

Zur Überzeugungskraft von Experimenten zum Teilchenmodell

Max Hofmann, Roger Erb

Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität-Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt am Main
hofmann@physik.uni-frankfurt.de, roger.erb@physik.uni-frankfurt.de

Kurzfassung

Der Einstieg in das Teilchenmodell nimmt für Schüler und Schülerinnen als einer der ersten Berührungspunkte mit moderner Physik eine besondere Rolle ein: Einerseits markiert dieser Übergang den grundlegenden kategorialen Wechsel zwischen Mikro- und Makrowelt, welcher mit neuen Beschreibungsweisen, Begriffen und Erklärungsmustern einhergeht, die sich von alltagsbezogenen Denkweisen deutlich mehr als die der klassischen Mechanik unterscheiden. Andererseits dringen die Schüler und Schülerinnen hier unweigerlich erstmals zur Grenze der Erkennbarkeit der Welt vor. Jede Erkenntnis muss der Natur gewissermaßen zuerst „abgerungen“ werden.

Dies bedeutet für die verwendeten Experimente eine große Herausforderung: Sie sind einerseits in der Regel vergleichsweise abstrakt und erfordern meist hohen (mental und technischen) Aufwand. Andererseits ist es oft nicht möglich, deren Fragestellungen aus der direkten Erfahrungswelt der Schüler und Schülerinnen abzuleiten, sie müssen erstmalig im Unterricht problematisiert werden, um eine Beschäftigung mit den Themengebieten zu motivieren.

In der vorgestellten Studie wurde daher untersucht, wie groß die Überzeugungskraft von Experimenten zum Teilchenmodell von Studierenden eines Einführungsseminars eingeschätzt wird. Auch mögliche Faktoren wie das jeweilige Teilchenkonzept der Versuchsperson und dessen Einfluss wurden hierbei erfasst.

Der empirischen Untersuchung ging die Explizierung eines den Inhalten der Sekundarstufe I zu Grunde liegenden, impliziten Teilchenmodells, voraus. Dessen einzelne Kernaussagen wurden hierbei als notwendig zum Verständnis einfacher Schulexperimente zum Aufbau von Materie erachtet. In einem nächsten Schritt wurden mittels einer gründlichen Recherche einschlägiger Literatur einzelne Experimente zum Teilchenmodell herausgesucht, welche zusammen ein möglichst breites Spektrum der genannten Aussagen abdecken sollten. Besonderer Schwerpunkt war dabei der diskontinuierliche Aufbau von Materie.

1. Ein Teilchenmodell der Sekundarstufe I

Zum Verständnis der in der Studie zu ermittelnden Einschätzungen der Überzeugungskraft von Experimenten zum Teilchenmodell war es essentiell zu klären, um welche Art von „Teilchenmodell“ es sich hierbei handeln würde. Aus diesem Grund wurde im Vorfeld der Untersuchung ein System von Aussagen erstellt, welche zum Verständnis der einfachen Experimente notwendig sind.

1.1. Bedeutung des Begriffs „Teilchen“ im Unterrichtskontext

An die Ergebnisse einschlägiger Studien zum Teilchenmodell anknüpfend, soll ein möglichst schlanker Teilchenbegriff verwendet werden, der maßgeblich auf dem Faktum der Diskontinuität der Materie beruht. Angesichts der vielen Wandlungen, die der Teilchenbegriff historisch, aber auch im Laufe des Schulcurriculums (welches ein Stück weit die historische Entwicklung der Physik nachzeichnet) erfährt, ist es deshalb das Ziel, so wenig Annahmen wie möglich zu machen, die für ein naives, alltagsnahes Teilchenbild sprechen. Der Weg zur modernen, hauptsächlich epistemischen Verwendungsweise des

Begriffs¹ würde sonst möglicherweise erschwert, wie auch die Befunde zur Persistenz anschaulicher Atommodelle bei Schülern und Schülerinnen² bis zum Abschluss der Schullaufbahn nahelegen (LICHTFELDT, 1991). Der in folgendem Modell vorkommende Begriff „Teilchen“ verweist im Wesentlichen auf das gleiche Objekt, was man auch als „Atom“ bezeichnen würde. Letzterer Begriff wird aber bewusst vermieden, da mit ihm auch ein gewisses, möglicherweise problematisches Präkonzept verbunden ist und er weitere Implikationen, wie „Kern“, „Hülle“ usw. mit sich führt. Da diese aber in der Einführungsphase keinen wesentlichen erklärenden Beitrag liefern und zudem nicht ohne weitere elektrostatische Grundkenntnisse verstanden werden können, wäre eine Thematisierung nicht sinnvoll. Es soll mit „Teilchen“ geübt werden, nur das anzunehmen, was zur Erklärung der Phänomene notwendig ist.

1.2. Anforderungen an den Teilchenbegriff im Unterrichtskontext

¹ siehe zum modernen Teilchenbegriff insbesondere FALKENBURG (1993, 2006)

² im Folgenden auch als „Lernende“ bezeichnet

SABOROWSKI (2006) zufolge ist der Physikunterricht der Sekundarstufe I zu Teilchen hauptsächlich durch Aussagen geprägt, die der kinetischen Gastheorie/Theorie des idealen Gases entstammen. Ausgehend von sowohl Schulbüchern als auch von einschlägigen Beobachtungen zählt er folgende Eigenschaften des üblicherweise verwendeten Teilchenmodells auf:

1. „Die Teilchen besitzen eine **Kugelgestalt**. (...)
2. Die Teilchen sind **ständig in Bewegung**. (...)
3. Die Teilchen haben eine **homogene Massenverteilung**. (...)
4. Die Teilchen einer Teilchensorte haben eine **einheitliche Masse**. (...)
5. Die Teilchen einer Teilchensorte haben eine **einheitliche Größe**. (...)
6. Zwischen den Teilchen wirken **Kräfte**. (...)³“ (SABOROWSKI 2006, S. 211)

Die Hälfte dieser Aussagen (Kugelgestalt, homogene Massenverteilung, Größe) ist weder für die Theorie des idealen Gases notwendig noch gemäß dem fachwissenschaftlichen Konsens in Hinblick auf aktuelle Theorien der Quantenmechanik korrekt. Sie sind eher Ausdruck des Wunsches einer anschaulichen Darstellung und verwenden, ja bestärken sogar, makroskopische Erklärungsstrukturen bei Mikroprozessen. Problematischer Weise legten ja aber Studien zur Schülervorstellungen der Teilchen nahe, dass diese naiven und anschaulichen Bilder, wenn sie erst einmal eingeführt wurden, starke Persistenz über die ganze Schullaufbahn hinweg zeigen. Wir plädieren deshalb mit BUCK (1982) festzuhalten, dass solche Eigenschaften wie „klar definierte Form“ nicht nur in einem adäquaten Teilchenmodell der Schule unerwähnt (was schon ein Fortschritt zum aktuellen Zustand gemäß den obigen Aussagen wäre), sondern bewusst als „nicht Teil des Teilchenmodells, da nicht notwendig zu Erklärung der Phänomene“ bezeichnet werden.

Im späteren Verlauf des Curriculums kann dann, im Zuge erster Darstellungen quantenmechanischer Modelle in der Oberstufe, die Aussage nochmals aufgenommen und zu „Den Teilchen kommen die Eigenschaften konkrete Form, konkrete Größe etc. nicht zu.“ präzisiert werden. Im Unterschied zum Unterricht der Sekundarstufe I kann nun diese Aussage aber auch mit Experimenten gestützt werden, welche zuvor noch nicht verständlich waren.

Idealerweise verspricht ein erstes Teilchenmodell folglich zum einen nichts, was im späteren Schulverlauf nicht eingehalten werden kann und erklärt zum anderen doch mit seinen wenigen Annahmen alle relevanten Versuche: Den Aussagen der Theorie des idealen Gases sollte deshalb nicht unnötigerweise Anschauliches, sofern ohne Mehrwert bei der Erklärung, hinzugefügt werden.

Es fällt jedoch leider auf, dass die Erklärungen eines Großteils der gängigen Versuche weit über den Gel-

tungsbereich dieser Theorie hinausgehen: Versuche mit Flüssigkeiten, Schmelzvorgänge oder auch Versuche zum Gesetz der multiplen Proportionen erfordern ein Modell, welches auch chemische Interaktionen sowie Aggregatzustände erklären kann. Es muss deshalb über den Bezugsraum der kinetischen Gastheorie hinausgehen, indem es weitere notwendige, den Theorien zum Aufbau von Feststoffen etc. entlehnte Aussagen aufgreift. Deshalb ist es schlussendlich nicht mit einem bestimmten fachwissenschaftlichen physikalischen Modell zu verwechseln, sondern stellt den Versuch dar, die nötigen Grundaussagen verschiedener physikalischer Modelle so zusammenzutragen, dass sie ein für den Schuleinsatz möglichst erklärungsstarkes, konsistentes und sparsames Konstrukt bilden, von dem aus dann wie einem Fundament im Laufe des Lernprozesses physikalischer Inhalte im Laufe der Schule und Universität moderne Theorien aufgebaut werden können.

Das folgende Modell kann als *ein möglicher* Vorschlag eines Teilchenmodells der Sekundarstufe I verstanden werden. Die meisten in ihm aufgeführten Aussagen werden zwar in der Regel im Unterricht zu Teilchen nicht expliziert. *Dennoch ist davon auszugehen, dass sie in dieser oder ähnlicher Form implizit mitgedacht werden, um die präsentierten Versuche überhaupt verstehen zu können.*

Allgemeine Eigenschaften:

1. Jede Materie ist aus kleinsten, nicht sichtbaren Teilchen zusammengesetzt.
2. Den Teilchen kommen die Eigenschaften: „Masse“, „Geschwindigkeit“, „Ort“ sowie das „Vermögen³, andere Teilchen anziehen und abstoßen zu können“, zu⁴. Diese Eigen-

³ Der Begriff der Ladung wird explizit vermieden, da hierfür eine Thematisierung der Substruktur (Kern, Hülle) nötig wäre. Es reicht zunächst aus, zu wissen, dass die Teilchen bestimmte Abstoßungs- und Anziehungscharakteristika haben. Die Ursache (Orbitale) kann im späteren Schulverlauf verstanden werden.

⁴ Der mittlere Teilchenabstand ist zwar ebenso oftmals von Interesse, wurde aber bewusst nicht als elementare Eigenschaft aufgezählt, weil er vielmehr Resultat der genannten Eigenschaften sowie der atomaren/molekularen Substrukturen ist. Letztere sind jedoch nicht Teil dieses basalen Modells. Es wird bewusst auf den Begriff des Teilchenvolumens als „Erklärung“ für den Teilchenabstand verzichtet. Hier müsste man vielmehr vom Volumen der Einheitszelle sprechen, was jedoch im hier betrachteten Kontext zu weit führen würde. Die Gefahr der Fehlvorstellung, Atome/Moleküle würden ihre Größe je nach Randbedingungen signifikant ändern und dadurch zu den unterschiedlichen Volumina der Aggregatzustände führen, wäre insbesondere dann sehr groß.

schaften charakterisieren die Teilchen *vollständig*⁵.

- a. Es ist nicht erforderlich, eine Form der Teilchen anzugeben. Bei der anschaulichen Darstellung fällt die Wahl häufig auf Kugeln, jedoch ist diese Festlegung nicht zwingend.⁶
 - b. Es ist nicht erforderlich, eine Substruktur der Teilchen anzugeben. Es kann bei der Erklärung der Experimente davon ausgegangen werden, es läge keine vor.
 - c. Es ist nicht erforderlich zu anzunehmen, dass oder wie sich die Teilchen intern ändern.
3. Teilchen verschwinden oder entstehen nicht neu.⁷ In einem abgeschlossenen System ändert sich die Gesamtzahl der Teilchen folglich nicht.
 4. Zwischen den Teilchen ist nichts bzw. nur leerer Raum.⁸ Dieser ist um ein Vielfaches größer als die Teilchen selbst und nimmt den Großteil des Volumens ein.

Eigenschaften in Anlehnung an die Theorie des idealen Gases:

5. In einem abgeschlossenen System ist die einzige mögliche Form der Wechselwirkung das Zusammenstoßen der Teilchen des Gases untereinander oder mit der Wand des Gefäßes.
6. Diese Stöße verlaufen vollkommen elastisch.⁹
7. Die Teilchen eines Gases sind in ständiger, reibungsfreier Bewegung. Diese ist folglich gleichförmig und ändert sich nur bei Zusammenstößen.
8. In einem abgeschlossenen System ist die Gesamtenergie der Teilchen erhalten.
9. In einem abgeschlossenen System verteilen sich die Teilchen eines Gases ohne äußere Einflüsse gleichmäßig im Raum.¹⁰

⁵ Diese Feststellung ist entscheidend: Die Teilchen sind folglich auch nur im Rahmen dieser Eigenschaften individuierbar.

⁶ bzw. sogar nicht anzugeben, Teilchen verfügen nicht über die Eigenschaft „Form“ im klassischen Sinne, siehe BUCK (1982).

⁷ Effekte wie „Paarbildung“ sind im betrachteten Kontext nicht relevant. Der Kern der Aussage meint auch vielmehr das „ersatzlose“ Verschwinden oder Entstehen aus dem Nichts.

⁸ Für einen möglichen „Träger- oder „Füllstoff“ würde ebenfalls (1) gelten. Somit wären die beobachteten Teilchen gar nicht Teilchen im eigentlichen Sinne, was ein Widerspruch wäre.

⁹ Ein inelastischer Stoß würde implizit gegen Annahmen (2b, 2c) verstoßen.

¹⁰ Die Geschwindigkeiten und beteiligten mikroskopischen Abstoßungs- und Anziehungskräfte sind im Verhältnis zur Gewichtskraft so groß, dass Gravita-

10. Die Teilchen können in einem offenen System Energie aufnehmen, z.B. bei Zufuhr von Wärme: Diese führt zur Erhöhung der mittleren Geschwindigkeit der Teilchen und damit ihrer kinetischen Energie.
11. Die Temperatur eines Gases ist direkt proportional zur mittleren kinetischen Energie der Teilchen.
12. Der Druck des Gases auf die Wände des Gefäßes entsteht durch elastische Stöße der Gasteilchen mit den Teilchen der Gefäßwand.
13. In einem Gas hängt der mittlere Abstand zwischen den Teilchen, und damit das mittlere eingenommene Volumen pro Teilchen, (näherungsweise) lediglich von den Parametern Druck und Temperatur ab. Nicht jedoch von der Art des Gases.

Eigenschaften, die zur Darstellung chemischer Reaktionen, Mischungen, Lösungsvorgängen sowie Aggregatzuständen, notwendig sind:

14. Jedes „chemische Element“ besteht aus der vielfachen Anordnung eines ihm spezifischen Teilchens, bzw. ist aus einer Vielzahl dieser aufgebaut. Diese unterscheiden sich untereinander womöglich in „Geschwindigkeit“ und „Ort“, nicht aber in „Masse“¹¹ und „Anziehungs-/Abstoßungsvermögen“. Letztere tragen zur makroskopischen Verschiedenartigkeit der jeweiligen Elemente bei und sind daher element-spezifisch.
15. Ob sich zwei Teilchen anziehen oder abstoßen, hängt von ihrem Abstand zueinander ab: Die Teilchen ziehen sich zunächst an, presst man sie immer näher zusammen, so stoßen sie sich schließlich ungleich stärker ab.
16. Das abstandsspezifische Anziehungs-/Abstoßungsvermögen ermöglicht, dass sich je nach der mittleren kinetischen Energie der Teilchen verschiedene Kategorien von Strukturen bilden können. Man nennt diese Kategorien „Aggregatzustände“. Sie unterscheiden sich auch makroskopisch erheblich:
 - a. *Gas*: Lose Struktur einzelner Teilchen, zufällige und gleichförmige Bewegung. Position variabel. Großer Abstand untereinander. Auf Grund des großen Abstandes und der hohen mittleren Geschwindigkeit überwiegt die starke, aber kurzreichweitige Abstoßung.
 - b. *Flüssigkeit*: Geordnete Struktur von Gruppen einzelner Teilchen, zufällige und

tion keinen bei Kurzzeitbeobachtungen entscheidenden/auffälligen Beitrag liefert.

¹¹ ...von kleineren Unterschieden zwischen den Isotopen abgesehen. Auch hier wäre eine genauere Formulierung ohne Kenntnis von Nukleonen nicht zielführend.

- gleichförmige Bewegung. Position variabel. Kleiner Abstand untereinander. Durch die Abstoßung untereinander nehmen die Teilchen ein festes Volumen ein. Die Flüssigkeit ist dadurch (weitgehend) inkompressibel.
- c. *Festkörper*: Feste Gitterstruktur der Teilchen. Position wenig (bis auf Gitterschwingungen) variabel. Kleiner Abstand untereinander. Die Teilchen sind durch Anziehung und Abstoßung ortsfest, der Festkörper dadurch in seiner Form stabil.
17. Bei der Änderung eines Aggregatzustandes wird folglich nur die Struktur der Teilchen des Stoffes untereinander geändert.
18. Bringt man mehrere Stoffe (mit möglicherweise durchaus verschiedenen makroskopischen Eigenschaften) zusammen, so können dabei alle Eigenschaften erhalten bleiben, manche verloren gehen und sich sogar grundlegend neue Eigenschaften bilden, so dass das Endprodukt keine Ähnlichkeit mehr mit den Ausgangsstoffen haben muss. In keinem Fall ändern sich aber die Teilchen selbst, ihre Anzahl bleibt gleich. Was sich vielmehr ändern kann, ist die Struktur (ganz oder nur graduell), mit der sie geordnet sind: Ändert sich diese, so können sich auch die makroskopischen Eigenschaften ändern. Solche Endprodukte enthalten mehr als eine Teilchenart und sind daher keine Elemente, sondern entweder „Gemische“ oder „chemische Verbindungen“.
19. Chemische Verbindungen - bei ihnen ändert sich die gesamte Ordnung der Teilchen - sind *nur in ganz bestimmten Verhältnissen* möglich. Diese hängen von den jeweiligen stoffspezifischen mikroskopischen Eigenschaften der beteiligten Teilchen ab.
20. Je nach dem, ob bei diesen Wechseln der Teilchenordnungen, von einem Stoff (Wechseln der Aggregatzustände) oder zwischen mehreren Stoffen (Verbinden, Trennen, usw.), gegen oder mit den Kräften zwischen den Teilchen Arbeit verrichtet wird, erfordern (endotherm) oder liefern (exotherm) diese Neuordnungen Energie.
21. Jegliche Veränderungen (Wechsel des Aggregatzustands, Verbindung, Trennung, Vermischen mehrerer Reinstoffe, Lösen usw.) sind (prinzipiell) wieder rückgängig zu machen.¹²

¹² Hiermit ist gemeint: Da die Teilchen sich selbst nicht ändern, ist es im Prinzip auch möglich, die Konfiguration (wie auch immer) in den ursprünglichen Zustand zu versetzen. Dies bedeutet natürlich nicht, dass sich dies unter Normbedingungen einstellt. Es wird nicht einmal vorausgesetzt, dass es technisch einfach realisierbar ist. Der Begriff der thermodynamischen Reversibilität wird bewusst vermieden, um Missverständnisse zu vermeiden.

22. Die *Struktur der Teilchen untereinander* ist für die *makroskopischen Eigenschaften* des Stoffes primär. Die jeweiligen *mikroskopischen Eigenschaften* der einzelnen Teilchen haben dabei Einfluss darauf, welche Strukturen sich bilden können.

Ein Großteil der Aussagen wird notwendig, wenn über die einfachen Beobachtungen thermodynamischer Parameter von Gasen hinausgegangen wird. Es ist eine besondere Schwierigkeit der schulischen Einführung in das Teilchenmodell, dass mit einem ersten Schritt bereits ein derart komplexes Aussagensystem gebildet werden muss, um überhaupt die wesentlichen Phänomene konsistent erklären zu können. Es scheint demnach keinen „abgespeckten Einstieg“ zu geben, der nur wenige der Aussagen nutzt und stetig weiter ausgebaut werden kann. Es handelt sich eher um ein „alles oder nichts Prinzip“: Entweder man versteht alle Aussagen gemeinsam, oder man hat nicht verstanden, was „Teilchen als Aufbaustein der Materie“ bedeutet.

Wie bemerkt: Es mag unsinnig sein, diese Aussagen in der gymnasialen Mittelstufe einzeln „abzuarbeiten“. Ich möchte aber problematisieren, dass man *eigentlich* von den Schülern und Schülerinnen implizit erwartet, dass sie ein ähnliches Konstrukt im Laufe der Einführung zum Teilchenmodell ausbilden – und nicht etwa die wenigen zentralen Aspekte schlicht auswendig lernen. Es zeichnet sich also ab, wie schwierig dieser Denkprozess für den Einzelnen tatsächlich ist und, dass er, obwohl die Mehrheit der Schüler und Schülerinnen bereits (dank weitgehender Verbreitung in Medien etc.) mit einem zumindest naiven Verständnis von Teilchen/Atomen in die Schule kommen¹³, mit ausreichend Relevanz und Zeit im Physikunterricht unterstützt werden muss.

Aus diesem Grund braucht es auch zur Begriffsbildung eine Vielzahl von Experimenten, um möglichst alle Aussagen abdecken zu können. Wie im kommenden Kapitel 2 zu sehen sein wird, decken die Versuche jeweils einige der 22 Aussagen ab, teils aus unterschiedlichen Perspektiven.

2. Gewählte Schulversuche zum Teilchenmodell

Es wurde im Vorfeld der Befragung eine größtenteils auf einschlägiger Literatur basierende ausführliche Sammlung möglicher Versuche zum Teilchenmodell erstellt. Die hierin enthaltenen 39 Versuche wurden neben der Beschreibung der jeweils benötigten Materialien und den zu sehenden Phäno-

¹³ Die vorherige Bekanntschaft mit teilchenartigen Materiekonzepten vermag sogar eine zusätzliche Schwierigkeit zu sein, da erst problematisiert werden muss, warum diese möglicherweise zu einfach sind. Die Gefahr in Hinblick auf den Eindruck, *man habe ja nichts gelernt, was man nicht schon vorher wusste*, ist groß.

mena zunächst unter folgenden Gesichtspunkten bewertet:

- *Voraussetzungen*

Es wird untersucht, wie viele Annahmen und Vorkenntnisse nötig sind, um das Experiment zu verstehen.

- *Konsistenz und Plausibilität*

Hierbei wird überprüft, wie schlüssig und konsistent der Versuch zeigen kann, was er soll. Es wäre zu erwarten, dass Kriterien für die Überzeugungskraft des Versuchs wesentlich sind.

- *Probleme/Schwierigkeiten*

Diese Kategorie kann, auch bei sonst guten Resultaten, ein Ausschlusskriterium sein, wenn z.B. die Wahrscheinlichkeit, dass die Argumentation falsch verstanden wird, oder Fehlvorstellungen angelegt/verstärkt werden könnten, sehr hoch ist.

Die 39 Versuche ließen sich in folgende 6 Themenkomplexe einteilen, wobei aus jedem diejenigen ausgewählt wurden, welche nach den obigen Kriterien am geeignetsten schienen. Insgesamt 10 wurden für die Befragung ausgewählt:

Erster Themenkomplex: *Teilchen „sehen“, Darstellungsmethoden der modernen Physik*

- *Feldemissionsmikroskop:*

In einem evakuierten Glaskolben werden von einer monokristallinen Nadelspitze (Kathode) durch eine angelegte Spannungsdifferenz Elektronen der Spitze zur leitend beschichteten, fluoreszierenden Innenseite (Anode) des Glaskolbens beschleunigt. Durch das radialsymmetrische Feld und das große Verhältnis beider Krümmungsradien (Spitze zu Kolbenwand) wird eine Auflösung der Elektronenverteilung Nadelspitze auf dem Leuchtschirm im atomaren Bereich möglich. Generell sind Versuche, die die direkte Wahrnehmung (im Sinne von „Sehen“) von Teilchen auf atomarer Größenordnung suggerieren relativ problematisch, da die „Andersartigkeit“ (REHM 2009) der Mikrowelt schnell verkannt werden kann. Im Gegensatz zu anderen Verfahren zum „Sichtbarmachen“ von Teilchen ist aber hier der Entstehungsprozess des Bildes verhältnismäßig einfach (analog!). Für Aufnahmen z.B. eines RTM gilt dies ausdrücklich nicht, weshalb z.B. gegen dieses entschieden wurde. Andere Verfahren wie Röntgenbeugung, aber auch Rutherford-Streuung oder Nebelkammeraufnahmen wurden nicht ausgewählt, weil diese zu voraussetzungsreich sind und nicht zum einfachen Kontext der Einführung passen. Szintillationen einzelner Teilchen auf einem Silberjodit-Schirm, wie sie einst WAGENSCHNEIN und BUCK (1984) vorgeschlagen hatten, wären auch denkbar, bergen aber unter anderem das Risiko, Teilchen in der Größe der Lichtflecken anzunehmen.

Zweiter Themenkomplex: *Versuche in Anlehnung zu Aussagen der Theorie des idealen Gases*

- ***Rauchteilchen: Brownsche Molekularbewegung***

(nach LANGENSIEPEN 1998)

In einen kleinen Würfel mit Glasseiten (Rauchkammer) wird Raumluf mit Rauchpartikeln eingebracht, etwa Zigarettenpapier-Rauch. Diese Partikel können dann, beobachtbar durch das Streulicht eines Lasers, unter dem Mikroskop beobachtet werden: Ihre Bewegung lässt auf mikroskopische, nicht sichtbare Stoßpartner schließen.

Auch andere Varianten, wie Brownsche Molekularbewegung anhand von Fett-Tröpfchen im Wasser sind möglich. Praktische Gründe waren hier entscheidungsgebend. Die weitere Flüssigkeits-Variante der Betrachtung der Teilchenbewegung in Abhängigkeit der Temperatur (in Anlehnung an Einsteins Deutung der Brownschen Molekularbewegung), etwa bei LANGENSIEPEN (1986) wurde verworfen, weil die korrekte Deutung durch den erheblichen Einfluss der mit steigender Temperatur sinkenden Viskosität der Flüssigkeit sehr kompliziert wird.

- ***Diffusion von Wasser und Farbstoff***

(nach FISCHLER & ROTHENHAGEN 1997)

Etwas Farbstoff in Pulverform wird, unter größtmöglicher Vermeidung von Konvektion, in einen Becher mit Wasser gegeben. Es bildet sich nach Auflösung des Pulvers am Bechergrund eine zunächst diskrete Grenzschicht Wasser - farbiges Wasser. Diese Grenzschicht weicht nach einigen Stunden langsam auf. Das Wasser ist nach einigen Wochen gleichmäßig farbig. Hiermit soll die Brownsche-Molekularbewegung veranschaulicht werden, da sie als ursächlich für die Vermischung angenommen wird.

Die einfache Variante des Verteilens eines Duftes im Raum wurde nicht ausgewählt, weil in diesem Zusammenhang Konvektionsströme den relevanten Beitrag liefern. Alle anderen Versuche zur Diffusion wie Kaliumpermanganat und Wasser wären jedoch ebenso geeignet. Die Vermischung von Bromdampf und Luft wäre etwas komplizierter, brächte aber keinen nennenswerten Mehrwert.

- ***Kirsche zerplatzt im Wasser,***

(ebd.)

Kirschen platzen nach einigen Stunden in reinem Wasser von Innen auf. Hieraus wird geschlossen, dass es sich bei der Kirschhaut um eine semi-permeable-Membran handelt. Letztere erfordert aber ein diskontinuierliches Teilchenkonzept.

- ***Ei schwimmt im Salzwasser***

(nach HARRISON & TREAGUST 2006)

Ein Ei schwimmt in Salz Lösung, welches zuvor in reinem Wasser unterging. Die Dichtezunahme der Lösung, welche heraus geschlossen werden kann, legt nahe, dass es freien Raum zwischen unsichtbaren Wasserteilchen geben muss, welcher von den im

Salz enthaltenen Teilchen in irgendeiner Form eingenommen werden kann.

Beide Versuche, Kirsche und Ei, nehmen eine Sonderrolle in diesem Themenkomplex ein, da sie hauptsächlich dafür verwendet werden sollen zu zeigen, dass zwischen den Teilchen leerer Raum ist (Aussage 4). Sie wurden deshalb ausgewählt, weil gerade diese Aussage wesentlich für ein diskontinuierliches Teilchenbild wäre und mit weit verbreiteten Hybrid-Konzepten kaum vereinbar ist. Nichtsdestotrotz sind beide Versuche problematisch und verhältnismäßig wenig überzeugend. Das gilt in besonderem Maße für den Versuch „Ei schwimmt im Salzwasser“. HARRISON & TREAGUST (2006) schlagen diesen als einen von mehreren Versuchen zum Teilchenmodell vor, weshalb er in diese Auswahl aufgenommen wurde. Es ist aber nach näherer Analyse zu befürchten, dass er ähnliche Probleme bei der Argumentation aufweist wie etwa Mischungsversuche von Ethanol und Wasser¹⁴.

Dritter Themenkomplex: Chemische Verbindungen, chemische Reaktionen

- **Konstante Proportionen: Gasvolumina**

(nach FISCHLER & ROTHENHAGEN 1997)

Bei der Verbindung von Gasen, etwa z.B. Sauerstoff und Wasserstoff zu Wasser, tritt stets ein festes Volumeverhältnis (hier 2:1) der Ausgangsstoffe auf. Es spiegelt die molekulare Zusammensetzung des Wassers wider.

Dieser Versuch gehört, nicht nur auf Grund seiner historischen Relevanz, zu den Empfehlenswerten, da er kaum das Potential hat, Fehlvorstellungen zu erzeugen und in der Interpretation recht eindeutig ist.

Andere Versuche zum Feld der konstanten/multiplen Proportionen wie Massenverhältnisse der reagierenden Substanzen sind ebenso möglich, jedoch etwas zeitaufwändiger auf Grund der langen Erhitzungsdauer bis zur Reaktionstemperatur.

Vierter Themenkomplex: Teilchenstrukturen

¹⁴ Es kann zu Fehlvorstellungen bei Mischungs-/Lösungsphänomenen kommen: In der Tat verbinden sich ja die Na- und Cl-Ionen ja mit den Wassermolekülen. Deshalb ist das NaCl auch nicht anschließend aus der Lösung herauszufiltern.

Die naheliegende Analogie der Mischung von z.B. Erbsen und Senfkörnern ist daher nicht zutreffend: Wasser- und Salzteilchen können nicht die jeweiligen Kügelchen sein, da beim Mischungsvorgang ja ihre eigene Struktur geändert wird: Die Erbsen und Senfkörner zerteilen sich sozusagen und fügen sich in platzsparender Weise wieder zu gemischten Teilchen zusammen.

Es sollte deshalb *nicht* vermittelt werden, dass die „Teilchen“ hier Salz oder Wasserteilchen sind, sondern vielmehr, dass Wasser und Salz *aus Gruppen ebendieser Teilchen* aufgebaut ist.

- **Wechsel des Aggregatzustandes mit Energie- bzw. Temperaturbilanz**

(nach LANGENSIEPEN 1986)

Beim Wechsel eines Aggregatzustandes, etwa dem Schmelzen von Fixersalz, ist ein Abflachen der Temperaturkurve des schmelzenden Präparates im Vergleich zu der des Wasserbades zu erkennen. Dies wird mit der Energieaufnahme während des Schmelzvorganges, welcher als Arbeit gegen die Bindungskräfte der Teilchen verstanden wird, gedeutet: Während das Präparat schmilzt, wird die zugeführte Energie für ebendiese Arbeit und nicht für die Erhöhung der Temperatur genutzt.

und

- **Ölfleckversuch**

(nach WILKE 1997)

Einzelne Tropfen Ölsäure-Benzin-Gemisch werden auf eine Wasseroberfläche gegeben. Zwar kann, nach Verdampfen der Ölsäure, auch unter Annahme der Monomolekularität der Ölschicht mittels des Radius des Ölflecks an der Wasseroberfläche das „Volumen“ eines Ölmoleküls genähert werden - entscheidender ist hierbei jedoch bereits der Befund, dass der Ölfleck nicht beliebig dünn werden kann, was für einen diskontinuierlichen Materieaufbau spricht.

Beide Versuche sind etwas aufwändiger in der Auswertung als die Restlichen, haben aber, auch wegen des abstrakten Argumentationsverlaufs, nur eine geringe Wahrscheinlichkeit kontinuierliche oder makroskopische Teilchenkonzepte zu festigen.

Fünfter Themenkomplex: Kristallbildung und -Lösung

- **Bilden und Lösen von Kristallen mit Wasser und Salz**

Salz wird in kristalliner Form (zuvor gewonnen durch langsame Verdunstung von Salz-Lösung) in Wasser gelöst. Anschließend wird gewartet, bis das Wasser verdunstet und sich erneut Salz Kristalle bilden. Es ist zu erkennen, dass die Kristalle dieselbe Würfelform aufweisen wie zu Anfang, obwohl sie diese beim Lösungsvorgang vollständig verloren hatten.

In Rückbezug auf die Arbeit PFUNDTs (1981) wurden gezielt Versuche, die den konstruierenden Charakter der Teilchen (Teilchen als erste Aufbausteine) bekräftigen, ausgewählt. Die Wahl von Salz und Wasser ist hierbei beliebig und hatte primär praktische Gründe.

Versuche, die Teilchen als Überrest eines immer feiner werdenden Zermahlungsvorganges (Mörser oder auch Zerstäuber) darstellen, wurden in Anbetracht der bekannten Probleme explizit ausgelassen.

Sechster Themenkomplex: Mikroskopische und makroskopische Eigenschaften

- **Elektrolyse und Knallgasreaktion**

Bei der Elektrolyse von Wasser entstehen zwei Gase (Wasserstoff und Sauerstoff), welche in ihren makroskopischen Eigenschaften keine Ähnlichkeit zur Wasser mehr haben. Dennoch ist aus diesen wieder, ohne zusätzliche Stoffe, im Zuge der Knallgasreaktion Wasser zu erhalten. Wie beim vorhergehenden Kristallbildungsexperiment soll hier gezeigt werden, dass Teilchen nicht Träger makroskopischer Eigenschaften sind, sondern letztere vielmehr durch die Struktur der Teilchen konstituiert werden. Die Struktur letztlich hängt von den mikroskopischen Eigenschaften wie „Abstoßungs/Anziehungs-Vermögen“ ab (vgl. 18. im eingangs dargestellten Teilchenmodell).

Ebenso unter anderem von PFUNDT (1981) und BUCK (1991) ausgehend, dient dieses Experiment dazu zu zeigen, dass makroskopische Eigenschaften wie Farbe, Festigkeit usw. Mikroobjekten *nicht* zukommen. Es wird also ganz gezielt die Vorstellung, Teilchen seien kleinste Ebenbilder der makroskopischen Stoffe, adressiert und zu problematisieren versucht.

Hierbei gibt es auch zahlreiche andere Varianten, z.B. Kupferoxid zu Kupfer und Sauerstoff, sind ebenso denkbar.

Im Folgenden werden die ausgewählten 10 Versuche oftmals der Einfachheit halber nicht mit ihrem vollständigen Titel, sondern mit Abkürzungen wie „Elektrolyse“ statt „Elektrolyse und Knallgasreaktion“, bezeichnet. Im Verlauf des vorliegenden Beitrags werden nun keine weiteren Versuche zum Teilchenmodell mehr betrachtet, alle Abkürzungen beziehen sich also immer auf die genannten 10 Versuche.

3. Zielsetzung und Design der Befragung

3.1. Zielsetzung

In Hinblick auf die eingangs geschilderten, vielfältigen Herausforderungen, die eine schulische Einführung zum Teilchenbild mit sich führt, war es, wie anfangs beschrieben, Zielsetzung der Befragung, eine erste Vorstellung davon zu bekommen, wie und ob sich die zahlreichen Herausforderungen auf das Einschätzungsverhalten zur Überzeugungskraft der Versuche zum Teilchenmodell auswirken. Dies dürfte möglicherweise auch von der befragten Zielgruppe abhängen, weshalb sich weitere Studien mit Schülern und Schülerinnen verschiedener Jahrgangsstufen sowie Experten (im Sinne von ausgebildeten Lehrern, Doktoranden und Professoren) anbieten würden.

In dieser ersten Erhebung wurden Studierende gewählt, welche als Teilnehmer und Teilnehmerinnen eines Einführungsseminars zum großen Teil aus Studienanfängern bestanden. Diese Gruppe bot sich an, da einerseits einige kürzlich noch zur Schule gingen und zum anderen schon über ausreichend Hintergrundwissen und Kompetenzen verfügten, um möglicherweise auch kritisch die Wirkung des Expe-

rimentes auf andere Schüler (der Sekundarstufe I) zu reflektieren.

Ein weiterer Vorteil dieser Stichprobe war sicherlich, dass die Anleitungen und Fragebögen sehr direkt und transparent verfasst sein konnten - es bestand nicht etwa die Notwendigkeit, die Einschätzung der Überzeugungskraft in Interviewform indirekt zu erheben. Auch war die Hoffnung, dass die Gruppe weniger sozial antworten würde, als es von Schülern der Sek. I unter Umständen zu erwarten gewesen wäre.

Um die Skalenwerte der eingeschätzten Überzeugungskraft (sie wurden, wie der Großteil der anderen Daten, im single-choice-Format erhoben) in Bezug zu setzen, wurde neben den Versuchen zum Teilchenmodell auch eines der klassischen Mechanik (freier Fall in Vakuumröhre) vorgeführt und „geratet“. Die Idee war dabei, dass dieses intuitiv verständliche und direkt sichtbare Phänomen sehr überzeugend eingeschätzt wird (also den oberen Wert der Überzeugungskraft-Skala definiert). Die anderen Bewertungen könnten dann ausgehend hiervon in Relation gesetzt werden.

Die *zentralen* Fragen, welche Grund zur Erhebung gaben, sind etwa die folgenden:

1. Wie überzeugend werden die ausgewählten Versuche zum Teilchenmodell generell (im Vergleich zum sehr anschaulichen und konkreten Versuch zum freien Fall) eingeschätzt?
2. Unterscheidet sich die mittlere Überzeugungskraft der Teilchen-Versuche untereinander?
3. Unterscheidet sich diese Einschätzung bzgl. der angenommenen Zielgruppe, gibt es folglich Differenzen der Einschätzungen der prinzipiellen Überzeugungskraft und der auf Schüler und Schülerinnen?
4. Unterscheidet sich die Einschätzung der Überzeugungskraft in Abhängigkeit von experimentunabhängigen Faktoren, wie dem jeweiligen Teilchenbild des Bewertenden?
5. Wie reflektiert werden die Experimente bewertet? Werden z.B. didaktische Probleme und Inkonsistenzen erkannt?

3.2. Design der Befragung

- Jedem Studierenden wurden insgesamt fünf Schulexperimente präsentiert, davon vier zum Teilchenmodell und eines zur klassischen Mechanik.
- Drei der Experimente wurden in Kleingruppen mit Hilfestellung absolviert, zwei weitere im Plenum.
- Zu jedem Versuch wurde im Vorfeld eine Anleitung (ca. 2-4 Seiten) ausgehändigt.
- Zu Beginn der Sitzung wurden mittels offenen und geschlossenen Items die zu Grunde liegenden Teilchenbilder erhoben: Als „einfache“ Teilchenbilder gelten dabei naive, anschauliche

Teilchenvorstellungen (Kugeln o.Ä.), „komplex“ dagegen solche, die korrekt Grundaussagen der Quantenmechanik nutzten (Orbitale als Wahrscheinlichkeitsdichten, Status des Messprozesses etc.). „Durchschnittlich“ wurden Teilchenvorstellungen genannt, die zwar fachliche Mängel aufwiesen, jedoch in ihrer Modellhaftigkeit erkannt wurden. (siehe Abb.1)

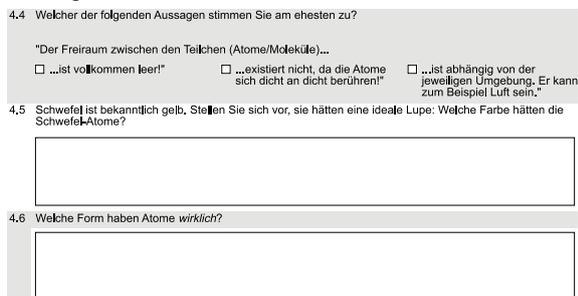


Abb.1: Beispielitems zur Erhebung des Teilchenbilds

- Nach jedem Versuch wurden zudem direkt die jeweiligen spezifischen Einschätzungen zur Überzeugungskraft abgefragt.
- Die Erhebung der Überzeugungskraft erfolgte mittels geschlossener Fragen. (5-stufige Likert-Skala, siehe Abb.2)

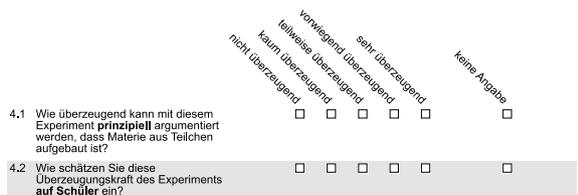


Abb.2: Item zur Erhebung der Überzeugungskraft

4. Ausgewählte Ergebnisse der Befragung

4.1. Zusammensetzung der Stichprobe nach Teilchenbild (Abb.3)

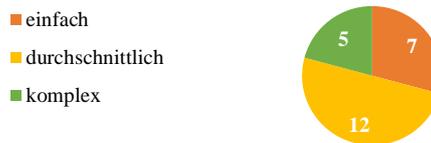


Abb.3: Verteilung der Teilchenbilder der Probanden

Das Antwortverhalten der Probanden legt nahe, dass in der Stichprobe überwiegend naiv-mechanistische, makroskopisch geprägte Teilchenbilder (etwa anschauliches Bohr-Modell als Darstellung der Realität) vorliegen.

4.2. Die eingeschätzte Überzeugungskraft der Experimente im Überblick (Abb.4)

- Die Differenz zwischen den Themenbereichen Mechanik und Teilchenmodell ist kleiner als erwartet, insbesondere kleiner als die Differenzen der Experimente zum Teilchenmodell untereinander.
- Die Differenz zwischen der Einschätzung der prinzipiellen Überzeugungskraft und derjenigen auf Lernende variiert kaum (Mittelwert der Differenz der jeweiligen Mittelwerte: $m_w=0,56$).
- Insbesondere ist diese Differenz durchweg positiv – die Probanden gingen folglich davon aus, dass kein Experiment überzeugender auf Lernende wirkte, als es aus fachlicher Sicht *eigentlich* gewesen wäre.
- Didaktisch eher empfehlenswerte Experimente (z.B. Wasser und Salz) sind im Allgemeinen nicht besser, werden sogar teils als weniger überzeugend angesehen als solche, welche naive Betrachtungsweisen fördern können (Rauchteilchen).

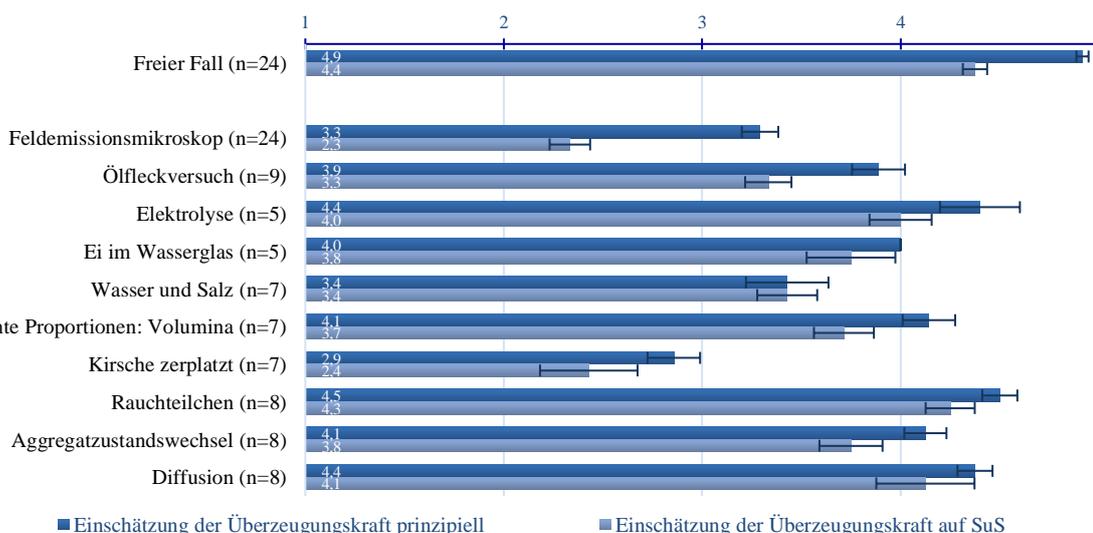


Abb.4: Durchschnittliche Einschätzungen der Überzeugungskraft

4.3. Die eingeschätzte Überzeugungskraft in Abhängigkeit des Teilchenbildes (Abb.5)

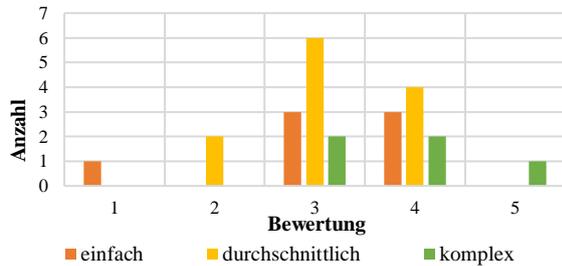


Abb.5: Feldemission - prinzipielle Überzeugungskraft

- Je nach Grad der Komplexität des zu Grunde liegenden persönlichen Teilchenmodells wird Überzeugungskraft tendenziell höher eingeschätzt. ($F=.609$, $p=.554$, $\eta_{part.}^2=.055$, $n=24$)
- Überzeugungskraft auf Lernende fällt, gegenüber der prinzipiellen Überzeugungskraft, auch innerhalb der Teilchenbild-Gruppen ab.

4.4. Eingeschätzte Überzeugungskraft bezüglich der Teilaussagen des Experiments (Abb.6)

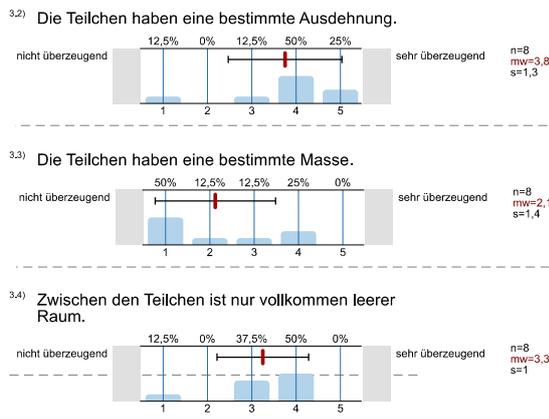


Abb.6: Rauchteilchen - Einschätzung der Überzeugungskraft von Teilaussagen

- Kontrollfrage 3.2 (*Ausdehnung* nicht für die konsistente Erklärung des Phänomens relevant, bzw. sogar im Rahmen der Theorie des idealen Gases *explizit ausgeschlossen*) wurde höher bewertet als 3.3 (*Masse*, hier *notwendig für Impulsübertrag*).
- Allgemein zeigte sich eine verhältnismäßig geringe Zustimmung bei den zur Erklärung des Versuchs essentiellen Grundannahmen (z.B. 3.4).

4.5. Verständnisfragen zu den betrachteten Phänomenen (Abb.7)

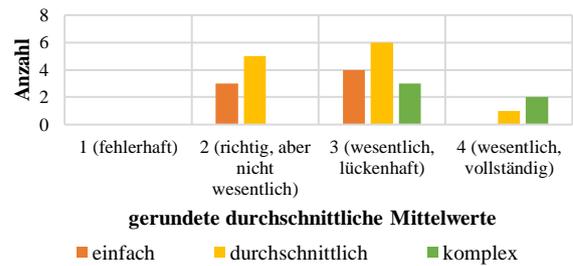


Abb.7: Mittleres Beantwortungsniveau der Verständnisfragen

- Die Argumentationsstruktur der Erklärungen zu den betrachteten Phänomenen wird in vielen Fällen nicht adäquat wiedergegeben ($mw=2,7$).

4.6. Unterschied von Experimenten zu Mikro- und Makrophänomenen (Abb.8)

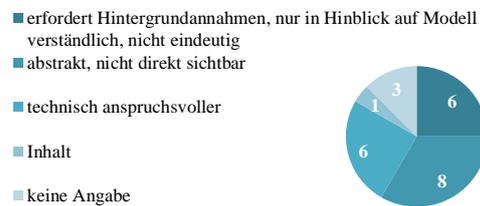


Abb.8: Vermuteter Unterschied zwischen Experimenten zu Mikro- und Makrophänomenen

- Mindestens ein Drittel der Probanden sieht keinen prinzipiellen Unterschied zwischen Experimenten der Mechanik und denen zum Teilchenmodell.

5. Fazit

Die Studie kann als erstes Vortasten in die Thematik verstanden werden und vermag, auf Grund ihrer explorativen Konzeption, zunächst nur Hinweise für weitere Untersuchungen zu geben. Diese sind im Folgenden kurz zusammengefasst:

Insgesamt spricht das Antwortverhalten, einer Einführungsveranstaltung gemäß, dafür, dass die Stichprobe eher als „noch-Schüler“ denn „schon-Lehrer“ angesehen werden kann und damit eventuell Rückschlüsse auf mögliche Resultate in der Schule erlaubt. Die Gruppe verfügt, im Einklang mit einschlägigen Forschungsergebnissen, zu großem Anteil über ein noch stark von makroskopischen Vorstellungen geprägtes Teilchenmodell. Dementsprechend wird auch der grundlegende Wechsel zwischen Makro- und Mikrowelt eher unterschätzt, bzw. nicht wahrgenommen. Letzteres mag erklären, weshalb die Differenzen zwischen den Themenbereichen Mechanik und Teilchenmodell kleiner als erwartet ausfielen.

Bemerkenswert ist die Tatsache, dass obwohl die Argumentationsstruktur der Erklärungen in vielen Fällen nicht adäquat wiedergegeben werden konnte, sich dies nicht in der Einschätzung ihrer Überzeugungskraft niederschlug. Auch wurden bei den für

die Argumentation als wesentlich erachteten Grundaussagen eher jene bevorzugt, welche den schon bestehenden Vorstellungen entsprachen, statt solchen, welche de facto Teil der konsistenten Deutung wären.¹⁵

Es scheint, als wären die Experimente trotz der angebotenen ausführlichen und konsistenten Erklärungen auf den Handouts, nicht in der Lage, das persönliche Teilchenkonzept zu problematisieren: Als überzeugend wird eingeschätzt, was schon zuvor vermutet wird. Ohne dieses Umdenken leisten die Experimente jedoch nur eine Bestärkung des vorliegenden Konzepts, oder werden als nicht überzeugend abgelehnt.

Die eingangs dargestellten Überlegungen zum Teilchenbegriff der Sekundarstufe I zeigten, mit welcher großen Schwierigkeiten für die Lernenden dieser Einstieg in die Mikrophysik verbunden ist. Sollen aber bei dieser Unterrichtseinheit nicht bloß vorliegende naive Alltagsvorstellungen zur Mikrophysik bestärkt werden, so müssen die verwendeten Versuche, sofern ihre Funktion im Unterricht über einen unterhaltenden, auflockernden Charakter hinausgehen soll, das Potential besitzen, einen Begriffswechsel in diesem Bereich zu induzieren. Die Anforderungen an ein Experiment zum Teilchenmodell sind also einerseits hoch, andererseits ist seine Anschaulichkeit/Direktheit dagegen qua dargestellter Mikrophysik gering.

Die Studienergebnisse werfen daher die weiter zu verfolgende Frage auf, welche Faktoren, neben denen einer fachlich schlüssigen Deutung, im Allgemeinen zur Überzeugungskraft eines Experimentes beitragen. Hierbei können Experimente zur Mikrophysik als geradezu paradigmatische Beispiele für prinzipielle Überzeugungswechsel-Prozesse bei schwieriger/indirekter Informationslage angesehen werden.

6. Literatur

- Buck, Peter (1982): *Ist ‚Volumen‘ eine Eigenschaft von Molekülen, Atomen und Elementarteilchen?* in: *Chimica Didactica* 8, S. 43-58
- Buck, Peter (1991): *Die Farbe des Goldes.* in: *Chimica Didactica* 17, S. 58-65
- Falkenburg, Brigitte (1993): *Was ist ein Teilchen? Bedeutungen eines fundamentalen physikalischen Konzepts.* in: *Physikalische Blätter* 49, S. 403-408
- Falkenburg, Brigitte (2006): *Metamorphosen des Teilchenkonzepts.* in: Fischler & Reiners: *Die Teilchenstruktur der Materien im Physik- und Chemieunterricht.* Berlin: Logos, S. 29-49
- Fischler, Helmut & Rothenhagen, Andreas (1997): *Experimente zum Teilchenmodell.* in: *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik*, 8 (45), S. 27-34
- Harisson, Allan & Treagust, David (2006): *Particles and matter: Problems in learning about the submicroscopic world.* in: Fischler & Reiners: *Die Teilchenstruktur der Materien im Physik- und Chemieunterricht.* Berlin: Logos, S. 53-75
- Langensiepen, Fritz [Hrsg.]; Götz, Rainer; Dahnke, Helmut (1986): *Handbuch des Physikunterrichts. Sekundarbereich 1. Band 3.* Köln: Aulis
- Langensiepen, Fritz [Hrsg.]; Götz, Rainer; Dahnke, Helmut (1998): *Handbuch des Physikunterrichts. Sekundarbereich 1. Band 8.* Köln: Aulis
- Lichtfeldt, Michael (1991): *Schülervorstellungen in der Quantenphysik und ihre möglichen Veränderungen durch den Unterricht.* Essen: Westarp
- Pfundt, Helga (1981): *Das Atom – letztes Teilungsstück oder erster Aufbaustein?* in: *chimica didactica* 7, 1981, S. 75-94
- Pfundt, Helga (1982): *Untersuchung zu den Vorstellungen, die Schüler vom Aufbau von Atomen entwickeln.* in: *Der Physikunterricht* 16, S. 51-65
- Rehm, Markus (2009): *Der Sprung zu den Atomen.* in: *Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie.* 20/114, S. 5-8
- Saborowski, Jörg (2006): *Unanschauliche Teilchen – anschaulich!?* in: Fischler & Reiners: *Die Teilchenstruktur der Materien im Physik- und Chemieunterricht.* Berlin: Logos S. 199-219
- Wagenschein, Martin & Buck, Peter (1984): *Demokrit auf dem Zeugenstand.* in: *Chimica Didactica* 10, S. 3 ff.
- Wilke, Hans-Joachim (1997): *Physikalische Schulerperimente, Band 1: Mechanik/Thermodynamik.* Berlin: Volk und Wissen

¹⁵ Eine nachfolgende Untersuchung an 14 Studenten höherer Semester, überwiegend des Lehramts L2, zeigte hierbei ähnliche Befunde.