

Das „problematische“ Erbsen-Senfkörner-Modell

Experimente zur Volumenänderung von Mischungen
Schwierigkeiten der Elementarisierung (didaktische Reduktion)

M. Plehn

Die Volumenkontraktion einer Ethanol-Wasser-Mischung wird seit „Generationen“ über ein „Erbsen-Senfkörner-Modell“ gedeutet. Ob dieses Modell fachwissenschaftlich richtig und im Rahmen der Elementarisierung zulässig ist, soll im Folgenden geklärt werden.

Einleitung

Im chemischen Anfangsunterricht wird in der Regel zunächst auf einige Stoffe (Feststoffe, Flüssigkeiten, Gase, Metalle, Nichtmetalle usw.) und ihre Eigenschaften (z. B. Aggregatzustand, Dichte u. a.) eingegangen. Zur ersten Deutung dieser Beobachtungen lernen die Schülerinnen und Schüler eine charakteristische Arbeitsweise der Naturwissenschaften kennen: das Arbeiten mit Modellen [1–5].

Dabei muss der für Anfänger schwierige Schritt vom Kontinuum zum Diskontinuum beschränkt werden.

Als Einstiegsversuch zur Hinführung zur Diskontinuumvorstellung (vergl. viele Schulbücher, Handreichungen, Zeitschriftenartikel, Lehrpläne usw.) wird „seit Generationen“ ein „klassischer“ Lehrerversuch zur Mischung aus gleichen Teilen Ethanol abs. (50 cm³) und Wasser (50 cm³) vorgeführt² [6].

Dieses Experiment ist wohl deshalb so beliebt, weil es einfach durchzuführen ist, immer gelingt, hohe „Beweiskraft“ hat und aufgrund des Widerspruchs zwischen dem erwarteten Ergebnis (100 cm³) und der abweichenden Realität (97 cm³, **Volumenverkleinerung, Volumenkontraktion**) die Schülerinnen und Schüler zum Nachdenken motiviert („kognitiver Konflikt“).

Zur modellhaften Überprüfung werden 50 cm³ Erbsen (oder große Glasperlen) und 50 cm³ Senfkörner (oder kleine Glasperlen) in einem Messzylinder gut gemischt. Tatsächlich können nach der Mischung nur ca. 90 cm³ gemessen werden. Der Modellversuch spiegelt die Realität scheinbar gut wider: Ethanol und Wasser bestehen aus unterschiedlich großen Teilchen, die gegenseitig die „Zwischenräume“ ausfüllen. Dadurch kommt es zu einer Verkleinerung des Volumens.

Mit dieser modellhaften Deutung geben sich die meisten Unterrichtswege zufrieden. Allerdings wird auch immer wieder auf die Problematik der Deutung dieses Versuchs aufgrund unterschiedlicher Teilchengröße hingewiesen [6–10].

Elementarisierung (didaktische Reduktion)

Die Deutung des Alkohol-Wasser-Versuchs durch ein Modell aus unterschiedlich großen Teilchen stellt eine Vereinfachung dar, die als Elementarisierung, didaktische Reduktion, Transformation oder in Erweiterung als didaktische Rekonstruktion bezeichnet wird [11–25].

Didaktische Reduktion ist eine Methode, Fachinhalte unterrichtsrelevant aufzubereiten, d. h. eine komplexe Wirklichkeit zu vereinfachen, zu reduzieren, um ihre Verständlichkeit zu ermöglichen. Dabei geht es darum, das „Elementare“ (Grundlegende, Allgemeine, Einfache) herauszuarbeiten.

Bei einer Vereinfachung und modellhaften Beschreibung sollten einige Kriterien (Prinzipien) erfüllt werden:

1. Kriterium: **Angemessenheit** für die geistige (kognitive) Struktur der Schülerinnen und Schüler.
2. Kriterium: **Fachliche Richtigkeit**. Es sollte ein „Mittelweg“ gefunden werden zwischen wissenschaftlich noch haltbaren Aussagen und einer den Schülerinnen und Schülern noch angemessenen Vereinfachung. Der Sachverhalt sollte widerspruchsfrei mit dem aktuellen Wissen der Lernenden sein.
3. Kriterium: **Entwicklungsfähigkeit (Ausbaufähigkeit)**. Die Elementarisierung sollte so geführt werden, dass sie, ohne die Lernenden zum völligen Umdenken, Umlernen, Verwerfen zu zwin-

gen, auf ein höheres Niveau weiterentwickelt werden kann. Das wichtigste Kriterium für die Auswahl der Inhalte sollte sein, nur solche Beispiele und Modelle auszuwählen, die später nur verbessert oder verfeinert, nicht aber in bedeutenden Wesenszügen widerrufen werden müssen.

Maßnahmen zur didaktischen Reduktion könnten sein:

1. **Elementarisierung:** z. B. Formulieren einer Einsicht, Aufstellen eines Gesetzes, Aufstellung einer Regel, Herstellung eines realen Zusammenhanges oder einer Bedeutung, Einführung einer einfachen Erfahrung.
2. **Vernachlässigung:** (vorerst) werden Teilaspekte eines fachlichen Inhalts nicht betrachtet.
3. **Partikularisierung:** Aufgliederung in Teilaspekte und Berücksichtigung nach ihrem Komplexitätsgrad, die zu grundlegenden Erkenntnissen bzw. Gesetzmäßigkeiten führen.
4. **Generalisierung:** Verallgemeinerung eines geeigneten Einzelbeispiels.
5. **Beschränkung auf die qualitative Ebene**
6. **Vernachlässigung begrifflicher Differenzierung**
7. **Rückgriff auf historische Erkenntnisstufen**

Während sich die didaktische Reduktion darauf beschränkt, die kognitive und eventuell die psychomotorische Dimension für Lernende aufzuarbeiten, wird im Laufe des fortschreitenden Unterrichts versucht, hinsichtlich des Verständnisses und des Sinnangebotes neue oder im Wissenschaftsbetrieb nicht beachtete individuelle und soziale Relationen (affektive

Dimension) zu vermitteln. Man spricht dann von einer **didaktischen Rekonstruktion** [26–31].

Wendet man nun diese Kriterien auf obiges Modell an, so leuchtet ein, dass das 1. Kriterium (Angemessenheit) erfüllt ist. Als Maßnahme wurde die Generalisierung (s. Pkt. 4.) gewählt.

Zur Beantwortung der Frage, ob die übrigen Kriterien gelten, sollen einige reale Experimente dienen. Die Schülerinnen und Schüler lernen so die charakteristische Arbeitsweise der Naturwissenschaftler kennen.

Wenn die Überlegung richtig ist, dass es aufgrund unterschiedlicher Teilchengröße bei einer Mischung **immer** zu einer **Volumenkontraktion** kommt, so sollte dies auch für andere Fälle gelten.

Gibt man 50 cm³ Aceton und 50 cm³ Hexan (jeweils aus einer Vollpipette!) in einen Messzylinder (100 cm³), so kommt es „unerwarteterweise“ zu einer **Volumenausdehnung, Volumendilatation**: ca. 102 cm³ (Arbeitsblatt 1, Versuch 1⁴)

Gibt man 50 cm³ Ethanol abs. und 50 cm³ Essigsäureethylester (Ethylacetat, jeweils aus einer Vollpipette) in einen Messzylinder (100 cm³), so kommt es ebenfalls zu einer Volumenausdehnung: ca. 101 cm³ (Arbeitsblatt 1, Versuch 2).

1. Fazit

Obiges Modell erfüllt nicht das 2. Kriterium der Elementarisierung, d. h. die Deutung der Volumenveränderungen über die unterschiedliche Teilchengröße gilt nicht uneingeschränkt (bzw. ist fachwissenschaftlich falsch). Eine Generalisierung aufgrund eines einzigen Versuchs ist nicht zulässig.

Auch das 3. Kriterium wird nicht erfüllt. Unterschiedliche Teilchengrößen sind nicht zu „unterschiedliche Polaritäten usw.“ (vergl. u.) erweiterbar. Aus der Lernpsychologie ist bekannt und belegt, dass

das größte Lernhemmnis Prozesse sind, die Umlernen nach dem Schema „vergiss, was du bisher weißt“ erfordern.

Ob bereits die Grenzen des Modells erreicht sind, sollen weitere Experimente klären.

Zunächst soll untersucht werden, inwieweit und ob überhaupt obiges Modell auch für die Mischung von Feststoffen und Flüssigkeiten (Herstellung von Lösungen) gilt.

Aus fachwissenschaftlicher Sicht könnte man einwenden, dass Mischungen von Feststoffen/Flüssigkeiten und Mischungen von Flüssigkeiten nur bedingt miteinander vergleichbar sind und die (scheinbar einfache) Auflösung eines Feststoffes in einer Flüssigkeit sehr komplex ist (s. z. B. Solvation, Hydratation, Zerstörung von Ionengittern, Bildung verschieden großer Ionen unterschiedlicher Ladung, Komplexbildung, Hydratationsenthalpie usw.).

Aus Sicht der Schülerinnen und Schüler, die bereits unterschiedliche Aggregatzustände kennen gelernt haben und die diese Zustände bald über ein Teilchenmodell deuten sollen, wobei auch auf das „Verschwinden“ von Feststoffen in Flüssigkeiten eingegangen wird, erscheinen Lösungsversuche in diesem Kontext sehr logisch.

Zur Überprüfung sollten einige Lehrer- bzw. Schülerversuche durchgeführt werden. Bei Schülervorschlägen werden regelmäßig das Lösen von Kochsalz und Rohrzucker genannt.

Beim Lösen von 100 g Kochsalz (Dichte: 2,164 g/cm³) unter Rühren in 400 g Wasser in einem Messzylinder (500 cm³), sollte sich theoretisch ein Volumen von ca. 447 cm³ ergeben (46,2 cm³ Kochsalz + 400 g Wasser). Tatsächlich misst man nur ca. 436 cm³: Volumenkontraktion (Arbeitsblatt 1, Versuch 3)⁵.

Obiges Modell wird anscheinend bestätigt.

Löst man dagegen 100 g Ammoniumchlorid („Salmiak“, Dichte: 1,531 g/cm³) unter Rühren in 400 g Wasser in einem Messzylinder (500 cm³), so müsste sich ein Volumen von ca. 466 cm³ ergeben (66 cm³ + 400 cm³ Wasser). Tatsächlich misst man aber ein Volumen von ca. 473 cm³. Es kommt also zu einer deutlichen Volumenausdehnung von ca. 11 cm³, trotz Abkühlung (endothermer Prozess, Arbeitsblatt 1, Versuch 4).

Auch für die Lösungsvorgänge von Feststoffen und Flüssigkeiten gilt: obiges Modell erfüllt nicht das 2. und 3. Kriterium.

2. Fazit

Einige Mischungen und Lösungen zeigen Volumenkontraktion, andere Volumendilatation.

Die Deutung zur Mischung und Lösung von Stoffen (ausschließlich) über die unterschiedliche Teilchengröße ist fachwissenschaftlich falsch.

Wenn die typische naturwissenschaftliche Arbeitsweise (Deutung über ein Modell, Überprüfung an anderen Beispielen, Grenzen eines Modells, Ersatz bzw. Erweiterung des Modells usw.) verdeutlicht wird, könnte obiges „Erbsen-Senfkörner-Modell“ als 1. Einstieg dienen, müsste aber anschließend sofort „erweitert“ (korrigiert) werden.

Mögliche Deutungsvorschläge (Schülervorstellungen) zur „Auflösung der Widersprüche“ können sein:

- Bei starken Unterschieden der Teilchengröße kommt es zu einer Volumenkontraktion (kleine Teilchen passen „besser“ in die „Zwischenräume“), bei geringen Größenunterschieden kommt es zu einer Volumendilatation (Teilchen passen „schlecht“ oder gar nicht in die „Zwischenräume“).
- Teilchen ziehen sich unterschiedlich stark an⁶.

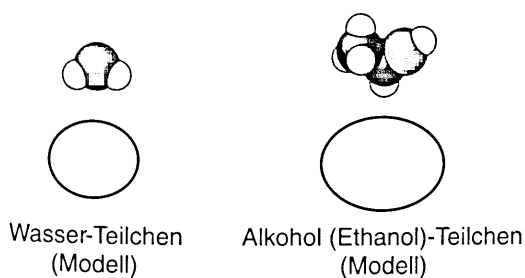


Abb. 1: Modellhafter Größenvergleich der Wasser- und Alkohol-Teilchen: Volumenkontraktion

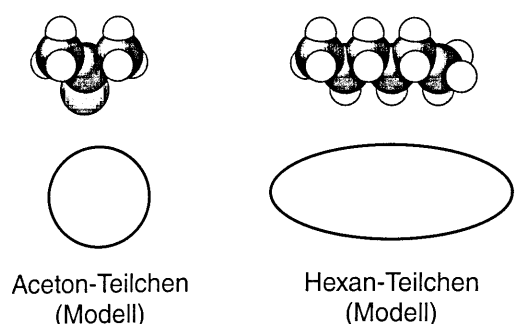


Abb. 2: Modellhafter Größenvergleich der Aceton- und Hexan-Teilchen: Volumenausdehnung (Dilatation)

Versuch 1: Mischen von Aceton und Hexan**Material**

Aceton (F, Xi, Nagellackentferner), Hexan (F, Xn, N, Benzin), Vollpipetten (50 cm³),
Pipettierhilfe (Peleusball), Messzylinder (100 cm³)

Durchführung

50 cm³ Aceton und 50 cm³ Hexan werden mit Vollpipetten in einen Messzylinder gegeben.
Das Gesamtvolumen wird abgelesen.

Beobachtung**Deutung****Aufgaben**

Lässt sich das Versuchsergebnis mit dem obigen Modell erklären?

Versuch 2: Mischen von Ethanol („Alkohol“) und Essigsäureethylester**Material**

Ethanol abs ($\omega=0,96$, F), Essigsäureethylester (F, Xi, Fruchtaroma, Klebstoff), Vollpipetten (50 cm³),
Pipettierhilfen (Peleusball), Messzylinder (100 cm³)

Durchführung

50 cm³ Ethanol und 50 cm³ Essigsäureethylester werden mit Vollpipetten in einen Messzylinder gegeben.
Das Gesamtvolumen wird abgelesen.

Beobachtung**Deutung****Aufgaben**

Lässt sich das Versuchsergebnis mit dem bisherigen Modell erklären?

Versuch 3: Auflösen von Kochsalz in Wasser**Material**

Kochsalz (Natriumchlorid), Wasser, Messzylinder (500 cm³), Waage

Durchführung

100 g Natriumchlorid werden unter Rühren in 400 cm³ Wasser in einem 500-cm³-Messzylinder gelöst.
Das Volumen wird abgelesen.

Beobachtung**Deutung****Aufgaben**

1. Informiere dich über die Dichte.
2. Berechne das theoretische Volumen der Lösung.
3. Vergleiche das theoretische mit dem tatsächlich gemessenen Volumen.
4. Wiederhole den Versuch, indem du 100 g Zucker (Rohrzucker) in 400 cm³ Wasser löst.
5. Lassen sich die Versuchsergebnisse mit dem bisherigen Modell erklären?

Versuch 4: Auflösen von Ammoniumchlorid („Salmiak“) in Wasser**Material**

Ammoniumchlorid (Xn), Wasser, Messzylinder (500 cm³), Waage

Durchführung

100 g Ammoniumchlorid werden unter Rühren in 400 cm³ Wasser in einem 500-cm³-Messzylinder gelöst.
Das Volumen wird abgelesen. Miss die Temperatur der Lösung.

Beobachtung**Deutung****Aufgaben**

1. Vergleiche die Ergebnisse der Kochsalz- und Ammoniumchlorid-Lösung.
2. Deute die starke Temperaturveränderung.
3. Entwickle ein Modell, das die unterschiedlichen („widersprechenden“) Versuchsergebnisse deuten kann.

Versuch 5: Mischen von Hexan und Wasser

Material

Hexan (F, Xn, N), Wasser, Methylenblau (Farbstoff), Messzylinder (25 cm³), Scheidetrichter

Durchführung

25 cm³ Wasser werden mit einem Tropfen Methylenblau-Lösung gefärbt und zusammen mit 25 cm³ Hexan in einem Scheidetrichter geschüttelt und nach einigen Minuten beobachtet.

Beobachtung

Deutung

Aufgaben

1. Informiere dich über den Begriff „Phase“
2. Wozu verwendet man Methylenblau?
3. Erkläre das Ergebnis mit dem „neuen“ Modell.
4. Bringe das Versuchsergebnis in Beziehung zu der Regel: „Gleiches löst sich in Gleichem, Ungleiches stößt sich ab (Polares löst sich in Polarem, Unpolares löst sich in Unpolarem)“
5. Erkläre, warum man Fettflecken nicht mit Wasser aber mit Benzin entfernen kann.

Ein Vergleich der unterschiedlichen Teilchengröße⁷ zeigt, dass der Vorschlag zu unterschiedlichen Teilchengröße verworfen werden muss (Abb. 1 und 2).

Ein weiterer Versuch (LDV oder SV) soll dies unterstreichen:

Mit Methylenblau gefärbtes Wasser (50 cm³) und 50 cm³ Hexan werden in einem Scheidetrichter gemischt (Schütteln im Scheidetrichter, Arbeitsblatt 1 Versuch 5):

Wasser und Hexan entmischen sich wieder und bilden 2 Phasen⁸.

Der Vorschlag b könnte eine Lösung der beobachteten Ergebnisse sein: die Teilchen ziehen sich aufgrund ihrer unterschiedlichen Eigenschaften (Polarität) verschieden stark an oder stoßen sich ab. Ziehen sie sich stärker an, so kommt es zu einer Volumenkontraktion, ziehen sie sich wenig an bzw. stoßen sich ab, so kommt es zu einer Volumendilatation oder zu einer Phasenbildung.

Zusammenfassung

Eine Deutung der Volumenkontraktion (Beispiel: Mischung Ethanol-Wasser) über die unterschiedliche Teilchengröße (Erbsen-Senfkörner-Modell) und eine daraus abgeleitete Generalisierung ist fachwissenschaftlich falsch und verstößt gegen Elementarisierungskriterien (Kriterium 2 und 3).

Der Ethanol-Wasser-Mischungsversuch und seine Deutung (Erbsen-Senfkörner-Modell) können als erster Einstieg dienen: Stoffe bestehen aus Teilchen. Es muss herausgearbeitet werden, dass eine Generalisierung aufgrund eines Versuchser-

gebnisses nicht zulässig ist („Mausefalten-Induktion“, Grenzen eines Modells). Der Versuch muss durch weitere Experimente überprüft werden.

Durch unterschiedliche Anziehungskräfte⁹ der Teilchen kommt es zu einer Volumenkontraktion bzw. zu einer Volumendilatation, teilweise zu einer Phasenbildung.

V Versuchsergebnisse

Versuch 1: Nach vollständiger Mischung: ca. 102 cm³ (Volumenausdehnung, Dilatation)

Versuch 2: Nach vollständiger Mischung: ca. 101 cm³ (Volumenausdehnung, Dilatation)

Versuch 3: $V = M/D$, 400 cm³ + 46,2 cm³ = 446,2; tatsächlich: 436 cm³ (Volumenkontraktion)

Versuch 4: Theoretisch: 466 cm³, tatsächlich: 473 cm³ (Volumenausdehnung)

Versuch 5: Wasser und Hexan entmischen sich, Bildung von 2 Phasen

Anmerkungen

¹ Auf die Erarbeitung der Unterschiede zwischen Modell und Realität soll hier nicht eingegangen werden.

² Dieses Experiment ist auch als Schülerversuch möglich. Aus Kostengründen verbietet sich der Einsatz absoluten Alkohols. Die Verwendung von Brennspiritus könnte aufgrund seines unangenehmen Geruchs (Zusatz von „Fuselölen“) die modellhafte Deutung (Mischung von 2 unterschiedlichen Teilchen) erschweren. Brennspiritus wird „vergällt“, d. h. dass Ethanol mit anderen Chemikalien, wie beispielsweise MEK (Methylethylketon = 2-Butanon), mit weiteren branntweinsteuerrechtlich vorgeschrieben

Markierungskomponenten, Petrolether, Cyclohexan, Phthalsäurediethylester (Diethylphthalat) oder ähnlichem versetzt wird, um es für den menschlichen Genuss unbrauchbar zu machen.

³ spätlat. dilatatio = Erweiterung

⁴ Weitere Beispiele für positive sog. Exzessvolumina (v^E , vergl. Fussnote 10) sind z. B.:

Methylcyclohexan und 2-Pentanol (maximal $v^E = +0,50$ cm³/mol bei $v = 117,98$ cm³/mol, 298 K). Dichlormethan und 2-Butanon (maximal $v^E = +0,06$ cm³/mol bei $v = 72,99$ cm³/mol, 298 K).

Weitere Beispiele: Methanol – Iso-Butanol, Ethanol-Benzol, Essigsäure-Benzol, Hexan-Benzol, Diethylether-Aceton u. a.

Weitere Beispiele für negative Exzessvolumina: N-Methyl-2-oxazolidinon und Wasser (maximal $v^E = -0,54$ cm³/mol, 298 K). Pyridin und Methanol (maximal $v^E = -0,48$ cm³/mol bei $v = 57,53$ cm³/mol, 298 K). Kohlenmonoxid und Methan (maximal $v^E = -0,35$ cm³/mol bei $v = 36,29$ cm³/mol, 90 K).

⁵ Auch beim Lösen von 100 g Zucker (Saccharose, Dichte: 1,5737 g/cm³) in 400 g Wasser ergibt sich eine Volumenkontraktion, die allerdings nicht so deutlich wie beim Kochsalz ausfällt (64 cm³ Saccharose + 400 cm³ Wasser, tatsächlich misst man ca. 462 cm³).

⁶ Magnetismus, Polaritäten sind den Schülerinnen und Schülern bereits bekannt.

⁷ Auf das sog. Kalottenmodell wird hier nicht näher eingegangen.

⁸ Die Schülerinnen und Schüler lernen hier bereits eine „Grundregel“ für Mischungs- und Lösungsvorgänge kennen: „Gleiches löst sich in Gleichem“, Polares in Polarem, Unpolares in Unpolarem, lat.: similia similibus solvuntur.

⁹ Die Teilchen (Teilchen A) einer Flüssigkeit ziehen einander aufgrund von Wechselwirkun-

gen (vgl. Van-der-Waals-Kräfte, Wasserstoffbrückenbindung) an. Diese Anziehungskräfte zwischen den Teilchen ($A \cdots A$) einer Flüssigkeit erklären den Zusammenhalt der Flüssigkeit als Ganzes. Beim Mischen mit einer Flüssigkeit B kann es zu stärkeren Anziehungskräften kommen. Das bedeutet, dass die Anziehungskräfte zwischen A und B ($A \cdots B$) stärker sind als die Anziehungskräfte zwischen $A \cdots A$ oder $B \cdots B$. Die stärkere Anziehung sorgt dafür, dass der mittlere Abstand zwischen zwei Teilchen in der Lösung sinkt. In einem bestimmten Rauminhalt können also mehr Teilchen untergebracht werden, was sich als Volumenkontraktion bemerkbar macht. Bei sehr vielen Lösungen fällt, je nach Anziehungskräften, die Volumenkontraktion sehr gering aus oder ist praktisch nicht vorhanden. Bei Abstoßungen kommt es zu einer Volumendilatation bzw. Phasenbildung. Das **Exzessvolumen** v^E ist die Differenz zwischen dem realen Volumen einer Mischung chemischer Stoffe und dem idealen Volumen, das sich aus der Summe der Reinstoffvolumina berechnen lässt.

Der Volumen-Effekt des Mischens reiner Stoffe ist relativ klein. Zumeist beträgt die Differenz nur ca. ein bis zwei Prozent.

Das Exzessvolumen kann sowohl positiv als auch negativ sein. Mischungen aus unpolaren und polaren Stoffen weisen zumeist ein deutlich positives Exzessvolumen auf, d. h. das Volumen der Mischung ist größer als das der idealen Mischung (Volumendilatation). Mischungen aus kleinen polaren Komponenten und größeren Molekülen mit einer polaren Gruppe weisen oft ein negatives Exzessvolumen auf, d. h. das Volumen ist kleiner als das der idealen Mischung (Volumenkontraktion).

Literatur

- [1] S. Mikelskis-Seifert, H. Fischler, Die Bedeutung des Denkens in Modellen bei der Entwicklung von Teilchenvorstellungen – Stand der Forschung und Entwurf einer Unterrichtskonzeption, *ZfDN* 9, 75–88 (2003)
- [2] R. Justi, J. Gilbert, Models and Modelling in Chemical Education. *Science and Technology. Education Library* 17, Sect. A, 47–68 (2003)
- [3] M. Quack, Modelle in der Chemie. *edoc-Server, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Jahrbuch* 2004, S. 202
- [4] L. Stäudel, Vom Nutzen „unähnlicher“ Modelle. *Unterricht Chemie* 100/101 (18), 28–34 (2007)
- [5] J. A. Bindernagel, I. Eilks, Modell und Modelldenken im Chemieunterricht und ein Einblick in das Verständnis von erfahrenen Chemielehrkräften. *CHEMKO* 15, Iss. 4, 181–186 (2008)
- [6] K. Petermann, J. Friedrich, M. Oelken, Schwierigkeiten auf dem Weg ins Diskontinuum, *PdN-ChiS* 58 (7), 22–30 (2009)

- [7] C. von Rhöneck, Schüleräußerungen zum Problem der Volumenverminderung beim Mischen von Spiritus und Wasser. In: *Der Physikunterricht* 1, Springer-Lehrbuch, 1982, S. 66–76
- [8] K. Kullmann, Was erklärt der Modellversuch zur Volumenkontraktion wirklich? *Chemie in der Schule* 12, 470–471 (1994)
- [9] R. Hüttner, Sind Versuche zur Volumenkontraktion geeignete Stationen auf dem Weg zu einer Teilchenvorstellung? *Chemie in der Schule* 43, 398–402 (1996)
- [10] A. Johnstone, Teaching of chemistry – logical or psychological? *Chemistry Education: Research and Practice* 1, 9–15 (2000)
- [11] G. Grüner, Die didaktische Reduktion als Kernstück der Didaktik. *Die deutsche Schule, Münster, Waxmann Verlag*, 1967
- [12] H. F. Rösler u. H. Schmidkunz, Die didaktische Reduktion. *NiU-Chemie* 34 (7), 4–8 (1996)
- [13] H. Rumpf, Zum Problem der didaktischen Vereinfachung. 1968, in [14]
- [14] J. Kahlke, F. Kath, *Didaktische Reduktion und methodische Transformation. Quellenband*, Darmstadt, Leuchtturm Verlag, 1984
- [15] F. Kath, J. Kahlke, *Das Umsetzen von Aussagen und Inhalten. Reduktion und methodische Transformation. Eine Bestandsaufnahme*. Alsbach, Bergstrasse, 1985
- [16] P. Vogel, *Didaktische Reduktion*. Halle, Meyer, 1986
- [17] G. Latzel, Chemie lehren – einfach, aber richtig. *Pädagogische Welt* 39, 482–486 (1985)
- [18] G. Hauptmeier, *Didaktische Reduktion bzw. Pädagogische Transformation*. In: F. J. Kaiser, G. Pätzold (Hrsg.): *Wörterbuch Berufs- und Wirtschaftspädagogik*. Bad Heilbrunn/Obb.: Klinkhardt, 175–178, 1999
- [19] U. Kattmann, R. Diut, H. Gropengieser, M. Komorek, Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion. *ZfDN* 3, 3–18 (1997)
- [20] E. Kircher, R. Girwidz, P. Häußler, *Physikdidaktik*. Vieweg Verlag, 2000
- [21] H. D. Barke, G. Harsch, *Chemiedidaktik Heute. Lernprozesse in Theorie und Praxis*. Springer Verlag, 2001
- [22] H. Schröder, *Didaktisches Wörterbuch*, 3. Aufl., München, Oldenbourg Verlag, 2001
- [23] P. Haupt, *Chemikalienmodelle. Mit Modellen die wichtigsten Begriffe verstehen und erlernen. Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie* 67, 13–16 (2002)
- [24] H. F. Bauer, H. J. Bader, *Elementarisierung – didaktische Reduktion – ein Kernproblem des Chemieunterrichts*. In: P. Pfeifer, B. Lutz, H. J. Bader, *Konkrete Fachdidaktik Chemie*, 3. Aufl., München, Oldenbourg Verlag, 2002, 181
- [25] M. F. Mikelskis, *Elementarisierung und didaktische Rekonstruktion*. Universität Potsdam, 2004

- [26] R. Duit, *Didaktische Rekonstruktion. PIKO-Brief*, Nr. 2, 2004
- [27] C. Höföle, *Didaktische Rekonstruktion. Inst. f. Biologie und Umweltwissenschaften. Universität Oldenburg*, 2005
- [28] P. Haupt, *Über die Elementarisierung naturwissenschaftlicher Fachinhalte für den Sachunterricht*. In P. Pfeiffer, *Sachunterricht im 21. Jahrhundert, DIZ, Oldenburg* 2007
- [29] E. Kircher, R. Girwidz, P. Häußler, *Elementarisierung und didaktische Rekonstruktion*. In: *Physikdidaktik, Springer-Lehrbuch*, 2010, 115–148
- [30] M. A. Anton, *Kompodium Chemiedidaktik*. Bad Heilbronn, Klinkhardt, 2008, 124 ff
- [31] http://daten.didaktik.uni-bayreuth.de/v_fachdidaktik/G_Didreduktion.htm: *Didaktische Reduktion*, Stand: 16. 5. 2011

Anschrift des Verfassers
Michael Plehn, Bellerbek 21, 22559 Hamburg,
E-Mail: michael-plehn@gmx.de