuspalten, braucht man Energie.

B2: ja, da braucht man dann Energie für, weil

B1: Sonst geht es nicht. (Interview Gruppe 3, Pos. 413-415)

Einige Interview-Gruppen beziehen sich hier auch spezifisch auf die notwendige Aktivierungsenergie für die Reaktion. Zudem wird hier auch häufig auf die Stärke der Bindung der Abgangsgruppen verwiesen:

B2: Ich würde sagen, das liegt an der Bindung. Es zieht nicht so stark an den Elektronen. Die Bindung ist schwächer und deshalb geht es einfacher abzuspalten. (Interview Gruppe 1, Pos. 324)

Die Lernenden beziehen hier auch weiteres Vorwissen auf die erföhlbaren Widerstände und die daraus abgeleitete Bindungsstärke. Dies sind hier vor allem Teilchengrößen, Polaritäten und Elektronegativitätsunterschiede, die als Begründung der erföhlten Bindungsstärke angeführt werden. Diese Aspekte werden im Modell nicht explizit dargestellt. Teilweise werden hier auch alternative Vorstellungen der Lernenden deutlich, wie im letzten Beispiel.

B2: Also ich denke auch, wenn wir jetzt drei von so einem Iod an einem Kohlenstoff halt hängen hätten, also, für uns macht das jetzt hier kaum einen Unterschied, weil die irgendwie alle gleich groß aussehen, so. Aber in Wirklichkeit so, ist das dann was ganz anderes und ich bin mir sicher, das würde dann halt noch viel schneller reagieren, weil die einfach, ja, wie [B1] gesagt hat, zu eng beieinander sind. Das wäre schon sehr polarisiert, das ganze Molekül. (Interview Gruppe 5, Pos. 406)

I1: Ja, was könnte das jetzt bedeuten, wenn man jetzt Brom und Iod vergleicht?

B1: Das heißt, dass das Brom schwerer abzuspalten ist. Also die reine Ablösung ist schwerer, weil es eine stärkere Polarisierung gibt, würde ich sagen. (Interview Gruppe 4, Pos. 440-441)

B2: Das Iod, dadurch, dass es eben eine höhere Elektronegativität hat als Brom, zieht es noch stärker die Elektronen zu sich und hängt deshalb auch nicht so stark am Kohlenstoff. (Interview Gruppe 2, Pos. 254)

Werden verschiedene Abgangsgruppen im Modell miteinander verglichen, betrachten die Gruppen hier vor allem die Unterschiede in den erfühlbaren Widerständen und bringen sie über die verbauten Magnete mit unterschiedlichen Bindungsstärken und damit im Modell aufzubringender „Aktivierungsenergie“ in Verbindung. Hierbei können sie auch qualitative Reihungen aufstellen.

B2: Es ist tatsächlich so, dass die Magneten unterschiedlich stark sind.

[...]

B1: Das soll jetzt für die Bindungskräfte zwischen dem Kohlenstoff und dem Brom stehen.

I1: Ja, was könnte das jetzt bedeuten, wenn man jetzt Brom und Iod vergleicht?

B1: Das heißt, dass das Brom schwerer abzuspalten ist. Also die reine Ablösung ist schwerer, weil es eine stärkere Polarisierung gibt, würde ich sagen. (Interview Gruppe 4, Pos. 435-441)

In den Interviews wird insgesamt erkennbar, dass die Teilnehmenden in der Lage sind, die Reaktion im Hinblick auf die aufzuwendende Kraft bzw. „Energie“ zu beschreiben und diese im Modell und in Bezug auf ihr Vorwissen zu interpretieren.

5. Reduzierte Darstellung im Modell und mögliches Entstehen von Fehlvorstellungen

Im Fokus des 3D-Prozessmodells stehen dessen vollständige haptische Erfahrbarkeit sowie die prozesshafte Darstellung einer Reaktion. Dies ist nur durch die besondere Konstruktion des Modells zu erreichen, die jedoch verschiedene Vereinfachungen notwendig macht und die Darstellung und auch die Interpretation des Modells beeinflussen kann! Dies betrifft auch die Darstellung der haptisch erfahrbaren „Aktivierungsenergie“. Diese ergibt sich für einen Reaktionsschritt aus unterschiedlichen miteinander wechselwirkenden Faktoren. Bindungsstärke und die Größe von Teilchen sind nur zwei dieser Einflussfaktoren. Im Modell sind diese beiden jedoch alleine für das Auftreten der erfühlbaren Widerstände verantwortlich.

Entsprechend könnten Lernende das Zustandekommen von Energiebarrieren und der Aktivierungsenergie auf diese beiden Faktoren reduzieren. An dieser Stelle sind entsprechend noch weitere Betrachtungen außerhalb des Modells notwendig, um ein fundiertes Verstehen von energetischen Aspekten im Kontext einer Reaktion nach S_N -Mechanismus aufzubauen. Diese müssen von Lernenden jedoch gedanklich auf das Modellsystem bezogen und interpretiert werden und können so zu fehlerhaften Interpretationen führen. Zudem wird im Modell vor allem der Einfluss der Abgangsgruppenqualität auf die Reaktion deutlich, während der Einfluss des Nucleophils nur bedingt dargestellt werden kann. An diesen Stellen ist eine Unterstützung bzw. Anleitung durch die Lehrperson notwendig, um die Darstellungen im Modell fachlich zu verorten, die Vereinfachungen zu thematisieren und Problemstellen anzusprechen, um das Entstehen von Fehlvorstellungen zu minimieren. Dies betrifft nicht nur das hier beschriebene Modell: Da Modelle keine exakten Repräsentationen der „Realität“ darstellen sondern als „epistemische Artefakte“ im Sinne von Werkzeugen beschrieben werden können, „über die theoretische und empirische Fragen beantwortet werden können“ [6], ist dieses Vorgehen beim Einsatz von Modellen im Chemieunterricht (und darüber hinaus) grundsätzlich notwendig. Erst durch diese Kontextualisierungen können die wissenschaftlichen Erklärungspotentiale von Modellen verdeutlicht und diese von Lernenden als wissenschaftliche Werkzeuge angewendet werden. Lernende erhalten so die Möglichkeit, ihr wissenschaftliches Verständnis und ihre Modellkompetenz auszubauen [6,7].

6. Haptisch erfahrbare Informationen in 3D-Modellen: ein Fazit

Wie im Beitrag beschrieben, können über den Einsatz von beweglichen Bauteilen und verschiedenen Magneten haptisch erfahrbare Widerstände in 3D-Modellen erzeugt werden. Diese lassen sich im Kontext der Darstellung eines Reaktionsprozesses als Anknüpfungspunkte für die Interpretation von Energiebarrieren einsetzen. Am besprochenen 3D-Modell können sie auf deren Zustandekommen hin untersucht und im Kontext fachlicher Konzepte interpretiert werden. So können 3D-Modelle über haptisch erfahrbare Informationen einen expliziten Zugang zu Darstellungen von Energie ermöglichen.

Lindenstruth Philipp *Philipps-Universität Marburg,*
Fachdidaktik Chemie

Literatur

- [1] Goodwin, W. M. Structural formulas and explanation in organic chemistry. *Found. Chem.*, 2008, 10(2), S. 117-127.
- [2] Graulich, N., The tip of the iceberg in organic chemistry classes. How do students deal with the invisible? *Chem. Educ. Res. Pract.*, 2015, 16(1), S. 9-21.
- [3] Becker, N. M., Cooper, M. M., College chemistry students' understanding of potential energy in the context of atomic-molecular interactions. *J Res Sci Teach.* 2014, 51(6), S. 789-808.

- [4] Lindenstruth, P., Schween, M., Kinetik zum Anfassen: Ein neuartiges 3D-Modell organisch-chemischer Reaktionsprozesse für inklusive Lehre CHEMKON, 2021, 28(2), S. 64-73.
- [5] Lindenstruth, P., Schween, M., Aktivierungsbarrieren ertasten, Prozesse und Strukturen begreifen. *Nachr. Chem.*, 2021, 69(6), S. 13-16.
- [6] Rost, M., Knuuttila, T., Models as Epistemic Artifacts for Scientific Reasoning in Science Education Research. *Education Sciences*, . 2022, 12(4), S. 276.
- [7] Justi, R., Gilbert, J. K. , Models and Modelling in chemical education. In: *Chemical Education: Towards Research-based Practice*. Gilbert, J. K., Jong, O., Justi, R., Treagust, D. F., Driel, J. H. (Hrsg.) 2003, Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, . S. 49-68.
- [8] Bildnachweis: Lindenstruth, P., Schween, M., Kinetik zum Anfassen: Ein neuartiges 3D-Modell organisch-chemischer Reaktionsprozesse für inklusive Lehre. CHEMKON, 2021, 28(2), Supporting Information, S. 5. Copyright Wiley-VCH GmbH. Reproduced with permission.
- [9] Die Bauteile des Modells wurden im 3D-Druckverfahren hergestellt, Anleitungen und Druckdateien zu diesem und weiteren Modellen sind hier abrufbar: <https://www.uni-marburg.de/de/fb15/arbeitsgruppen/ag-schween/forschung-und-kooperationen/inklusive-zugaenge-zur-organischen-chemie-fuer-blinde-und-sehbehinderte-menschen>
- [10] Videos zur Durchführung einer Reaktion am 3D-Prozessmodell finden Sie auf dieser Seite: <https://www.uni-marburg.de/de/fb15/arbeitsgruppen/ag-schween/forschung-und-kooperationen/3d-prozessmodell-organisch-chemischer-reaktionsprozesse>
- [11] Ein Angriff von der Seite zwischen zwei Resten und der Abgangsgruppe ist im Modell prinzipiell auch denkbar. Hierbei lässt sich die Abgangsgruppe ebenfalls entfernen und das Nucleophil bindet dann an dieser Stelle, ohne dass es zu einer räumlichen Veränderung kommt. Das Modell ermöglicht diesen Angriff zwar, auf chemischer Ebene ist ein Angriff in dieser Position jedoch nicht möglich. Der Angriff erfolgt durch eine Wechselwirkung des HOMO des Nucleophils mit dem LUMO der C-X-Bindung. Dieses ist entlang der C-X-Bindungsachse ausgerichtet und so nur auf der Seite zugänglich, die der Abgangsgruppe gegenüberliegt. Diese Möglichkeit sollte im Unterricht von der Lehrperson thematisiert werden, damit keine alternativen Vorstellungen zu möglichen Angriffspositionen in einer nucleophilen Reaktion am Modell aufgebaut werden.
- [12] Da die Teilnehmenden bereits Vorwissen zu Energie aus dem Unterricht besitzen, lässt sich leider nicht feststellen, inwiefern am Modell neue Aspekte entwickelt werden oder Vorwissen aktiviert wird. Entsprechend wird davon ausgegangen, dass sich die Antworten der Teilnehmenden auf aktiviertes Vorwissen beziehen.

„Das ist ja nur ein Modell!“

Wie Lehramtsstudierende des Fachs Chemie mit Modellen umgehen und wie sie darüber denken

Marvin Rost und Anja Lembens

1 Einleitung

Die Chemie ist die Wissenschaft von den Stoffen und ihren Veränderungen. Diese Definition kann den Chemieunterricht hervorragend durch die Sekundarstufe I tragen. Das Erlernen des Beobachtens, Vergleichens und Ordnen von Stoffeigenschaften und Reaktionen auf der makroskopischen Ebene ist so anspruchsvoll wie lohnenswert: Es eröffnet im Allgemeinen einen systematischen Zugang zu den Grundlagen des naturwissenschaftlichen Arbeitens und kann im Speziellen hervorragend mit laborpraktischen Übungen verbunden werden. Das volle Potential des Fachs wird dadurch allerdings nicht ausgeschöpft, weil eine wesentliche Facette der Chemie dabei unbeachtet bleibt. Diese Facette betrifft die Ebene der Ursachen, die den Eigenschaften und Veränderungen der Stoffe zugrundeliegen – die Teilchenebene. Leider ist diese Ebene nicht direkt beobachtbar. Die Eigenschaften und das Verhalten submikroskopischer Teilchen ist uns nur indirekt z. B. über Messungen zugänglich. Auf Basis dieser Messdaten konstruieren wir Modelle, die uns dazu dienen, Phänomene zu erklären und vorherzusagen. Daten selbst sind aber nicht aus sich heraus hinreichend für Modellierungen, weil bei Messungen immer schon Annahmen vorliegen, die die Datenaufnahme und -interpretation formen. Wenn Modelle also stets annahme- und erläuterungsbedürftig sind, tragen sie insbesondere für Noviz*innen nicht aus sich heraus zur mechanistischen Erklärung bspw. einer beobachtbaren Stoffeigenschaftsänderung bei. In der Folge dieses nicht trivialen Verhältnisses von makroskopischer und submikroskopischer Welt ist Chemie ein schweres Fach [1]!

Wenn nun Schüler*innen im Chemieunterricht mit Modellen arbeiten, bzw. die Modellierung chemischer Zielsysteme erlernen sollen, dann bedeutet das, dass Universitäten und Hochschulen zu einer entsprechenden Kompetenzausprägung bei zukünftigen Lehrkräften beitragen sollten. Zu diesem Zweck werden an der Universität Wien Modellierungsübungen in eine Grundlagenveranstaltung (Begleitseminar zur Vorlesung Allgemeine Chemie A) integriert. Dort sollen die Studierenden ausgewählte Zielsysteme (z. B. Aggregatzustandswechsel, chemische Reaktionen) mit verschiedenen Mitteln (bspw. Lego, Rondi oder verschiedene Molekülbaukästen) darstellen und über die notwendigen Annahmen und Konsequenzen ihrer modellhaften Darstellungen reflektieren. Wir präsentieren in diesem Beitrag einige studentische Ergebnisse und rahmen diese mit der Interpretation von Modellen als erkenntnistheoretische Artefakte. Außerdem berichten wir über typische Herausforderungen und unterstreichen so die Bedeutung der

Modellarbeit als notwendig integralen Bestandteil der Chemie-lehrkräftebildung in fachlichen sowie fachdidaktischen Lehrveranstaltungen. Ein reflektiertes Verstehen der Genese, Funktion und Grenzen von Modellen in der Chemie ist eine zentrale Voraussetzung, damit angehende Lehrkräfte diese im schulischen Chemieunterricht lernwirksam einsetzen können.

2. Theoretische Überlegungen zur Arbeit mit Modellen

Die Allgegenwärtigkeit von Modellen in chemiebezogener Forschung und Lehre macht es nicht einfach, einen definitorischen Rahmen zu konstruieren, der sowohl einen nützlichen als auch einen möglichst widerspruchsfreien Begriffsraum absteckt. Modelle werden häufig als Ersatzobjekte beschrieben, mit denen Wissenschaftler*innen, Lernende sowie Lehrende einen hypothetischen Zugriff auf Zielsysteme erhalten, die sie sonst nicht direkt untersuchen könnten [2,3]. Um aus dieser Perspektive heraus Phänomene erklären und Vorhersagen über Prozesse machen zu können, ist allerdings eine Strukturgleichheit oder -ähnlichkeit zwischen Modell und Original eine notwendige Voraussetzung. Irgendwie muss die Struktur eines Atoms auf sein Modell projiziert werden, um als Ersatzobjekt Untersuchungen überhaupt zuzulassen. Krüger et al. (4) wenden gegen diese und andere Versuche einer strengen Begriffsdefinition eine mangelnde Produktivität für das Lehren und Lernen der Naturwissenschaften ein. Sie betonen verstärkt die epistemische Funktion von Modellen, d. h. sie fokussieren auf die Frage nach dem kontextualisierten (zeit-, ort-, personenbezogenen) Zweck von Modellen:

„Um dieser erkenntnistheoretischen Funktion von Modellen Rechnung zu tragen, sollten Modelle weniger als Repräsentationen betrachtet werden, die danach beurteilt werden, inwiefern sie dem jeweiligen Phänomen entsprechen. Vielmehr sollte der Charakter von Modellen als Werkzeug im Erkenntnisprozess betont werden“ (ebd., S. 143).

Obwohl der Werkzeugcharakter von Modellen – also die Tauglichkeit für die Erklärung und Vorhersage von Phänomenen – plausibel ist, werden sie dennoch in naturwissenschaftlichem Unterricht häufig mit Repräsentationen identifiziert. Modelle werden hier als strukturelle Abbilder der zugrundeliegenden Phänomene oder Systeme betrachtet, die bspw. erklären, warum ein Stoff im gasförmigen Zustand fundamental andere Eigenschaften besitzt als im festen Zustand. Solch eine Identifikation für die Beschreibung chemischer Phänomene in Schulbüchern findet sich z. B. bei Uphäi & Ramnarain [5]. Die Fähigkeit, mit solchen

Repräsentationen angemessen umgehen zu können, wird als Repräsentationskompetenz bezeichnet [6]. Für die Entwicklung von Kompetenzen ist der Erwerb von Wissen eine wichtige Voraussetzung. Zum Erfassen des Wissens über chemiebezogene Repräsentationen liegen für Chemielehramtsstudierende auch entsprechende Testinstrumente vor [7]. Ernstgenommen läuft diese Perspektive allerdings Gefahr, das Pferd von hinten aufzuzäumen. Wird in einer Chemiestunde ein Aggregatzustandswechsel vorgeführt und anschließend behauptet, daraus könne auf das Kugelteilchenmodell geschlossen werden, setzt man die Kenntnis des Kugelteilchenmodells bereits voraus. Lernende tun sich jedoch schwer damit, den diskreten Charakter der Teilchenebene initial überhaupt zu akzeptieren [8]. Sollen Schüler*innen wiederum aus dem Teilchenmodell Vorhersagen über Aggregatzustände machen, ist es umständlich, ein geeignetes Zielsystem zu finden, um Annahmen über das Teilchenmodell darauf anwenden zu lassen. Außerdem müsste ein Zielsystem gefunden werden, das den Schüler*innen noch unbekannt ist, um authentisch aus Annahmen auf das Verhalten eines Stoffes schließen zu können – die Sublimation von Iod ergibt sich bspw. überhaupt nicht direkt aus dem Kugelteilchenmodell. Und weil schließlich in empirischer Hinsicht das Wissen über die submikroskopische Ebene für die Vernetzung mit makroskopischen Prozessen vorgelagert ist und nicht umgekehrt [9], kann die simple Gleichsetzung von Modellen mit Repräsentationen zur Erklärung von Phänomenen im Chemieunterricht nicht ohne Weiteres zielführend sein.

Eine Möglichkeit, dieser Herausforderung beim Lehren und Lernen in den Naturwissenschaften zu begegnen, ist die konsequente Rahmung von Modellen als erkenntnistheoretische Artefakte [10]. Dabei werden die beschriebenen repräsentationalen Herausforderungen umgangen, indem ein Modell grundsätzlich als Ausdruck hypothetischer Zusammenhänge verstanden wird. Die Frage lautet dann nicht mehr, wie ein Modell ein Original am besten repräsentiert, sondern was vom Umgang mit dem Modell gelernt werden kann – sowohl falls damit präzise Vorhersagen machbar sind als auch falls die Vorhersagen nicht zutreffen. Das setzt voraus, dass der strukturelle Abgleich zwischen Modell und dem zu modellierenden submikroskopischen System grundsätzlich als unmöglich akzeptiert wird. Wir können – anders als bei einem Spielzeugauto und einem echten Auto – ein Molekülmodell nicht neben ein Molekül legen und die strukturellen Merkmale des Originals mit seinem Modell vergleichen. Die modellierende Person handelt demnach stets im Modus des Was-wäre-wenn und ist darauf zurückgeworfen, diese Annahmen experimentell entweder (vorläufig) beibehalten zu können oder verwerfen zu müssen. Sogenanntes gesichertes Wissen muss sich wiederholt am Phänomen bewähren. Das entsprechende Wissen kann dadurch plausibler oder unplausibler werden, kann des Weiteren radiert werden und so zu großen Errungenschaften führen. Die Wissenschaftsgeschichte zeigt aber mindestens für das Atommodell eine derartige Varianz in der Beständigkeit von Wissen [11,12], dass Argumente für absolute Setzungen

praktisch keine ernsthafte Bedeutung in der Wissenschaftstheorie haben. Im Chemieunterricht ist das ebenfalls herausfordernd. Es ist schwer einzusehen, warum ein Elektron einerseits stets auf einer Bahn um einen Kern kreisen sollte (Bohr'sche Postulate) und andererseits als ortsfester Ladungsträger als Bindeglied zwischen zwei Atomkernen dient (Lewis-Formeln). Weil es spätestens beim Wechsel in die Sekundarstufe II passieren kann, dass das Elektron als delokalisierte Ladungsraum mit einer Aufenthaltswahrscheinlichkeit dargestellt wird, kann das Elektron nicht einmal seinen Status als kleine, negativ geladene Kugel aufrechterhalten. In der Folge wird das Argument stark, die Sachzusammenhänge auf der submikroskopischen Ebene im Chemieunterricht eher als vorläufig und stets revisionsbedürftig darzustellen. Solch eine epistemologische Bescheidenheit ist möglicherweise schwer zu akzeptieren. Allerdings wird auch über den ontologischen und erkenntnistheoretischen Status von Kräften, Teilchen, Evolutionsdruck und zahllosen weiteren nicht direkt beobachtbaren Prozessen und Zuständen so sehr gestritten, dass eine definitorische Lösung nicht plausibel erscheint [13]. Warum sollte es im schulischen Unterricht also plötzlich einfache Antworten auf komplexe Fragen geben? Es handelt sich beim Umgang mit diesen Unsicherheiten nämlich keinesfalls um ein wissenschaftsinternes Problem. Die Leser*innen mögen sich aussuchen, ob sie die folgenden Aussagen auf die öffentlichen Reaktionen zum aktuellen IPCC-Bericht, oder die medialen Debatten um epidemiologische Modellierungen beziehen:

„Das ist ja nur ein Modell!“

„Heute sagen sie so, morgen sagen sie so!“

„Die wissen es ja gar nicht genau!“

Unsere bisherigen Ausführungen erscheinen zunächst wenig optimistisch, weil nicht unbedingt klar ist, welche Referenz angelegt werden kann, um Modelle für das Lehren und Lernen in der Chemie produktiv zu machen, ohne in Beliebigkeit umzuschlagen. Wir schlagen vor, den Fokus stärker auf die jeweilige Fragestellung in einer Lehr-/Lernumgebung zu legen, auf die in iterativer Weise Bezug genommen wird. Dieses Vorgehen ist vielfach untersucht und in zahlreichen Publikationen beschrieben worden und findet international seinen Ausdruck als Scientific Inquiry (vgl. 14). Es ist im deutschsprachigen Raum auch in Konzeptionen wie Forschendem Lernen (15) zu finden und bspw. für die Erstellung von Lernaufgaben konkretisiert worden (vgl. 16). Auf diese Weise wird im Chemieunterricht der Umgang mit dem Zustandekommen naturwissenschaftlichen Wissens und dessen Revisionsbedürftigkeit an etwas gebunden, das häufig nicht explizit gemacht wird: Wer naturwissenschaftlich arbeiten will, prüft begründete Vermutungen, die öfter als unzutreffend zurückgewiesen werden müssen, als dass sie beibehalten werden können. Das bedeutet paradoxerweise, dass das Falschliegen ein integraler Bestandteil erfolgreichen wissenschaftlichen Arbeitens ist. Wir scheitern uns gewissermaßen vorwärts. In der Folge kann die theoretische Rahmung von Modellen als Vehikel zur Darstellung hypothetischer und zu prüfender

Zusammenhänge (s. o.) produktiv mit unterrichtspraktischen Planungsschemata verbunden werden.

3. Einblicke in unsere fachdidaktische Lehrveranstaltung

Das Begleitseminar zur zweigeteilten Einführungsvorlesung Allgemeine Chemie der Universität Wien richtet sich explizit an Lehramtsstudierende. Während die Fachstudierenden beide Vorlesungsteile (A & B) hören, wechseln die Lehramtsstudierenden nach Teil A in das fachdidaktisch orientierte Begleitseminar. Hier werden ausgewählte Aspekte der Vorlesung Allgemeine Chemie A mit Blick auf ihre Bildungsrelevanz und Umsetzungsmöglichkeiten in der Schule fachlich und fachdidaktisch reflektiert. Dies geschieht unter anderem anhand der Basiskonzepte in der Chemie (bspw. Struktur-, Eigenschafts- oder Energiekonzept) wodurch Lehramtsstudierende erste Einblicke in die Herausforderungen des Lehrens und Lernens von Chemie gewinnen sollen. Als wichtigstes Ziel wird dabei eine erkenntnisgesteuerte Reflexion angesehen, d. h. es wird die Frage danach gestellt, wie naturwissenschaftliches Wissen überhaupt zustande kommt. Dieses Moment kann sogar als ein Wesensmerkmal des Lehramtsstudiums gelten [17,18]. Ein Seminarabschnitt spielt dabei eine besondere Rolle. In den vergangenen zwei Jahren war die Gesamtgruppe durch die pandemiebedingten Einschränkungen über einen Zeitraum von zwei Wochen zweigeteilt. In der ersten Woche durchlief die eine Hälfte der Seminarteilnehmer*innen eigenständig eine Selbstlerneinheit, bei der sie Erklärvideos zum undifferenzierten Teilchenmodell sowie den Atommodellen nach Dalton, Rutherford und Bohr ansehen und offene Fragen dazu formulieren sollten. Die zweite Hälfte der Teilnehmer*innen war in Präsenz vor Ort und dazu aufgefordert, ganz typische Zielsysteme (z. B. eine chemische Reaktion im Gleichgewicht oder eine Aggregatzustandsänderung) auf der submikroskopischen Ebene mit verschiedenen Mitteln darzustellen und zu kommentieren. Aufgabe war die Darstellung von:

- Element, Verbindung, Reinstoff, Gemenge
- Aggregatzustände und Übergänge
- Lösung, Lösevorgang, Kristallisieren
- Massenerhaltung und konstante Proportionen bei chem. Reaktionen; Reaktanten im Überschuss

In der Folgewoche tauschten die Teilgruppen. Beide Teilgruppen sollten anschließend zu folgender Aussage Stellung nehmen: „Das Bohr'sche Atommodell ist das modernste der [in den Videos] vorgestellten Modelle. Darum bildet es die Wirklichkeit am besten ab.“

Entgegen der theoretischen Darstellung in diesem Artikel, wird zu Beginn gerade nicht von einer Fragestellung ausgegangen. Die Studierenden werden stattdessen mit der Aufgabe konfrontiert, die jeweiligen Zielsysteme darzustellen. Sie werden also zur soeben noch als problematisch präsentierten Repräsentation submikroskopischer Prozesse angehalten.

Dieser scheinbare Widerspruch wird in der iterativen Natur des forschenden Lernens aufgelöst. Die Studierenden sollen im Dialog mit ihren Kommiliton*innen und den Lehrenden auf möglicherweise inkonsistente Vorstellungen und Argumentationen stoßen, um überhaupt mit der Entwicklung einer reflexiven und frageorientierten Haltung starten zu können. Die alternative Herangehensweise, nämlich theoriekonforme Fragestellungen bzgl. der vorgestellten Theorie (Modelle als epistemische Artefakte) vorzugeben, wurde als nicht adressatengerecht für diese Studienanfänger*innen verworfen. Das Ziel war nicht, die Vermittlung modelltheoretischen Wissens, sondern, die Studierenden in Erkenntnis- und Reflexionsprozesse zu verwickeln. Dabei ermöglichten die Diskussionen der Studierenden untereinander, die Gespräche mit den Lehrenden und die Lernprodukte der Studierenden wertvolle Einblicke in die Lernprozesse der Studierenden. Im Folgenden präsentieren wir ausgewählte Lernprodukte und ordnen diese bezüglich der theoretischen Rahmung ein. Weil es den Umfang des vorliegenden Artikels überschreiten würde, diskutieren wir die fachliche Richtigkeit ausdrücklich nicht. Entsprechende Diskussionen waren Teil des Seminars. Wir bitten daher die Leser*innen wertschätzend Rücksicht darauf zu nehmen, dass wir hier die Gedankenwelt von Lernenden aus erster Hand studieren und davon für unser eigenes Lehrhandwerk lernen dürfen.

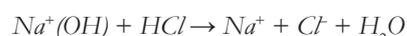
4. Einblicke in ausgewählte Modellüberlegungen der Studierenden

Wir geben im Folgenden Einblicke in die Modellüberlegungen zweier Kleingruppen (3-4 Personen).

Gruppe 1 hatte einen klassischen Molekülbaukasten zur Verfügung.

Die hier präsentierte Darstellung bezieht sich auf die Massenerhaltung bei chemischen Reaktionen (Abb. 1). Der kommentierende Text lautete:

„Anhand der Reaktion von Natronlauge mit Salzsäure zu Natriumchlorid und Wasser, wird die Massenerhaltung veranschaulicht.“



Um die verschiedenen Bindungsarten darzustellen, wurde bei der Ionenbindung bei dem Anion (Ion mit einem Elektron mehr) das Verbindungsstück angesteckt, jedoch nicht mit dem Kation verbunden. Bei der kovalenten Bindung oder auch Elektronenpaarbindung, überlappen die Orbitale der verschiedenen Atome und teilen sich die Elektronen.“

Die Gruppe stellt die Reaktion per vereinfachter Summenformel und Molekülbaukasten als Reaktion aus der ionischen Verbindung Natriumhydroxid mit Chlorwasserstoff dar. Dem gegenüber stellen die Studierenden verbal die Reaktion von „Salzsäure“ mit „Natronlauge“ dar. Besonders ausführlich erfolgt die Beschreibung des Versuchs, die unterschiedlichen Bindungsarten mit den eingeschränkten Mitteln des Molekülbaukastens klar gegeneinander abzugrenzen. Der eingefügte Zusatz, dass Bindungsorbitale überlappen würden, findet in

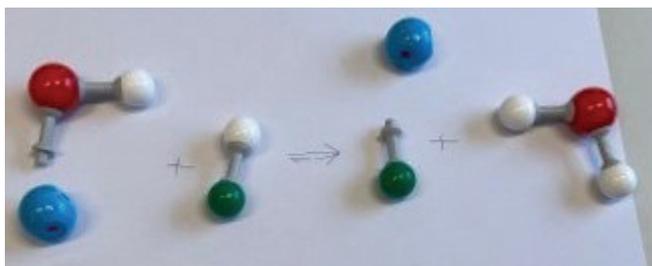


Abbildung 1: Studentische Darstellung der Massenerhaltung bei chemischen Reaktionen anhand der Reaktion von Natronlauge mit Salzsäure.

der Moleküldarstellung hingegen gar keinen Ausdruck. Die Vermischung von Stoff- und Teilchenebene (bspw. Salzsäure vs. Chlorwasserstoffmolekül) wurde in der Lehrveranstaltung diskutiert, wurde aber in der finalen Abgabe der Studierenden nicht aufgenommen und reflektiert.

Nach den weiteren Darstellungen explizierte die Gruppe folgendermaßen die Möglichkeiten und Grenzen des Molekülbaukastens für die gestellte Aufgabe:

„Durch die begrenzte Anzahl der Löcher (4) können mit den Verbindungsstücken nicht alle Verbindungen dargestellt werden.“

Auch für komplexere Strukturen sind (selbst mit zwei Baukästen) viel zu wenig Kugeln vorhanden.“

Die Unterschiede der verschiedenen Bindungsarten können auch nicht so gut aufgezeigt werden.“

Gruppe 2 hatte grüne Legosteine in verschiedenen Größen zur Verfügung.

Die hier gezeigte Darstellung bezieht sich auf die Übergänge bei Aggregatzuständen (Abb. 2). Der kommentierende Text lautete:

„Bei dieser Darstellung mussten wir uns zunächst klar werden, wie die Teilchen-Zusammensetzung bei den unterschiedlichen Aggregatzuständen ist. Wir verwendeten weiterhin unser vorher aufgestelltes Modell mit dem Wassermolekül unter Berücksichtigung der Valenzelektronen.“

Die Studierenden konstruieren „Wassermolekülmodelle“ aus den Legosteinen, anhand deren sie den Prozess des Schmelzens, über den flüssigen Zustand zum Erstarren und anschließend den festen Zustand darzustellen versuchen. Bei den Diskussionen innerhalb der Gruppe einigten sie sich darauf, die gewinkelte Struktur des Wassermoleküls nicht zu berücksichtigen und stattdessen die stöchiometrischen Verhältnisse der Atomsorten sowie die Zuweisung von Elektronen in den Vordergrund zu stellen:

„Bei der Verbindung kam uns direkt H_2O in den Sinn und wir achteten auf die Valenzelektronen. Da wir aber keinen einzelnen Legosteine hatten, definierten wir die 2-knöpfigen mit einem Valenzelektron.“

Der zweiknöpfige Legosteine wurde als Wasserstoffatom mit einem Valenzelektron definiert, von denen pro Molekül je zwei verwendet und übereinandergestapelt wurden. Als

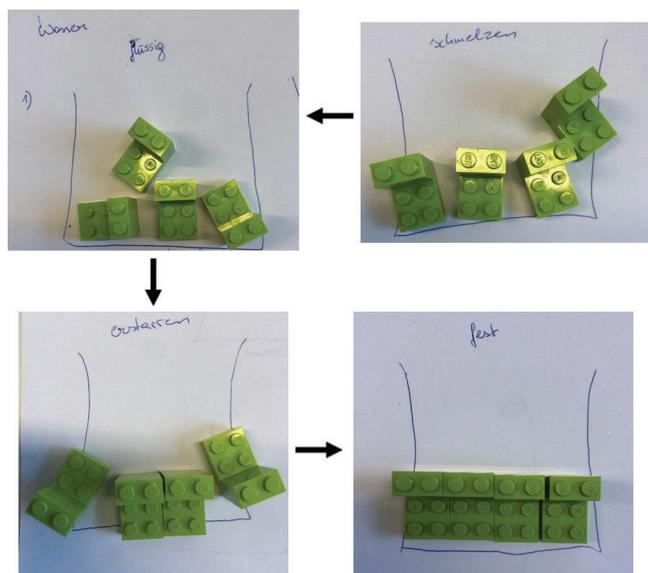


Abbildung 2: Studentische Darstellung von Aggregatzustandsänderungen.

Sauerstoffatome dienten die sechsknöpfigen Legosteine. Bei diesen bleibt die Zuweisung von Valenzelektronen und freien Elektronenpaaren jedoch unausgesprochen. Interessant ist die hier und an einer weiteren Stelle explizierte Notwendigkeit für zweckbezogene Flexibilität in der Repräsentation der submikroskopischen Ebene:

„Als wir zu dieser Aufgabe kamen, mussten wir erkennen, dass unser Modell mit den Valenzelektronen nicht mehr funktionierte und an seine Grenzen kam, da man damit Na^+ und Cl^- nicht richtig darstellen konnte. Wir brauchten ein Modell, welches den positiven Anteil und den negativen Anteil [wiedergab]. Somit erfanden wir ein neues Modell, bei dem wir ausschließlich nach den Elementen und ihrer Anzahl unterschieden.“

Die Gruppe erläuterte Herausforderungen bei der Arbeit mit den Legosteinen folgendermaßen:

*„schwierige Unterscheidung: gleiche Farbe
keine kleineren Legosteine (1-knöpfig)
keine richtige Darstellung der verschiedenen Bindungsarten ist möglich“*

Ergänzend zu diesen erhellenden Einblicken in die Modellüberlegungen der Studierenden sollen hier noch exemplarische Stellungnahmen zur Aussage über das Bohr'sche Atommodell diskutiert werden. Die Aussage, zu der die Studierenden zum Ende des Seminarabschnitts Stellung nehmen sollten, lautete:

„Das Bohr'sche Atommodell ist das modernste der [in den Videos] vorgestellten Modelle. Darum bildet es die Wirklichkeit am besten ab.“

Stellungnahme 1

„An sich würde ich der Aussage zustimmen, denn ein Modell wird verworfen, wenn es durch ein anderes Modell widerlegt werden kann. Einige Modelle können jedoch Prozesse in der Wirklichkeit besser erklären, wie oben erwähnt die [Teilchen-]Schwingungen des Dalton'sche Atommodells“

für Wärmeleitung oder Diffusion. Somit bleiben einige Hypothesen der Theorie gültig, und einige können als überholt wahrgenommen werden. Was „am besten“ abbildet, also wie gut die Wirklichkeit dadurch erfasst werden kann, ist eine subjektive Entscheidung.“

Die Person formuliert eine aufschlussreiche Mischung von Argumenten mit Blick auf die Revisionsbedürftigkeit von Modellen („verworfen“/„widerlegt“). Dabei bringt sie sowohl eine repräsentationale Auffassung („Prozesse in der Wirklichkeit besser erklären“) als auch eine pragmatische Perspektive („subjektive Entscheidung“) zum Ausdruck. Die subjektive Entscheidung hat keinen Referenzpunkt und läuft damit Gefahr beliebig zu werden. Eine bessere Erklärung der Wirklichkeit (im Vergleich zu einer anderen Erklärung) würde voraussetzen, dass es einen Referenzpunkt gäbe, nämlich eine Vergleichbarkeit von Modell und Original. Für beide Positionen gibt es Argumente. Für beides gleichzeitig zu argumentieren, ist jedoch nicht miteinander vereinbar [10].

Stellungnahme 2

„Es stimmt, dass das Bohr'sche Atommodell das modernste ist und die Wirklichkeit am ehesten [a]bbildet. Mit Hilfe dieses Modells wird erklärt, warum die Elektro[n]en auf ihren Kreisbahnen sind und warum die Atome unterschiedlich groß sind.“

Diese Person zeigt eine ausgeprägte repräsentationale Haltung. Die Beurteilung, dass das Bohr'sche Atommodell die Wirklichkeit am ehesten abbildet, kann als eine Vorstellung von Wissenschaft gedeutet werden, die graduell dafür sorgt, dass Modelle und die Realität sich asymptotisch annähern. Dafür lassen sich plausible Gedankengänge formulieren:

„Wie könnte wissenschaftliches Denken und Inferenz möglich sein, wenn es nicht eine gewisse Ähnlichkeit zwischen einer Repräsentation und dem zu Repräsentierenden gäbe – durch Zauberei?“ [vgl. 19, sinngem. Übers. d. Aut.]

Dieses Argument ist also in der Wissenschaftstheorie durchaus vertreten, steht aber unter den hier bereits diskutierten Vorbehalten.

Stellungnahme 3

„Vielleicht ist das Modell der Wirklichkeit am nächsten, es könnte jedoch Schwierigkeiten im Verständnis hervorrufen, die [wiederum] mit einfacheren Modellen besser bzw. leichter erklärt werden können. Beim Unterrichten ist es wichtig, die Realität so einfach wie möglich zu erklären und deshalb sollte man eher mit einfacheren Modellen anfangen. Später, wenn die Grundlagen verstanden wurden, kann man zu den schwierigeren Modellen übergehen. Erst dann können diese richtig verstanden werden.“

Diese Person wechselt direkt in die Perspektive einer Lehrperson und antizipiert mögliche Herausforderungen („Schwierigkeiten im Verständnis“). Die erklärende Funktion von Modellen steht hier im Vordergrund, wobei unterschiedliche Modelle als unterschiedlich nützlich für die Mediation von Wissen bewertet werden. Bezüglich dieses Wissenserwerbs ist das wesentliche Merkmal ein lerntheoretisches Stufenmodell („einfach [...] anfangen“, „später [...] übergehen“, „Erst dann“). Die Erklärung der Realität mithilfe von Modellen unterstellt darüber hinaus eine direkte Korrespondenz zwischen Modell und

Original, d. h. auch diese Person zeigt ein repräsentationales Modellverständnis.

5. Zusammenfassung

Die gezeigten Lernprodukte aus der Lehrveranstaltung zeigen die Herausforderungen, die der Umgang mit und das Verstehen von Modellen in sich bergen. Alle von den Studierenden beschriebenen Modellgrenzen beziehen sich auf die mediale Ebene, d. h. die Studierenden scheinen bereits vor der Lehrveranstaltung eine Strukturgleichheit der Darstellungsform mit der submikroskopischen Ebene akzeptiert zu haben. Die Entwicklungsgeschichte der Atommodelle wird als notwendige Erfolgsgeschichte interpretiert, dabei ist eine repräsentationale Vorstellung von Modellen dominierend: Chemiker*innen würden versuchen, ihre Modelle immer stärker an die Wirklichkeit anzunähern. Eine explizite Einordnung durch modelltheoretische Überlegungen, bzw. bewusste Suche nach Widersprüchen in den jeweiligen Argumentationen fand nicht statt. Es wurden zwar Inkonsistenzen gefunden (verschiedene Bindungsarten darstellen). Diese veranlassten die Studierenden aber nicht, über die Suche nach alternativen Darstellungsformen (bspw. weitere Molekülbaukästen, alternative Darstellungen aus den Parallelgruppen) hinauszugehen. Das liegt daran, dass sie die Strukturgleichheit von Modell und Original bereits als gegeben voraussetzen und in der Folge nach geeigneten Darstellungsformen suchen, nicht aber über ihre erkenntnistheoretischen Annahmen reflektierten.

Die gezeigte und in vielen Lernprodukten der Studierenden gefundene Vermischung der Stoff- und der Teilchenebene spiegelt eine klassische chemiedidaktische Herausforderung, die offensichtlich weder durch die vorgelagerte Fachvorlesung, noch durch die punktuelle Arbeit im Begleitseminar überwunden werden konnte. Wir interpretieren diese Herausforderung modelltheoretisch. Wenn es das Ziel von Wissenschaft sei, Modelle und Realität zur Deckung zu bringen, dann sollte das jeweilige Zielsystem konsequenterweise als vollständig durch die Teilchendarstellungen beschreibbar sein (vgl. Zauberei-Argument weiter oben). Wir weisen dieses Argument mit dem Hinweis auf die beschriebenen Schwierigkeiten zurück, beurteilen den Befund aber als äußerst wertvollen Startpunkt für die Weiterentwicklung der fachdidaktischen Lehrveranstaltungen an unserem Standort.

6. Ausblick

Wenn eine stärkere Bewusstheit der Studierenden über die Annahmen bzgl. submikroskopischer Objekte und Prozesse angestrebt wird, sollte diese Ziel explizit gemacht und entsprechend bearbeitet werden. Das adressatengerechte Arbeiten mit der Erfassung der Vorstellungswelt der Lernenden führt nicht automatisch zu einer reflexiven Haltung. Eine solche Haltung zu entwickeln, ist ein langwieriger und voraussetzungsreicher Prozess, der entsprechende explizite Auseinandersetzungsmöglichkeiten im Verlauf des

Lehramtsstudiums voraussetzt. Die Annahme von Modellen als Repräsentationen der Realität (und in der Folge die Weitergabe dieser Haltung an Schüler*innen) wird von den meisten Studierenden, wenn überhaupt, nur in Ansätzen hinterfragt. Sollen Modelle eher nach der Rahmung von Modellen als epistemische Artefakte genutzt werden, entsteht allerdings eine enorme methodische Herausforderung. Wenn Modelle der Ausdruck hypothetischer Zusammenhänge sind (was-wäre-wenn), erhalten sie ihren besonderen Wert erst, wenn sie an der empirischen Welt ausprobiert werden können und scheitern dürfen. Das bedeutet, Studierende (und ggf. Schüler*innen) sollten die Gelegenheit erhalten, ihre Hypothesen testen zu können. Wir empfehlen ausdrücklich, dass Zeit für diese Arbeit eingeräumt wird. Wir werden dies in ausgewählten Seminaren

mit digitaler Unterstützung (20) anstoßen und entwickeln derzeit auch entsprechende Erhebungsinstrumente.

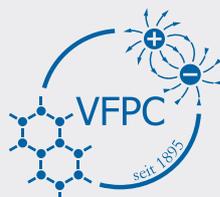
Wenn wir in der fachdidaktischen und schulischen Lehre keine geeigneten Lerngelegenheiten für die Entwicklung angemessener Vorstellungen zur Entwicklung und Funktion von Modellen anbieten, wird ein Modell- und Wissenschaftsverständnis tradiert, das für naturwissenschaftliche Bildung im 21. Jahrhundert nicht adäquat ist.

Marvin Rost *Universität Wien, AECC Chemie*

Anja Lembens *Universität Wien, AECC Chemie*

Literatur

- [1] Reid N. Johnstone's Triangle: Why Chemistry Is Difficult. In: Reid N, Herausgeber. *The Johnstone Triangle: The Key to Understanding Chemistry* [Internet]. Cambridge: Royal Society of Chemistry; 2021 [zitiert 17. Juni 2021]. S. 48-71. Verfügbar unter: <http://ebook.rsc.org/?DOI=10.1039/9781839163661-00048>
- [2] Bindernagel J, Eilks I. Modelle und Modelldenken im Chemieunterricht und ein Einblick in das Verständnis von erfahrenen Chemielehrkräften. *ChemKon*. 2008;15(4):181-6.
- [3] Reith M, Nehring A. Scientific reasoning and views on the nature of scientific inquiry: testing a new framework to understand and model epistemic cognition in science. *Int J Sci Educ*. 2020;42(16):2716-41.
- [4] Krüger D, Kauertz A, Upmeyer zu Belzen A. Modelle und das Modellieren in den Naturwissenschaften. In: Krüger D, Parchmann I, Schecker H, Herausgeber. *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Berlin and Heidelberg: Springer; 2018. S. 141-57.
- [5] Upahi JE, Ramnarain U. Representations of chemical phenomena in secondary school chemistry textbooks. *Chem Educ Res Pract*. 2019;20(1):146-59.
- [6] Daniel KL, Herausgeber. *Towards a Framework for Representational Competence in Science Education*. Cham: Springer International Publishing; 2018. (Models and Modeling in Science Education; Bd. 11).
- [7] Taskin V, Bernholt S, Parchmann I. An inventory for measuring student teachers' knowledge of chemical representations: design, validation, and psychometric analysis. *Chem Educ Res Pract*. 2015;16(3):460-77.
- [8] Barke HD, Harsch G, Kröger S, Marohn A. Schülervorstellungen. In: *Chemiedidaktik kompakt: Lernprozesse in Theorie und Praxis* [Internet]. 3. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2018 [zitiert 24. Mai 2022]. S. 11-58. Verfügbar unter: http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-56492-9_2
- [9] Sumfleth E, Nakoinz S. Chemie verstehen – beobachtbare makroskopische Phänomene auf submikroskopischer Ebene modellbasiert interpretieren. *Z Für Didakt Naturwissenschaften*. 2019;25(1):231-43.
- [10] Rost M, Knuutila T. Models as Epistemic Artifacts for Scientific Reasoning in Science Education Research. *Educ Sci*. 2022;12(4):276.
- [11] Weyer J. *Geschichte der Chemie*. Band 1. Bd. 1. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2018.
- [12] Weyer J. *Geschichte der Chemie*. Band 2. Bd. 2. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2018.
- [13] Veit W. Model Pluralism. *Philos Soc Sci*. 2020;50(2):91-114.
- [14] Pedaste M, Mäeots M, Siiman LA, de Jong T, van Riesen, S. A. N., Kamp ET, u. a. Phases of inquiry-based learning: Definitions and the inquiry cycle. *Educ Res Rev*. 2015;14:47-61.
- [15] Wulf C, Haberstroh S, Petersen M, Herausgeber. *Forschendes Lernen: Theorie, Empirie, Praxis* [Internet]. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; 2020 [zitiert 9. Juni 2022]. Verfügbar unter: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-31489-7>
- [16] Dachauer J, Hofer E. Lernaufgaben im Chemieunterricht. Erarbeitung von Einflussfaktoren auf die Reaktionsgeschwindigkeit. *Chem Sch*. 2020;35(2):15-8.
- [17] Kunina-Habenicht O. Wissen ist Macht: Ein Plädoyer für ein wissenschaftliches Lehramtsstudium. In: Scheid C, Wenzl T, Herausgeber. *Wieviel Wissenschaft braucht die Lehrerbildung? Zum Stellenwert von Wissenschaftlichkeit im Lehramtsstudium* [Internet]. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; 2020 [zitiert 13. April 2021]. S. 109-26. Verfügbar unter: http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-23244-3_6
- [18] Scheid C. Das Junktim von Forschen und Lehren. Professionalisierungs- und erkenntnistheoretische Analysen der Lehrtätigkeit. In: Scheid C, Wenzl T, Herausgeber. *Wieviel Wissenschaft braucht die Lehrerbildung? Zum Stellenwert von Wissenschaftlichkeit im Lehramtsstudium* [Internet]. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; 2020 [zitiert 24. Mai 2022]. S. 149-75. Verfügbar unter: http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-23244-3_8
- [19] Chakravartty A. Informational versus functional theories of scientific representation. *Synthese*. 2010;172(2):197-213.
- [20] Damelin D, Krajcik J, Stephens L. *SageModeler* [Internet]. Concord, MA: The Concord Consortium and the CREATE for STEM Institute at Michigan State University; 2020. Verfügbar unter: <https://sagemodeler.concord.org/index.html>



Neues aus dem Verein

Verzögerung der Hefte

Geschätzte Leser*innen,

es ist Ihnen sicher aufgefallen, dass sowohl das Heft 2 als auch das vorliegende Heft nicht zum gewohnten Zeitpunkt, sondern verspätet erschienen sind. Die Verantwortung dafür liegt einerseits bei der Redaktion, die durch interne Umstellungen nun etwas veränderte Abläufe hat und durch notwendige Übergaben eine Verzögerung entstand. Andererseits wurden auch die agierenden Personen durch Coronaerkrankungen teilweise länger außer Gefecht gesetzt.

Wir hoffen, dass die Probleme nun soweit behoben wurden, dass das vierte Heft vor Weihnachten bei Ihnen ankommt.

Fortbildungswoche

Für die nächste Fortbildungswoche gibt es im November noch eine Nachinskriptionsfrist. Alle Interessierten können sich also noch anmelden.

[https://www.ph-online.ac.at/ph-wien/ee/ui/ca2/app/desktop/#/slc.tm.cp/student/courses/284734?\\$ctx=design=ca;lang=de&\\$scrollTo=toc_overview](https://www.ph-online.ac.at/ph-wien/ee/ui/ca2/app/desktop/#/slc.tm.cp/student/courses/284734?$ctx=design=ca;lang=de&$scrollTo=toc_overview)

Einladung zur Generalversammlung 2022

Zeit: Montag, 12. Dezember 2022, 19:00 Uhr

Ort: ZOOM (Link: <https://univienne.zoom.us/j/62832898090?pwd=NVIkQStxMmlYay9lcDVSYmJZYnhmZz09>)

Meeting-ID: 628 3289 8090, Kenncode: 057538)

Tagesordnung:

1. Begrüßung, Beschlussfassung der Tagesordnung
2. Bericht des Obmanns
3. Bericht der Kassierin
4. Bericht der Rechnungsprüfer, Entlastung des Vorstands
5. Wahl des Vorstands und der Kassaprüfer für das Vereinsjahr 2022/23
6. Festsetzung des Mitgliedsbeitrags 2022/23
7. Fortbildungswoche 2023
8. Allfälliges

Um zahlreichen Besuch ersucht der Vorstand!

Österreichische Post AG
SP 17Z041123 S
Verein zur Förderung des physikalischen
und chemischen Unterrichts,
Porzellangasse 4, Stiege 2, 1090 Wien
DVR 0558567
VRN 668472729

Impressum: Medieninhaber (Verleger) und Hrsg.: Verein zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts. Druck: Fa. Wograndl GmbH, Mattersburg

Retouren an: AECC Physik Universität Wien, Porzellangasse 4, Stiege 2, 1090 Wien.