

Zwischen Wissenschaftstheorie und Didaktik der Chemie: Die Genese von Stoffbegriffen*

Joachim Schummer

Zusammenfassung

Nach einer Verdeutlichung der engen Verwandtschaft von wissenschaftstheoretischen und fachdidaktischen Aufgaben wird aus erkenntnis- und wissenschaftstheoretischer Perspektive eine Untersuchung der stofflichen Erkenntnis, Begriffsbildung und -entwicklung vorgenommen. Ausgehend von einem Modell der experimentellen Stofferkennung werden die logische Struktur von Stoffbegriffen und Wege zur wissenschaftlichen Präzisierung alltäglicher Stoffbegriffe aufgezeigt, eine Systematik wissenschaftlicher Stoffeigenschaften nach Untersuchungskontexten entwickelt, der dynamische und relationale Charakter von stofflichen und insbesondere chemischen Eigenschaften in Abgrenzung zur substantialistischen Denkweise herausgearbeitet, die besondere Bedeutung von operationalen Begriffen in der Chemie zur Stoffordnung, Begriffspräzisierung und -vermittlung herausgehoben und scheinbare Differenzen zwischen einer physikalischen und chemischen Stoffklassifikation aufgelöst. Die Ergebnisse werden zusammenfassend auf eine kritische Diskussion von Weningers Begriffsklärungsversuchen angewandt.

Abstract

After clarifying the relationship between philosophy and didactics of science an investigation into the structure of recognition and concept development in the material realm is performed from aspects of epistemology and philosophy of science. Starting from a model of experimental recognition of matter, the logical structure of material concepts is clarified; methods to transform ordinary concepts into scientific concepts are proposed; a system of material concepts in natural science is developed; the dynamical and relational character of material (in particular of chemical) properties is emphasized and contrasted with substantialistic traditions; the special relevance of operational concepts for material ordering, concept precision and teaching in chemistry is underlined; and apparent differences between physical and chemical classification of substances are eliminated. In conclusion the results are used for critical discussions of Weninger's attempts to clarify basic chemical concepts.

1. Vorüberlegungen zum Verhältnis von Wissenschaftstheorie und Fachdidaktik

Sowohl Fachdidaktiker als auch Wissenschaftstheoretiker sind um eine reflexive und gegliederte Aufarbeitung der Wissensbestände einer Wissenschaft bemüht. Die Aufarbeitung der Fachdidaktik zielt darauf ab, die Wissensbestände in eine für Lernende vermittlungsfähige Form zu Überführen. (2) Dazu müssen sie ein gewisses (in der bisherigen Sozialisation erworbenes) Vorverständnis des jeweiligen Gegenstandsbereichs und eine gewisse "Alltagsvernunft" des Lernenden vorausgesetzt werden. Daran anknüpfend sol-

len in aufeinander abgestimmten Schritten einerseits das begriffliche Verständnis weiterentwickelt und andererseits die (unter dem Begriff der wissenschaftlichen Vernunft zusammenfaßbaren) Methoden der Begriffsbildung und -erweiterung, des Verstehens und Erklärens, des legitimen Folgern etc. entwickelt und präzisiert werden. Das Kriterium für eine gute fachdidaktische Aufarbeitung liegt letztlich im praktischen Erfolg, ob nämlich Lernende auf diesem Wege den Wissensbestand einer Wissenschaft ohne große Verständnisbarrieren ("Klüfte des Nicht-verstehen-könnens") erwerben können.

Die Aufarbeitung der traditionellen Wissenschaftstheorie, etwa im Sinne der "rationalen Rekonstruktion" der analytischen Philosophie [14], besteht zunächst darin, einen Aussagen- oder Begriffszusammenhang des wissenschaftliche Diskurses (z.B. einer Disziplin oder einer Teildisziplin) zu präzisieren, indem diese z.B. in eine Formalsprache übersetzt werden, die Begriffe expliziert und Argumentationszusammenhänge durch sorgfältige Unterscheidung von Prämissen und Folgerungen herausgearbeitet werden. Eine solche rationale Rekonstruktion dient der Überprüfung der inneren Widerspruchsfreiheit bzw. Konsistenz, der systematischen Begriffsentwicklung und Kohärenz des Begriffsrahmens, der Aufdeckung von implizit vorausgesetzten Prämissen, Zirkularitäten und Lücken in Begründungszusammenhängen usw. Daran kann sich dann eine "Reparaturarbeit" der offengelegten Mängel anschließen. Die Wissenschaftstheorie liefert damit einen aufgearbeiteten Wissensbestand, der für jedes rationale Subjekt nachvollziehbar und akzeptabel sein soll.

Vergleicht man die beiden Aufarbeitungsformen, dann fällt als wichtigster Unterschied auf, daß sie auf unterschiedlich gerüstete Subjekte abgestimmt sind. Während sich der Lernende auf der Grundlage seiner "Alltagsvernunft" die wissenschaftlichen Methoden im Verlauf erst aneignen muß, werden diese (meist noch um einen aufgeblähten logischen Formalismus vermehrt) beim rationalen Subjekt der Wissenschaftstheorie immer schon vorausgesetzt. Nun ist aber gerade diese der traditionellen Wissenschaftstheorie inhärente Dogmatik der wissenschaftlichen Rationalität seit geraumer Zeit selber zum Gegenstand der wissenschaftstheoretischen Diskussion geworden. Ausschlaggebend dafür waren in erster Linie wissenschaftshistorische und -soziologische Studien, die insgesamt eher eine - nach den wissenschaftstheoretischen Rationalitätsstandards gemessene - irrationale Praxis der Wissenschaften aufzeigten, sowie das Scheitern einiger ehrgeiziger Rekonstruktionsversuche. Von den inzwischen krisenerschütterten Dogmen seien hier nur stichwortartig genannt: die Konstruierbarkeit einer adäquaten Formalsprache der Wissenschaft ohne Bezug auf die Alltagssprache; die unabhängige, rationale Entscheidbarkeit zwischen Alternativtheorien; die strikte Trennung von Beobachtungs- und Theoriensprache und damit auch die strikte Falsifikation von Theorien durch einzelne empirische Fälle; die Abkopplung des (logischen) Rechtfertigungskontextes von der Heuristik des (genealogischen) Entdeckungs-/Entwicklungszusammenhangs; die Beschränkung auf formal-semantische Sprachanalyse unter Ausblendung des pragmatischen Kontextes, wozu die Sprachverwendungskontexte des Alltags und der historischen Wissenschaftlergemeinschaften, aber auch Handlungs- und Experimentierkontexte gehören. Insgesamt könnte man ein wenig vereinfachend sagen, daß das ursprünglich ideal konstruierte rationale Subjekt der Wissenschaftstheorie durch die verschiedensten Krisen ein wenig menschlicher geworden ist. Mit der Einsicht, daß man immer schon eine Einbettung in nicht weiter formalisierbare, historisch und kulturell verankerte Alltags- oder Lebensweltkontexte mit entwicklungsfähigen Erkenntnis-, Handlungs-, Sprach- und Entschei-

dungskompetenzen des Subjekts voraussetzen muß, bewegt sich die wissenschaftstheoretische Arbeit auffallend auf die fachdidaktische Aufgabenstellung zu, wobei das Potential einer fruchtbaren Zusammenarbeit von Wissenschaftstheoretikern noch kaum wahrgenommen wird.

Bedauerlicherweise wurde bisher ausgerechnet die Chemie von der philosophischen Disziplin Wissenschaftstheorie äußerst stiefmütterlich behandelt [15]. Geht man davon aus, daß Wissenschaftstheoretiker den Fachdidaktikern anderer Disziplinen insbesondere durch Klärung der jeweiligen Grundbegriffe und Methoden mehr oder weniger bewußt "zuegearbeitet" haben, dann trifft die defizitäre Lage einer wissenschaftstheoretischen Aufarbeitung der Chemie indirekt auch die Chemiedidaktik. (3) Vor diesem Hintergrund wird das auffallende wissenschaftstheoretische Engagement von Chemiedidaktikern in den letzten zwei Jahrzehnten verständlich. (4) Die folgenden Überlegungen zur Stoffeigenschaften und Begriffsbildung und -entwicklung, die ursprünglich in einem philosophischen Kontext entstanden sind [20], lassen sich damit im interdiskursiven Bereich zweier aufeinander konvergierender Diskurse ansiedeln: der Chemiedidaktik auf der einen und der Wissenschaftstheorie der Chemie auf der anderen Seite.

2. *Ein erkenntnistheoretisches Modell zur Entwicklung stofflicher Erfahrungsbegriffe*

Die klassische Philosophie hat die Welt zuerst in einem metaphysischen Entwurf vorgelegt, um dann die Frage zu beantworten, wie die Gegenstände dieser Welt erkannt werden können. Im Gegensatz zum metaphysischen Standpunkt erschließen sich die Gegenstände von einem erkenntnistheoretisch-methodologischen Standpunkt aus erst durch den besonderen Erkenntniszugang; ihre Seinsweise bleibt unlöslich mit diesem Zugang verknüpft. Der Primat der erkenntnistheoretischen Frage (Wie erkennen wir?) vor der ontologischen Frage (Was sind die Gegenstände der Welt?) in der neuzeitlichen Philosophie besitzt eine einfache Begründung: Bevor wir die Gegenstände nicht erkannt haben, können wir gar nichts darüber aussagen, weil alle Begriffe von diesen Gegenständen mittels der Erkenntnis derselben gebildet werden. In Übertragung auf die Fachdidaktik könnte diese Lehre etwa folgendermaßen lauten: Begriffe, die auf spezielle Gegenstände einer Wissenschaft Bezug nehmen, können nur über den erkennenden Zugang gelernt werden. Die theoretische Gegenstandsbeschreibung einer empirischen Wissenschaft bleibt daher einem Lernenden solange unverständlich, bis er die entsprechenden Begriffe über eine am Erkenntnisprozeß orientierte Begriffsentwicklung gelernt hat. In chemiedidaktischer Konkretisierung: Wer bspw. im Bemühen um begriffliche Präzision einem Lernenden das Charakteristische eines Stoffes oder einer Stoffklasse über die strukturellen Besonderheiten der entsprechenden Moleküle vermitteln will, bevor dieser nicht die Brücke zwischen stofflichen und molekülstrukturellen Eigenschaften (d.i. insbesondere die chemische Methode zur Strukturuntersuchung) gelernt hat, der verlangt entweder begriffshellseherische Fähigkeiten oder die Aneignung bedeutungsleerer Worthülsen. (5)

Die Chemie ist als Wissenschaft von den Stoffen und Stoffumwandlungen (i.G. etwa zur Mathematik) eine Erfahrungswissenschaft; die Besonderheit der chemischen Erfahrung liegt (i.G. etwa zur biologischen Taxonomie) in der experimentellen Methode, die sich wiederum von der Methode bspw. der Mechanik dadurch unterscheidet, daß sie nicht nur Meßexperimente, sondern auch qualitative Experimente umfaßt. Für einen erkenntnistheoretischen Zugang zu den Gegenständen und Begriffen der Chemie muß da-

her zunächst ein erkenntnistheoretisches Modell der experimentellen Erkenntnis der Chemie entworfen werden, von dessen Gültigkeit die gesamte folgende Begriffsentwicklung abhängt. Ein solches erkenntnistheoretisches Modell sollte den Erkenntnis Kontext soweit analytisch explizieren, daß die Bildung bzw. Erlernung von begrifflicher Erkenntnis auf einem allgemeinen Niveau verständlich wird, d.h., es muß alle (notwendigen) äußeren und inneren Bedingungen und Schritte des Erkenntnisprozesses umfassen. Weil die Erkenntnistheorie es bisher versäumt hat, ein Modell der experimentellen Stofferkennntnis zu entwickeln, werde ich das im folgenden nachholen.(6)

Ich wähle als Ausgangspunkt den Begriff der Perspektive im Sinne einer willentlich gebundenen intentionalen Zugangsweise und werde dann versuchen, das Besondere der Stoffperspektive und anschließend der chemischen Subperspektive herauszuarbeiten. "Willentliche Gebundenheit" besagt hier, daß jeder Erkenntniszugang immer an ein bestimmtes Interesse (metaphorisch: an ein bestimmte Fragestellung) geknüpft ist. "Intentionalität" bedeutet, daß dieses Interesse auf etwas ausgerichtet bzw. daß die Aufmerksamkeit fokussiert ist. Auf was richtet sich diese Perspektive, was sind die Gegenstände des besonderen Zugangs? Die Frage läßt sich einfach beantworten: Die Gegenstände der Betrachtung sind genau die Gegenstände, die sich unter der jeweiligen Perspektive betrachten lassen. Das ist keine leere Kennzeichnung, sondern eine präzise dispositionale Charakterisierung, die uns vor einer Perspektivenverabsolutierung bewahrt, d.h., Gegenstände sind nicht (wie im metaphysischen Entwurf) durch irgendwelche absolut gesetzten Wesensmerkmale vorentworfen, sondern alle vermeintlichen Wesensmerkmale (z.B. ausgedehnt, größen- und gestaltartig, stofflich, ästhetisch, nützlich etc.) gelangen erst über die jeweilige Perspektive ins Spiel.

Die Besonderheit der stofflichen Perspektive bringt uns bereits in sprachliche Verlegenheit, denn die Ausdrücke "Perspektive", "Betrachtung" etc. erwecken passivistische und überdies visualistische Assoziationen. Die Stoffperspektive zeichnet sich aber gerade durch einen handelnden Zugang in zwei Schritten aus: Der erste Schritt besteht in der Gegenstandskonstitution, der zweite Schritt in der Untersuchung des Gegenstandes. Die Gegenstandskonstitution beginnt bereits, wenn wir unsere Aufmerksamkeit auf etwas richten, nach etwas greifen etc. Durch diesen vorbereitenden Schritt machen wir uns etwas zum Untersuchungsgegenstand: wir konstituieren den Untersuchungsgegenstand. Die Schritte der Gegenstandskonstitution sind gerade in der Chemie zu ausgefeilten Techniken entwickelt worden: z.B. die Techniken der Probennahme, Probenaufbereitung, Probenfixierung etc. Das bedeutet wohlgerne keine Gegenstandserschaffung oder -konstruktion, sondern das sind notwendige Vorbereitungsoperationen, damit überhaupt etwas zum Gegenstand einer speziellen Untersuchung werden kann. Gegenstände, die für eine stoffliche Untersuchung vorbereitet sind, nenne ich im folgenden Stoffproben.(7)

Der zweite Schritt, die Stoffprobenuntersuchung, besteht aus zwei Teilschritten: die gezielten Auswahl oder Herstellung eines Kontextes, in den dann die Stoffprobe gestellt wird, und die gezielte Registrierung des Verhaltens in diesem Kontext. Im Unterschied zum passivistischen, rezeptiven Erkenntnismodell des sog. Empirismus (8) ist die Stoffuntersuchung stets ein interaktiver Prozeß. Wir konstruieren im ersten Teilschritt aktiv einen Kontext und untersuchen erst im zweiten das Verhalten. Beide Teilschritte bilden zusammen gewissermaßen eine Erfahrungseinheit. Sobald man versucht, diese Einheit weiter aufzulösen, löst man auch den Erfahrungsgehalt auf.

Die beiden Teilschritte bedürfen, wenn sie zu einer wissenschaftlichen, begrifflich präzisen Erkenntnis führen sollen, einer systematisierenden Vorarbeit. Auf der einen Seite müssen die relevanten kontextuellen Bedingungen und Komponenten expliziert und gegen andere Kontexte abgegrenzt werden; auf der anderen Seite benötigen wir ein Schema unterschiedlicher möglicher Verhaltensverläufe, aus denen bei der Registrierung eine eindeutige Wahl getroffen werden kann. Ohne diese vorbereitenden Systematisierungsschritte, ohne die Bewußtmachung der Besonderheit der jeweiligen Untersuchung vor dem Hintergrund prinzipiell anderer Möglichkeiten, ist keine begriffliche Bestimmtheit für experimentelle Erfahrung möglich.

Wer darüber befinden will, welche Komponenten und äußeren Umstände eines experimentellen Aufbaus für den Untersuchungsverlauf entscheidend und welche Verlaufsalternativen zu berücksichtigen sind, der kann dies nur vor dem Hintergrund ausgehnter experimenteller Erfahrung mit ausreichender Sicherheit tun. Damit gerät man aber in eine sowohl erkenntnistheoretisch als auch fachdidaktisch prekäre Situation. Denn wenn jede begrifflich präzise experimentelle Erfahrung immer schon begrifflich präzise faßbare experimentelle Erfahrung voraussetzt: womit soll man dann beginnen? Die traditionellen philosophischen Lösungen bestanden entweder in einer Flucht zu idealen (nicht-empirischen) Modellsystemen (Rationalismus) oder in einem Rückzug auf einfache Wahrnehmungseindrücke, die von allen Kontexten abstrahiert sind (Sensualismus); beide Erkenntnismodelle ignorieren damit das Charakteristische der experimentellen Erfahrung, nämlich die Interaktion in einem Kontext, und sind daher für die chemische Stofferkennntnis untauglich.

Der einzige (nicht nur didaktisch, sondern auch wissenschaftstheoretisch) mögliche Ansatz einer Begriffsentwicklung scheint darin zu bestehen, daß man mit Begriffen der Alltagserfahrung beginnt und dann Schritt für Schritt Präzisierungen einführt. Nach dem bisher entwickelten Erkenntnismodell wird die Präzisierung eines Erfahrungsbegriffs einerseits durch die Differenzierung möglicher Verhaltensverläufe und andererseits durch die Explizierung der kontextuellen Bedingungen erreicht. Untersucht man Stoffe erfahrungsbegriffe des Alltags unter dem zweiten Gesichtspunkt, dann fällt auf, daß hier ein hoher Grad an Präzision, d.h. eine große Wahrscheinlichkeit für unzweideutige Verständigung, durch den impliziten Bezug auf Normalkontexte erreicht wird. Wenn wir hier eine Stoffprobe bspw. als brennbar charakterisieren, dann setzen wir normalerweise implizit eine bestimmte Sauerstoffatmosphäre, bestimmte Druck- und Temperaturbedingungen etc. voraus, wie wir sie eben in unseren alltäglichen Kontexten anzutreffen gewohnt sind. Oder wir sagen "hart" und meinen damit implizit hart bei normalen Temperaturen und relativ zu unseren Tastorganen oder gängigen Vergleichsproben. Und niemand denkt an relativistische Effekte oder an überkritisches Wasser, wenn er die Ausrücke "rot" oder "wasserlöslich" in bezug auf alltägliche Erfahrungskontexte hört.

Die Aufgabe der erkenntnistheoretischen wie der fachdidaktischen Begriffsentwicklung besteht nun darin, ausgehend von einfachen Erfahrungsbegriffen des Alltags eine schrittweise Explizierung der Erfahrungskontexte und damit eine schrittweise Präzisierung der Erfahrungsbegriffe vorzunehmen. Präzisierung der Begriffe bedeutet dabei eine schrittweise Universalisierung ihrer unzweideutigen Verwendung, bei der letztlich keine relevanten Bedingungen mehr implizit vorausgesetzt sind. Das Hauptproblem liegt in der sorgfältigen Entwicklung der Schrittfolge, da man zur Explikation der kontextuellen Bedingungen wiederum nur auf Erfahrungsbegriffe zurückgreifen darf, die bereits mit

der notwendigen Präzision eingeführt sind. Parallel dazu muß man eine schrittweise Differenzierung der möglichen Untersuchungsverläufe zur differenzierteren Begriffsbildung und damit auch zur differenzierteren Beschreibung der kontextuellen Bedingungen durchführen.

Diese allgemeinen Skizze macht bereits deutlich, daß eine saubere Entwicklung experimenteller Erfahrungsbegriffe ein komplexeres Problem ist, als es sich in einem passivistischen Erkenntnismodell der einfachen sinnlichen Wahrnehmung darstellt. Wissenschaftstheoretiker und Wissenschaftsdidaktiker sitzen dabei in demselben Boot, weil beide von einer nicht weiter formalisierbaren Alltagserfahrung ausgehen müssen; beide können aber wichtige Anhaltspunkte aus der Wissenschaftsgeschichte gewinnen, soweit sich diese als Schritte der Begriffspräzisierung und -differenzierung interpretieren läßt.

3. Überblick über die experimentelle Stoffeigenschaften

In diesem Abschnitt möchte ich einen groben Überblick über experimentelle Kontextcharakteristika zur Stoffuntersuchung geben, nach denen sich die sog. Stoffeigenschaften systematisieren lassen. (9) Da ich die Kontextcharakteristika hier nicht im einzelnen erläutern kann, muß ich an ein Vorverständnis appellieren. Der Überblick soll in erster Linie dazu dienen, die Besonderheit der chemischen Kontexte herauszustellen, auf die ich im folgenden hauptsächlich eingehen werde.

- 1) In Kontexten mechanischer Krafteinwirkung untersuchen wir mechanische (Werk-)Stoffeigenschaften (z.B. Mohshärte, Bruchfestigkeit).
- 2) In Kontexten der Einwirkung von thermischer Energie und hydrostatischem Druck untersuchen wir thermodynamische Stoffeigenschaften (z.B. Schmelztemperatur, spez. Wärmekapazität).
- 3) In Kontexten von elektromagnetischen Feldern untersuchen wir elektrische, magnetische und optische Stoffeigenschaften (z.B. spez. elektrische Leitfähigkeit, magnetische Suszeptibilität, Brechungsindex).

Die Eigenschaften (1)-(3) könnte man unter dem Begriff der physikalischen Stoffeigenschaften zusammenfassen.

- 4) In Kontexten mit Organismen und Ökosysteme untersuchen wir biologische bzw. ökologische Stoffeigenschaften (z.B. Toxizität, Ozonerstörungspotential).
- 5) In Kontexten mit anderen stofflich bestimmten Stoffproben untersuchen wir chemische Stoffeigenschaften im engeren Sinne (z.B. Wasserlöslichkeit, Oxidierbarkeit).

Die Eigenschaften (1)-(5) sind nach ihren zugeordneten Kontextcharakteristika geordnet. Das bedeutet natürlich nicht, daß wir einen bestimmten Kontext bspw. zur Untersuchung von mechanischen Eigenschaften nicht auch unter dem elektromagnetischen Gesichtspunkt charakterisieren könnten. Aber in diesem Falle interessieren wir uns eben nicht für den Einfluß der elektromagnetischen Kontextbedingungen; sie werden daher so gewählt, daß sie auf den Untersuchungsverlauf nur einen standardisierten bzw. keinen Einfluß ausüben. Mit der bewußten Konzentration auf einzelne Kontextcharakteristika bilden wir verschiedene Subperspektiven der Stoffperspektive. Die Subperspektiven lassen sich allerdings auch zu neuen Subperspektiven und damit neuen Stoffeigentypen verbinden. Verknüpfen wir bspw. die chemische und die elektromagnetische Subperspektive, dann lassen sich z.B. Kontexte zur Untersuchung der photochemischen Stoffeigenschaften bilden usw. Damit ist gewissermaßen die wissenschaftliche Stoffperspektive in gro-

ben (und vielleicht noch erweiterbaren) Zügen umrissen. Wenn man die Kontexte weiter expliziert und die zu erwartenden Untersuchungsverläufe ausdifferenziert, dann gewinnt man ein Repertoire von Untersuchungsmethoden zur stofflichen Differenzierung von Stoffproben. Geht man dabei systematisch vor, dann lassen sich daraus ein oder mehrere stoffliche Klassifikationssysteme entwickeln, mit deren Hilfe man jede Stoffprobe durch einen ganzen Komplex von Stoffeigenschaften charakterisieren kann.(11)

4. Die Überwindung des substantialistischen Denkschemas zur stofflichen Begriffsbildung

Wenn man die Stoffperspektive zur Stoffprobenuntersuchung und zur Stoffbegriffsbildung einnimmt, ist man genötigt, mit gewohnten Denkschemata zu brechen, die bereits in der griechischen Antike zu philosophischen Systemen ausgearbeitet wurden. Nach dem griechischen Philosophen Parmenides kann die Welt keine dynamischen, prozessualen Elemente enthalten, weil sie nicht denkend erfaßbar seien (vgl. [22]). Nach der daraus abgeleiteten, für die gesamte abendländische Philosophie bis heute einflußreichen Substanzmetaphysik besteht die Welt aus unveränderlichen Substanzen, die Träger von bestimmten Eigenschaften sind. (12) Wir erkennen die Welt, indem wir an jedem Objekt seine ihm wesensmäßigen Eigenschaften erkennen und so eine statische Ordnung der Welt entwerfen. Gegen den, bereits in der Antike geäußerten, Einwand, daß wir doch in einer dynamischen Welt voller Veränderung leben, behauptet dieser Ansatz, daß sich alle Veränderung auf der Ebene unwesentlicher Eigenschaften abspielen, während die Substanzen selbst, die eigentlichen Wesenheiten, davon unberührt und somit unveränderlich bleiben. Entscheidend für die Begründung dieses Ansatzes ist, daß wir scheinbar Veränderung immer nur an Objekten denken können, für die wir voraussetzen müssen, daß sie selbst während der Veränderung unverändert bleiben. Auch unsere Sprache scheint uns zu dieser Denkweise zu zwingen: Wenn wir sagen "etwas verändert sich", dann beziehen wir uns immer auf ein Etwas, das vor, während und nach der Veränderung dasselbe bleibt.

Die größte Herausforderung dieses Ansatzes waren bereits in der Antike die chemischen Phänomene der Stoffumwandlung, weil hier offensichtlich solch gravierende Eigenschaftsveränderungen stattfinden, daß man nicht mehr ohne weiteres von zugrundeliegenden unveränderlichen Objekten sprechen kann. Unter dem substanzmetaphysischen Grundsatz "Aus nichts entsteht nichts, und etwas kann nicht zu nichts werden" enthalten Formulierungen wie "ein Zu-Existieren-Aufhören der Anfangsstoffe als Stoffe [...] und das Zu-Existieren-Beginnen des Endstoffes" ([34]: S. 29) zur Beschreibung chemischer Phänomene einen kategorialen Fehler. Der (bis heute wirksame) substanzmetaphysische Denkwang scheint uns hier unmittelbar zur Annahme unveränderlicher korpuskularer Substanzen führen, die wir zwar nicht wahrnehmen können, aber aus logischen Gründen fordern müssen, um chemische Veränderungen nach dem substantialistischen Schema denken zu können: "Bei der sogenannten Stoffumbildung trennen sich die Henaden der Anfangsaggregate und vereinigen sich zu den Endaggregaten. Die Henaden als solche bleiben dabei erhalten". (ebd., S. 20-21) Es ist also keine Frage der räumlichen Größe (makroskopisch-mikroskopisch) oder der räumlichen Struktur (kontinuierlich-diskontinuierlich) (vgl. [29]), ob wir eine stoffliche oder atomistische Perspektive einnehmen, wie meist irrtümlich angenommen wird, denn die stoffliche Betrachtungsweise abstrahiert gerade von der räumlichen Größe und Struktur des Gegenstandes. Es ist viel-

mehr eine Entscheidung für einen metaphysischen oder kategorialen Rahmen, der zur Ausblendung der anderen Perspektive aus logischen Gründen zwingt.

Alle Stoffeigenschaften sind Veränderungsdispositionen, welche die Möglichkeit zu bestimmten Veränderungen unter bestimmten kontextuellen Bedingungen umfassen. Sie lassen sich nicht in das substanzmetaphysische Schema integrieren. Sie müßten nicht nur als unwesentliche Eigenschaften, sondern auch als "uneigentliche Eigenschaften" aufgefaßt werden, denn damit drücken wir ja nichts aus, was nur der einzelnen Stoffprobe zueigen ist, sondern wir beschreiben die erwarteten Veränderung in Relation zu den kontextuellen Komponenten einschließlich unseres handelnden Eingriffs. Eine Entscheidung für die Stoffperspektive bedeutet daher die Wahl eines kategorialen Rahmens, der anstelle der Substanzkategorie die Kategorie der dynamischen Relation setzt. Faßt man einen Stoff als Bündel möglicher kontextbedingter Veränderungsweisen auf, dann machen auch die Fragen keinen Sinn, ob der chemische Stoff bei chemischen Reaktionen "verschwindet" bzw. "entsteht" oder ob ihm ein Erhaltungsprinzip zugrunde liegt, weil der Stoff gerade Inbegriff möglicher Veränderungsweisen ist.⁽¹²⁾ Während der substantialistischen Ansatz darauf abzielt, die Welt als statische Ordnung voneinander unabhängiger Substanzen zu begreifen, versucht die stoffliche Erkenntnis, dynamische Relationen zwischen Stoffproben und bestimmten Kontexten unter unserem gezielten handelnden Eingriff systematisch zu erfassen. Beides sind unterschiedliche und voneinander unabhängige Perspektiven, denen unterschiedliche Erkenntnisziele, sowie Erkenntnis- und Begriffsbildungsmodelle zugrunde liegen, die nicht miteinander vermischt werden sollten, obwohl natürlich eine didaktische Brücke unumgänglich ist. ⁽¹³⁾

Im Unterschied zum substantialistischen Erkenntnismodell werden stoffliche Erfahrungsbegriffe nicht durch passive Wahrnehmung, sondern in experimentellen Handlungskontexten gelernt, in denen die Veränderungsweisen je nach den inszenierten kontextuellen Bedingungen studiert werden. Man versteht die sprachliche Mitteilung eines experimentellen Ergebnisses erst richtig, wenn man die Regeln gelernt hat, um das Experiment im Prinzip selber durchführen zu können. Die Bedeutung von empirischen (oder besser: experimentellen) Stoffprädikaten wird also gelernt, indem man eine komplexe Handlungskompetenz erwirbt. Darin besteht gerade die Aufgabe der Praktika in einem naturwissenschaftlichen Studium, die im Chemiestudium sogar ungewöhnliche Ausmaße gewonnen haben. Zur Handlungskompetenz gehört dabei auch die Fähigkeit, sprachliche Äußerungen mit bestimmten experimentellen Erfahrungen verknüpfen zu können. Das lernt man nur in der Praxis und unter Kontrolle anderer Menschen, die durch eine entsprechende Handlungskompetenz ausgewiesen sind. Weil die Regeln nur in sozialen Gemeinschaften gelernt und vermittelt werden, gewinnen sie gerade ihre intersubjektivität. Die Sprache wird damit zum zwischenmenschlichen Verständigungsmittel und die experimentellen Erfahrungen können durch den Handlungsbezug sogar über kulturelle Grenzen hinweg sprachlich ausgetauscht werden.

Wer die Handlungskompetenz nicht erworben hat, der wird auch die experimentellen Prädikate nicht immer in kompetenter Weise verwenden können - es sei denn, er lernt auf der Grundlage seines Sprachgefühls, die experimentellen Prädikate wie Abstrakta im passenden rein sprachlichen Zusammenhang anzubringen. Weil die kompetente Sprachverwendung sowohl in experimentellen als auch in rein sprachlichen Kontexten (nach unterschiedlichen Bedeutungstheorien) erworben werden kann, läßt sich das erfahrungsfundierte Verständnis nicht ohne weiteres an der adäquaten Sprachverwendung ab-

lesen. Die Fachdidaktik ist hier gefragt, beide Kontexte der Spracherwerbung sorgfältig zu trennen und Prüfungskriterien zu entwickeln, ob die Begriffe tatsächlich erfahrungsfundiert erworben sind.

5. Die Relationalität chemischer Stoffbegriffe

Nach der aufgeführten Typologie von Stoffeigenschaften bzw. Stoffsubperspektiven nach Kontextcharakteristika ist es für die chemische Subperspektive kennzeichnend, daß wir mindestens zwei Stoffproben in einen Kontext stellen müssen. Überdies werden wir, wenn wir das stoffliche Verhalten beschreiben wollen, genötigt sein, mindestens eine weitere Stoffprobe zu berücksichtigen, die wir nach Verlauf des Experiments erhalten. Die Prädikate zur Beschreibung chemischer Experimente weisen daher eine besondere logische Struktur auf, sie sind mehrstellige Prädikate oder Relationen (genauer: Dispositionsrelationen). Das ist eigentlich wieder eine Frage der Perspektive. Im Prinzip kann nämlich jedes Stoffprädikat als komplexe Relation dargestellt werden, wenn wir das stoffliche Verhalten als Relation zwischen der Stoffprobe und allen Komponenten des experimentellen Aufbaus einschließlich des Experimentators und seinen Handlungen beschreiben. Wir neigen aber (nicht zuletzt aufgrund des substantialistischen Denkwanges) dazu, alle experimentellen Komponenten zum Kontext zu rechnen, um uns ganz auf die Stoffprobe, den Gegenstand der Untersuchung, zu konzentrieren. Diese Konzentration wird aber bei den chemischen Experimenten überfordert, und zwar bereits im ganz anschaulichen Sinne, wenn wir bspw. aus zwei Stoffproben eine homogene (Reaktions-)Mischung herstellen. Und auch auf logischer bzw. begrifflicher Ebene gerät man rasch in Schwierigkeiten.

Wir wollen uns der Übersicht halber nur auf das Verhältnis der Stoffproben konzentrieren und die anderen experimentellen Komponenten vernachlässigen. Nehmen wir an, wir interessieren uns für die chemischen Eigenschaften einer Stoffprobe a. Wir bringen dann a mit einer Stoffprobe b in einen chemischen Kontext und erhalten als Resultat eine Stoffprobe c. Um diese chemische Erfahrung zur Sprache bringen, formulieren wir den Satz: "a reagiert mit b zu c". (Auf den Begriff der chemischen Reaktion werde ich in Abschnitt 6 noch eingehen.) Solange wir b und c nicht bereits auf eindeutige Weise stofflich bestimmt haben, bleibt diese Aussage über a aber völlig bedeutungslos. Wir können ihr erst Bedeutung abgewinnen, wenn b und c unter stofflichen Gesichtspunkten bereits charakterisiert sind. Je präziser die stoffliche Bestimmung von b und c ist, desto gehaltvoller wird auch die Aussage über a. Fehlen hingegen wichtige Angaben zur stofflichen Bestimmung von b und c, dann gewinnen wir aus dem chemischen Experiment auch nur eine vage chemische Bestimmung von a. Damit geraten wir aber im Rahmen der chemischen Subperspektive in einen Zirkel, wie er bereits in Abschnitt 2 angedeutet wurde. Denn wir müssen ja bereits b und c chemisch charakterisiert haben, bevor wir zur Charakterisierung von a schreiten. Um b chemisch zu charakterisieren müßten wir auf weitere Stoffproben d und e zurückgreifen usw.

Das kleine Gedankenspiel macht deutlich, daß die Bildung präziser Prädikate in der chemischen Subperspektive stets auf die Unterstützung durch andere Stoffsubperspektiven angewiesen ist, d.h. vor jeder chemischen Erfahrung muß man immer schon physikalische Stoffbegriffe zur Charakterisierung der Stoffproben gelernt haben. Denn die chemische Subperspektive kann alleine keine Eigenschaften isolierter Stoffproben, sondern nur Relationen zwischen Stoffproben erfassen. (14) Chemische Stoffbegriffe

sind immer Relationsbegriffe, die dynamische Relationen zwischen Stoffproben knüpfen, wie es auch auf begrifflich höher entwickelten Niveau in der Formulierung von Reaktionsgleichungen zum Ausdruck kommt. Wenn man mit solchen Relationen eine chemische Stoffordnung entwickelt, dann erhält man ein komplexes relationales Netz, in dem die chemische Bestimmtheit einer Stoffprobe durch einen Knotenpunkt in diesem Netz dargestellt ist. Sprechen wir aus der chemischen Subperspektive von chemischen Stoffen (und nicht von Stoffproben), dann beziehen wir uns auf solche Knotenpunkte in einem Netzwerk, in dem jeder Knotenpunkt (Stoff) mit jedem anderen Knotenpunkt (Stoff) direkt oder indirekt über chemische Relationen verknüpft ist.

Chemikern ist die Relationalität ihrer Begriffe meist nicht gegenwärtig, weil sie stets von stofflich eindeutig bestimmten Stoffproben im Rahmen eines Klassifikationssystems ausgehen, das nicht nur die chemische Subperspektive berücksichtigt. (15) Die Chemiegeschichte bietet allerdings eine Fülle von Beispielen, bei denen die Entwicklung von Relationssystemen im Vordergrund stand. Die Vorgehensweise besteht stets in der Verankerung an einem oder mehreren Standardstoffen, von denen dann die Relationen schrittweise geknüpft werden. Ich erinnere hier nur an das System der relativen Massenäquivalente, das System der Molekülstrukturen in der organischen Chemie, die methodisch als Reaktionsformeln zur Darstellung der Reaktivitäten von Stoffklassen durch funktionelle Gruppen entwickelt wurden, das System der elektrochemischen Potentiale, das System der relativen Säurestärken etc. Und natürlich basiert auch das gesamte chemische Nomenklatorsystem auf chemischen Relationsbegriffen, nämlich auf der chemischen Relation eines Stoffes zu seinen elementaren Zerlegungsprodukten, die hier als Standardstoffe gewählt wurden.

Die Relationalität der chemischen Begriffe wird gerne verdrängt, denn sie paßt ganz und gar nicht in die vorherrschende substantialistische Denkweise. Daß jede elementare Zusammensetzung eine chemische Relation zwischen mehreren Stoffen ausdrückt, scheint heute z.B. gar nicht mehr bewußt zu sein. Die Umdeutung der relativen Massenäquivalente (die einem System reaktiver Massenproportionen entspringen) zu absoluten Atommassen ist hingegen ein prominentes Beispiel, das jedoch selten als Überführung eines Systems von Relationsbegriffen in einen Satz von Absolutbegriffen, sondern als metaphysisches Problem über die Existenz von Atomen diskutiert wird. Bezeichnend für die Blindheit der Chemiker bzgl. der logischen Struktur ihrer eigenen Begriffe ist auch die Tatsache, daß die Ablösung der (chemischen) relativen Konfigurationsstrukturen durch (physikalische) absolute Konfigurationsstrukturen in den 50er Jahren dieses Jahrhunderts fast unbemerkt verlief.

Sobald man die metaphysischen Fragen ausklammert und sich aus erkenntnis- und wissenschaftstheoretischer oder fachdidaktischer Perspektive der Bildung und Entwicklung von Begriffen widmet, läßt sich die Relationalität der chemischen Begriffe nicht mehr leugnen. Chemischen Begriffen liegt eine andere logische Struktur zugrunde als etwa Größen- und Gestaltbegriffen, sie müssen daher auch auf andere Weise gelernt werden. (16)

6. Die operational fundierte hierarchische Stoffordnung

Unter allen stofflichen Untersuchungskontexten nehmen diejenigen eine Sonderstellung ein, bei denen sich im Verlauf der Untersuchung eine Aufteilung bzw. Zerlegung einer Stoffprobe in mindestens zwei stofflich unterscheidbare Stoffproben einstellt. Mit Hilfe

eines solchen Untersuchungskontextes lassen sich erstens Stoffproben hinsichtlich der dadurch definierten "Zerlegbarkeit" im Sinne eines operationalen Kriteriums charakterisieren, zweitens wird eine dynamische Relation zwischen der Ausgangsstoffprobe und ihren "Zerlegungsprodukten" eingeführt und drittens führen wir mit der stofflichen Untersuchung auch faktisch eine entsprechende Zerlegungsoperation durch und gelangen damit zu neuen Stoffproben für weitere Untersuchungen. Findet man eine Folge von Zerlegungsoperationen, so daß die Zerlegungsprodukte eines jeden Schrittes nur durch die nachfolgenden Zerlegungsoperationen weiterzerlegt werden können, dann gewinnt man eine operational fundierte hierarchische Stoffordnung.

Die Lösung dieser Aufgabe ist bekannt aber wenig reflektiert: In bestimmten mechanischen Untersuchungskontexten unterscheiden wir (durch Mahlen und Sichten, durch Filtrieren, Zentrifugieren etc.) zwischen heterogenen und homogenen Stoffen, wobei die homogene Stoffproben das operationale Kriterium erfüllen, daß sie durch die mechanischen Zerlegungsoperationen nicht weiter in stofflich unterscheidbare Stoffproben zerlegt werden können. Die homogenen Stoffproben können in bestimmten thermischen Untersuchungskontexte (durch fraktionierte Destillation, Kondensation, Kristallisation etc.) weiter nach ihrer Zerlegbarkeit analog unterteilt werden in homogene Mischungen und reine Stoffe. Alle weiterführenden konventionellen Zerlegungsoperationen (raffinierte thermische, chemische, elektrochemische) begründen die analoge Unterscheidung der reinen Stoffe in reine Verbindungen und elementare Stoffe. Über die stofflichen Dispositionseigenschaften der jeweiligen Zerlegbarkeit besitzt man damit neben den Herstellungsoperationen zugleich auch operationale Definitionen für die Begriffe der verschiedenen Stoffebenen. (17)

Unter den zahlreichen wichtigen Konsequenzen, die sich aus dieser operational fundierten hierarchischen Stoffordnung auf der Grundlage einer Zerlegungshierarchie für die Chemie ergeben, möchte ich im folgenden vier diskutieren: die Technik der Probenahme, das Diskontinuum der reinen Stoffe, die Ordnungs- und Nomenklaturbasis der Elemente, den Begriff der chemischen Reaktion.

- 1) Um eine Stoffprobe im Rahmen eines Klassifikationssystems eindeutig stofflich zu bestimmen, müßte man sie in vielen verschiedenen chemischen Kontexten untersuchen. Da die stoffprobe jedoch in jeder chemischen Untersuchung stofflich verändert wird, kann man an ihr eigentlich nur eine einzige Untersuchung durchführen. Geradezu selbstverständlich lösen wir dieses Problem mit der Technik der Probenahme durch mechanische Zerlegung homogener Stoffproben - aber wodurch ist diese Lösung gerechtfertigt? Eine Rechtfertigung erhält man aus der operationalen Definition des Begriffs der Homogenität, denn eine homogene Stoffprobe ist gerade dadurch gekennzeichnet, daß sie durch mechanische Zerlegungsoperationen, also durch Probenahmen, nicht weiter in stofflich unterscheidbare Stoffproben zerlegt werden kann. Folglich kann jedes mechanische Zerlegungsprodukt zur stofflichen Untersuchung der Ausgangsstoffprobe herangezogen werden.
- 2) Durch die operative Auswahl der reinen Stoffen gewinnt man aus dem kontinuierlichen Spektrum aller Stoffe (wozu auch die homogenen Mischungen gehören) ein diskontinuierliches Spektrum, wodurch eine Klassifikation qualitativ eindeutig voneinander unterscheidbarer Stoffe erst möglich wird. Der Begriff der Reinheit ist zwar ein idealer Grenzbegriff, aber durch Wiederholung der entsprechenden

Zerlegungsoperationen kann er operativ angenähert werden. Erst auf der Basis der operationalen Definition der reinen Stoffe lassen sich präzise chemische Begriffe und damit auch die gesamte chemische Stoffordnung sowie alle theoretischen Begriffe und Modelle entwickeln. Man kann diese Schritte der Zerlegungs- oder Reinigungsoperationen auch als Vorbereitungsschritte für die chemische Subperspektive betrachten; denn sie konstituieren erst die chemischen Untersuchungsgegenstände, an denen alle chemische Begrifflichkeit zu entwickeln ist.

- 3) Durch die seit Lavoisier etablierte operationale Definition der Elemente als die letzten Zerlegungsprodukte läßt sich jeder reine Stoff durch Relation zu seinen elementaren Zerlegungsprodukten charakterisieren und anhand dieser chemischen Relation in eine systematische Ordnung einfügen, die zugleich auch Grundlage für eine systematische Nomenklatur ist. Die dadurch erreichte enorme Systematisierungsleistung wird erst verständlich vor dem Hintergrund der über zweitausendjährigen Geschichte des Elementbegriffs auf der Basis von Erhaltungsprinzipien, die für eine Stoffsystematik trotz aller Hoffnungen völlig untauglich blieb.
- 4) Auf der Grundlage der operationalen Begriffe der reinen und elementaren Stoffe läßt sich auch der Begriff der chemischen Reaktion operational präzisieren. Sobald man zwei Stoffproben vereinigt, führt man bereits eine stoffliche Veränderung durch. Von einer chemischen Reaktion sprechen wir aber nur dann, wenn die Produktstoffprobe nach dem Experiment von der Gesamtheit der Ausgangsstoffproben hinsichtlich der reinen Stoffe unterscheidbar und hinsichtlich der elementaren Stoffe gleich ist. Man muß also immer einen stofflichen Vergleich auf der Basis der reinen und elementaren Stoffe nach den entsprechenden Stoffprobenzerlegungen durchführen. Chemische Reaktionen sind stoffliche Veränderungen auf der Basis der reinen Stoffe (nach Zahl, Art oder Menge) unter Erhaltungsbedingungen auf der Basis der elementaren Stoffe (nach Zahl, Art und Menge).

Vom wissenschaftstheoretischen Standpunkt liefern operationale Begriffsdefinitionen ein Optimum an Begriffspräzision durch die Anbindung an geregelte (Experimentier-) Handlungen. Damit bietet sich für die Fachdidaktik über die Anleitung zu experimentellen Handlungsfähigkeiten eine geeignete Methode der präzisen Begriffsvermittlung an.

7. Die Klassifikation der Stoffe

Die durch Zerlegungsoperationen gewonnen reinen Stoffproben sind die Untersuchungsgegenstände, an denen eine Stoffklassifikation zu entwickeln ist. Eine Stoffklassifikation ist ein Begriffssystem, das eine eindeutige sowie eine unter pragmatischen Zweckgesichtspunkten differenzierte und effektive Unterscheidung von Stoffproben ermöglicht. Eine Klassifikation ist unzweckmäßig, wenn sie entweder irrelevante oder ungenügende Differenzierungen erlaubt, oder wenn sie viele Klassen entwirft, unter die kein Exemplar (keine Stoffprobe) fällt. Jede Klasse einer Stoffklassifikation verknüpft verschiedene Begriffe zu einem Bündel und soll im folgenden ein "bestimmter Stoff" - im Unterschied zu den Stoffproben, die unter eine Klasse fallen - genannt werden. Daraus geht bereits hervor, daß eine Stoffklassifikation und damit die Kriterien der Stoffunterscheidung nicht ein für allemal festliegen, sondern sowohl entwickelbar sind als auch von pragmatischen Zweckgesichtspunkten abhängen. (18)

In Abschnitt 3 wurden Stoffbegriffe nach verschiedenen Stoffsubperspektiven unterschieden; nun stellt sich natürlich die Frage, welche davon für die Stoffklassifikation als relevant erachtet werden bzw., welche zu den charakteristische Stoffeigenschaften gezählt werden sollen. Weil eine chemische Stoffordnung nach Abschnitt 5 nicht unabhängig von physikalischen Stoffeigenschaften entwickelt werden kann, kann man sich nicht alleine auf chemische Eigenschaften beschränken. Aber welche physikalischen Stoffeigenschaften sollen einbezogen und welche vernachlässigt werden? Wenn man von Stoffeigenschaften eine effektive Differenzierung fordert (s.o.), dann lassen sich zunächst alle Eigenschaften eliminieren, die zu keiner Differenzierung tauglich sind. Dazu zählen insbesondere die Untersuchungen des Stoffprobedrucks und der -temperatur unter bestimmtem Kontextdruck bzw. bestimmter -temperatur, denn sie liefern für alle Stoffproben die gleichen Werte; solche physikalischen Eigenschaften werden im folgenden Zustandsgrößen genannt. Physikalische Größen die zwischen den meisten chemisch unterscheidbaren Stoffproben unterscheiden aber zwischen manchen (im Rahmen der Meßgenauigkeit) nicht, lassen sich hingegen ohne weiteres zu den charakteristischen Stoffeigenschaften zählen, solange man der chemische Differenzierbarkeit Priorität einräumt.

Wie soll man aber mit physikalischen Stoffeigenschaften verfahren, die zwischen chemisch ununterscheidbaren Stoffproben unterscheiden können? M.a.W.: Ist es notwendig, zwischen Stoffen mit gleichen chemischen aber unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften zu unterscheiden, bzw. müssen wir zwischen einer chemischen und einer physikalischen Stoffklassifikation unterscheiden? Da viele physikalische Stoffeigenschaften heute mit einer wesentlich höheren (quantitativen) Auflösung differenzieren als die qualitativen chemischen Stoffeigenschaften, würde die Differenzierung offensichtlich ins uferlose getrieben, insbesondere wenn man an die praktischen Grenzen der Reinigungsoperationen stößt. Von einer sinnvollen physikalischen Differenzierung ist aber zu fordern, daß sie nicht auf infinitesimal kleinen, sondern auf deutlichen Unterschieden der physikalischen Meßwerte aufbaut. Unter dieser Einschränkung sowie unter Ausklammerung der Zustandsgrößen und möglicher Spannungen während Entwicklung einer Stoffklassifikation(19) scheinen keine gravierenden Differenzen zwischen der chemischen und physikalischen Subperspektive aufzutreten, solange man sorgfältig auf eine standardisierte Stoffprobenvorbereitung und alle relevanten kontextuellen Bedingungen achtet. Eine standardisierte Stoffprobenvorbereitung ist insbesondere bei Festkörpern wichtig, deren physikalische Eigenschaften u.U. sehr stark von der mechanischen, thermischen oder auch optischen Vorbehandlung abhängen. Und wenn man infolge der Vernachlässigung relevanter kontextueller Bedingungen zu unterschiedlichen physikalischen Ergebnissen an chemisch ununterscheidbaren Stoffproben gelangt, dann ist dies lediglich eine Konsequenz unpräziser Begriffsbildung. Tatsächlich spielt die Mißachtung kontextueller Bedingungen aus einem Mißverständnis der logischen Struktur von Stoffbegriffen bis heute eine Rolle. Wer z.B. meint, Wasserdampf, (flüssiges) Wasser und Eis müßten aufgrund ihrer unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften als unterschiedliche Stoffe betrachtet werden, der mißverstet die logische Struktur von Stoffbegriffen. Im folgenden Abschnitt möchte ich kritisch auf Weningers Ansatz zur Präzisierung chemischer Grundbegriffe eingehen [31], anhand dessen sich nicht nur das soeben genannte Mißverständnis, sondern auch eine Reihe der in den vorherigen Abschnitten behandelten Fragen zusammenfassend diskutieren lassen.

8. Kritische Diskussion von Weningers Ansatz zur Klärung chemischer Grundbegriffe

8.1 Ist Wasser ein Stoff oder eine Stoffklasse?

In seinem Aufsatz "Grundsätzliches zur Verwendung von Stoff- und Stoffklassennamen" [31] hat Weninger nicht nur aus chemiedidaktischen Gründen für eine Präzisierung wichtiger chemischer Grundbegriffe plädiert und seinen eigenen Ansatz argumentativ zu begründen versucht. Seine Hauptthese lautet, daß man neben dem physikalischen Stoffbegriff keinen zusätzlichen chemischen Stoffbegriff verwenden sollte, sondern daß verschiedene Aggregatzustände und Modifikationen als verschiedene Stoffe betrachtet werden müßten, die zu Stoffklassen zusammengefaßt werden können. So seien Wasserdampf, (flüssiges) Wasser und Eis verschiedene Stoffe, die zu der Stoffklasse Dihydrogenoxid zusammengefaßt werden; einen von den Aggregatzuständen und Modifikationen abstrahierenden (chemischen) Stoff Wasser lehnt er strikt ab. Weninger begründet seine These aus (a) "phänomenologischer", (b) "logischer" und (c) "sachlicher Sicht".

zu a: Wasserdampf, (flüssiges) Wasser und Eis seien zwar chemisch ununterscheidbar, anhand von physikalischen Eigenschaften seien sie jedoch als gasförmige, flüssige und feste Stoffe eindeutig zu unterscheiden und daher auch als verschiedene Stoffe zu behandeln. Eine Gleichbehandlung würde hingegen die erlebbaren phänomenalen Unterschiede negieren, und Weninger weist mit Recht darauf hin, daß Lernenden hierbei auf eine Verständniskluft stoßen. Aber er übersieht sowohl die Möglichkeit als auch die Notwendigkeit, diese Kluft auf dem Weg zur wissenschaftlichen Stoffbeschreibung und -klassifikation zu überbrücken. Wir lernen die Ausdrücke "fest" und "flüssig" im Alltag zur Beschreibung von tastbaren Stoffeigenschaften eines Gegenstandes unter denselben gewohnten Normalbedingungen. Der Übergang zu wissenschaftlichen Erfahrungsbegriffen besteht aber u.a. darin, auf die Kontextbedingtheit aufmerksam zu werden und die relevanten kontextuellen Bedingungen zu explizieren, wozu insbesondere Druck und Temperatur gehören. Wenn wir zwei Stoffproben bzgl. einer Eigenschaft vergleichen wollen, dann müssen wir die Untersuchungen auch unter denselben kontextuellen Bedingungen durchführen, weil wir sonst verschiedene Begriffe verwenden; und dann werden wir für zwei chemisch ununterscheidbare (zunächst) flüssige und feste Stoffproben auch keine physikalischen Unterschiede mehr finden. Wenn man hingegen, wie Weninger, die kontextuellen Bedingungen ausklammert, dann müßte man auch konsequenterweise beliebig viele Stoffe der Stoffklasse Dihydrogenmonoxid physikalisch unterscheiden, denn für alle physikalischen Größen wie Viskosität, Dichte, Brechungsindex etc. erhält man (auch innerhalb eines Aggregatzustandes) beliebig viele verschiedene Meßwerte mit Änderung der kontextuellen Bedingungen. M.a.W.: "fest" und "flüssig" sind ohne Angabe der kontextuellen Bedingungen überhaupt keine (wissenschaftlich-)physikalischen Stoffprädikate; bildet man hingegen (wissenschaftlich-)physikalische Stoffbegriffe, dann fällt die physikalische Stoffunterscheidung mit der chemischen zusammen. Weningers "phänomenologisches" Argument beruht also auf einem Mißverständnis der logischen Struktur von physikalischen Stoffbegriffen.

zu b: Aus "logischer Sicht" meint Weninger: "Es liegt aber nicht nur keine Notwendigkeit, sondern vor allem auch keine logische Möglichkeit vor, diese beiden Stoffe [flüssiges Wasser und Eis] als einen einzigen, chemisch identischen, Stoff zu betrachten." (S. 82) Die erste Teilbehauptung wurde bereits widerlegt: Wenn man auf die logische

Struktur der physikalischen Stoffbegriffe achtet, dann muß man (flüssiges) Wasser und Eis notwendigerweise als physikalisch ununterscheidbare Stoffe betrachten. Da die logische Notwendigkeit die logische Möglichkeit impliziert, ist damit eigentlich auch die zweite Teilbehauptung widerlegt.

Mit "logischer Unmöglichkeit" scheint Weninger hier allerdings etwas anderes im Auge zu haben. Er meint, aus der Aussage I «Flüssiges Wasser und Eis sind als derselbe (chemische) Stoff Wasser zu betrachten» (s.o.), folge die Aussage II «Der Begriff des (chemischen) Wassers sollte also keine Unterbegriffe haben» (S. 81). Daraufhin widerlegt er Aussage II, indem er zeigt, daß (flüssiges) Wasser und Eis als Unterbegriffe des chemischen Begriffs Wasser aufgefaßt werden können, und glaubt damit die "logische Unmöglichkeit" von Aussage I bewiesen zu haben. An dieser Argumentation ist nicht nur der formale Schlußmodus fragwürdig, es ist insbesondere überhaupt nicht einsichtig, daß Aussage II aus Aussage 1 folgt. Denn zu dem Stoffbegriff Wasser kann man natürlich beliebig viele Unterbegriffe bilden (z.B. Wasser mit der Temperatur 10° C und dem Druck 20 bar; indem man also den Begriff Wasser durch Werte der Zustandsgrößen Druck und Temperatur spezifiziert). Die entscheidende Frage ist aber, ob solche Unterbegriffe stoffklassifikatorisch relevant sind, was offensichtlich nicht der Fall ist.

zu c: Weningers Argument aus "sachlicher Sicht" erfolgt vor dem Hintergrund einer realistischen Interpretation der Modellbildung der klassischen Chemie, d.h. Weningers "Sachen" sind klassische Atome, Moleküle und Ionen, die er zusammen mit dem Namen "Henaden" bezeichnet. Henaden sind die Bausteine von Stoffportionen. Stoffportionen, die durch dieselbe Henadenart aufgebaut sind, gehören nach Weninger zu derselben Stoffklasse; Stoffportionen, die außerdem durch die gleichen (räumlichen) Beziehungen der Henaden zueinander aufgebaut sind gehören zu derselben Stoffart: "Da die stofflichen Eigenschaften der Stoffportionen nicht allein durch die Art der Aufbauhenaden, sondern auch durch deren gegenseitige Beziehungen bestimmt werden, ist es sachgerecht, zwei Stoffportionen nur dann als stofflich gleich zu betrachten, wenn sie nicht nur aus Henaden der gleichen Art aufgebaut sind, sondern wenn auch die Beziehungen zwischen den Henaden gleich sind. Wasser und Eis sind damit [...] auch aus sachlichen Gründen als verschiedene Stoffe zu betrachten" (S. 81), da "sowohl Wasser wie auch Eis [...] aus H₂O-Molekülen aufgebaut sind [...] und] zwischen den Molekülen im Wasser andere Beziehungen bestehen als zwischen denen im Eis". (S. 80)

Gegen eine definitorische Zuordnung wäre im Rahmen des "Henadenmodells" im Prinzip nichts einzuwenden; fragwürdig sind allerdings erstens die Prämisse, daß sich Eis und (flüssiges) Wasser durch ihre physikalischen Stoffeigenschaften unterscheiden: das wurde oben bereits ausführlich widerlegt; zweitens die Zuordnungsrichtung und damit der "sachliche" Bezug der Argumentation und drittens die Tauglichkeit des Henadenmodells. Wir erwarten zwar, daß ein Modell einer Erfahrungswissenschaft möglichst alle empirischen Unterscheidungen adäquat widerspiegelt, aber doch wohl kaum, daß durch das Modell festgelegt wird, welche empirischen Unterscheidungen zu treffen sind. Als sachliche Ebene der Erfahrungswissenschaft Chemie wären also nicht die Henaden, sondern die Stoffportionen (besser: -proben) zu bezeichnen, an denen die stofflichen Untersuchungen durchgeführt werden. Wenn man daher auf der Ebene der empirischen Stoffklassifikation zu dem Ergebnis gelangt, daß die Unterscheidung zwischen Eis und (flüssigem) Wasser als getrennten Stoffen auf stoffklassifikatorisch untauglichen empirischen Begriffen beruht (s.o.), dann muß man ein Modell, das diese Unterscheidung besonders

heraushebt, als verbesserungsbedürftig betrachten. M.a.W.: Anstelle einer Begründung für seine fragwürdige Stoffunterscheidung liefert Weninger Indizien dafür, daß an seinem Henadenmodell etwas nicht stimmt.

Mit dem intendierten Bezug auf eine Sachebene wechselt Weninger ausdrücklich vom chemiedidaktischen zum fachlichen Kontext. Aus chemisch-physikalischer Sicht ist das Henadenmodell aber als völlig unzureichend einzustufen. Henaden werden von Weninger im Stile der klassischen Korpuskulartheorien als einheitliche, abzählbare und konstitutive Bausteine der Stoffportionen einer Stoffklasse (in seinem Sinne) betrachtet. Das ist nicht nur unvereinbar mit den Grundprinzipien der Quantenmechanik, (20) es widerspricht auch allen physiko-chemischen Untersuchungen, wonach z.B. Bindungswinkel und -längen von Molekülen sowie Dissoziations- bzw. Aggregationsgleichgewichte als abhängig von den Zustandsgrößen aufgefaßt werden müssen. Daß das Henadenmodell für viele Phänomene untauglich ist und daher erst recht nicht mit der Sachebene verwechselt werden darf, wird man sogar schon in Anfängerkursen der Chemie deutlich machen müssen, wenn man z.B. das Ionenprodukt des Wassers und damit den wichtigen Begriff des pH-Werts einführen will; denn nun "darf" Wasser auf einmal nicht mehr ausschließlich aus H₂O-Henaden bestehen.

Der Grund für die begrenzte Tauglichkeit des Henadenmodells liegt nicht nur in den groben Vereinfachungen, sondern in der kategorialen Differenz zwischen der stofflichen Ebene und der Modellebene. Das Henadenmodell ist (als Abkömmling der klassischen Korpuskularmetaphysik) aus dem substantialistischen Denkschema entworfen; es liefert zu jedem Stoff ein statisches Bild von Substanzen (Henaden) und ihren strukturellen Beziehungen zueinander. Ein Stoff ist hingegen ein Bündel von kontextbedingten dynamischen und relationalen Stoffbegriffen. Mit einem substantialistischen Schema kann man die stofflichen Verhältnisse weder adäquat beschreiben noch auf einer Modellebene repräsentieren. Die chemischen Modelle zur Repräsentation stofflicher Verhältnisse operieren in der Tat auch nicht mit substanzartigen Henaden, sondern mit Modellentitäten, die durch ihre Wechselwirkungspotentiale (also durch dynamische Relationen) gekennzeichnet sind und die nur in grober, jedem Chemiker stets bewußter und in für manche Fragen völlig untauglicher Vereinfachung als unveränderlich und kontextunabhängig aufgefaßt werden.

8.2 Probleme der Begriffsentwicklung

Die Chemiedidaktik und die Wissenschaftstheorie der Chemie stehen, wie bereits einleitend erwähnt, vor dem gemeinsamen Problem, in die historisch gewucherte und kaum reflektierte chemische Begrifflichkeit durch systematische Begriffsentwicklungen einige Ordnung einzuführen. Daher sind Weningers fachdidaktisch motivierte Bemühungen zur Klärung wichtiger chemischer Begriffe besonders lobenswert, auch wenn sie das gesteckte Ziel kaum zu erreichen vermögen. Er unterscheidet:

1. Henade: ein Oberbegriff für Atom, Molekül und Ionenelementargruppen (S. 80);
2. Stoffportion: ein Aggregat von Henaden bestimmter Anzahl in einer bestimmten Aggregationsform bzw. in einer bestimmten (räumlichen) Beziehung zueinander (S. 84 u.a.);
3. Stoff: "ein Abstraktum, [...] [zu dem ich] nur gelange, wenn ich von der mit einer (allein konkreten) [...] [Stoffportion] immer mitgegebenen Größe der Portion absehe" (S. 84);

4. Stoffklasse: "ein Abstraktum, eben die Klasse aller Stoffe, die ausschließlich aus [...] [Henaden einer bestimmten Sorte] aufgebaut sind" (S. 85) in Absehung der jeweiligen (räumlichen) Beziehungen der Henaden zueinander (S. 84).

Weninger liefert zwar nicht explizit eine Begriffsentwicklung, eine solche läßt sich aber entsprechend der angegebenen Reihenfolge aus seinen Ausführungen leicht rekonstruieren, zumal seine Argumentation stets implizit auf eine solche Bezug nimmt. Entscheidend ist dafür zunächst sein Standpunkt, daß die Grundbegriffe im "realiter Existierenden" oder "Konkreten" (beide Begriffe werden weitgehend gleichbedeutend verwendet) fundiert sein müssen, während die abgeleiteten Begriffe durch Abstraktion gewonnen werden. Eine "Sache" ist nach Weninger konkret, wenn man mit ihr "umgehen, sie handhaben, manipulieren kann." (S. 84) Und er meint: "Konkret im hier gemeinten Sinne sind [...] nur die Henaden und die aus ihnen gebildeten Henadenaggregate." (ebd.) Nimmt man Henade als Grundbegriff, dann gelangt man zum Begriff der Stoffportion, indem man die Anzahl und die räumliche Beziehung der Henaden zueinander (ihre Aggregationsform) hinzufügt: Eine Stoffportion ist eine bestimmte Aggregation von Henaden bestimmter Anzahl, wobei die Stoffportionsgröße durch die Henadenanzahl bestimmt ist. Daraus wird der Stoffbegriff durch Abstraktion von der Portionsgröße abgeleitet, die nach Weninger [32] gleichbedeutend mit der Henadenanzahl ist. Der Begriff Stoffklasse läßt sich anschließend aus dem Stoffbegriff durch Abstraktion von der Beziehung der Henaden zueinander entwickeln.

So plausibel diese Begriffsentwicklung auf den ersten Blick erscheinen mag, unter wissenschaftstheoretischen Gesichtspunkten ist sie kaum haltbar, weil sie zirkulär ist. Wenn man von dem Begriff Stoffportion (Henaden einer bestimmten Anzahl in bestimmter Beziehung zueinander) die Anzahl und die Beziehung abstrahiert, dann bleibt lediglich der Begriff Henade übrig, der als Grundbegriff vorausgesetzt wurde. Der Begriff Henade ist folglich nach der rekonstruierten Begriffsentwicklung gleichbedeutend mit dem nach Weninger "doppelt abstrakt(en)" (S. 84) Begriff Stoffklasse. Die Wahl des theoretischen Begriffs Henade scheint daher als Grundbegriff ungeeignet zu sein. Vom methodologischen Standpunkt ist dieses Ergebnis nicht verwunderlich, denn die Zuordnung von Modellentitäten wie Henaden zu Stoffklassen kann nur auf der Grundlage einer empirischen Stoffklassifikation erfolgen und nicht umgekehrt, wie Weninger es von einem metaphysischen Standpunkt aus versucht. Das Pochen auf der "Realität" der Modellentitäten befreit die zugeordneten Begriffe nicht von ihrer Abstraktheit, denn erstens ist Abstraktheit keine Eigenschaften von Sachen, sondern von allein Begriffen, und zweitens ist natürlich jeder Begriff abstrakt, wobei sich der Grad der Abstraktheit nur innerhalb eines Begriffssystems angeben läßt. In einer Begriffsentwicklung darf die begriffliche Ebene nicht mit der ontologischen Ebene verwechselt werden. Daher kann das hartnäckige Pochen auf der "Realität" auch keinen didaktischen Beitrag zur Begriffsvermittlung liefern, sondern es artikuliert lediglich eine metaphysische Position für einen philosophischen Diskurs, in der alle Begriffe bereits als bekannt vorausgesetzt sind. Was sich wissenschaftstheoretisch als Zirkularität erweist, äußert sich fachdidaktisch in einer Verständniskluft, weil diejenigen Begriffe immer schon vorausgesetzt werden, die erst erklärt werden sollen.

In der rekonstruierten Begriffsentwicklung von Weninger habe ich bewußt die experimentelle Stoff erfahrung ausgeklammert. Würde der Begriff der Stoffportion nicht nur als Henadenaggregat, sondern zugleich auch als Bündel experimenteller Stoffeigen-

schaften eingeführt, dann wäre die aufgewiesene Zirkularität zwar vermieden, aber damit würde eben auch ein ungewollter Bruch in der Begriffsentwicklung auftreten. Mit dem gewählten Ansatz scheint es neben Zirkularität und Bruch keine Alternative zu geben. Daher mag verständlich sein, daß Weninger hier – kontraproduktiv zu seinem eigenen Bemühen um begriffliche Klarheit – unklar bleibt: Einerseits verwendet er die Ausdrücke "Stoffportion" und "Henadenaggregat" ständig gleichbedeutend bzw. er erläutert den ersten durch den zweiten wie in der obigen Rekonstruktion, (21) und andererseits fordert er, "daß die Kontinuumssprechweise von den Stoffportionen und deren stofflichen Eigenschaften und die Diskontinuunssprechweise von den Henadenaggregaten und deren Struktureigenschaften zu zwei grundverschiedenen Deutungsbereichen gehören" (S. 94), die deutlich voneinander zu trennen seien. Im ersten Fall bleibt die Begriffsentwicklung wie gesagt zirkulär; und im zweiten Fall einer strikten Trennung von Bedeutungsbereichen kann die Rede von Henaden voraussetzungsgemäß gar nichts zur Klärung des Stoff- und Stoffklassenbegriffs beitragen. In beiden Fällen bleibt Weninger jedenfalls weit hinter seinem selbst gesteckten Ziel einer Begriffsklärung zurück.

Weningers Begründungsversuche eines allgemeinverbindlichen "physikalischen" Stoffbegriffs berücksichtigen weder physikalische Stoffeigenschaften, noch sind sie konsistent mit der modernen Quantenmechanik und mit physiko-chemischen Erkenntnissen; sie wurzeln ausschließlich in der substantialistischen Denkweise, die mit der Physik nur sofern etwas zu tun hat, als sie in der Tat der Korpuskularmetaphysik der klassischen Mechanik zugrunde lag. Vor diesem Hintergrund wird verständlich, daß seine von korpuskularen Substanzen ausgehende Begriffsentwicklung zirkulär bleibt und gar nicht bis zu Stoffbegriffen reichen kann. Wenn er behauptet, daß "die Frage nach dem Stoff als eines selbständig existierenden Eigenschaftsträgers [d.h. einer Substanz im philosophischen Sinne] eine Scheinfrage ist" ([34]: S. 16), so ist diese Behauptung zwar richtig. Aber sie ist nicht deswegen richtig, weil wir "mit Hilfe eines Übermikroskops [...] keinen Stoff 'Silber', sondern nur Ag-Atome" (ebd.) sehen würden, sondern weil Stoffe nicht in dem substantialistischen Denkschema erfaßt und weil stoffliche Eigenschaften weder im Mikroskopischen verborgen sind noch in passiver Wahrnehmung erkannt werden können. Da jede stoffliche Erfahrung an bestimmte Interaktionen in bestimmten Kontexten gebunden ist, können wir auch nur in Ausnahmefällen zwei stoffliche Erfahrungen gleichzeitig an derselben Stoffprobe machen. Brennbarkeit, Wasserlöslichkeit, Schmelztemperatur, Siedetemperatur etc. erfordern ganz unterschiedliche Untersuchungskontexte, die sich nicht gleichzeitig realisieren lassen. Wenn wir solche Stoffeigenschaften in ein klassifikatorisches Systems zusammenfassen, so konstruieren wir damit keine "selbständig existierenden Eigenschaftsträger", sondern Bündel oder Komplexe von Stoffeigenschaften. Ein Stoff ist nicht "das, woraus ein Ding besteht" (ebd.), sondern ein solches Bündel uneigentlicher Eigenschaften. Und woraus diese Bündel besteht, hängt ab von unserer Stoffperspektive, die wir ausgehend von unserer Alltagsstofferfahrung durch Explizierung, Differenzierung, Erweiterung und klassifikatorische Systematisierung der stofflichen Erfahrungsbegriffe wissenschaftlich präzisieren können.

Endnoten

(*) Herrn Buck danke ich für wertvolle Hinweise, die mich auf verwandte Probleme von Chemiedidaktik und Wissenschaftstheorie der Chemie aufmerksam gemacht haben.

(2) Zu den Aufgabenfeldern der Fachdidaktik rechne ich im folgenden nicht nur den Schul-, sondern

auch den Hochschulbereich und klammere unter dem (einseitigen) Gesichtspunkt der Wissensvermittlung bewußt alle pädagogische Aspekte aus.

(3) So schreibt z.B. H. Pfundt: "Bei der Suche nach den Lernvoraussetzungen stellte sich auch heraus, daß manche Schwierigkeiten im Unterricht darauf beruhen, daß bestimmte begriffliche und terminologische Klärungen von der Chemie bisher nicht geleistet worden sind." ([33], Lehrerbuch, Einführung in den Lehrgang, S. 33, Hervorh. i.O.).

(4) Anstelle einer seitenfüllenden Liste von chemiedidaktischen Arbeiten, die sich erkenntnis- und wissenschaftstheoretischen Fragen widmen (wofür insbesondere *chimica didactica* stets aufgeschlossen war), verweise ich auf [8], [11], [1], [10], [17], die das Verhältnis zwischen Fachdidaktik und Wissenschafts- und Erkenntnistheorie aus unterschiedlichen Blickwinkeln thematisieren.

(5) Diese Problematik spiegelt sich unmittelbar in der die 70er und 80er Jahre dominierenden chemiedidaktischen Kontroverse über die Einführung der Atomvorstellung wider: vgl. z.B. [6], [35], [33], [28], [2], [4], [5], [29], [30], [12], [13], [25], [19]. In der amerikanischen Chemiedidaktik wurde sogar schon eine "Renaissance der deskriptiven Chemie" angekündigt; vgl. [36] sowie weitere Aufsätze in diesem Band.

(6) In der Erkenntnistheorie wird die experimentelle Erkenntnis i.d.R. mit "gezielter Beobachtung" gleichgesetzt und damit unter die passivistischen Modelle der sinnlichen Wahrnehmung subsumiert, wobei man mit der "Zielrichtung" meist die Überprüfung einer bestimmten Hypothese meint, ohne daß der Handlungscharakter der experimentellen Erkenntnis berücksichtigt wird (vgl. [21]). Das trifft auch weitgehend noch zu auf die Aufsätze in [7].

(7) Der Begriff Stoffprobe besitzt auf den ersten Blick eine gewisse Verwandtschaft mit Weningers Begriff der Stoffportion ([28]-[34]). Während letzterer jedoch einer ontologischen Denkungsart entspringt, weil er den Gegenstand als Teil (Portion) eines zugrundeliegenden Ganzen und damit immer auch schon als größenartig faßt, wird mit "Stoffprobe" vom erkenntnistheoretischen Standpunkt aus ein Gegenstand der stofflichen Erfahrung bezeichnet, an dem stoffliche Untersuchungen durchgeführt werden sollen, die ja gerade von der Größenartigkeit des Gegenstandes abstrahieren. Auf diese Problematik werde ich in Abschnitt 8 noch ausführlich eingehen.

(8) Der griechische Begriff *empeiria* hat im neuzeitlichen Empirismus eine gravierende Bedeutungsverschiebung erfahren hat. "Empeiria" bedeutete ursprünglich ein Auf-die-Probe-stellen, "Probieren" oder "Testen" würden wir heute sagen; *empeiria* leitet sich ab von *peira*: Probe; bei Homer wird es verwendet im Sinne von Kraftprobe in einem Wettkampf (vgl. [16]: 169). Erst im 17. Jahrhundert reduziert dann Locke im Geiste der mechanischen Philosophie die äußere (sinnliche) Erfahrung auf eine passive Rezeption von Sinneseindrücken, wobei "Eindruck" ganz mechanistisch zu lesen ist (vgl. [21]).

(9) Zur Vermeidung terminologischer Verwirrung halte ich hier an dem Ausdruck "Eigenschaften" fest, obwohl sich in den beiden folgenden Abschnitten herausstellen wird, daß man nicht mehr von Eigenschaften im ursprünglichen Sinne sprechen kann.

(10) Auf ähnliche Weise erwerben auch ten Voordes Schüler einen chemischen Stoffbegriff [27].

(11) Der philosophische Substanzbegriff ist nicht zu verwechseln mit dem Begriff der chemischen Substanzen, denen gerade alle Substanzcharakteristika im substanzmetaphysischen Sinne fehlen.

(12) Einen Versuch zur "Aufwertung" des Prozessualen unternimmt auch Buck [3]. Seine Konstruktion der (Stoff-)Begriffe Material, Stoff, Element als "Das-in-der-Veränderung-Unveränderliche" geht zwar primär von einer Systematik der Veränderungsprozesse (mechanische Verformung, Änderung des Aggregatzustandes, chemische Reaktion) aus. Doch durch seine (an Aristoteles erinnernde) Bestimmung des Stofflichen als das Beharrliche der jeweiligen Veränderung - und nicht als Inbegriff der Veränderungsweisen - bleibt er dem substantialistischen Denken verhaftet.

(13) Als chemiehistorisches Beispiel einer unfruchtbaren Überformung der dynamisch-relationalen Perspektive durch substantialistische Denkwänge kann die über zeitausendjährige Geschichte der Prinzipienedeutung der chemischen Elemente dienen. Ob sich eine Reformulierung der Prinzipienlehre als didaktische Brückenfunktion zwischen stofflicher Erfahrung und atomistischer Denkweise, wie Schlöpke [18] es vorschlägt, als geeignet erweisen kann, wage ich daher zu bezweifeln.

(14) Zu dieser Einsicht gelangte bereits vor über 150 Jahren Hegel, als er in verallgemeinernder Weise das "chemische Objekt" vom "mechanischen Objekt" unterschied: "bei dem chemischen [Objekt i.U. zum mechanischen Objekt] dagegen gehört die Bestimmtheit, somit die Beziehung auf Anderes und die Art und Weise dieser Beziehung seiner Natur an." ([9]: S. 429).

(15) Zur chemischen Charakterisierung wurde traditionell ein Satz von Nachweisreagenzien verwendet, die als stofflich eindeutig bestimmt galten.

(16) Diese Einsicht ist meines Wissens nur in ten Voordes didaktischem Konzept [27] ansatzweise

umgesetzt worden, indem er z.B. die Aufgabe stellt: "Könnte man das Mischen/nicht-Mischen von zwei Flüssigkeiten eine Stoffeigenschaft nennen? Eine Eigenschaft des Gegenstandes?" und wenn er fordert: "Die Veränderung selbst soll in den Blick genommen und als Relation benannt werden." (ebd., S. 129/131; vgl. auch [23]).

(17) Die Anwendung der operationalen Kriterien bedarf allerdings einer gewissen Sorgfalt; vgl. die Diskussion von Problemfällen der reinen Stoffen in [24].

(18) Als Beispiele für die Ausdifferenzierung der stofflichen Unterscheidungskriterien seien die Unterscheidungen von entanomererenreinen und isotoopenreinen Stoffe genannt, wobei die letztere für die meisten chemischen Probleme bereits eine Überdifferenzierung darstellt.

(19) So ließen sich die z.B. ursprünglich nur physikalisch unterscheidbaren enantiomerenreinen und die isotoopenreinen Stoffproben erst später auch chemisch unterscheiden.

(20) Eine chemische Bindung wird z.B. in der Chemie nicht als Aggregation von unveränderlich bleibenden Henaden, sondern allenfalls durch Superposition der (Henaden-)Wellenfunktionen beschrieben, was selbst schon eine Vereinfachung im Rahmen des Valence-Bond-Modells darstellt; nach den Quantenstatistiken wären alle gleichartigen Henaden ununterscheidbar und damit auch nicht mehr abzählbar; usw.

(21) Z.B. S. 84: "Die Moleküle eines Aggregates (einer Stoffportion) ..."; "... mit einer Stoffportion bzw. einem Henadenaggregat ..."; nachdem die Klasse der konkreten Sachen zunächst durch die Klassen der Henaden und Henadenaggregate bestimmt wird, werden einfach auch die Stoffportionen zu den konkreten Sachen gerechnet; usw.

Literatur

- [1] BUCK, P.: "Erkenntnistheoretische Zusammenhänge als Lerninhalte des Chemieunterrichts", *chimica didactica*, 4 (1978), 61-73.
- [2] BUCK, P.: "Ein vierter psychogenetisch-didaktischer Zugang zum Atombegriff", *chimica didactica*, 5 (1979), 201-214.
- [3] BUCK, P.: "'Material', 'Stoff', 'Element'. Von der Ausblendung des Prozessualen in der Chemie", *chimica didactica*, 11 (1985), 27-44.
- [4] DAHLMANN, W.: "Eine vergleichende Analyse neuerer Arbeiten zur Einführung in die Atomvorstellung", *chimica didactica*, 6 (1980), 193-214.
- [5] DAHLMANN, W.: "Eine spekulative Einführung in die Atomvorstellung ...", *chimica didactica*, 7 (1981), 27-56.
- [6] Der Chemieunterricht, 1 (1970), H. 1., "Atommodelle im Chemieunterricht".
- [7] Der Chemieunterricht, 15 (1984), H. 2: "Das Experiment im Chemieunterricht".
- [8] EWERS, M.: "Relevanz der Wissenschaftsgeschichte für die Naturwissenschaftsdidaktik", *chimica didactica*, 2 (1976), 185-195.
- [9] HEGEL, G.W.F., Werke Bd. 6: Wissenschaft der Logik II, Frankfurt/M. 1986.
- [10] JANICH, P.: "Methodische Ordnung als didaktisches Prinzip der Naturwissenschaften?", *chimica didactica*, 7 (1981), 177-188.
- [11] KIRCHER, E.: "Einige erkenntnistheoretische und wissenschaftstheoretische Auffassungen und deren mögliche Auswirkungen auf die Fachdidaktik der Naturwissenschaften", *chimica didactica*, 3 (1977), 61-79.
- [12] KIRCHER, E. et al.: "Atommodelle im Unterricht", *chimica didactica*, 8 (1982), 127-142.
- [13] PFUNDT, H.: "Ein Weg zur Atomhypothese", *chimica didactica*, 8 (1982), 143-156.
- [14] POSER, H.: Stichwort "rationale Rekonstruktion", in: J. Speck (Hg.), *Handbuch wissenschaftstheoretischer Begriffe*, Bd. 3, Göttingen 1980, S. 555-556.
- [15] PSARROS, N.; RUTHENBERG, K.; SCHUMMER, J. (Hg.), *Philosophie der Chemie - Bestandsaufnahme und Ausblick*, Würzburg 1994.
- [16] SCHADEWALDT, W., *Die Anfänge der Philosophie bei den Griechen*, Frankfurt/M. 1978.
- [17] SCHARF, V.: "Zum Problem der Verständigung zwischen Laien (Schülern) und Fachleuten aus dem Bereich der Chemie", *Siegener Studien*, 38 (1985), 47 ff.
- [18] SCHLÖPKE, W.-I.: "Zerlegungsdenken und Elementbegriff" *chimica didactica*, 11 (1985), 3-26.
- [19] SCHLÖPKE, W.-I.: "Die philosophischen Annahmen (Postulate) der Atomtheorie und ihre Bedeutung bei der Behandlung der Atomhypothese im Chemieunterricht", *chimica didactica*, 13 (1987), 89-116.
- [20] SCHUMMER, J., *Pragmatischer Referenzrealismus, Referenzmethodologie und Chemie. Wissen-*

schaftstheoretische Untersuchungen der Chemie im Anschluß an Rom Harrés 'Varieties of Realism', Karlsruhe 1994 (Dissertation).

- [21] SCHUMMER, J.: "Die Rolle des Experiments in der Chemie", in: P. Janich, N. Psarros (Hg.), Das chemische Denken, Mannheim 1994.
- [22] SCHUMMER, J.: "Die philosophische Entstofflichung der Welt", *chimica didactica*, 21 (1994), 3-19.
- [23] van SPRANG, O.; ten VOORDE, H.: "Stoffmenge, Anzahl und Erfahrungskontext", *chimica didactica*, 12 (1986), 149-165.
- [24] TIMMERMANS, J., *The Concept of Species in Chemistry*, New York 1963.
- [25] ten VOORDE, H.: "Die Kluft des Nicht-verstehen-könnens: Ein Problem des Unterrichts", *chimica didactica*, 9 (1983), 138-175.
- [26] ten VOORDE, H.: "Der chemische Elementbegriff als Ergebnis eines Wechsels der Betrachtungsweise", *chimica didactica*, 10 (1984), 99-116.
- [27] ten VOORDE, H., "Die Überbrückung der Kluft des Nicht-verstehen-könnens: Eine Aufgabe des Unterrichts", *chimica didactica*, 13 (1987), 117-148.
- [28] WENINGER, J.: "Stoffportion, Monadenaggregat, Monadenmenge und Anzahl", *Der Chemieunterricht*, 10 (1979), H. 2, 6-37.
- [29] WENINGER, J.: "Das Denken im Kontinuum und im Diskontinuum", *MNU*, 35 (1982), 193-200/268-273.
- [30] WENINGER, J.: "Stadien auf dem Weg zu Atomhypothese - eine Entgegnung auf Einwände von Peter Buck", *chimica didactica*, 8 (1982), 222-224.
- [31] WENINGER, J.: "Grundsätzliches zur Verwendung von Stoff- und Stoffklassennamen", *chimica didactica*, 10 (1984), 75-97.
- [32] WENINGER, J.: "Bezeichnet der Name 'Stoffmenge' eine physikalische Größe?", *chimica didactica*, 11 (1985), 151-159.
- [33] WENINGER, J. et al., *Stoffe und Stoffumbildungen. 1. Teil: Ein Weg zur Atomhypothese*, Stuttgart 1979.
- [34] WENINGER, J., *Stoffe und Stoffumbildungen. 3. Teil: Auf dem Weg zu einer Chemie der Aggregate*, Lehrgangsbeschreibung, 33. Unterrichtseinheit, Stuttgart 1988.
- [35] WENINGER, J.; BRÜNGER, H. (Hg.), *Atommodelle im naturwissenschaftlichen Unterricht*, Weinheim-Basel 1976.
- [36] ZUCKERMAN, J.J.: "The Coming Renaissance of Descriptive Chemistry", *Journal of Chemical Education*, 63 (1986), 829-833.