

Philosophie der Chemie

Joachim Schummer

1 Einleitung

1.1 Was ist Chemie?

Die Chemie ist die Wissenschaft der Stoffe und ihrer Umwandlungen ineinander. Die schier unendliche Mannigfaltigkeit stofflicher Erscheinungen und ihre oft radikalen Eigenschaftsänderungen standen in allen Hochkulturen seit alters her im Zentrum naturphilosophischer Fragestellungen und Spekulationen. Lässt sich die Vielfalt auf eine begrenzte Anzahl von Elementen zurückführen, aus denen unsere materielle Welt besteht beziehungsweise einst entstanden sein könnte? Wie lässt sich der radikale Wandel der Stoffe erklären, wenn etwa aus Flüssigem Festes oder Gasförmiges wird, aus brennendem Holz Wärme, Rauch und Asche, aus Gesteinen unter Einwirkung von Hitze glänzende Metalle entstehen, aus Nährstoffen ein Lebewesen heranwächst oder bestimmte Stoffe einen kranken Körper in einen gesunden verwandeln? Sind den stofflichen Umwandlungen prinzipielle Grenzen gesetzt, oder lässt sich mit den richtigen Zutaten und dem entsprechenden Wissen jeder beliebige Wunschstoff herstellen?

Die Chemie ist experimentelle Laborwissenschaft im prototypischen Sinne, denn bis weit ins 19. Jahrhundert waren Labore Arbeitsstätten chemischen Experimentierens, bevor andere Disziplinen diesem Beispiel folgten. Ihre zentralen Methoden sind bis heute die der chemischen Analyse und Synthese: die Bestimmung der elementaren Bestandteile eines Stoffes und seiner inneren Konstitution und die Reaktion bekannter Ausgangsverbindungen zur Bildung neuer Stoffe, die wiederum Gegenstand der Analyse werden. Durch die beständige Verfeinerung beider Methoden kennt die Chemie inzwischen über 100 Millionen verschiedene chemische Substanzen, die sie zum größten Teil nicht durch Naturisolierung, sondern durch Synthese gewonnen hat. Auf der Basis charakteristischer Eigenschaften erfasst sie

diese in einer an Trennschärfe und Tiefe einzigartigen Klassifikation, die den Umfang aller wissenschaftlichen Taxonomien um ein Vielfaches übertrifft. Zugleich untersucht sie mit quantitativen und chemisch-analytischen Methoden chemische Prozesse, die im Labor als gezielte Synthesen durchgeführt werden, und typologisiert die dabei ablaufenden Reaktionsschritte in einer weiteren Klassifikation, die inzwischen mehr als eine Millionen Reaktionstypen unterscheidet.

Die experimentellen Studien und Klassifikationen der Chemie standen über ihre gesamte Geschichte hinweg in einem Anwendungs- und Inspirationskontext. Denn für eine Laborwissenschaft ist die Übertragung des im Labor erworbenen Wissens auf den Außenbereich stets eine Anwendung, unabhängig davon, ob es sich dabei um ein Verständnis natürlicher oder technischer Phänomene handelt. Neben den Kernbereichen der anorganischen, organischen und physikalischen Chemie, die selber wiederum nach Stoffgruppen, Fragestellungen und Untersuchungsmethoden in zahlreiche Teilgebiete aufgefächert sind, umfasst das Fach daher heute Hunderte von Subdisziplinen, die jeweils auf ein bestimmtes Anwendungsfeld spezialisiert sind. Dazu gehören einerseits die verschiedenen Bereiche und Aspekte der Natur, die beispielsweise von der Bio-, Geo-, Atmosphären-, Umwelt- und Astrochemie untersucht werden. Jeder dieser Bereiche umfasst überdies eine historische Dimension. Beispielsweise beschäftigt sich die kosmologische Chemie mit der ursprünglichen Bildung von Elementen und einfachen Stoffen, die Petrochemie mit Gesteinsbildungen, die präbiotische und evolutionäre Chemie mit der Entstehung und Entwicklung von organischen Stoffsystemen und Lebensformen und so weiter; zusammengenommen schreiben sie dabei eine chemische Naturgeschichte (Lamza 2014). Zur Chemie gehört aber auch das Studium aller Techniken, die mit der Herstellung oder Verarbeitung von Stoffen und Materialien befasst sind, was heute den größten Teil der produzierenden Industrietätigkeit ausmacht; also neben den klassischen Feldern der Pharmazie, Metallurgie, Glas- und Papierherstellung die Herstellung von Grund-, Werk-, Farb-, Bau-, Kleb-, Verpackungstoffen und so weiter, ein rasant wachsender Anteil der Nahrungsmittelindustrie und weite Teile dessen, was heute Nanotechnologie genannt wird. Weil alle anderen Natur- und Technikwissenschaften sich mit materiellen Systemen beschäftigen, die stoffliche Eigenschaften haben und chemischen Veränderungen unterliegen, ist die Chemie wie keine andere Wissenschaft interdisziplinär verzahnt, was historisch zu unzähligen Brückendisziplinen geführt hat und gerade in den angewandten Feldern beständig neue Herausforderungen bildet.

Vor diesem Hintergrund überrascht es nicht, dass die Chemie – gemessen an der Anzahl der Publikationen, die durch *Chemical Abstracts* im Vergleich zu anderen disziplinären Abstract-Organen erfasst werden – die bei Weitem größte Wissenschaft ist; lange Zeit war sie sogar größer als alle anderen Naturwissenschaften zusammen genommen (Schummer 2006). Erst

durch die verstärkte Hinwendung zu traditionell chemisch orientierter Forschung verschiedener anderer Disziplinen in den letzten Jahrzehnten, insbesondere der Biologie zur Biochemie sowie der Physik zur Materialwissenschaft, wurde diese gewaltige Dominanz ein wenig abgeschwächt.

1.2 Die späte Formierung der Chemiephilosophie

Ungeachtet der außerordentlichen Größe der Chemie hat die Gegenwartsphilosophie diese bis vor kurzem fast vollständig ignoriert, und zwar gerade auch in denjenigen Bereichen, die sich selber Wissenschaftstheorie oder Wissenschaftsphilosophie nennen. Durch ihre einseitige Fokussierung auf den relativ schmalen und in vielerlei Hinsicht besonderen Bereich der mathematischen Physik hat die „allgemeine Wissenschaftstheorie“ Fragestellungen, Ansätze und Grundbegriffe formuliert, deren Relevanz für andere Disziplinen nicht immer erkennbar ist. Daher befindet sich auch die Chemiephilosophie, die sich seit etwa 1990 international formiert, noch in einer Phase der Neubesinnung und Sichtung, ob das, was die herkömmliche Wissenschaftstheorie hervorgebracht hat, zum Verständnis der Chemie brauchbar sein könnte oder ob hierzu nicht ganz neue Ansätze entwickelt werden müssen.

Die heute international vorherrschende angelsächsische Wissenschaftstheorie, die im Wesentlichen auf mathematisch oder physikalisch vorgebildete Emigranten des Wiener und Berliner Kreises der 1920er Jahre zurückgeht, konnte ihre Einseitigkeit nur durch einen Physikalismus rechtfertigen, der die Chemie wie alle anderen Wissenschaften lediglich als Anwendungsfall der theoretischen Physik begreift. Ehrgeizige Quantentheoretiker wie Paul Dirac leisteten dem Vorschub durch leichtfertige Behauptungen wie: „Die zugrundeliegenden physikalischen Gesetze für die mathematische Theorie eines großen Teils der Physik und der gesamten Chemie sind vollständig bekannt.“ (Dirac 1929). Eine historisch naive Philosophiegeschichtsschreibung zelebrierte überdies den Siegeszug der Mechanischen Naturphilosophie von Descartes bis Heisenberg/Einstein durch Ausblendung fast aller anderen naturphilosophischen und wissenschaftlichen Strömungen. Die Chemie kam (wie auch andere Disziplinen) bestenfalls in zurechtgerückten *case studies* vor, um für oder gegen das Modell der Theoriewahl von Popper, Lakatos, Kuhn usw. zu argumentieren (van Brakel 1996).

Im Unterschied zur neuen angelsächsischen *philosophy of science* haben sich einige Wissenschaftsphilosophen anderer Länder, meist in Kontinuität des 19. Jahrhunderts, ausführlicher mit der Chemie (und anderen Disziplinen) auseinandergesetzt. Zum Beispiel spielte die Chemie in vielen marxistischen Ländern unter Rückgriff auf entsprechende Thesen in Friedrich Engels Dialektischem Materialismus bis in die 1980er Jahre eine wichtige Rolle (van Brakel/Vermeeren 1981, Laitko 1996). In Frankreich, wo traditionell Chemiker von Antoine Lavoisier bis Pierre Duhem philosophische Debatten mitgeprägt hatten, wurde die *épistémolo-*

logie entscheidend geformt durch chemisch gebildete Philosophen wie Auguste Comte, Émile Meyerson und Gaston Bachelard (Bensaude-Vincent 2009). Auch die deutsche Philosophiegeschichte hat eine reichhaltige Auseinandersetzung mit der Chemie vorzuweisen, von Immanuel Kant und G.W.F. Hegel bis zu Justus Liebig und Wilhelm Ostwald, was in einschlägigen Werken zur Philosophiegeschichte jedoch kaum Berücksichtigung findet.

Trotzdem blieb die Chemiephilosophie auch in den beiden zuletzt genannten Ländern bis Ende des 20. Jahrhunderts eher ein Randphänomen und artikulierte sich zumeist in Beiträgen von Chemikern, Chemiehistorikern und -didaktikern, die darin ein für ihr jeweiliges Fach notwendiges Anliegen sahen. Erst in den späten achtziger Jahren formierten sich daraus zusammen mit chemisch gebildeten Philosophen in verschiedenen Ländern nationale Gruppen, insbesondere in Holland, Italien, Polen, Deutschland und England, die sich bald auch international austauschten und vernetzten. Inzwischen gibt es zwei internationale Fachzeitschriften, *Hyle: International Journal for Philosophy of Chemistry* (seit 1995) und *Foundations of Chemistry* (seit 1999), und eine *International Society for the Philosophy of Chemistry*, die seit 1997 jährliche Sommersymposien ausrichtet. Obwohl die ursprünglichen Impulse alle aus Europa kamen, findet die Professionalisierung des Fachs heute zunehmend in innovationsfreundlichen Ländern statt, insbesondere in den USA, Großbritannien und einigen südamerikanischen Staaten, während es beispielweise an deutschen Universitäten unter den über hundert Wissenschaftsphilosophen inzwischen keinen einzigen Fachvertreter mehr gibt.

Im Folgenden wird, den Vorgaben dieses Bandes entsprechend, kein allgemeiner Überblick über die gegenwärtige Chemiephilosophie geliefert. Stattdessen greife ich exemplarisch zwei Themen heraus: Anhand der Frage nach dem Gegenstandsbereich der Chemie diskutiere ich zunächst das ontologische Verhältnis zwischen Stoffen und Molekülen. Stellvertretend für den erkenntnistheoretisch-methodologischen Themenkomplex behandle ich sodann die Frage nach der Reduzierbarkeit der Chemie auf die Physik. Die durch die Vorgaben bedingte einseitige Fokussierung auf Themen der theoretischen Philosophie versuche ich abschließend durch einen kurzen Überblick über einige praktisch-philosophische Fragestellungen zu korrigieren.

2 Ontologische Fragen am Beispiel der Differenz von Stoffen und Molekülen

Die meisten allgemeinbildenden Lexika definieren die Chemie mit leicht unterschiedlichen Gewichtungen als die Lehre von den Stoffen, Stoffumwandlungen, Atomen und Molekülen. Solche gegenstandsbezogenen Definitionen enthalten zwei voneinander unabhängige ontologische Differenzen. Zum einen bleibt offen, ob die Chemie es primär mit Prozessen (Stof-

fumwandlungen beziehungsweise chemischen Reaktionen) zu tun hat, in denen die Stoffe oder Substanzen nur als temporäre Agentien auftreten, oder ob sie in erster Linie Substanzen studiert, zu deren Eigenschaften auch die Umwandlungsmöglichkeiten gehören. Für beide ontologische Positionen, welche die alte Differenz zwischen Prozess- und Substanzphilosophie fortführen, gibt es gute Argumente. Während die Substanzphilosophie dem Alltagsverstand näher zu liegen scheint, mehren sich in jüngerer Zeit Stimmen für eine prozessphilosophische Position in der Chemie (Earley 1998, van Brakel 1997, Schummer 1998a, Weininger 2000, Stein 2004; zusammenfassend: Schummer 2004a). Zum anderen stellt sich die Frage, ob der eigentliche Gegenstandsbereich der Chemie die Stoffe oder die Moleküle (und ihre jeweiligen Umwandlungen) sind. In dieser Frage, die im Folgenden gesondert behandelt wird, lebt die ebenso alte Differenz zwischen Stoff- und Dingphilosophie weiter.

2.1 Stoffe und Dinge in der Philosophie

Der Unterschied zwischen Stoffen und Molekülen wird oft epistemologisch dargestellt: Zu Stoffen haben wir einen sinnlichen oder „makroskopischen“ Zugang, Moleküle sind hingegen mikroskopische Gegenstände, die sich wegen ihrer Kleinheit der direkten Wahrnehmung entziehen. Diese Unterscheidung ignoriert allerdings, dass Stoffe und Moleküle vor allem ontologisch zu unterschiedlichen Kategorien gehören. Ein Stoff wie Wasser hat keine Größe, Gestalt oder Anzahl, oder anders formuliert: Ob Wasser in einer großen oder kleinen Portion, in runder oder eckiger Form, in einer oder in mehreren Portionen vorliegt, ist völlig unerheblich; es handelt sich jedes Mal um dasselbe Wasser. Ganz anders verhält es sich bei Molekülen, die zur Kategorie der Dinge gehören. Hier sind Größe, Gestalt und Anzahl entscheidende Eigenschaften für ihre Charakterisierung.

Die Unterscheidung zwischen Stoffen und Dingen ist so zentral, dass sie in allen indogermanischen und vielen anderen Sprachen syntaktisch fest verankert ist. Überall differenziert man zwischen *mass terms* (Stoffnomina, die keine Pluralbildung zulassen, wie „Wasser“ oder Abstrakta wie „Gerechtigkeit“) und *count terms* (zählbare Nomina mit Pluralbildung wie „Flasche“ oder „Tugend“). In der Philosophie sind seit der Antike solche sprachlichen Kategorien ausschlaggebend gewesen für die Bildung logischer und ontologischer Kategorien, weil die Sprache unser Denken und unsere Vorstellung von der Welt prägt. Aus der syntaktischen Unterscheidung zwischen Subjekt und Prädikat leitete Aristoteles die ontologische Unterscheidung zwischen Substanz und Eigenschaft ab und baute darauf seine syllogistische Logik auf, die in der heutigen Prädikatenlogik weitergeführt wird. Analog entwickelte er die ontologischen Kategorien Stoff und Form weiter: Jedes Einzelding besteht (entweder im wörtli-

chen oder metaphorischen Sinn) aus einem Stoff und einer Form, die ihm seinen Dingcharakter verleiht.¹

Der kategoriale Unterschied zwischen Stoffen und Dingen ist seit der Antike auch bekannt über Theseus' Paradoxon (Rosenberg 1993). Ist ein Holzschiff, dessen sämtliche Teile (sein „Material“) schrittweise ausgetauscht worden sind, noch dasselbe Schiff wie zuvor? Wenn es ein anderes ist, durch welchen Austausch änderte sich die Identität? Wenn es noch dasselbe ist, könnte man nicht mit den alten Teilen das alte Schiff wieder aufbauen und so ein von dem ersten unterschiedenes herstellen? Das Schiff besitzt sowohl eine stoffliche Identität als auch eine Dingidentität, die durch seine Gestalt und Funktion bestimmt ist. Wer beides miteinander vermischt, verwickelt sich in Paradoxien. Umgekehrt könnte man aus einem Stück Ton erst einen Krug und dann ein Pferd formen und analog fragen, ob der Gegenstand dabei seine Identität wechselt oder beibehält. Hierbei wird unser Verstand jedoch weniger verwirrt, weil wir nun klar zwischen der stofflichen und der gestalthaften Identität unterscheiden. Beim Schiff des Theseus ist das weniger eindeutig, weil die Teile des Schiffs für sich genommen Einzeldinge und zusammen genommen der Stoff des Schiffs sind.

Die moderne Ontologie und Logik hat sich überwiegend auf Dinge konzentriert. Eine analoge Theorie des Stofflichen steckt hingegen bis heute noch in den Kinderschuhen, denn Stoffe verhalten sich mereologisch anders als Individuen: Zwei Tropfen Wasser vereinigen sich zu einem Tropfen Wasser, wobei die Teile sich im Ganzen auflösen. Umgekehrt kann man den Wassertropfen immer weiter teilen und erhält als Teile stets nur Wassertropfen. Ein Tropfen Wasser und ein Tropfen Alkohol bilden einen Tropfen alkoholische Lösung, der in stofflicher Hinsicht beiden Ausgangsteilen ähnelt. Nimmt man hingegen Öl statt Alkohol, dann bleiben die Teile getrennt. Ein Tropfen Quecksilber und ein Tropfen Brom ergeben zusammen einen weißen Festkörper, der keinerlei Ähnlichkeiten mehr mit beiden ursprünglichen Teilen aufweist. Zerteilt man den Festkörper mechanisch, erhält man stets nur Körner von Quecksilberbromid, aber niemals die Ausgangsstoffe zurück. Die Beispiele illustrieren bereits: Die stoffliche Welt lässt sich nicht durch eine einfache Ontologie und Logik beschreiben, die von der Besonderheit des jeweiligen Stoffes abstrahiert, wie man das mit einer Welt von Billardkugeln oder Einzeldingen machen kann. Stattdessen müsste hier das gesamte chemische Wissen eingehen. Wo das unterlassen und der kategoriale Unterschied zwischen Stoffen und Dingen ignoriert wird, entstehen Absurditäten oder Paradoxien.

Mit dem gleichen nominalistischen Ehrgeiz, mit dem Prädikate semantisch auf Mengen von Individuen zurückgeführt wurden („rot“ bezeichnet demnach nicht eine Farbe, sondern die

¹ Eine gute Einführung zu Aristoteles liefert Düring 1966/2005, zu dessen Chemie siehe insbesondere Düring 1944/1980.

Menge aller roten Gegenstände), haben Philosophen versucht, die *mass terms* durch *count terms* zu umschreiben, also Stoffe als Dinge zu begreifen (Pelletier 1979). Der berühmteste Ansatz, von Willard Van Orman Quine (1960), betrachtet Stoffe als raum-zeitlich verstreute Gegenstände: Wasser ist demnach die Gesamtheit aller in der Raum-Zeit verteilten und über Koordinaten lokalisierbaren „Wasserteilchen“. Doch leider besteht Wasser nicht aus „Wasserteilchen“, denn die Mikrostruktur ist hochkomplex: Wassermoleküle sind über Wasserstoffbrücken dynamisch miteinander verbunden und befinden sich in einem Dissoziationsgleichgewicht mit Ionen, sind also gar keine Moleküle im modellhaften Sinne. Wasser gilt auch schon lange nicht mehr als Element: Es kann sich zersetzen, mit anderen Stoffen reagieren, wird bei Reaktionen freigesetzt, ist stets gemischt mit Fremdstoffen, welche seine Mikrostruktur entscheidend prägen, wird quasi-chemisch in Kristallstrukturen (zum Beispiel in Gips) oder in Gelen eingebunden und so weiter. Der auf Dinge fokussierte Philosoph müsste sich daher in die subtilsten Details der Chemie einarbeiten, um in jedem Einzelfall eine willkürliche Entscheidung zu treffen, ob die jeweilige Atomanordnung in diesem Moment gerade zu dem „verstreuten Gegenstand“ Wasser gehören soll oder nicht.

Ähnliche Anstrengungen wurden unternommen, um Stoffeigenschaften auf Dingeigenschaften zurückzuführen (Schummer 1995). Alle Stoffeigenschaften sind Dispositionen, d.h. ein Stoff hat die Fähigkeit, nur unter bestimmten Bedingungen ein bestimmtes Verhalten zu zeigen. Dass ein Salz wasserlöslich ist, bedeutet nicht nur, dass es in gelöstem Zustand vorliegt, nachdem man es in Wasser gegeben hat, sondern dass es sich jederzeit in Wasser auflösen kann, und zwar gerade dann, wenn es noch nicht aufgelöst ist. Dingeigenschaften wie Größe, Gestalt und Lage sind demgegenüber „manifeste“ Eigenschaften, sie bestehen unabhängig von kontextuellen Bedingungen. In den Schwierigkeiten der Reduktion zeigen sich wieder die kategorialen Probleme. Der klassische Versuch von Rudolf Carnap (1953), das Dispositionsprädikat „wasserlöslich“ durch das manifeste Prädikat „gelöst“ zu ersetzen, führte wieder in eine Paradoxie: Solange das Salz nicht gelöst ist, kann seine Wasserlöslichkeit nicht festgestellt werden; sobald es jedoch gelöst ist, existiert das Salz gar nicht mehr, über das man etwas aussagen möchte. Keiner der zahlreichen folgenden Ansätze, die schlichten Dispositionsprädikate durch kontrafaktische Konditionalsätze zu umschreiben („Wenn das Salz in Wasser gegeben worden wäre, dann läge es in aufgelöstem Zustand vor“) und ihnen durch Mögliche-Welten-Semantiken nicht-dispositionale Bedeutung zu verleihen („In irgendeiner möglichen Welt ist das Salz gerade aufgelöst“) sind überzeugend. Sie illustrieren vielmehr die Hartnäckigkeit der ontologischen Kategoriedifferenz gegen alle spitzfindigen logischen und semantischen Versuche der analytischen Philosophie, die Stoffkategorie auf die metaphysisch präferierte Dingkategorie zu reduzieren.

2.2 Die experimentbasierte Stoffontologie der Chemie

Wer sich wissenschaftstheoretisch mit der Chemie beschäftigen möchte, wird all diesen Ansätzen nicht viel abgewinnen können, weil sie bereits an simplen alltäglichen Stoffbeschreibungen scheitern und sich zu chemischen Fragen gar nicht erst vorgewagt haben. Stattdessen lohnt es sich gerade auch philosophisch, genauer auf die Chemie zu schauen. Als prototypische Experimentalwissenschaft, die nicht manifeste Eigenschaften isolierter Dinge und deren raumzeitliche Koordinaten vermisst, sondern seit vielen Jahrhunderten ausschließlich Dispositionseigenschaften in Laborkontexten studiert, hat die Chemie Ordnungsstrukturen ihres Gegenstandsbereichs entwickelt, die der auf Dinge fixierten Philosophie bis heute fremd geblieben sind. Das lässt sich, wie folgt, exemplarisch an der hierarchischen Ordnung der Stoffe nach Teil-Ganzes-Beziehungen illustrieren (Schummer 1997a).

Wissenschaftliche Dispositionseigenschaften sind im Unterschied zu manifesten Eigenschaften an experimentelle Kontexte und Handlungen gebunden, die reproduzierbar sind. Jede experimentelle Analyse, d.h. die Trennung eines Stoffes in unterschiedliche Stoffe, etabliert eine Teil-Ganzes-Beziehung genauso sowie umgekehrt jede Synthese, also die Bildung eines Stoffes aus unterschiedlichen Ausgangsstoffen. In der Chemie sind daher, im Unterschied zu ihren Vorläufern und der bis heute gängigen Praxis in der Philosophie, Analyse und Synthese keine logisch-begrifflichen Operationen, sondern experimentelle Verfahren, wie es übrigens auch die Etymologie nahelegt. Ein Stoff wird nicht mehr, wie es die fast zweitausend Jahre gültige Lehre des Aristoteles vorschrieb, begrifflich in seine Grundeigenschaften zerlegt, aus denen dann seine Zusammensetzung aus hypothetisch angenommen Elementen zu schließen ist. Stattdessen wird er einer geordneten Reihe von Zerlegungsoperationen unterzogen, sodass seine Zerlegbarkeiten (also bestimmte Dispositionseigenschaften) seine Position in einer hierarchischen Stoffordnung eindeutig anzeigen: Was sich durch mechanische Operationen (Schneiden, Sieben, Sortieren) in unterschiedliche Stoffe zerlegen lässt, ist eine heterogene Mischung; was darüber hinaus durch thermodynamische Verfahren (Destillation, Kristallisation, Chromatographie) aufgetrennt werden kann, ist eine homogene Mischung; und was sich dem widersetzt, ist ein Reinstoff oder eine chemische Substanz. Ist diese durch chemische oder elektrochemische Verfahren nicht weiter zerlegbar, handelt es sich definitionsgemäß um ein Element, ansonsten um eine Verbindung, deren elementare Zusammensetzung sich qualitativ und quantitativ aus genau dieser Analyse ergibt.

Das Experiment ist in der Chemie daher nicht bloß das künstliche Herbeiführen von Phänomenen, auf die man im Prinzip auch untätig warten könnte, „bis die Situationen, die wir so scharfsinnig ersinnen, zufällig, wie man zu sagen pflegt, eintreten“ (Bergmann 1972: 111), wie es die ältere analytische Wissenschaftstheorie glaubte, die darin nur eine Bestätigungs- oder Widerlegungsinstanz für physikalische Theorienentwicklung sah. In der täglichen Forschungspraxis ist Experimentieren vor allem das freie Ausprobieren, das Suchen nach neu-

en unbekanntem Phänomenen, was kurioserweise erst in jüngerer Zeit ins Bewusstsein der Wissenschaftstheorie gelangt ist, obwohl genau diese Bedeutung auch allgemeinsprachlich ist und selbst die Etymologie darauf hindeutet. Das chemische Experimentieren legt dabei ein Schwergewicht auf die Suche und Charakterisierung neuer Stoffe (Schummer 2004b). Im außeralltäglichen Bereich dient es zur Etablierung operationaler Begriffe und liefert, wie das Beispiel belegt und was im vorliegenden Zusammenhang bedeutsam ist, eine operationale Basis für ontologische Strukturen, hier: für die Etablierung einer Kette von mereologischen Teil-Ganzes-Relationen, die zusammen genommen eine hierarchische Ordnung aller denkbaren Stoffe ergeben (Schummer 1994). Weil die chemische Ontologie nicht begrifflich entworfen, sondern operational fundiert ist, sind alle Stoffe, die in Laborkontexten untersucht werden, überdies nicht einfach vorgefunden, sondern das Resultat definierter Herstellung, heute überwiegend industrieller Herkunft. In diesem Sinne schafft sich die Chemie die Gegenstände ihrer Untersuchung selber.

Das gilt insbesondere für chemische Substanzen, die durch Reinigungsoperationen an das Ideal perfekter Reinheit angenähert werden. Darin zeigt sich eine Grundstruktur ontologischer Praxis experimenteller Wissenschaften: Die Chemie passt nicht nur ihre Begriffe an die vorgefundene Stoffwelt an, sondern auch umgekehrt die Stoffwelt durch Operationen (hier: durch Reinigungsverfahren) an ihre Begriffsstruktur. Begriffe und Gegenstände werden also unter Berücksichtigung experimenteller Widerständigkeiten wechselseitig aneinander angepasst. Zwar bleibt wegen der praktischen Unerreichbarkeit perfekter Reinheit stets eine Differenz zwischen Begriffen und Gegenständen übrig, aber der Ansatz liefert eine einzigartige experimentelle Lösung des philosophischen Universalienproblems, deren Bedeutung kaum überschätzt werden kann.² Denn im Unterschied zu biologischen oder geologischen Klassifikationen werden in der Chemie die Artbegriffe den naturgegebenen Gegenständen nicht übergestülpt, sondern die Artbegriffe sind durch experimentelle Verfahren der Synthese, Analyse und Reinigung operational stabilisiert (Schummer 2014c). Wer nominalistisch bestreiten wollte, dass beispielsweise Ethanol oder Wasserstoff eine stabile chemische Art ist, die überall und jederzeit mit den entsprechenden Verfahren instanziiert werden kann, der müsste die Reproduzierbarkeit experimenteller Verfahren infrage stellen.

² Im klassischen Universalienproblem streiten sich Realisten und Nominalisten über die Frage, ob die Unterscheidungen von Arten in der Natur der Gegenstände selber begründet sind (Realismus) oder ob sie nur menschliche Konzepte sind, die den individuellen Gegenständen für bestimmte Einteilungszwecke übergestülpt werden (Nominalismus). Traditionell wird die Debatte anhand von naturgegebenen Gegenständen geführt, beispielsweise ob eine biologische Spezies eine „natürliche Art“ ist oder nur eine auf Konventionen beruhende Gruppierung von Individuen. In den Experimentalwissenschaften wie der Chemie geht es jedoch nicht um naturgegebene, sondern um operativ zugerichtete Gegenstände wie Reinstoffe. Die Kernfrage des Universalienproblems lautet hier also nicht, ob ein Reinstoff eine „natürliche Art“ ist, sondern ob die Unterscheidung der Reinstoffe in ihrer Natur begründet ist.

2.3 Stoffe und Moleküle in der Chemie

Seit Mitte des 19. Jahrhunderts hat die Organische Chemie eine Strukturtheorie entwickelt, die jedem solcherart stabilisierten Stoff ursprünglich genau eine Molekülstruktur zuordnet. Die Bestimmung der Struktur erfolgte bis Mitte des 20. Jahrhunderts ausschließlich aufgrund der chemischen Eigenschaften des jeweiligen Stoffes: seiner elementaren Zusammensetzung, seiner Umwandlungen mit anderen Stoffen und insbesondere seiner schrittweisen und kontrollierten Synthetisierbarkeit aus den Elementen oder einfachen Stoffen. Bestandteil der Strukturtheorie ist ein Regelwerk, das die wechselseitige Umwandlung von Stoffarten als regelmäßige Umgestaltungen von Strukturgruppen, den sogenannten funktionellen Gruppen, beschreibt. Im Unterschied zu den röntgenkristallographisch bestimmten und quantenmechanisch errechneten Strukturen enthalten die chemischen Strukturen Informationen über die chemischen Eigenschaften eines Stoffes, wie er mit anderen Stoffen reagiert und sogar wie man ihn herstellen kann. Wer die Theorie beherrscht, liest die chemischen Strukturformeln als Potentiale von Umwandlungsmöglichkeiten und kann damit Stoffeigenschaften erklären und voraussagen. Dadurch wurde die kategoriale Differenz zwischen den Dispositionseigenschaften der Stoffe und den manifesten Eigenschaften von Strukturen überwunden: Eine chemische Molekülstruktur besitzt in logischer Hinsicht gleichartige Eigenschaften wie Stoffe, nämlich Dispositionsrelationen, welche die Umwandelungspotentiale zweier oder mehrere Stoffe/Strukturen ineinander beschreiben.

Seit den 1950er Jahren wurde die chemische Strukturbestimmung durch zahlreiche spektroskopische Verfahren ergänzt und schließlich sogar weitgehend ersetzt, insbesondere durch Infrarot-, kernmagnetische Resonanz- und Massenspektroskopie. Während man früher die Stoffe aufwändig reinigen und chemischen Analysen unterziehen musste, lassen sich mit den spektroskopischen Verfahren auch molekulare Strukturen in Mischungen, Gasphasen und Molekülstrahlen untersuchen. Im Unterschied zur klassischen Theorie, die jede chemische Substanz durch möglichst genau eine schematische Molekülstruktur repräsentiert, zeigen die spektroskopischen Methoden bei entsprechender zeitlicher und energetischer Auflösung selbst für Reinstoffe ein großes Spektrum an Strukturen, das überdies bei Änderung äußerer Bedingungen wie Temperatur und Druck beträchtlich variiert.

Die instrumentellen Veränderungen der letzten Jahrzehnte haben die Ontologie der Chemie grundlegend beeinflusst (Schummer 2002). Ein einfacher mikrostruktureller Essentialismus, der eine Struktur als das Wesen einer chemischen Substanz begreift, ist nicht mehr aufrecht zu erhalten, weil jeder Reinstoff eine Vielzahl von Strukturen zeigt, die überdies mit den thermodynamischen Bedingungen beträchtlich variieren (van Brakel 1991). Außerdem lassen sich Strukturen nachweisen (beispielsweise Fragmente in der Massenspektroskopie), zu denen es keine entsprechenden Stoffe gibt. Die eindeutige Zuordnung zwischen Stoff und

Struktur ist also von zwei Seiten aufgehoben. Die Multiplikation der Strukturen erfordert eine Entscheidung, was als der eigentliche Gegenstandsbereich der Chemie gelten soll: Stoffe oder Strukturen? In dieser Frage sind sich sowohl Chemiker als auch Philosophen uneinig.

In der Chemie ist die Differenz durch Mehrdeutigkeiten nicht immer unmittelbar erkennbar, denn sowohl die Stoffnamen als auch der Substanzbegriff werden häufig auch auf Molekülstrukturen angewandt. Beispielsweise bezeichnen Chemiker mit demselben Ausdruck „Ethanol“ je nach Kontext den Stoff und die entsprechende Molekülstruktur. Der Unterschied wird jedoch deutlich bei der Frage, was bei der jeweiligen Forschung als *Explanandum* betrachtet wird. Werden die Stoffeigenschaften durch Eigenschaften der interatomaren Struktur erklärt, sind die Stoffe das *Explanandum* und damit der eigentliche Gegenstandsbereich. Wird hingegen eine bestimmte interatomare Struktur durch elektronische beziehungsweise quantenmechanische Modelle erklärt, ist sie der Gegenstandsbereich. In vielen Fällen (z.B. bei reaktiven Zwischenstufen, Katalysatoren) ist die Strukturklärung gleichsam eine tiefergelegte Erklärung und dient letztlich dem besseren Verständnis stofflicher Verhältnisse oder Reaktionen, die somit als der eigentliche Gegenstandsbereich gelten können. In anderen Fällen scheint an eine Erklärung oder Voraussage stofflicher Verhältnisse gar nicht mehr gedacht zu sein. Das gilt insbesondere in der Biochemie sowie allgemein beim Studium molekularer Strukturen als Agentien in raumzeitlich strukturierten Gebilden oder Nanosystemen (im Unterschied zu homogenen Mischungen), bei denen die stoffliche Betrachtung wenig sinnvoll ist. Für die Wirkungsweise eines Proteins beispielsweise ist die dreidimensionale Molekülstruktur entscheidend, bei Nukleinsäuren zählt in erster Linie die Nukleotidsequenz, während die stofflichen Eigenschaften der jeweiligen kristallinen Reinsubstanz oder ihrer Mischungen relativ unwichtig sind. Darüber hinaus wächst seit den 1980er Jahren aber auch eine Forschung, in der die Strukturklärung als Selbstzweck erscheint, ohne dass weitere Bezüge unmittelbar erkennbar sind.³

Von außerordentlicher ontologischer Bedeutung sind nanokristalline Festkörper, weil sie die kategoriale Differenz zwischen Stoffen und Dingen verwischen und zu begrifflichen Verwirrungen bis in den juristischen Bereich hinein führen. Zur Stoffkategorie gehört, dass die Eigenschaften unabhängig von der Größe und Gestalt seiner Portionen sind; Ausdrücke wie „kleiner Lehm“ oder „eckiges Gold“ enthalten Kategorienfehler, richtig wäre „kleiner Lehmklumpen“ und „eckiges Goldstück“. Werden hingegen reine Stoffportionen in den Nanometerbereich hinein verkleinert, verändern sich ihre Eigenschaften in Abhängigkeit von ihrer Größe und Gestalt; Gold wird z.B. purpurrot. Einerseits sind nanokristalline Festkörper wie

³ Das gilt eindeutig für die Herstellung neuer Stoffe, die ausschließlich wegen ihrer „ästhetisch reizvollen“ Molekülstrukturen erfolgt (z.B. Vögtle 1989), ohne dass weitere Stoffeigenschaften untersucht werden, sowie, wenn auch weniger eindeutig, für eine wachsende Zahl von Arbeiten aus der Organischen Chemie.

Stoffe meist homogen in den Eigenschaften; andererseits tritt nun der Dingcharakter der Kristalle hervor, indem ihre Größe und Gestalt die Eigenschaften des Stoffes bestimmen. Unbeholfen mischt man dafür die ontologischen Kategorien in Ausdrücken wie „small materials“ oder „kleine Stoffe“. Technisch steckt darin ein großes Potential. Juristisch offenbart sich hier eine große Regulierungslücke, weil alle Chemikaliengesetze die ontologische Stoffkategorie zugrunde legen: Wird ein Stoff in makrokristalliner Form als bedenkenlos eingestuft, kann er trotzdem in nanokristalliner Form hoch toxisch sein, ohne dass dies in den stoffbasierten Regulierungsansätzen Berücksichtigung finden muss (Schummer 2009: 108f).

In der Frage nach dem Gegenstandsbereich der Chemie spaltet sich die Philosophie traditionell auf in Ding- und Stoffphilosophie. Die an der Physik orientierte angelsächsische Wissenschaftstheorie hat Stoffe kaum zur Kenntnis genommen. Zum Beispiel ist in der klassischen reduktionistischen Programmatik von Oppenheim und Putnam (1958) von Stoffen gar keine Rede; stattdessen springt man von Elementarteilchen über Moleküle zu Lebewesen und entsprechend von der Physik gleich zur Biologie. Das hat auch die gegenwärtige angelsächsische Chemiephilosophie beeinflusst,⁴ denn fast alle Beiträge gehen wie selbstverständlich davon aus, der Gegenstandsbereich der Chemie bestünde in interatomaren Strukturen, die durch subatomare Strukturen zu erklären sind, was die Chemie automatisch in ein Konkurrenzverhältnis zur Molekül- und Festkörperphysik setzt und damit die Frage der Reduzierbarkeit provoziert (s. Abschnitt 3). Demgegenüber heben die meisten nichtangelsächsischen Chemiephilosophen die Stoffe als Gegenstandsbereich hervor und sehen in der Erklärung, Voraussage, Ordnung und Gestaltung der sinnlich erfahrbaren Welt die Hauptzwecke der Chemie (z.B. van Brakel 1986, 2000, Schummer 1996a, Psarros 1999, Bensaude-Vincent & Simon 2008, Ruthenberg & van Brakel 2008). Man kann dann über den ontologischen Status von Stoffen streiten, ob sie das Produkt eines besonderen epistemischen Zugangs zur Welt sind (Schummer 2008) oder eine eigene, unabhängige Welt konstituieren (Lewowicz & Lombardi 2013), aber nicht mehr über ihre grundsätzliche Rolle als primärer Gegenstandsbereich der Chemie.

3 Epistemologisch-methodologische Fragen am Beispiel der Reduktion der Chemie auf die Physik

3.1 Die Rolle der Quantenmechanik in der Chemie

⁴ Neben dem Einfluss der angelsächsischen physikorientierten Wissenschaftstheorie mag auch die englische Sprache bei der Vernachlässigung von Stoffen eine Rolle spielen. Denn im Unterschied zu anderen europäischen Sprachen gibt es im Englischen kein Äquivalent zu dem deutschen Ausdruck „Stoff“: *stuff* bedeutet Zeug und wird oft pejorativ verwendet; *matter* meint umfassender die Materie schlechthin; *material* ist auf Feststoffe beschränkt, im engeren Sinne auf Werkstoffe; *chemical substance* bezeichnet einen Reinstoff und besitzt zudem die Bedeutung von Drogen.

Die angelsächsische Chemiephilosophie ist aufgrund der erwähnten Annahme dominiert von der Frage, ob die Chemie auf die Physik reduzierbar ist. Es geht dabei nicht, wie die Fragestellung suggeriert, um das Verhältnis zwischen den Disziplinen, geschweige denn um Inklusions- oder gar Machtverhältnisse. Denn Disziplinen sind komplexe epistemisch-soziale Gebilde, deren Identität in ihren spezifischen Forschungsfragen, -methoden und -werten sowie ihren Organisationsformen liegt und deren Autonomie im vorliegenden Fall unbestritten ist. Vielmehr fragt man, ob bestimmte Phänomen- oder Theorienbereiche der Chemie durch Theorien der Physik (insbesondere durch die Quantenmechanik und statistische Mechanik) vollständig erklärbar sind. An der Frage selber ist die philosophische Dimension nicht unbedingt erkennbar. Denn die Entscheidung, ob eine bestimmte Theorie etwas erklären kann oder nicht, obliegt normalerweise der Wissenschaft und nicht der Philosophie.

Aus den quantenmechanischen Prinzipien lässt sich weder der Aufbau des Periodensystems der Elemente (nach der Elektronenkonfiguration) eindeutig ableiten (Hartmann 1965, Scerri 1991) noch der zentrale Begriff der chemischen Molekülstruktur (Woolley 1978, Primas 1981). Die Quantenmechanik liefert genauso wenig wie die klassische Mechanik klassifikatorische Begriffe, um die über 100 Millionen bekannten chemischen Verbindungen zu klassifizieren, sie kann nicht einmal ohne zusätzliche Hilfe zwischen spiegelbildlichen Strukturen unterscheiden (sog. Enantiomeren, die eine zentrale Rolle in der Organischen Chemie und Biochemie spielen). Von einer chemischen Theorie erwartet man in erster Linie die Erklärung und Voraussage chemischer Reaktionen („Welche Reaktionsprodukte erhalte ich, wenn ich die Stoffe A und B zusammen rühre?“), aber gerade darüber schweigt sich die Quantenmechanik im Unterschied zur chemischen Strukturtheorie weitgehend aus. Warum spielt sie trotzdem eine so bedeutsame Rolle in der Chemie, ist die Chemie vielleicht sogar ihr wichtigstes Anwendungsgebiet?

Die Quantenmechanik liefert fast konkurrenzlose Erklärungsansätze für die chemische Bindung der meisten Stoffe – warum Atome überhaupt miteinander in Verbindung treten – und für alle elektromagnetischen Eigenschaften von Stoffen. Außerdem bietet sie zusammen mit der statistischen Mechanik Ansätze zur Erklärung von thermodynamischen und mechanischen Stoffeigenschaften. Um sie fruchtbar zu machen, bedarf es jedoch eines vielseitigen Inputs chemischer Grundlagen und Erkenntnisse zur sinnvollen Modellbildung im Rahmen der Quantenchemie. Die quantenchemischen Modelle sind nicht einfach „semantische Interpretationen“ der Theorie, wie es die ältere Wissenschaftstheorie nach dem Vorbild beispielsweise der Berechnung eines Pendels aus der klassischen Mechanik meinte.⁵ Vielmehr

⁵ Die ältere Wissenschaftstheorie unter dem Einfluss des Logischen Positivismus und der mathematischen Modelltheorie glaubte, alle naturwissenschaftlichen Theorien seien reine mathematische Formalismen (etwa die drei Newton'schen Axiome der klassischen Mechanik). Die Anwendungen des Formalismus auf konkrete Probleme (zum Beispiel die Ableitung der Bewegungsgleichung eines Pendels aus den Axiomen und den spezifischen Größen

gehen in die Modellbildungen konzeptionelle Annahmen aus verschiedenen Bereichen ein und oft sogar empirische Daten.

Um einen Stoff wie Wasser quantenchemisch zu modellieren, setzt man nicht mit einem Ensemble aus n Sauerstoffkernen, $2n$ Protonen und $10n$ Elektronen an, wie es ein klassischer Modellansatz auf der Basis einer Elementaranalyse von Wasser erfordern würde. Stattdessen geht man von der chemisch-empirischen Formel aus, wonach Wasser vorzugsweise in Einheiten H_2O (statt H_4O_2 , H_6O_3 oder Kombinationen von H_2O_2 , H_4O etc.) vorliegt. Im nächsten Schritt bedient man sich auf vierfache Weise der klassischen chemischen Strukturtheorie: Erstens berechnet man nur ein einziges von der Strukturtheorie postuliertes H_2O -Molekül, das wie in der Strukturtheorie stellvertretend für den Stoff stehen soll, anstelle eines Ensembles von Molekülen; zweitens gibt man meist die Symmetrie der klassischen Struktur als Randbedingung vor; drittens werden die Atomkerne in der Regel nicht quantenmechanisch, sondern (nach der Born-Oppenheimer-Näherung) klassisch-mechanisch behandelt, weil sich sonst keine der chemischen Strukturtheorie entsprechenden Molekülstrukturen zeigen würden; viertens berechnet man nicht die Dynamik des Systems, sondern nur eine Reihe von statischen Zuständen nach der zeitunabhängigen Schrödingergleichung. Bei einfachen Systemen und großen Rechenleistungen lassen sich zwar einige der Annahmen zurücknehmen; der Grundansatz, chemisches Wissen in die Modellierung einzubeziehen, bleibt aber stets erhalten. Im Ergebnis erhält man, nachdem man eine Reihe von weiteren Näherungen durchgeführt und schließlich unplausible Rechenresultate eliminiert hat, eine geometrische Struktur, deren Abstände und Winkel zusammen ein energetisches Minimum bilden, eine energetische Struktur der Elektronen und ein klassisches Potentialfeld für mögliche Wechselwirkungen mit der Umgebung. Für Stoffe wie Wasser sind die vorausgesetzten Annahmen allerdings zu einfach, um für die meisten Fragestellungen brauchbare Ergebnisse zu erhalten, denn das chemische Modellkonzept von Molekülen greift hier zu kurz. Für andere Stoffe, insbesondere aus dem Bereich der Organischen Chemie, sind sie ausreichend. Die Kunst der quantenchemischen Modellbildung besteht nicht zuletzt auch darin, sie anhand von Vorwissen und Analogiebildungen auf bestimmte Stoffgruppen zu optimieren. Auch deswegen wäre es ganz abwegig, die Anwendung der Quantenmechanik auf die Chemie nach dem Vorbild der Pendelberechnung durch die klassische Mechanik zu betrachten.

3.2 Methodologischer Pluralismus der Modelle

des Pendels) nannten sie „semantische Interpretationen“ der Theorie und identifizierten sie mit naturwissenschaftlichen Modellen. Verschiedene Arbeiten, insbesondere von Nancy Cartwright und Margaret Morrison, zeigten, dass diese Vorstellung von Modellen nicht einmal auf die Physik zutrifft, geschweige denn auf die Chemie und andere Wissenschaften.

Die quantenchemische Modellbildung ist ein Musterfall gelungener Interdisziplinarität, sowohl historisch als auch systematisch, weil hierbei von verschiedenen Disziplinen konzeptionelle Ressourcen zusammengeführt werden. Das trifft auch auf die meisten Modellansätze der physikalischen Chemie zu, von kinetischen Theorien wie der Eyring-Theorie, welche die chemische Reaktionsdynamik aus einer statistisch-mechanischen Modellbildung der Übergangszustände entwickelt, bis zu Absorptions- und Zustandsgleichungen stofflicher Mischungen. Deswegen erscheint es unangemessen, die interdisziplinäre Modellbildung durch Schemata der Theorienreduktion zu beschreiben (Hetteema 2012, dazu kritisch Lombardi 2013, 2014).

In der Chemie, wie in allen Experimentalwissenschaften, sind Modelle nicht Interpretationen oder Anwendungen einer Theorie, wie es reduktionistische Schemata voraussetzen, sondern theoretische Konstruktionen, die verschiedenen epistemischen Zwecken dienen können, wie Vorhersage, Erklärung, Klassifikation und – gleichsam als Steigerung des Vorhersagepotentials – der Anleitung neuer Synthesen. Die Pluralität der Zwecke bedingt eine methodologische Pluralität und theoretische Arbeitsteilung. Während die klassische chemische Strukturtheorie auf Klassifikation, Synthese und Vorhersage chemischer Eigenschaften zugeschnitten ist, liefern quantenchemische Modellbildungen in erster Linie Vorhersagen und Erklärungen elektromagnetischer Eigenschaften. Doch selbst innerhalb enger gefasster Themen, etwa bei thermodynamischen Zustandsgleichungen, quantenchemischen Ansätzen, Säure-Base-Konzepten oder molekularen Darstellungsformen, gibt es eine Pluralität von Modellen, die auf den jeweiligen Gegenstandsbereich und auf spezifische Fragestellungen optimiert sind (Schummer 1998b). Die Güte eines Modells besteht nicht in seiner Universalität, sondern in den klar umrissenen Grenzen seiner Anwendbarkeit, die sowohl empirisch als auch theoretisch aus den vorgenommenen Annahmen abgeschätzt werden kann.

Modelle können modifiziert, eingeschränkt oder erweitert werden, aber nicht grundsätzlich falsifiziert oder verifiziert. Denn im Unterschied zu den theoretischen Wissenschaften, wie der mathematischen Physik, hat sich in den Experimentalwissenschaften ein instrumentalistisches Verständnis von Theorien/Modellen etabliert (Schummer 2014a). Theorien sind hier nicht der Zweck, sondern die Instrumente der eigentlichen Forschung, die nicht im Testen von Theorien, sondern in der Verfolgung epistemischer Zwecke besteht. Niemand verwirft ein Instrument, weil es sich in einem Fall als untauglich erweist, stattdessen wird es entweder angepasst oder sein Anwendungsbereich schärfer eingegrenzt.

Der methodologische Pluralismus der Chemie ist sowohl historisch ausführlich belegt als auch methodologisch und epistemologisch gerechtfertigt (Chang 2012, Schummer 2015). Er lässt sich aus der Pluralität der Zwecke und aus prinzipiellen Erkenntnisgrenzen der Chemie als notwendig begründen. Demgegenüber fordert der methodologische Monismus, wie er in

der mathematischen Physik und deren Philosophie verbreitet ist, es könne letztendlich nur einen einzigen wahren theoretischen Ansatz geben, eine „Theory of Everything“, so dass alle konkurrierenden Ansätze im Forschungsprozess eliminiert werden müssten. Im Vergleich dazu weist der methodologische Pluralismus eine Reihe von Vorteilen auf, weil er flexibler ist für neue Fragestellungen, kreativer in der Entwicklung interdisziplinärer Konzepte, rationaler im Umgang mit theoretischen Ressourcen und sparsamer in den metaphysischen Voraussetzungen. Als allgemeine philosophische Position kann der methodologische Pluralismus sowohl die disziplinäre Diversifizierung der Wissenschaft seit Jahrhunderten als auch Formen der Interdisziplinarität begreifen. Der methodologische Monismus muss hingegen die faktische methodologische Vielfalt der Wissenschaft insgesamt sowie innerhalb der einzelnen Disziplinen als irrationales Unterfangen betrachten und sich mit zweifelhaftem Geltungsanspruch normativ dagegen wenden – als Reduktionismus beziehungsweise in seiner üblichen Form als Physikalismus.

Die Frage, ob die Chemie auf die Physik reduzierbar ist, besitzt daher nur aus der monistischen Perspektive eine ausgezeichnete philosophische Bedeutung. Aus der pluralistischen Perspektive rücken stattdessen die Besonderheiten interdisziplinärer Forschung in den Vordergrund, wobei eine hierarchische Theorienreduktion im Einzelfall zwar denkbar bleibt, aber nur eine der vielen möglichen Varianten ist.

4 Beispiele Praktischer Chemiephilosophie

Die an der mathematischen Physik orientierte analytische Wissenschaftsphilosophie hat sich ihre philosophischen Themen traditionell nach den Besonderheiten ihrer Lieblingsdisziplin ausgewählt und sich insbesondere mit mathematischer Logik, Begründungs- und Rechtfertigungsmethodologie sowie Ontologie beschäftigt. Diese zur theoretischen Philosophie gehörenden Teildisziplinen begreifen Wissenschaft als reine kognitive Struktur und abstrahieren, ähnlich wie die Tradition des Deutschen Idealismus (vgl. Schummer 2014c, Kap. 12), von all ihren gesellschaftlichen Kontexten, Handlungs-, Wert- und Zweckbezügen, die zur praktischen Philosophie gerechnet werden. Eine solche Abstraktion und Selbstbeschränkung der Wissenschaftsphilosophie lässt sich jedoch weder systematisch rechtfertigen, noch erscheint sie sinnvoll für Disziplinen wie die Chemie, in denen experimentelle Handlungen konstitutiv für den Forschungsprozess sind und die zudem eine ganz spezifische gesellschaftliche Einbettung aufweisen. Nur weil beispielsweise die Mathematik keine besonderen handlungstheoretischen und ethischen Fragen aufwirft, kann das Spektrum wissenschaftsphilosophischer Themen für andere Disziplinen nicht nach dem Vorbild der Mathematikphilosophie beschnitten werden. Eine zeitgemäße und sachbezogene Wissenschaftsphilosophie im eigentlichen Sinne muss auch Bereiche der praktischen Philosophie umfassen. In der Biologiephilosophie

ist dies inzwischen längst selbstverständlich, wie ein Blick in Standardwerke und Überblicksdarstellungen zeigt (z. B. Hull & Ruse 1998). Demgegenüber ist der Einfluss der Physikphilosophie insbesondere auf die angelsächsische Chemiephilosophie bis heute noch so stark, dass praktische Fragestellungen dort marginalisiert sind (vgl. z.B. die Sammelbände Hendry, Needham & Woody 2012; Scerri & McIntyre 2015).

Gerade weil die Chemie nicht einfach das Sosein ihrer Gegenstände betrachtet und vermisst, sondern ihre Veränderungspotentiale beziehungsweise ihre chemischen Reaktionsmöglichkeiten studiert, ist sie im mehrfachen Sinne praktisch relevant. Bereits die Laborhandlungen verändern die materielle Welt auf substanzieller Ebene, indem neue Substanzen geschaffen werden, die es zuvor nicht gab. Das ist keineswegs ein Randphänomen chemischer Forschung. Vielmehr muss die chemische Erschließung des Reichs möglicher Stoffe nach, wie bereits eingangs erwähnt, über 100 Millionen solcher Synthesen in den vergangenen zwei Jahrhunderten als die zentrale Forschungshandlung der Chemie begriffen werden (Schummer 1997b). Aus methodologischer Perspektive wirft dies die Frage nach der Unterscheidung zwischen Wissenschaft und Technik auf, die traditionell unzureichend gefasst wurde, weil sie Veränderungswissen pauschal der Technik zuschreibt (Schummer 1997c). Aus ethischer Perspektive wird die Forschungshandlung selber relevant, weil sie im wörtlichen Sinne weltverändernd ist und zudem Gefahrenpotentiale für alle Beteiligten der Labortätigkeit birgt (Schummer 1996b, 2001). Weil das Wissen über Stoffveränderungen und -synthesen überdies oft technisch bedeutsam ist und industriell genutzt wird, übernehmen Chemiker auch eine besondere Verantwortung für die Ausrichtung und die Folgen ihrer Forschungstätigkeit (Schummer 2005). Daher gehören auch ethische Fragen zum Kern der Chemiephilosophie (Schummer 2001/2002; Børsen/Schummer 2016).

Die außerordentliche praktische Relevanz des Wissens über Stoffveränderungsmöglichkeiten hat der Chemie und ihren handwerklich-technischen Vorläufern schon immer und in allen Hochkulturen eine besondere gesellschaftliche Aufmerksamkeit verliehen. In der jüdisch-christlichen Kultur wurde es beispielsweise mit dem göttlichen Schöpfungswissen identifiziert; jegliche stoffliche Umwandlung durch Menschen galt bis ins 18. Jahrhundert als verbotene Handlungen gegen den Willen des Schöpfergottes. Die Spannung lebt bis heute weiter in einem vormodernen Naturbegriff, der nichtsdestotrotz gesellschaftlich weit verbreitet ist und alles Chemische als unnatürlich begreift und ablehnt (Schummer 2003b). Diese und andere philosophiehistorische Besonderheiten, einschließlich des kaum zu unterschätzenden Einflusses der Alchemie, prägen bis heute das öffentliche Bild der Chemie, das moralische und wissenschaftspolitische Haltungen gegenüber der Wissenschaft insgesamt beeinflusst. Wissenschaftsphilosophie, die sich nicht auf die rationale Rekonstruktion kognitiver Strukturen beschränkt, muss auch solche gesellschaftlichen und kulturellen Besonderheiten

einer Disziplin aus einem historischen Kontext heraus zu verstehen suchen (Schummer et al. 2007).

Die Disziplinen, nach denen das Fachwissen noch weitgehend bis heute an Schulen und Universitäten getrennt gelehrt wird, sind überwiegend Konstruktionen des 19. Jahrhunderts. Vorher war die einseitige disziplinäre Spezialisierung unüblich, heute ist sie wissenschaftspolitisch immer weniger opportun zugunsten interdisziplinärer Forschung. Die Chemie ist in ihrer Forschung so sehr vernetzt, dass gegenwärtig etwa ein Drittel aller Publikationen in einer reinen Chemiezeitschrift auch Autoren anderer Disziplinen aufweist. Wissenschaftsphilosophie, die sich nicht ausschließlich auf die Vergangenheit beziehen oder disziplinäre Kategorien künstlich konservieren will, muss die Dynamik der Forschung berücksichtigen und sich neuen Entwicklungen öffnen. Der im letzten Abschnitt erwähnte methodologische Pluralismus bietet die Möglichkeit dazu, nicht nur Formen der Interdisziplinarität zu untersuchen, sondern auch aktuelle Forschungstrends philosophisch zu begleiten. Weil Chemiker an vielen jüngeren und aktuellen Entwicklungen maßgeblich beteiligt sind, von der Gentechnik über die Materialwissenschaft und Nanotechnologie bis zur Synthetischen Biologie, ergeben sich hierbei für Chemiephilosophen zahlreiche weitere Betätigungsfelder im Sinne sowohl theoretischer als auch praktischer Philosophie, die überdies gesellschaftlich nachgefragt werden (Baird et al. 2004, Nordmann et al. 2006, Schummer & Baird 2006, Schummer 2009, 2011, Bensaude-Vincent & Benoit-Browaeys 2011).

Weil die Chemiephilosophie sich mit Ausnahme einzelner Vorläufer international erst in den 1990er Jahren formiert hat, ist sie weniger verbunden mit den älteren Traditionen der physikorientierten Wissenschaftstheorie und offener für neuere Fragen der Geschichte, Soziologie und Didaktik der Wissenschaft sowie des *Public Understanding of Science*. Und sie wirft neue Fragestellungen auf, wie etwa die Rolle von ästhetischen Werten und Visualisierungen in der Forschungspraxis, die in der Chemie traditionell eine herausragende Rolle spielten (Spector & Schummer 2001, Schummer 2014b). Die internationale Formierung, die in den 1990er Jahren in dieser Form erstmals über das Internet möglich wurde, zeigt aber auch die kulturelle Verschiedenheit wissenschaftsphilosophischer Zugänge. Man wird daher von einer zeitgemäßen Chemiephilosophie kein monolithisches Gedankengebäude erwarten dürfen, sondern eine Pluralität von Ansätzen, die wohl nicht zufällig den methodologischen Pluralismus der Chemie auf philosophischer Ebene widerspiegelt und dadurch aufgeschlossen ist für neue Fragestellungen von gesellschaftlicher Relevanz.

Mit Ausnahme der mathematischen Physik und einigen rein theoretischen Teildisziplinen sind heute fast alle Naturwissenschaften Experimentalwissenschaften, die die alten erkenntnistheoretischen Ideale apriorischer Wissensgewinnung schon lange verabschiedet haben, im Experimentieren weit mehr als eine Testinstanz von Theorien sehen und ihre Forschung

eingebettet in einen Komplex aus epistemischen und nichtepistemischen Zwecken betreiben. Als prototypische Experimentalwissenschaft von unvergleichbarer Größe und interdisziplinärer Vernetzung nimmt die Chemie in der heutigen Wissenschaftslandschaft eine herausragende Rolle ein. Ein philosophisches Verständnis dieser Disziplin verspricht daher in besonderer Weise, die traditionell höchst einseitigen Vorstellungen von Wissenschaft nach dem Modell der mathematischen Physik zu korrigieren. Deswegen besitzt die Chemiephilosophie auch das weiterreichende Potential, die traditionelle Wissenschaftsphilosophie aus ihrer selbstgeschaffenen gesellschaftlichen und interdisziplinären Isolation herauszuholen, in die sie sich durch Ausblendung der Zwecke sowohl wissenschaftlicher wie wissenschaftsphilosophischer Forschung manövriert hat (Schummer 2014d, Kap. 11). Denn wie jede menschliche Handlung sind auch Wissenschaft und Wissenschaftsphilosophie nur über ihre selbstgesetzten Zwecke verständlich, und dafür muss die theoretische Philosophie mit der praktischen verknüpft bleiben. Von der zukünftigen Chemiephilosophie wäre daher zu erwarten, dass sie ihre Erträge auch fruchtbar aufbereitet, um zu einem besseren Verständnis der Wissenschaft insgesamt beizutragen, das in vielen gesellschaftlichen Bereichen – von der Bildung über den Wissenschaftsjournalismus bis zur Wissenschaftspolitik – nachgefragt wird.

5 Literaturempfehlungen

Einführende Überblicksdarstellungen zur Philosophie der Chemie sind eher rar, oft einseitig und alle auf Englisch: van Brakel & Vermeeren 1981, van Brakel 1996, 2000, Kap. 1, Ramsay 1998, Brock 2002, Schummer 2003a, 2006, 2010, Bensaude-Vincent 2009, und Hendry, Needham & Woody 2012.

Einen Überblick über aktuelle Themen erhält man über die Publikationen der beiden Zeitschriften *Hyle: International Journal for Philosophy of Chemistry* (www.hyle.org) und *Foundations of Chemistry* (<http://link.springer.com/journal/10698>) sowie über verschiedene thematisch allgemein gehaltene Sammelbände und Sonderhefte, z.B. Baird, Scerri & MacIntyre 2006, Schummer 2014d, Scerri & McIntyre 2015. Eine facettenreiche Darstellung des Stoffbegriffs in der Chemie liefern Ruthenberg & van Brakel 2008. Die Zeitschrift *Hyle* hat darüber hinaus eine Reihe von thematischen Sonderheften publiziert, u.a. zu Modellen, Ethik, Ästhetik, Nano- und Bionanotechnologie, das öffentliche Bild und das Mathematikverhältnis der Chemie, die alle frei zugänglich sind.

Bestandsaufnahmen der älteren Literatur zur Philosophie der Chemie liefern die Bibliographien von van Brakel & Vermeeren 1981 und Dittus & Mayer 1992. Eine durchsuchbare Online-Bibliographie zur Geschichte und Philosophie der Chemie findet sich unter <http://www.hyle.org/service/biblio.htm>.

Literatur

- Baird, Davis, Alfred Nordmann und Joachim Schummer (Hg.) (2004). *Discovering the Nano-scale*. Amsterdam: IOS Press.
- Baird, Davis, Eric Scerri und Lee MacIntyre (Hg.) (2006). *Philosophy of Chemistry: Synthesis of a New Discipline*. Dordrecht: Springer
- Bensaude-Vincent, Bernadette (2009). Philosophy of Chemistry. In: Anastasios Brenner und Jean Gayon (Hg.). *French Studies in the Philosophy of Science*, Dordrecht: Springer, 165-185.
- Bensaude-Vincent, Bernadette und Dorothée Benoit-Browaeys (2011). *Fabriquer la vie: Où va la biologie de synthèse?*. Paris: Seuil.
- Bensaude-Vincent, Bernadette und Jonathan Simon (2008). *Chemistry: The Impure Science*. London: Imperial College Press.
- Bergmann, Gustav (1972). Sinn und Unsinn des methodologischen Operationalismus. In: Ernst Topitsch (Hg.). *Logik der Sozialwissenschaften*, Köln: Kiepenheuer & Witsch, 104-112.
- Børsen, Tom und Joachim Schummer (Hg.) (2016). *Ethical Case Studies of Chemistry*. Sonderband von *Hyle: International Journal for Philosophy of Chemistry* 22, 1-172.
- Brock, William (2002). The Philosophy of Chemistry. *Ambix* 49, 67-71.
- Carnap, Rudolf (1953). Testability and Meaning. In: Herbert Feigl und May Brodbeck (Hg.). *Readings in the Philosophy of Science*. New York: Appleton-Century-Crofts, 47-92.
- Chang, Hasok (2012). *Is Water H₂O? Evidence, Pluralism and Realism*. Dordrecht: Springer.
- Dirac, Paul A. M. (1929). Quantum mechanics of many-electron systems. *Proceedings of the Royal Society of London*, A123, 714-733.
- Dittus Sabrina und Matthias Mayer (1992). Bibliographie Chemie und Geisteswissenschaften. In: Jürgen Mittelstraß & Günter Stock (Hg.). *Chemie und Geisteswissenschaften*. Berlin: Akademie Verlag, 218-333.
- Düring, Ingemar (1944). *Aristotle's Chemical Treatise: Meteorologica, Book IV*, Göteborg (Nachdruck: New York/London: Garland, 1980).
- (1966). *Aristoteles: Darstellung und Interpretation seines Denkens*, Heidelberg: Winter, 2. Aufl. 2005.
- Earley, Joseph E. (1981). Self-Organization and Agency: In Chemistry and in Process Philosophy. *Process Studies* 11, 242-258.
- Earley, Joseph E. (1998). Modes of Chemical Becoming. *Hyle: International Journal for Philosophy of Chemistry* 4(1), 105-115.
- Hartmann, Hermann (1965). Die Bedeutung quantenmechanischer Modelle für die Chemie. In: *Sitzungsberichte der Johann Wolfgang Goethe-Universität*, Wiesbaden: F. Steiner, 151-168.
- Hendry, Robin, Paul Needham und Andrea Woody (Hg.) (2012). *Philosophy of Chemistry* (Bd. 6 des *Handbook of the Philosophy of Science*), Amsterdam et al.: Elsevier.

- Hettema, Hinne (2012). *Reducing Chemistry to Physics: Limits, Models, Consequences*. Groningen: Rijksuniversiteit Groningen (Dissertation).
- Hull, David und Michael Ruse (1998). *The Philosophy of Biology*, Oxford: Oxford University Press.
- Laitko, Hubert (1996). Chemie und Philosophie: Anmerkungen zur Entwicklung des Gebietes in der Geschichte der DDR. In: Nikos Psarros, Klaus Ruthenberg und Joachim Schummer (Hg.). *Philosophie der Chemie: Bestandsaufnahme und Ausblick*. Würzburg: Königshausen & Neumann, 37-58.
- Lamza, Lukasz (2014). Six Phases of Cosmic Chemistry. *Hyle: International Journal for Philosophy of Chemistry* 20, 165-192.
- Lewowicz, Lucía, und Olimpia Lombardi (2013). Stuff versus individuals. *Foundations of Chemistry* 15, 65-77.
- Lombardi, Olimpia (2013). Book Review of Hinne Hettema: Reducing Chemistry to Physics. *Hyle: International Journal for Philosophy of Chemistry* 19(1), 135-137.
- Lombardi, Olimpia (2014). Linking chemistry with physics: arguments and counterarguments. *Foundations of Chemistry* 16, 181–192.
- Nordmann, Alfred, Joachim Schummer und Astrid Schwarz (Hg.) (2006). *Nanotechnologien im Kontext: Philosophische, ethische und gesellschaftliche Perspektiven*. Berlin: Akademische Verlagsgesellschaft.
- Oppenheim, Paul, und Hilary Putnam (1958). Unity of Science as a Working Hypothesis. *Minnesota Studies in the Philosophy of Science* 2, 3-36.
- Pelletier, Francis Jeffrey (Hg.) (1979). *Mass Terms: Some Philosophical Problems*. Dordrecht: Kluwer.
- Primas, Hans (1981). *Chemistry, Quantum Mechanics and Reductionism. Perspectives in Theoretical Chemistry*. Berlin-Heidelberg-New York: Springer.
- Psarros, Nikos (1999). *Die Chemie und ihre Methoden: Eine philosophische Betrachtung*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Quine, Willard Van Orman (1960). *Word and Object*, Cambridge/MA: MIT Press.
- Ramsey, Jeffry L. (1998). Recent Work in the History and Philosophy of Chemistry. *Perspectives on Science* 6, 409-427.
- Rosenberg, Jay F. (1993): Das Schiff des Theseus. Eine Fallstudie, in: Ders.: *Philosophieren – Ein Handbuch für Anfänger*, Klostermann: Frankfurt, S. 64-77.
- Ruthenberg, Klaus, und Jaap van Brakel (Hg.) (2008). *Stuff: The Nature of Chemical Substances*. Würzburg: Königshausen & Neumann.
- Scerri, Eric R. (1991). The Electronic Configuration Model, Quantum Mechanics and Reduction. *The British Journal for the Philosophy of Science* 42, 309-325.
- Scerri, Eric R. & Lee McIntyre (Hg.) (2015). *Philosophy of Chemistry: Grow of New Discipline*. Dordrecht: Springer.
- Schummer, Joachim (1994). Die Rolle des Experiments in der Chemie. In: Peter Janich (Hg.). *Philosophische Perspektiven der Chemie*. Mannheim: Bibliographisches Institut, 27-51.

- Schummer, Joachim (1995). Die philosophische Entstofflichung der Welt. *chimica didactica* 21(1), 5-19.
- Schummer, Joachim (1996a). *Realismus und Chemie. Philosophische Untersuchungen der Wissenschaft von den Stoffen*. Würzburg: Königshausen & Neumann.
- Schummer, Joachim (1996b). Die stoffliche Weltveränderung der Chemie: Philosophische Herausforderungen. In: Christoph Hubig und Hans Poser (Hg.). *Cognitio humana - Dynamik des Wissens und der Werte. XVII. Deutscher Kongreß für Philosophie, Leipzig 1996, Workshop-Beiträge*, Bd. 1, Leipzig, 429-436.
- Schummer, Joachim (1997a). Towards a Philosophy of Chemistry. *Journal for General Philosophy of Science* 28, 307-336.
- Schummer, Joachim (1997b). Scientometric Studies on Chemistry I: The Exponential Growth of Chemical Substances, 1800-1995. *Scientometrics* 39, 107-123.
- Schummer, Joachim (1997c). Challenging Standard Distinctions between Science and Technology: The Case of Preparative Chemistry. *Hyle: International Journal for Philosophy of Chemistry* 3, 81-94.
- Schummer, Joachim (1998a). The Chemical Core of Chemistry, I: A Conceptual Approach. *Hyle: International Journal for Philosophy of Chemistry* 4, 129-162.
- Schummer, Joachim (1998b). Physical Chemistry: Neither Fish nor Fowl?. In: Peter Janich und Nikos Psarros (Hg.). *The Autonomy of Chemistry*. Würzburg: Königshausen & Neumann, 135-148.
- Schummer, Joachim (2001a). Ethics of Chemical Synthesis. *Hyle: International Journal for Philosophy of Chemistry* 7, 103-124.
- Schummer, Joachim (Hg.) (2001-2002). *Ethics of Chemistry*. Sonderband von *Hyle: International Journal for Philosophy of Chemistry*, 7(2), 83-167; 8(1), 3-48.
- Schummer, Joachim (2002). The Impact of Instrumentation on Chemical Species Identity: From Chemical Substances to Molecular Species. In: Peter Morris (Hg.). *From Classical to Modern Chemistry: The Instrumental Revolution*, Cambridge: Royal Society of Chemistry, 188-211.
- Schummer, Joachim (2003a) The Philosophy of Chemistry. *Endeavour* 27, 37-41.
- Schummer, Joachim (2003b). The Notion of Nature in Chemistry. *Studies in History and Philosophy of Science* 34, 705-736.
- Schummer, Joachim (2004a). Substances versus Reactions (Editorial). *Hyle: International Journal for Philosophy of Chemistry* 10, 3-4.
- Schummer, Joachim (2004b). Why do Chemists Perform Experiments?. In: Danuta Sobczynska, Pawel Zeidler und Ewa Zielonacka-Lis (Hg.). *Chemistry in the Philosophical Melting Pot*, Frankfurt/M.: Peter Lang, 395-410.
- Schummer, Joachim (2005). Forschung für die Armen versus Forschung für die Reichen: Verteilungsgerechtigkeit als moralisches Kriterium zur Bewertung der angewandten Chemie. In: Clemens Sedmak (Hg.). *Option für die Armen: Die Entmarginalisierung des Armutsbegriffs in den Wissenschaften*, Freiburg: Herder, 605-626.
- Schummer, Joachim (2006). The Philosophy of Chemistry: From Infancy Towards Maturity. In: Davis Baird, Eric Scerri und Lee MacIntyre (Hg.). *Philosophy of Chemistry: Synthesis of a*

New Discipline (*Boston Studies in the Philosophy of Science*, Vol. 242). Dordrecht: Springer, 19-39.

Schummer, Joachim (2008). Matter versus Form, and Beyond. In: Klaus Ruthenberg und Jaap van Brakel (Hg.). *Stuff: The Nature of Chemical Substances*. Würzburg: Königshausen & Neumann, 3-18.

Schummer, Joachim (2009). *Nanotechnologie: Spiele mit Grenzen*. Frankfurt: Suhrkamp.

Schummer, Joachim (2010). Philosophy of Chemistry. In: Fritz Allhoff (Hg.), *Philosophies of the Sciences: A Guide*. Blackwell-Wiley, 163-183.

Schummer, Joachim (2011). *Das Gotteshandwerk: Die künstliche Herstellung von Leben im Labor*. Berlin: Suhrkamp.

Schummer, Joachim (2014a). The Preference of Models over Laws of Nature in Chemistry. *European Review* 22(S1), S87-S101.

Schummer, Joachim (2014b). Aesthetic Values in Chemistry. *Rendiconti Lincei - Scienze Fisiche e Naturali* 25, 317-325.

Schummer, Joachim (2014c). *Wozu Wissenschaft? Neun Antworten auf eine alte Frage*. Berlin: Kadmos.

Schummer, Joachim (Hg.) (2014d). General Lessons from Philosophy of Chemistry. Sonderheft von *Hyle: International Journal for Philosophy of Chemistry* 20, 1-192.

Schummer, Joachim (2015). The Methodological Pluralism of Chemistry and Its Philosophical Implications. In: Eric R. Scerri & Lee McIntyre (Hg.). *Philosophy of Chemistry: Grow of New Discipline*. Dordrecht: Springer, 57-72.

Schummer, Joachim, Bernadette Bensaude-Vincent und Brigitte Van Tiggelen (Hg.) (2007). *The Public Image of Chemistry*. Singapur: World Scientific.

Schummer, Joachim und Davis Baird (Hg.) (2006). *Nanotechnology Challenges: Implications for Philosophy, Ethics and Society*. Singapur: World Scientific.

Spector, Tami, und Joachim Schummer (Hg.) (2003). *Aesthetics and Visualization in Chemistry*. Sonderband von *Hyle: International Journal for Philosophy of Chemistry*, 9, 3-243.

Stein, Ross L. (2004). Towards a Process Philosophy of Chemistry. *Hyle: International Journal for Philosophy of Chemistry* 10, 5-22.

van Brakel, Jaap, und H. Vermeeren (1981). On the Philosophy of Chemistry. *Philosophy Research Archives* 7, 501-552.

van Brakel, Jaap (1986). The Chemistry of Substances and the Philosophy of Mass Terms. *Synthese* 69, 291-324.

van Brakel, Jaap (1991). Chemistry. In: Hans Burkhardt und Barry Smith (Hg.). *Handbook of Metaphysics and Ontology*, Bd. I, München: Philosophia, 146-147.

van Brakel, Jaap (1996). Über die Vernachlässigung der Chemie. In: Nikos Psarros, Klaus Ruthenberg und Joachim Schummer (Hg.). *Philosophie der Chemie: Bestandsaufnahme und Ausblick*. Würzburg: Königshausen & Neumann, 13-26.

van Brakel, Jaap (1997). Chemistry as the Science of the Transformation of Substances. *Synthese* 111, 253-282.

van Brakel, Jaap (2000). *Philosophy of Chemistry: Between the Manifest and the Scientific Image*. Leuven: Leuven University Press.

van Brakel, Jaap (2014). Philosophy of Science and Philosophy of Chemistry. *Hyle: International Journal for Philosophy of Chemistry* 20, 11-57.

Vögtle, Friedrich (1989). *Reizvolle Moleküle der Organischen Chemie*. Stuttgart: Teubner.

Weininger, Stephen J. (2000). Butlerov's Vision. The Timeless, the Transient, and the Representation of Chemical Structure. In: Nalini Bhushan und Stuart Rosenfeld (Hg.). *Of Minds and Molecules*. New York: Oxford University Press, 143-161.

Woolley, R. Guy (1978). Must a Molecule Have a Shape? *Journal of the American Chemical Society* 100, 1073-1078.