

Alternative Darstellungsformen des Teilchenmodells

Florian Budimaier & Martin Hopf

Abstract Deutsch

Das Teilchenmodell stellt einen zentralen Aspekt naturwissenschaftlicher Bildung dar, jedoch bereitet es Schülerinnen und Schülern häufig Lernschwierigkeiten. Insbesondere die Unterscheidung der Eigenschaften von makroskopischen Objekten und submikroskopischen Teilchen fällt ihnen schwer. Diese Problematik wird durch Abbildungen, welche Teilchen explizit makroskopische Eigenschaften zuordnen, noch verstärkt. Im Rahmen einer Studie mit 20 Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe wurde daher eine alternative Darstellungsform des Teilchenmodells untersucht. Die Ergebnisse legen nahe, dass typografische Darstellungen – insbesondere für leistungsstärkere Schüler*innen – hilfreicher sind als die in Schulbüchern verbreiteten kugelförmigen Darstellungen.

Schlüsselwörter

Akzeptanzbefragung, Qualitative Inhaltsanalyse, Teilchenmodell, Typografische Darstellungen

Abstract English

The particle model is a central aspect of science education, but it often causes learning difficulties for students. In particular, they find it difficult to distinguish between the properties of macroscopic objects and submicroscopic particles. This problem is exacerbated by illustrations that explicitly assign macroscopic properties to particles. Therefore, an alternative representation of the particle model was investigated in a study with 20 secondary school students. The results suggest that typographic representations are more helpful than the spherical representations commonly found in textbooks, especially for high-achieving students.

Keywords

particulate nature of matter, probing acceptance, qualitative content analysis typographic representations

Zu den Autoren

Florian Budimaier, Mag.; Universität Wien, AECC Physik, Pädagogische Hochschule Wien.

Kontakt: florian.budimaier@phwien.ac.at

Martin Hopf, Univ.-Prof. Dr.; Universität Wien, AECC Physik.

Kontakt: martin.hopf@univie.ac.at

1 Ausgangslage

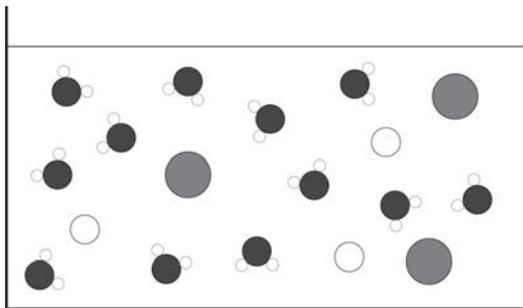
Das Teilchenmodell gilt als eines der zentralen Konzepte im naturwissenschaftlichen Unterricht (vgl. National Science Teaching Association 2017; OECD 2019). Nicht nur bildet es die Grundlage für ein Verständnis des Aufbaus der Materie, es ist auch ein zentrales Element für den Umgang mit vielen gesellschaftlich bedeutsamen Kontexten wie beispielsweise dem Klimawandel und der Energiewende. Auch im neuen österreichischen Lehrplan für Physik in der Sekundarstufe I zählt das Teilchenmodell zu den zentralen fachlichen Konzepten (vgl. BMBWF 2023, S. 2). Dabei wird betont, dass sich unter der Annahme alles besteht aus Teilchen, das Verhalten von physikalischen Systemen voraussagen lässt. Eine exaktere Definition des Teilchenmodells findet sich bei de Vos und Verdonk (1996, S. 659): „All matter consists of entities called particles. Individual particles are too small to be seen. They behave as hard, solid, and (except in chemical reactions) immutable objects. Their absolute dimensions and shape are usually irrelevant.“¹

Eine Vielzahl an Forschungsarbeiten hat gezeigt, dass das Teilchenmodell zu den schwierigsten Themen im naturwissenschaftlichen Unterricht gehört (vgl. Hadenfeldt, Liu & Neumann 2014, S. 182). Falsche Vorstellungen vieler

¹ De Vos und Verdonk (1996, S. 659) führen neben dieser noch sieben weitere Konzeptideen an, um die grundlegenden Eigenschaften des Teilchenmodells zu beschreiben. Dabei gehen sie unter anderem auf die Bewegung der Teilchen, ihre gegenseitige Anziehung sowie die Abstände zwischen den Teilchen in den drei Aggregatzuständen ein.

Schüler*innen über das Teilchenmodell resultieren häufig daraus, dass sie wissenschaftliche Modelle nicht korrekt auf beobachtbare Phänomene anwenden können (vgl. Mikelskis-Seifert & Fischler 2003, S. 78). Dies führt dazu, dass Schüler*innen Atomen und Molekülen dieselben Eigenschaften zuschreiben wie der Substanz, die sie aufbauen. Beispielsweise existieren Vorstellungen, wonach Atome eine Farbe haben (vgl. Albanese & Vicentini 1997, S. 253) oder sich die Größe von Wassermolekülen bei Phasenübergängen ändert (vgl. Griffiths & Preston 1992, S. 618f.; Lee et al. 1993, S. 261). Wenn diese Schüler*innen – wie Grosslight et al. (1991, S. 804) vorschlagen – davon ausgehen, dass Modelle einfache Kopien der Realität sind, scheint es offensichtlich, dass in ihrem mentalen Modell ein Wassermolekül die gleichen Eigenschaften wie flüssiges Wasser hat. Daher würden sie argumentieren, dass das Wassermolekül blau ist wie der Ozean und sich ausdehnt, wenn das Wasser verdunstet, da Gase mehr Raum benötigen als Flüssigkeiten.

Harrison und Treagust (2006) argumentieren, dass diese fehlerhaften mentalen Modelle der Schüler*innen oft aus den Darstellungen des Teilchenmodells in Lehrbüchern resultieren. Diese Darstellungen, wie beispielweise jene in Übersicht 1, lassen den falschen Schluss zu, dass sich Moleküle im Inneren einer Substanz befinden und dass sich immer etwas zwischen ihnen befindet (vgl. ebd., S. 60). Auch bezüglich der Abstände zwischen den Teilchen widersprechen Schulbücher öfters der wissenschaftlichen Lehrmeinung (vgl. Treagust et al. 2010, S. 144). Während das korrekte Verhältnis für die Abstände zwischen den Teilchen in Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen etwa 1:1:10 beträgt (vgl. de Vos & Verdonk 1996, S. 660), gehen Darstellungen in Lehrbüchern meist von einer engeren Anordnung der Teilchen aus.



Übersicht 1: Teilchenmodell einer Flüssigkeit, welches impliziert, dass die Teilchen sich innerhalb einer Substanz befinden (adaptiert nach Harrison & Treagust 2006, S. 60, Quelle: eigene Darstellung)

Adbo und Taber (2009, S. 771) konnten zeigen, dass die mentalen Modelle schwedischer Schüler*innen der Sekundarstufe II hinsichtlich der Struktur der Teilchen in den drei Aggregatzuständen häufig mit Darstellungen in Lehrbüchern übereinstimmen. Schüler*innen nehmen daher in der Regel an, dass in Festkörpern die Teilchen miteinander in Kontakt stehen und zwischen zwei Teilchen in Flüssigkeiten etwa ein Teilchen und in Gasen etwa drei bis vier Teilchen Platz haben (vgl. Treagust et al. 2010, S. 144).

Sollte man in Anbetracht all dieser Schwierigkeiten modellhafte Darstellungen des Teilchenmodells im Unterricht verwenden? Aus der Theorie multimedialen Lernens geht hervor, dass Menschen nur eine begrenzte Menge an Information auf einmal über einen visuellen oder auditiven Kanal verarbeiten können (vgl. Mayer 2009, S. 66). Eine Kombination mehrerer unterschiedlicher Darstellungsformen kann daher das Physiklernen fördern, weil verschiedene Sinneskanäle gleichzeitig aktiviert werden, anstatt einen Kanal zu überlasten (vgl. Opfermann, Schmeck & Fischer 2017, S. 6). Wenn zum Beispiel eine mündliche Erklärung über das Teilchenmodell durch eine visuelle Darstellung (Diagramm, Grafik usw.) unterstützt wird, kann eine erfolgreiche konzeptionelle Veränderung erreicht werden (vgl. Adadan, Irving & Trundle 2009, S. 1765; Chiu & Chung 2013, S. 161). Da Atome und Moleküle nicht direkt beobachtet werden können, müssen sie entweder durch visuelle Modelle (z. B. Kugel-Stab-Modell) oder Symbole (z. B. H_2O für ein Wassermolekül) dargestellt werden (vgl. Gilbert & Treagust 2009, S. 4).

Wiener et al. (2015, S. 315) halten visuelle Modelle von Teilchen für sehr problematisch. Wie bereits erwähnt, kann die Darstellung von Atomen als kreisförmige, farbige Objekte zu zahlreichen Missverständnissen führen. Daher schlagen sie einen typografischen Ansatz vor, bei dem alle Teilchen durch Buchstaben oder Wörter dargestellt werden. Auf diese Weise sollte der Modellcharakter betont und die Übertragung von makroskopischen Eigenschaften auf submikroskopische Teilchen reduziert werden. In einer Studie mit 20 Schülerinnen und Schülern der zweiten Klasse einer allgemeinbildenden höheren Schule (AHS) haben Wiener et al. (2015, S. 320) festgestellt, dass ihre Idee in dieser Gruppe gut akzeptiert wurde und dabei falsche Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern zum Teilchenmodell vermindert werden konnten.

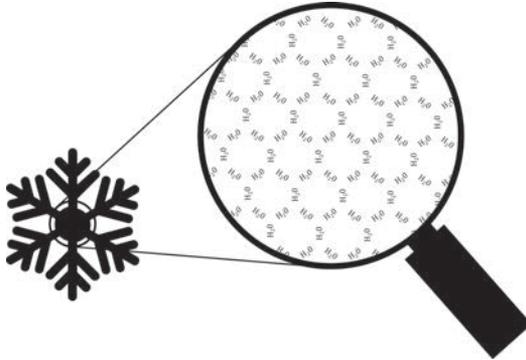
2 Forschungsfragen und Ziele

Anschließend an den soeben beschriebenen Forschungsstand konzentriert sich diese Studie auf die fachlich inkorrekten Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern im Zusammenhang mit Darstellungen in Schulbüchern. In der einfachsten Version des Teilchenmodells wird ein Atom als Kreis und ein Molekül als Summe kreisförmiger Objekte dargestellt (vgl. Bunce & Gabel 2002, S. 913). Um verschiedene Elemente oder Moleküle voneinander zu unterscheiden, werden sie mit unterschiedlichen Farben versehen oder in verschiedenen Größen gezeichnet. Manchmal wird auch Farbe verwendet, um bestimmte Eigenschaften hervorzuheben, zum Beispiel sind *heiße* Teilchen rot und *kalte* Teilchen blau. Diese Darstellungen können jedoch bei Schüler*innen zur Annahme führen, Atome und Moleküle hätten eine beobachtbare Farbe oder Form.

Um derartige Vorstellungen zu vermeiden, wurde im Rahmen der Studie eine neue Art der Darstellung, basierend auf der Idee typografischer Darstellungen von Wiener et al. (2015, S. 315f.) entwickelt. In der Elementarteilchenphysik stellen Wiener et al. (2015, S. 316) Quarks, Gluonen und die aus diesen aufgebauten Teilchensysteme mit Buchstaben dar (z. B. *u* für up-Quark). Diese Idee wurde im Kontext des Teilchenmodells weiterentwickelt und Atome und Moleküle durch die jeweiligen chemischen Symbole dargestellt (z. B. H_2O für Wassermoleküle). Bei der Gestaltung der Darstellungen wurde auch darauf geachtet, dass sie mit physikalischen Erkenntnissen übereinstimmen. Beispielsweise beträgt das Verhältnis der Abstände zwischen den Teilchen in Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen 1:1:10 (vgl. de Vos & Verdonk 1996, S. 660). Zudem bilden Wassermoleküle in Eis eine hexagonale Struktur² (vgl. Salzmann & Murray 2020, S. 586). Übersicht 2 zeigt ein Beispiel einer typografischen Darstellung, welches diese Erkenntnisse berücksichtigt.

Wie bei allen Formen grafischer Darstellungen gibt es jedoch auch hier Grenzen: Die meisten Stoffe des täglichen Lebens bestehen nicht nur aus einem Element oder einem einfachen Molekül wie H_2O . Während Wasser oder

² Tatsächlich bildet Eis verschiedene Strukturen. Friert Wasser bei normalem Druck (1 bar) und Temperaturen knapp unterhalb des Gefrierpunkts ($0\text{ }^\circ\text{C}$) bildet sich Eis I_h , das eine hexagonale Struktur aufweist. Bei Temperaturen unterhalb von $-22\text{ }^\circ\text{C}$ bilden sich auch kubische Strukturen (Eis I_c). Nach Salzmann und Murray (2020, S. 586) sind insgesamt 18 verschiedene Kristallstrukturen von Eis bekannt.



Übersicht 2: Typografische Darstellung von Eis (Quelle: eigene Darstellung)

Luft leicht mit ihren chemischen Symbolen dargestellt werden können, ist dies bei anderen Stoffen wie Fett, Kunststoffen oder Holz nicht der Fall. Dies schränkt die Anzahl der möglichen Beispiele, die mit den Schülerinnen und Schülern diskutiert werden können ein. Für die hier vorgestellte Studie wurde nur Wasser³ verwendet, weil es für das tägliche Leben besonders relevant ist.

Wie soeben dargelegt, liegt das Forschungsinteresse der hier präsentierten Studie darin, die Funktionalität der entwickelten typografischen Darstellungen für den Unterricht über das Teilchenmodell zu überprüfen. Dementsprechend lautet die Forschungsfrage wie folgt:

*Wie beurteilen Schüler*innen typografische Darstellungen im Vergleich zu anderen Darstellungen des Teilchenmodells?*

Basierend auf einer gemäßigt konstruktivistischen Betrachtung von Lernen wird hinsichtlich der Beantwortung der Fragestellung davon ausgegangen, dass Schüler*innen nicht als *tabula rasa* in den Unterricht kommen (vgl. Haagen-Schützenhöfer 2016, S. 13). Vorerfahrungen und Vorwissen beeinflussen den

³ Wasser verhält sich jedoch anders als fast alle anderen Stoffe, da es im flüssigen Zustand die höchste Dichte aufweist. Schüler*innen müssen darauf aufmerksam gemacht werden, dass die meisten Stoffe beim Schmelzen an Volumen zunehmen, während Wasser dichter wird. Dieses Beispiel kann auch als Ausgangspunkt für einen kognitiven Konflikt genutzt werden, um einen Konzeptwechsel herbeizuführen (vgl. Posner et al. 1982, S. 214). Schüler*innen gehen häufig davon aus, dass Teilchen in Flüssigkeiten größer sind als in Festkörpern (vgl. Griffiths & Preston 1992, S. 618f.). Dieses Beispiel zeigt aber, dass diese Annahme nicht stimmt und das Volumen eines Körpers nicht mit dem Volumen der Teilchen zusammenhängt.

Lernprozess. Es sollte daher untersucht werden, ob sich typografische Darstellungen hinsichtlich dieser Vorerfahrungen als anschlussfähig erweisen und welche Vorstellungen Schüler*innen mit den einzelnen Darstellungsformen verbinden.

3 Untersuchungsdesign

Die soeben gestellte Forschungsfrage wurde im Rahmen einer Studie⁴ zum Teilchenmodell untersucht. Das genaue Vorgehen wird im Weiteren beschrieben.

3.1 Erhebungsmethoden

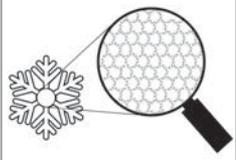
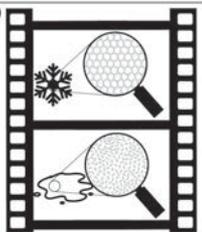
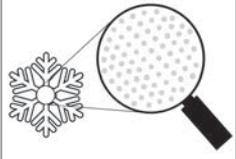
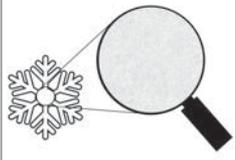
Die Untersuchung der typografischen Darstellungen wurde anhand von Interviews nach der Methode der Akzeptanzbefragung (vgl. Jung 1992, S. 278; Wiesner & Wodzinski 1996, S. 252) durchgeführt. Bei dieser Methode handelt es sich um eine Kombination aus einem Micro-Teaching und einem Einzelinterview mit dem Ziel, Lernschwierigkeiten zu eruieren. Anstatt den Schülerinnen und Schülern nur Fragen zu stellen, werden zentrale fachliche Konzepte, auch *Key Ideas* (vgl. Haagen-Schützenhöfer 2016, S. 21) genannt, vom Interviewenden erklärt. Nach der Erklärung werden die Schüler*innen vom Interviewenden gefragt, ob diese für sie logisch und nachvollziehbar war. Im Anschluss sollten die Schüler*innen die Erklärung noch einmal in eigenen Worten wiederholen. Durch diesen Schritt können mögliche Verständnisschwierigkeiten aufgedeckt werden. Abschließend sollten die Schüler*innen noch mindestens eine Aufgabe lösen, um zu zeigen, dass sie die Erklärung auch in einem neuen Kontext anwenden können.

3.2 Intervention

In der vorliegenden Studie wurden zwei Key Ideas untersucht. Dabei ging es um die Ideen, dass alles aus sehr kleinen, nicht-sichtbaren Bausteinen besteht sowie, dass das Verhalten all dieser Bausteine die Eigenschaften eines Stoffes bestimmt. Zu beiden Key Ideas gab es jeweils eine Aufgabe mit typografischen

⁴ In diesem Artikel wird der Teil der erhobenen Daten präsentiert, der sich auf die typografischen Darstellungen bezieht. Weitere Ergebnisse der Studie sind bereits in Budimaier und Hopf (2022) und Hull et al. (2023) publiziert. Die vollständigen Transkripte der Interviews sind auf Anfrage bei Budimaier erhältlich.

Darstellungen. Dabei wurden diese noch mit zwei weiteren Darstellungen – einem kugelförmigen Teilchenmodell und einem kontinuierlichen Modell der Materie – ergänzt. Bei der ersten Aufgabe wurden die Schüler*innen gefragt, welche der drei gezeigten Darstellungen ihrer Meinung nach am besten zeigt, wie eine Schneeflocke aufgebaut ist. In derselben Art und Weise sollten die Schüler*innen bei der zweiten Aufgabe beurteilen, welche der drei gezeigten Darstellungen am besten das Schmelzen einer Schneeflocke veranschaulicht. Übersicht 3 zeigt alle verwendeten Darstellungen.

	Aufgabe 1	Aufgabe 2
typografische Darstellung	a) 	d) 
kugelförmige Darstellung	b) 	e) 
Kontinuums-Darstellung	c) 	f) 

Übersicht 3: Darstellungen aus der Akzeptanzbefragung (Quelle: eigene Darstellung)

Bei der Auswahl der Stichprobe wurden mehrere Faktoren berücksichtigt. In Österreich sieht der Physik-Lehrplan für die AHS das Teilchenmodell in der zweiten und sechsten Klasse vor. Da Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern über die Teilchennatur der Materie auch in der Sekundarstufe II vorherrschen (vgl. Adbo & Taber 2009, S. 783; Treagust et al. 2010, S. 161),

war ein Vergleich zwischen der Sekundarstufe I und der Sekundarstufe II von Interesse.

Die Auswahl der Schüler*innen wurde durch die Covid-19-Pandemie beeinflusst, die den Besuch von Schulen aufgrund der Beschränkungen durch die österreichische Bundesregierung unmöglich machte. Da der Erstautor jedoch Lehrer an einem Wiener Gymnasium ist, war es möglich, die Studie an dieser Schule durchzuführen. Die Schule befindet sich in einem Bezirk mit sehr hohem sozioökonomischem Status und die Schüler*innen werden im Allgemeinen von ihren Eltern in ihrem Lernen stark unterstützt. Sowohl von der Direktion als auch von den Eltern der teilnehmenden Schüler*innen wurde das Einverständnis eingeholt. Zwanzig Schüler*innen⁵ aus vier verschiedenen Klassen haben sich freiwillig zur Teilnahme an den Interviews bereit erklärt. Die Stichprobe war zu gleichen Teilen in Schüler*innen der zweiten und sechsten Klasse AHS aufgeteilt. Die Schüler*innen beider Gruppen hatten zuvor bereits im Physikunterricht etwas über das Teilchenmodell gelernt.

3.3 Auswertungsmethoden

Die Auswertung der Akzeptanzbefragungen erfolgte mittels evaluativer qualitativer Inhaltsanalyse (vgl. Kuckartz & Rädiker 2022, S. 157ff.). Hinsichtlich der Aufgaben wurden drei Codierungen verwendet, welche sich auf mentale Modelle zum Teilchenmodell nach Johnson (2006, S. 115f.) stützten. Entschieden sich die Schüler*innen für die kontinuierliche Darstellung, erhielt ihre Antwort die Codierung *Kontinuumsmodell*. Die kugelförmige Darstellung, welche die Übertragung makroskopischer Eigenschaften auf Atome nahelegt, erhielt die Codierung *Hybridmodell*. Die typografische Darstellung, welche besonders den Modellcharakter betont, erhielt die Codierung *Teilchenmodell*. Alle Antworten wurden vom ersten Autor codiert, anhand von zwei Interviews wurde auch die Interrater-Reliabilität erhoben und $\hat{I}^{\circ} = 0,74$ errechnet. Gemäß Landis und Koch (1977, S. 165) stellt dies eine erhebliche Übereinstimmung dar.

⁵ 12 Schülerinnen und 8 Schüler.

4 Forschungsergebnisse

Mehr als die Hälfte der Schüler*innen erachtete typografische Darstellungen als, im Vergleich zu den beiden anderen Darstellungen, besser geeignet, um den Aufbau der Materie zu veranschaulichen (siehe Übersicht 4). Dies ist bemerkenswert, weil die Darstellung als kugelförmiges Modell vielen Schülerinnen und Schülern bereits aus ihren Physiklehrbüchern vertraut war, wie folgende Aussage illustriert: „Die typischen Darstellungen sind die, weil Moleküle werden dargestellt als (.) eben als kleine Kügelchen auch im Physikbuch“ (M3:24)⁶. Es zeigen sich jedoch Unterschiede im Antwortverhalten, wenn die gesamte Leistung der Schüler*innen in der Akzeptanzbefragung in die Analyse miteinbezogen wird. Jene Schüler*innen, welche im Laufe der Akzeptanzbefragung ein größeres konzeptuelles Verständnis gezeigt hatten, wählten im Vergleich durchschnittlich doppelt so oft das typografische Modell. Demnach sind die typografischen Darstellungen besonders attraktiv für Schüler*innen, welche bereits ein elaborierteres Verständnis des Teilchenmodells aufweisen. Dies ist unabhängig von Alter und Geschlecht der Schüler*innen. Es konnten keine nennenswerten Unterschiede zwischen der zweiten und der sechsten Klasse AHS, sowie zwischen Schülerinnen und Schülern festgestellt werden.

	Typografische Darstellung	Kugelförmige Darstellung	Kontinuums-Darstellung
Schneeflocke	13	5	2
Schmelzen	10	8	2
Gesamt	23	13	4

Übersicht 4: Anzahl der Schüler*innen, die eine bestimmte Darstellung bevorzugen (Quelle: eigene Darstellung)

Auf die Frage, warum sie das typografische Modell am überzeugendsten finden, argumentierten viele Schüler*innen, dass die Darstellung gut zeigt, wie die Moleküle „vernetzt“ (M3:24), „verkettet“ (K6:20) oder „zusammengebunden“ (B3:38) sind. Es scheint somit, dass Schüler*innen das typografische Modell als besonders gut geeignet für die Darstellung der Struktur von Festkörpern erachten. Um einen exemplarischen Einblick in die Überlegungen der

⁶ Zur Anonymisierung der Teilnehmer*innen wurde für jede Person eine Kurzbezeichnung erstellt (z. B. M3). Die Zahl nach dem Doppelpunkt kennzeichnet den Absatz im Transkript, dem das Zitat entnommen ist.

Schüler*innen zu geben, werden im Folgenden zwei prototypische Antworten jeweils anhand eines Fallbeispiels dargestellt.

4.1 Modellwechsel

Als letzte Frage zur ersten Key Idea sind den Schülerinnen und Schülern drei Zeichnungen gezeigt worden, welche die Struktur einer Schneeflocke darstellen sollen. Nummer eins stellte das typographische Modell dar, Nummer zwei ein kontinuierliches Modell und Nummer drei ein kugelförmiges Modell (siehe Übersicht 3a-c). Der Interviewende forderte die Schüler*innen auf, aus diesen drei Darstellungen jene auszuwählen, welche ihrer Meinung nach am besten den Aufbau der Schneeflocke zeigt. Bob⁷ begründete seine Wahl des typografischen Modells (siehe Übersicht 3a) dabei wie folgt:

„Also ich finde, dass es die Nummer eins am besten darstellt, weil wir, also weil die halt, weil es Bausteine sind und die nicht wie bei der Nummer drei also solche Abstände haben sie dann direkt zusammen sind und so halten. Und bei der Nummer zwei, also die Nummer zwei verstehe ich nicht ganz weil (.) also hier kann ich sehen, dass es kleine Teilchen sind, aber der Nummer zwei nicht“ (R2:30).

Demgemäß schien bei Bob die Vorstellung vorhanden zu sein, dass in einer festen Substanz die Teilchen miteinander in Kontakt stehen. Es ist jedoch fraglich, ob die Aktivierung dieser Vorstellung wissenschaftlich korrekte Vorstellungen über die atomare Bindung behindern könnte.

Am Ende der Diskussion von Key Idea Nummer zwei wurden den Schülerinnen und Schülern erneut drei Zeichnungen gezeigt. Diese stellten die Strukturveränderung der Materie beim Schmelzen einer Schneeflocke dar, wobei am Ende nur noch eine Wasserpfütze übrigbleibt. Dabei entsprach Nummer eins dem kontinuierlichen Modell, Nummer zwei dem typographischen Modell und Nummer drei dem kugelförmigen Modell (siehe Übersicht 3d-f). Der Interviewende forderte die Schüler*innen wiederum auf, aus diesen drei Darstellungen jene auszuwählen, welche ihrer Meinung nach am besten den Schmelzvorgang zeigt. Bob entschied sich, im Gegensatz zu seiner Antwort auf die vorherige Frage, hier jedoch für das kugelförmige Modell (siehe Übersicht 3e):

⁷ Alle Namen sind Pseudonyme.

„**Bob:** Diesmal ist es die Abbildung Nummer drei.

Interviewer: Und kannst du mir auch begründen warum?

B: Weil man da einfach deutlich sieht, dass die Teilchen weiter auseinander sind. Also weil bei dem sieht man es schon ein bisschen, aber wenn wir jetzt nur so ganz kurz darauf könnte man das auch mit dem verwechseln.

I: Okay, weil die zwei Bilder bei zwei zu ähnlich sind.

B: Ja also halt während bei dem, da merkt man sofort, da sind weniger Teilchen und ein größerer Abstand ist da“ (R2:56-60).

Bob merkt deutlich an, dass ihm die Nummer drei am besten gefällt, weil man „deutlich sieht, dass die Teilchen weiter auseinander sind“ (R2:58). Auch dies deckt sich mit den Erkenntnissen aus der Literatur hinsichtlich der Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern über die Abstände zwischen den Teilchen. Im Gegensatz zur naturwissenschaftlichen Sichtweise nimmt gemäß vieler Schüler*innen der Abstand zwischen den Teilchen von fest zu flüssig zu.

4.2 Hierarchie der Modelle

Alice betrachtete die drei verschiedenen Darstellungen des Aufbaus der Materie als hierarchisch strukturiert, wie sich aus ihrer folgenden Aussage ablesen lässt:

„Ich würde jetzt auf jeden Fall sagen, dass das hier die realste, also Nummer zwei [kontinuierliche Darstellung, Anmerkung F.B. & M.H.] ist die realste Vorstellung, weil so sehen es wir. So könnte man, also Nummer drei [kugelförmige Darstellung, Anmerkung F.B. & M.H.] könnte man beschreiben, als die nächstkleinere Stufe, weil das besteht aus Teilchen, weil wir wissen alles besteht aus Teilchen und dann Nummer eins [typografische Darstellung, Anmerkung F.B. & M.H.] sehe ich jetzt hier schon die genaue chemische Zusammensetzung aus Wasser und das ist hier halt dann so ein Netz“ (F2:32).

Es scheint, dass für Alice der Modellcharakter dieser Darstellungen, trotz deutlicher Hinweise des Interviewers, nicht klar geworden ist. Sie sah die Darstellungen nicht als drei verschiedene Möglichkeiten, die Struktur der Materie zu veranschaulichen, sondern als Bilder der Realität, die auf verschiedenen Skalen zeigen, *wie es wirklich ist*.

Darüber hinaus gab es für Alice nicht nur eine Hierarchie zwischen den Darstellungen, sondern auch zwischen Teilchen auf der einen Seite und Atomen und Molekülen auf der anderen:

A: Es ist vielleicht falsch gewählt gewesen dieses Vokabel, aber es ist eigentlich alles ein Teilchen, nur Teilchen sind für mich trotzdem größer, ich, oder molekular kann man sagen, auf jeden Fall noch nicht atomare Ebene.

I: Okay, also das heißt du würdest sagen ein Teilchen ist größer als ein Atom oder als ein Molekül, das ist eine größere Einheit.

A: Nein, theoretisch nicht, aber in meiner Vorstellung irgendwie schon“ (F2:66-68).

Dies zeigt, dass bei Alice eine Art Zwiespalt im Denken über das Teilchenmodell bestand. Obwohl sie die wissenschaftlichen Fakten bereits kannte und in der Lage war, sie anzuwenden, hatte sie immer noch Vorstellungen, die im Widerspruch zu ihrem Wissen standen.

Die beiden soeben exemplarisch aufgezeigten Erkenntnisse traten nicht nur bei Alice und Bob auf, sondern waren jeweils bei mehreren teilnehmenden Schülerinnen und Schülern zu beobachten. So wechselten insgesamt fünf Schüler*innen von der ersten zur zweiten Frage vom typografischen zum kugelförmigen Modell. Außerdem erkannten insgesamt vier Schüler*innen eine Hierarchie zwischen den drei vorgestellten Modellen. Drei davon gaben an, die typografische Darstellung sei am genauesten, gefolgt von der kugelförmigen Darstellung und der Kontinuums-Darstellung. Eine Person reihte jedoch die Kontinuums-Darstellung an erster Stelle, gefolgt von der typografischen und der kugelförmigen Darstellung.

5 Interpretation und Diskussion

In der hier vorgestellten Studie wurde die Nützlichkeit typografischer Darstellungen für Lernprozesse im Kontext des Teilchenmodells untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass die Mehrheit der befragten Schüler*innen typografische Darstellungen als bessere Darstellung des Aufbaus der Materie erachtet haben als kugelförmige oder kontinuierliche Modelle. Leistungsstärkere Schüler*innen wählten besonders häufig das typografische Modell. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Ezema et al. (2022, S. 203) wonach kognitive Fähig-

keiten einen positiven Einfluss auf den Konzeptwechsel beim Lernen über das Teilchenmodell haben.

Schüler*innen dieser Studie bevorzugten das typografische Modell vor allem bei der Darstellung von Festkörpern, da es die Struktur der Moleküle und deren Bindung zeigt. Dies ist in Einklang mit den Ergebnissen von Treagust et al. (2010, S. 144), wonach in der Vorstellung vieler Schüler*innen die Teilchen im Festkörper in Kontakt miteinander stehen. Ebenso konnte das Ergebnis von Treagust et al. (2010, S. 144) bestätigt werden, dass Schüler*innen im Allgemeinen davon ausgehen, dass der Abstand der Teilchen zueinander beim Übergang vom festen in den flüssigen Zustand zunimmt.

Des Weiteren wurde die Schwierigkeit der Modellbildung von Schülerinnen und Schülern (vgl. Mikelskis-Seifert & Fischler 2003, S. 78) auch in dieser Studie deutlich. In der Annahme, dass es eine starke Korrelation zwischen ihren eigenen mentalen Modellen über die Teilchen und der Realität gibt (vgl. Harrison & Treagust 1996, S. 532) konstruierten manche Schüler*innen eine Hierarchie zwischen den in der Studie vorgestellten Darstellungen des Aufbaus der Materie. Grund dafür könnte auch die generelle Unzufriedenheit mit Modellen von Schülerinnen und Schülern sein, verbunden mit dem Wunsch zu wissen, wie *es wirklich ist* (vgl. Fischler & Schecker 2018, S. 147ff.).

5.1 Einschränkungen

Hinsichtlich der Aussagekraft der erhobenen Daten muss angemerkt werden, dass alle Schüler*innen, welche an der Studie teilgenommen haben, dieselbe Schule besucht haben und von derselben Physik-Lehrkraft unterrichtet wurden. Dieser Lehrkraft zufolge hatten die meisten der Schüler*innen, die sich freiwillig zu einem Interview bereit erklärten, gute Noten und großes Interesse an Physik. Wären Schüler*innen zufällig ausgewählt worden, hätten diese möglicherweise schlechtere Leistungen erbracht als jene in der untersuchten Stichprobe.

Des Weiteren wurden den Schülerinnen und Schülern drei verschiedene Darstellungen zum Aufbau der Materie vorgestellt, welche entsprechend den Erkenntnissen aus der Literatur erstellt wurden. Daraus lässt sich jedoch nicht zwangsläufig schließen, dass die von den Schülerinnen und Schülern im Rahmen der Studie als beste Darstellung gewählte Form auch generell die beste Variante zur grafischen Darstellung des Teilchenmodells ist. Zudem zeigen

die Antworten der Schüler*innen, dass die typografischen Darstellungen noch weiter verbessert werden sollten, um beispielsweise nicht den Eindruck zu vermitteln, die Teilchen wären miteinander in Kontakt.

Bei der Anwendung der typografischen Darstellungen ergibt sich das Problem, dass diese nur auf eine begrenzte Menge an Beispielen beschränkt sind, da die Summenformeln vieler Substanzen komplex sind. Eine mögliche Lösung wäre, sich zu Beginn auf einige alltägliche Stoffe mit einfacher Summenformel (z. B. Wasser oder Luft) zu beschränken. Mit fortschreitendem Wissen der Schüler*innen aus dem Chemieunterricht könnten dann auch komplexere Beispiele verwendet werden.

6 Ausblick

Die Ergebnisse der hier präsentierten Studie legen nahe, dass typografische Darstellungen des Teilchenmodells im Unterricht verwendet werden können, da sie – innerhalb der hier untersuchten Stichprobe – auf breitere Akzeptanz stießen als die in Schulbüchern verbreiteten kugelförmigen Darstellungen. Entsprechend der Rückmeldungen der Schüler*innen sollten jedoch noch kleinere Verbesserungen an den Darstellungen vorgenommen werden. So sollte immer ein deutlicher Abstand zwischen den Symbolen sein, damit nicht der Eindruck entsteht, diese würden einander berühren. Des Weiteren sollten Schüler*innen explizit darauf hingewiesen werden, dass die Abstände zwischen den Bausteinen beim Schmelzen nicht merklich zunehmen. Im für den Alltag sehr wichtigen Beispiel Wasser nehmen die Abstände sogar ab, was mit der hexagonalen Struktur von Eis I_h zu tun hat. Die hier präsentierten typografischen Darstellungen ermöglichen es, diese Anomalie des Wassers darzustellen und mit Schülerinnen und Schülern zu diskutieren.

Abschließend wollen die Autoren dieses Beitrags Lehrkräfte und Fachdidaktiker*innen der Naturwissenschaften dazu ermutigen, typografische Darstellungen in der schulischen Praxis sowie in weiteren Studien zu erproben. Aufgrund der Vielfalt an naturwissenschaftlichen Konzepten, welche mit dem Teilchenmodell in Verbindung stehen, sind verschiedene Anwendungsmöglichkeiten denkbar. Um nur einige zu nennen: Temperatur, Druck, Wärmetransport oder der Aufbau von Kristallen. Letzteres Thema wird von den Autoren in einer Folgestudie noch weiter untersucht werden. Darüber hinaus sollten die hier vorgestellten oder ähnliche Beispiele mit einer größeren Gruppe

von Schülerinnen und Schülern getestet werden. Ebenso können die Ergebnisse dieser und möglicher weiterer Studien für Autorinnen und Autoren von Physikschulbüchern von Bedeutung sein, insbesondere hinsichtlich der Implementierung des zentralen Konzepts *Teilchen* im neuen Lehrplan für Physik der Sekundarstufe I.

Literatur

- Adadan, E., Irving, K. E. & Trundle, K. C. (2009). Impacts of multi-representational instruction on high school students' conceptual understandings of the particulate nature of matter. *International Journal of Science Education*, 31(13), S. 1743–1775. <https://doi.org/10.1080/09500690802178628>.
- Adbo, K. & Taber, K. S. (2009). Learners' mental models of the particle nature of matter: A study of 16-year-old Swedish science students. *International Journal of Science Education*, 31(6), S. 757–786. <https://doi.org/10.1080/09500690701799383>.
- Albanese, A. & Vicentini, M. (1997). Why do we believe that an atom is colourless? Reflections about the teaching of the particle model. *Science & Education*, 6(3), S. 251–261. <https://doi.org/10.1023/A:1017933500475>.
- Budimaier, F. & Hopf, M. (2022). Students' Ideas on Common Experiments About the Particulate Nature of Matter. *Journal of Baltic Science Education*, 21(3), S. 381–397. <https://doi.org/10.33225/jbse/jbse/22.21.381>.
- Bunce, D. M. & Gabel, D. (2002). Differential effects on the achievement of males and females of teaching the particulate nature of chemistry. *Journal of research in science teaching*, 39(10), S. 911–927. <https://doi.org/10.1002/tea.10056>.
- Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung (2023). *Lehrplan PHYSIK (Sekundarstufe I)*. Abrufbar unter: <https://www.paedagogikpaket.at/massnahmen/lehrplaene-neu/materialien-zu-den-unterrichtsgegenstaenden.html> (2023-05-05).
- Chiu, M.-H. & Chung, S.-L. (2013). The use of multiple perspectives of conceptual change to investigate students' mental models of gas particles. In G. Tsapralis (Hrsg.), *Concepts of Matter in Science Education* (19, S. 143–168). Dordrecht Heidelberg [u. a.]: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5914-5_7.
- de Vos, W. & Verdonk, A. H. (1996). The particulate nature of matter in science education and in science. *Journal of research in science teaching*, 33(6), S. 657–664. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2736\(199608\)33:6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(199608)33:6).
- Ezema, M. J., Ugwuany, C. S., Okeke, C. I. & Orji, E. I. (2022). Influence of Cognitive Ability on Students Conceptual Change in Particulate Nature of Matter in Physics. *Journal of Turkish Science Education*. <https://doi.org/10.36681/tused.2022.118>.

- Fischler, H. & Schecker, H. (2018). Schülervorstellungen zu Teilchen und Wärme. In T. Wilhelm, M. Hopf, R. Duit & H. Schecker (Hrsg.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis* (S. 139–161). Berlin, Heidelberg.
- Gilbert, J. K. & Treagust, D. F. (2009). Introduction: Macro, submicro and symbolic representations and the relationship between them: Key models in chemical education. In J. K. Gilbert & D. Treagust (Hrsg.), *Multiple representations in chemical education* (Models and Modeling in Science Education, Bd. 4, 1. Aufl., S. 1–8). Berlin: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8872-8_1.
- Griffiths, A. K. & Preston, K. R. (1992). Grade-12 students' misconceptions relating to fundamental characteristics of atoms and molecules. *Journal of research in science teaching*, 29(6), S. 611–628. <https://doi.org/10.1002/tea.3660290609>.
- Grosslight, L., Unger, C., Jay, E. & Smith, C. L. (1991). Understanding models and their use in science: Conceptions of middle and high school students and experts. *Journal of research in science teaching*, 28(9), S. 799–822. <https://doi.org/10.1002/tea.3660280907>.
- Haagen-Schützenhöfer, C. (2016). *Lehr- und Lernprozesse im Anfangsoptikunterricht der Sekundarstufe I*. Habilitationsschrift. Universität Wien.
- Hadenfeldt, J. C., Liu, X. & Neumann, K. (2014). Framing students' progression in understanding matter: A review of previous research. *Studies in Science Education*, 50(2), S. 181–208. <https://doi.org/10.1080/03057267.2014.945829>.
- Harrison, A. G. & Treagust, D. F. (1996). Secondary students' mental models of atoms and molecules: Implications for teaching chemistry. *Science Education*, 80(5), S. 509–534. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-237X\(199609\)80:5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(199609)80:5).
- Harrison, A. G. & Treagust, D. F. (2006). Particles and matter: Problems in learning about the submicroscopic world. In H. Fischler (Hrsg.), *Die Teilchenstruktur der Materie im Physik- und Chemieunterricht* (50, S. 53–76). Berlin: Logos-Verlag.
- Hull, M. M., Becker, M., Budimaier, F., Abe, H. & Funahashi, H. (2023). Uses for the HEC BB Bag in Physics Instruction. *The Physics Teacher*, 61(1), S. 26–30. <https://doi.org/10.1119/5.0087273>.
- Johnson, P. (2006). The development of students' understanding of the particle theory and its role in their conception of macroscopic phenomena. In H. Fischler (Hrsg.), *Die Teilchenstruktur der Materie im Physik- und Chemieunterricht* (50, S. 109–144). Berlin: Logos-Verlag.
- Jung, W. (1992). Probing Acceptance: A technique for investigating learning difficulties. In R. Duit, F. Goldberg & N. Hans (Hrsg.), *Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies. Proceedings of an international workshop held at the University of Bremen, March 4 – 8, 1991* (S. 278–295). Kiel: Institut für Pädagogik der Naturwissenschaften.

- Kuckartz, U. & Rädiker, S. (2022). *Qualitative Inhaltsanalyse: Methoden, Praxis, Computerunterstützung* (Grundlagentexte Methoden, 5. Auflage). Weinheim Basel, [Grünwald]: Beltz VerlagsgruppePreselect.media GmbH.
- Landis, J. R. & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), S. 159. <https://doi.org/10.2307/2529310>.
- Lee, O., Eichinger, D. C., Anderson, C. W., Berkheimer, G. D. & Blakeslee, T. D. (1993). Changing middle school students' conceptions of matter and molecules. *Journal of research in science teaching*, 30(3), S. 249–270. <https://doi.org/10.1002/tea.3660300304>.
- Mayer, R. E. (2009). *Multimedia Learning*. Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CB09780511811678>.
- Mikelskis-Seifert, S. & Fischler, H. (2003). Die Bedeutung des Denkens in Modellen bei der Entwicklung von Teilchenvorstellungen. Stand der Forschung und Entwurf einer Unterrichtskonzeption. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 9, S. 75–88.
- National Science Teaching Association. (2017). *Next Generation Science Standards*. Abrufbar unter: <https://static.nsta.org/ngss/AllTopic.pdf> (zuletzt geprüft am 15.10.2021).
- OECD. (2019). *PISA 2018 Science Framework*. Abrufbar unter: <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/f30da688-en.pdf?expires=1634284373&id=id&acname=guest&checksum=FF000864620CBB32753AF736D220FEE3> (zuletzt geprüft am 15.10.2021).
- Opfermann, M., Schmeck, A. & Fischer, H. E. (2017). Multiple representations in physics and science education – Why should we use them? In D. F. Treagust, R. Duit & H. E. Fischer (Hrsg.), *Multiple Representations in Physics Education* (Models and Modeling in Science Education, Bd. 10, S. 1–22). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58914-5_1.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W. & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), S. 211–227. <https://doi.org/10.1002/sci.3730660207>.
- Salzmann, C. G. & Murray, B. J. (2020). Ice goes fully cubic. *Nature Materials*, 19(6), S. 586–587. <https://doi.org/10.1038/s41563-020-0696-6>.
- Treagust, D. F., Chandrasegaran, A. L., Crowley, J., Yung, B. H. W., Cheong, I. P.-A. & Othman, J. (2010). Evaluating students' understanding of kinetic particle theory concepts relating to the states of matter, changes of state and diffusion: A cross-national study. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 8(1), S. 141–164. <https://doi.org/10.1007/s10763-009-9166-y>.
- Wiener, G. J., Schmeling, S. M. & Hopf, M. (2015). Introducing 12 year-olds to elementary particles. *Physics Education*, 52(4), S. 313–322. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aa6cfe>.

Wiesner, H. & Wodzinski, R. (1996). Akzeptanzbefragung als Methode zur Untersuchung von Lernschwierigkeiten und Lernverläufen. In R. Duit & Pädagogische Hochschule Ludwigsburg (Hrsg.), *Lernen in den Naturwissenschaften: Beiträge zu einem Workshop an der Pädagogischen Hochschule Ludwigsburg* (151, S. 250–274). Kiel: Institut für Pädagogik der Naturwissenschaften.