

Analyse und Quantifizierung in chemischen Forschungsprogrammen des 18. Jahrhunderts*

Christoph Meinel, Lehrstuhl für Wissenschaftsgeschichte,
Universität Regensburg, Postfach 101042, 8400 Regensburg

Die Chemie, so hat es Immanuel Kant ausgerechnet im Todesjahr Carl Wilhelm Scheeles verkündet, die Chemie sei "nichts mehr als systematische Kunst" und könne "niemals eigentliche Wissenschaft werden", weil sie nicht mathematisierbar, d.h. auch nicht quantifizierbar sei.¹ Und hätte der Philosoph das Laboratorium seines Königsberger Kollegen, des Hofapothekers Carl Gottfried Hagen betreten, hätte er dessen *Lehrbuch der Apothekerkunst* (1778-1782) oder den *Grundriß der Experimentalchemie* (1786) zu Rate gezogen, wäre sein Urteil nicht anders ausgefallen.

In der Tat hatte Kant den neuralgischen Punkt beim Namen genannt. Vor dem wissenschaftlichen Methoden- und Exaktheitsideal des 18. Jahrhunderts konnte die Chemie nicht bestehen. An Versuchen, das Fach von einer empirisch-qualitativen Kunst auf die Höhe einer quantitativ-exakten Wissenschaft zu heben, hat es nicht gefehlt. Doch erst das ausgehende 18. Jahrhundert entwickelte ein Forschungsprogramm, das in die moderne chemische Wissenschaft führen sollte.

Die "Chemische Revolution" wird nun meist mit der konsequenten Verwendung messender und zählender Verfahren in Verbindung gebracht. Dabei spielt die Analytik als Instrument und Regulativ der Forschung die entscheidende Rolle. So sahen es die Zeitgenossen, und die Geschichtsschreibung ist ihnen darin gefolgt. Umso erstaunlicher mutet es an, daß der Prozeß zunehmender Quantifizierung in der historischen Forschung kaum je genauer untersucht wurde. Es ist, als verstehe er sich von selbst - ja, man hat gar im Aufbau des Chemiestudiums und in der Abfolge von qualitativer und quantitativer Analyse eine Rekapitulation der Phylogenese des Faches sehen wollen und den Übergang von der qualitativen zur quantitativen Betrachtungsweise damit als historisch notwendigen Entwicklungsschritt dargestellt.² Doch im Historischen versteht sich nichts von selbst.

Was ich zeigen will, ist, daß wir uns die Wandlung der Chemie zu einer exakten, quantifizierenden Wissenschaft nicht so vorstellen sollten, als ginge es dabei bloß um die allmähliche Zunahme messender und zählender Verfahren, den zunehmenden Gebrauch präziser Instrumente, die graduelle Ablösung rein

qualitativer Bestimmungsgrößen durch quantitative Daten; - gerade so, als sei lediglich eine neue Meßlatte an die alten Qualitäten angelegt worden; als habe man längst gewußt, daß Schwefel in der Hitze schmilzt und benutze nun das Thermometer, um den genauen Schmelzpunkt zu ermitteln. Tatsächlich ist das Aufkommen der quantitativen Methode in der Chemie weniger von Kontinuitäten, als von Brüchen gekennzeichnet. Ging es doch darum, in einem Gebiet, das seit der Antike ganz dem Qualitativen verpflichtet war, Zahlen und Quantitäten einen Platz im Kernbereich der Wissenschaft, d.h. in ihrer Theoriebildung, zu sichern. Dies war etwas grundsätzlich Neues, und allein um diesen Aspekt soll es im folgenden gehen. Dabei haben im Verlauf des 18. Jahrhunderts offensichtlich ganz unterschiedliche Quantifizierungsprogramme miteinander konkurriert, von denen sich nur die wenigsten in Laboratoriumspraxis umsetzen ließen. Auch hier ist das Bild eher von Verwerfungen denn von Übergängen bestimmt.

Doch versuchen wir zunächst, dem Bild Feinstruktur zu geben. Denn im Grunde gab es *die* Chemie jener Zeit überhaupt nicht. Was uns begegnet, sind Traditionen ganz unterschiedlicher Art, mit je spezifischen Problemstellungen, spezifischen Methoden und spezifischer Praxis. Im wesentlichen sind es drei Richtungen: (1) die Chemie als Hilfswissenschaft der Medizin und der Arzneimittelbereitung verpflichtet; (2) die mineralogisch-metallurgische Tradition, auf gewerbliche Anwendung zielend, im Bergbau und Hüttenwesen praktisch bewährt; (3) eine Chemie, die sich als Teil der allgemeinen Naturwissenschaft verstand, auf Ursachenforschung und Gesetzmäßigkeiten aus war und zunehmend von der Experimentalphysik beeinflusst wurde. Wir werden sehen, daß tatsächlich nur der letztere Strang jene grundsätzlich neue Form quantitativer Analytik hervorbringen konnte.

Im medizinisch-pharmazeutischen Bereich ist der Gebrauch der Waage und exakter Maße durch weit zurückreichende Überlieferung belegt. Das Substrat erlaubt zwei Grundoperationen: Analysis, die Zerlegung und Synthesis, die Zusammenfügung. Arzneimittel wurden aus Einzeldrogen in bestimmten Mischungsverhältnissen bereitet. Aus Naturprodukten isolierte man reine Stoffe und sicherte ihre Identität mit Hilfe qualitativer Merkmale. Reinheitsprüfung und Standardisierung erfolgten in der Regel durch Prüfung nach Augenschein, Geruch, Geschmack und äußeren Eigenschaften. Wichtiger war die Standardisierung mit Hilfe von Herstellungsanweisungen. Handgriffe und Operationen spielten eine wichtige Rolle. Die Rezeptur war empirisch erprobt und gehorchte pharmakologischen oder galenischen Erfordernissen. Doch vom Stand der chemischen Analytik findet sich in den Pharmakopöen des 18. Jahrhunderts kaum etwas wieder.³ Sie lieferten Vorschriften zur Herstellung von Präparaten, und befolgte man diese, so war die korrekte Zusammensetzung garantiert.

Selbstverständlich waren Maß und Gewicht innerhalb gewisser Grenzen einzuhalten. Doch quantitative Daten, die Gewichtsmengen und Mischungsverhältnis, Temperatur und Zeitmaß vorgaben, blieben äußeres Bestimmungsmerkmal.

Über den Stoff selbst und seine chemische Beschaffenheit besagten sie nichts. Eine (wie auch immer geartete) Theorie des Arzneimittels ließ sich aus quantitativen Daten nicht gewinnen.

Eher kam hier ein anderer Aspekt zum Tragen: der kaufmännische. Arzneimittel werden, wie andere Waren auch, nach Maß und Gewicht taxiert. Seit der frühen Neuzeit tritt die Taxe mit verbindlichen Abgabepreisen als wichtigstes Buch des Apothekers zur Pharmakopöe hinzu. Quantifizierung dient hier der Rezeptur und der ökonomischen Bewertung. Man könnte dies die kaufmännische oder kompositorische Quantifizierung nennen. Für diese war kein besonderer Grad an Präzision erfordert. Maß und Zahl traten in Form von Handlungsanweisungen oder wirtschaftlichen Daten auf, ohne Aussagen über die Natur stofflicher Vorgänge zu machen oder gar in die Theorie der Substanz einzugehen.

Dies gilt in ähnlicher Weise für die mineralogisch-metallurgische Richtung.⁴ Die ökonomische Theorie des 18. Jahrhunderts wies gerade den Bodenschätzen die Schlüsselrolle für die Wirtschaftskraft eines Landes zu. So besaß Schweden bereits im 17. Jahrhundert chemische Laboratorien bei den staatlichen Berg- und Hüttenwerken. Sie dienten zunächst der Arzneimittelversorgung, kamen dann aber in die Hand von Mineralogen und Chemikern und entwickelten sich zu führenden Forschungsstätten für chemische Analytik. Ihre Aufgabe war, die Abbauwürdigkeit von Erzen zu prüfen. Auch hier also stand der ökonomische Aspekt im Vordergrund und nicht etwa die Frage nach den Gesetzen der Körperwelt und der inneren Beschaffenheit der Materie. Zwar erforderte die analytische Quantifizierung, wie wir sie im Unterschied zur kaufmännischen oder kompositorischen nennen könnten, ein höheres Maß an Präzision und methodisch-instrumentellem Aufwand; doch reichte es in der Regel vollkommen aus, prozentuale Zusammensetzungen anzugeben.

Gleichzeitig ging man daran, Mineralien, die bisher ausschließlich nach äußeren Merkmalen wie etwa der Kristallform charakterisiert worden waren, nun auch nach inneren Merkmalen, insbesondere ihrer chemischen Zusammensetzung zu unterscheiden. Doch auch in diesem Fall geschah dies nicht in theoretischer Hinsicht. Die quantifizierende Methode blieb auf ein Akzidens beschränkt. Zwar bediente man sich quantifizierender Vorgehensweisen im Interesse der Anwendung, zwar entwickelte man immer verlässlichere Meß- und Bestimmungsverfahren, doch blieb die Quantitas eine Hilfsgröße und diente in erster Linie als zusätzliches Ordnungsmittel innerhalb eines naturhistorischen Klassifikationsrasters, das grundsätzlich von Qualitäten bestimmt war.

So blieb die Chemie in den wichtigsten Bereichen ihrer beruflichen und akademischen Wirklichkeit bis zum Ende des 18. Jahrhunderts einer qualitativ ausgerichteten Wissenschaftspraxis verpflichtet, die weitgehend, wenn nicht gar vollständig, auf quantitative Konzepte im strengen Sinne, d.h. die Annahme eines wesens- oder gar gesetzmäßigen Zusammenhanges zwischen Qualität und

Quantität, verzichten konnte, ohne deswegen minder erfolgreich zu sein. Gerade die Einbettung quantitativer Daten in einen stabilen Kontext herstellenden und ökonomischen Handelns erklärt, weshalb diese Art der Quantifizierung über Jahrhunderte Bestand hatte und sich auch gegenüber konkurrierenden Forschungsprogrammen behaupten konnte.

Zur pharmazeutischen und mineralogischen Tradition trat nun seit der Mitte des 18. Jahrhunderts eine neue Richtung, die sich als *Chemia physica*, als Teil der allgemeinen Naturwissenschaft verstand. Die Tradition der alten Physica aber war eindeutig nicht-mathematisch. Danach berührten Zahlen nur einen äußeren Aspekt der Dinge; zur wirklichen Kenntnis der Stoffe und der Ursachen ihrer Beschaffenheit trügen sie nichts bei. Und doch war es genau dieser Traditionsstrang, in dem sich quantitative Konzepte und quantifizierende Verfahren durchsetzen sollten.

Das umfangreichste und großartigste Forschungsprogramm einer vollständig quantifizierbaren Chemie, das das 18. Jahrhundert hervorgebracht hat, steht in der Tradition des Newtonianismus. Getragen von der Idee einer gesetzmäßigen Einheit der Natur hatte Newton vermutet, sämtliche Erscheinungen der Natur sollten sich auf Anziehungs- und Abstoßungskräfte zwischen Körpern zurückführen lassen.⁵ Was ihm vorschwebte, war eine quantifizierbare Physik von Massen, Kräften und Bewegungen im submikroskopischen Bereich. Als Gegenpart zur Himmelsmechanik wäre damit die gesamte Natur auf mathematische Prinzipien zurückgeführt. Als "Newtonscher Traum" ist dieser grandiose Entwurf in die Geschichte eingegangen. Immer wieder wurde in der 2. Hälfte des 18. Jahrhunderts die Vorstellung eines neuen Newton beschworen, der auf empirischer Grundlage die *Principia mathematica* der Chemie begründen, d.h. ein infinitesimales Berechnungsverfahren für kurzreichweitige Grundkräfte entwickeln könnte. Diese Idee, und nicht etwa die Phlogistik, ist der eigentliche Kern der Chemie des 18. Jahrhunderts, und selbst die Chemische Revolution hat ihn nicht erschüttern können. Denn noch Lavoisier war überzeugt,

es werde sich eines Tages die Präzision der Daten so steigern lassen, daß der Mathematiker am Schreibtisch die Eigenschaften jeder beliebigen chemischen Verbindung berechnen können, so wie er heute schon die Bewegungen der Himmelskörper berechnet.⁶

Doch wie die erforderlichen Daten ermitteln, wie ein solches Programm in Forschungspraxis umsetzen?

Als Empiriker setzten die Chemiker bei einem scheinbar vertrauten Phänomenbereich an: dem der physikalischen Adhäsion, die als Maß der chemischen Wechselwirkung galt. Zu ihrer Bestimmung wurde ein Schwimmer an einem Waagschenkel so aufgehängt, daß er die Oberfläche einer Flüssigkeit berührte. Am freien Schenkel der Waage ließ sich das Gewicht des Schwimmers genau kompensieren. So konnte man diejenige Kraft ermitteln, die erforderlich war, um den Schwimmer gerade von der Flüssigkeitsoberfläche zu lösen. Diese

wurde der Adhäsionskraft gleichgesetzt, die zwischen dem Material des Schwimmers und dem der Flüssigkeit wirksam war. So glaubte Guyton de Morveau 1777, mit Scheiben aus Glas, Talg und verschiedenen Metallen, die in Wasser oder Quecksilber tauchten, eine der chemischen Affinität proportionale Adhäsions- bzw. Trennkraft gefunden zu haben.⁷

Die Mehrzahl der Chemiker versuchte jedoch, aus dem Verlauf chemischer Umsetzungen ein Maß für die Affinität der Reaktanden zu gewinnen. Mit Affinität oder Chemischer Verwandtschaft bezeichnete man ja das Reaktionsbestreben von Stoffen. Es war bekannt, daß bestimmte Säuren von anderen Säuren aus ihren Salzen freigesetzt werden und bestimmte Salze andere Salze aus ihren Lösungen ausfällen. So ließen sich Reihen von chemisch analogen Stoffe aufstellen, die durch andere Stoffe aus ihren Verbindungen verdrängt werden. Die Ergebnisse konnte man tabellarisch erfassen. Typbildend waren die Affinitätstafeln, die Etienne François Geoffroy 1718 vorgelegt hatte. Den Höhepunkt erreichten diese Bemühungen 1775 mit Torbern Bergmans *Disquisitio de attractionibus electivis*. Mit immensem experimentellen Aufwand sind hier Säuren, Salze und Alkalien nach ihrem Reaktionsverhalten gruppiert. Grundprinzip war die topologische Anordnung der Substanzen in vertikalen Reihen aufgrund ihrer qualitativ-chemischen Analogie. Die Position innerhalb einer Reihe gab dann das relative Maß für die Reaktivität eines Stoffes an.⁸

Viele Chemiker waren überzeugt, auf diese Weise auch zu absoluten Affinitätswerten gelangen zu können. Doch hier stieß das Forschungsprogramm auf Hindernisse. Bereits bei den einfachen Relationstafeln hatten sich Abhängigkeiten vom Reaktionsweg, vom Lösungsmittel und von der Temperatur gezeigt, wo man doch konstante, substanzspezifische Werte erwartete. Auch andere Anomalien traten auf. Einduetige, stabile Affinitätsdaten ließen sich unter diesen Voraussetzungen nicht gewinnen, und je komplexer die Tafeln wurden und je mehr Nebeneffekten sie Rechnung trugen, um so weniger waren sie für die Praxis zu brauchen. Die Hoffnung auf eine wirkliche Mathematisierung der Chemie schien damit in weite Ferne gerückt.⁹

Bezog man jedoch, der Newtonschen Tradition folgend, die Gewichtsverhältnisse der Reaktanden in die Messungen ein, so ergab sich ein anderes Bild. Gewicht oder Masse galt ja gewissermaßen als die Quantität schlechthin. So schlug Richard Kirwan 1783 vor, die zur Sättigung erforderlichen Stoffmengen als Affinitätsmaß zu verwenden. Den gleichen Weg schlug Jeremias Benjamin Richter ein.¹⁰ Als Schüler Kants ging es ihm darum, die Chemie vom Verdacht des bloß Empirischen zu befreien und ihr Prestige zu heben. Was Richter wollte, war, die Chemie zu einem Zweig der angewandten Mathematik zu machen. Diesen nannte er "Stöchiometrie oder Meßkunst chymischer Elemente".¹¹ Er verstand darunter das Verfahren zur Bestimmung der Gewichtsverhältnisse, nach denen Stoffe miteinander reagieren. Grundlegend war Richters Entdeckung, daß neutrale Salze sich wieder zu neutralen Verbindungen umsetzen. So ließ sich für jede Säure und jede Base ein fester

Gewichtsanteil angeben, der in allen Neutralsalzen konstant blieb. Auf diesem Wege gelangte Richter zu arithmetischen oder geometrischen Reihen, nach denen sich die elementaren Bestandteile miteinander verbinden sollten. Wo die Natur die der Formel entsprechenden Glieder vermissen ließ, nahm Richter an, es müsse sich um bisher noch nicht aufgefundene Substanzen handeln. Überzeugt, einem fundamentalen Naturgesetz auf der Spur zu sein, dehnte er seinen Ansatz auch auf andere Bestimmungsgrößen wie den Zusammenhang von Dichte und Affinität aus. Die Übereinstimmung mit den bekannten Affinitätstafeln ließ freilich zu wünschen. Oft genug liefen Richters Zahlen der Erfahrung schlichtweg zuwider. Hilfhypothesen, korrigierende Parameter und ein eigenwilliger Stil machen das, was er gemessen und berechnet haben will, kaum nachvollziehbar. So warnte schon Jakob Fries in einer zeitgenössischen Rezension der Richterschen *Stöchiometrie*, es heiße, Kant gründlich mißverstehen, wolle man aus empirischen Daten eine mathematische, d.h. apriorische Wissenschaft konstruieren.¹²

Damit aber war das newtonische Forschungsprogramm einer Quantifizierung chemischer Wirkkräfte um 1800 in eine Sackgasse geraten. Den Ausweg wies bezeichnenderweise ein Gelehrter, der seine Ausbildung in Physik und Mathematik erhalten hatte, Berufserfahrung in der Wirtschaft besaß und sich nie auf die Affinitätsforschung eingelassen hat: Antoine Laurent Lavoisier. Sein Verdienst liegt in der konsequenten Einführung physikalischer Methoden in die chemische Forschung.¹³ Präzisionsmessungen hatten ihn beschäftigt, noch bevor er sich chemischen Fragen zuwandte. Er hat die Waage in der Chemie systematisch benutzt und die Resultate der Wägung als fundamental für die Deutung der Versuche angesehen. Seit dem berühmten Experiment von 1770 über die vorgebliche Umwandlung von Wasser in Erde hatte er sich zum Grundsatz gemacht, sämtliche Reaktionspartner vor und nach einer Umsetzung zu wägen. Auf diese Weise ließ sich der Verlauf einer Umsetzung quantitativ bilanzieren. Wichtig war, daß grundsätzlich geschlossene Systeme betrachtet wurden. Man hat diesen Zugang mit der ökonomischen Theorie jener Zeit und der Praxis kaufmännischer Buchhaltung in Verbindung gebracht.¹⁴ Dabei war die Produktion quantitativer Daten für Lavoisier alles andere als triviale Routine. Das Zentrum seiner Kreativität lag tatsächlich in jenen Bilanzierungen und ihren unendlichen Zahlenreihen. Die Schwierigkeiten, denen Lavoisier begegnete, kamen dabei weniger aus der genauen Wägung als aus der Entscheidung, welche Gewichtsbestimmungen signifikant, welche indirekten Verfahren zur Ermittlung nicht direkt meßbarer Größen erlaubt, welche rechnerischen Korrekturen zulässig und welche Fehlergrenzen zu erwarten waren. Es ging also nicht in erster Linie darum, genauere quantitative Daten zu gewinnen, sondern darum, solchen Daten einen völlig neuen Status in der wissenschaftlichen Theoriebildung zu verleihen.¹⁵

Mit Lavoisier rückt die Elementaranalytik ins Zentrum der Aufmerksamkeit. Mit der analytischen Definition des chemischen Elementbegriffs und der Erkenntnis, daß die meisten Stoffe aus einer relativ kleinen Zahl von Elementen

zusammengesetzt sind, kam es nun darauf an, das relative Mengenverhältnis dieser Elemente zu ermitteln, um eine Substanz im chemischen Sinne eindeutig zu charakterisieren. Doch auch das Lavoisiersche Forschungsprogramm führt keineswegs nahtlos in die moderne Analytik hinein. Vielmehr löste es um 1800 geradezu eine Grundlagenkrise aus. Denn eines der Axiome sowohl der Analytik wie auch der Affinitätsforschung, die Konstanz der Äquivalentmassen in Verbindungen, war keineswegs unumstritten. Zwar hatte Claude-Louis Proust 1797 gezeigt, daß sich die Bestandteile gewisser Verbindungen stets in festen Mengenverhältnissen vereinigen und daß, wenn zwei Elemente miteinander mehrere Verbindungen eingehen, sich die Proportionen in regelmäßigen Sprüngen ändern; doch war Proust nicht in der Lage, einen Grund dafür anzugeben. Auch sprach der empirische Befund eher dagegen. Nur für wenige Verbindungen war ein konstantes Gewichtsverhältnis der Elemente zweifelsfrei nachgewiesen. Diesen stand eine unübersehbare Zahl von Mineralien, Erzen und organischen Stoffen gegenüber, deren Zusammensetzung man nur ungefähr anzugeben wußte. Hinzukam eine Fülle von - wie wir heute wissen - tatsächlich nicht-stöchiometrischen Mineralien. Auch war es nicht üblich, exakt zwischen Verbindung, Lösung und Mischung zu unterscheiden. So konnte der Eindruck entstehen, die Gewichtsverhältnisse bei chemischen Verbindungen seien innerhalb gewisser Grenzen stetig veränderlich, und feste Zahlenverhältnisse seien in der Chemie eher die Ausnahme. Diese Auffassung vertrat Claude Louis Berthollet, der Altmeister der Pariser Chemiker. Beim Studium chemischer Affinitäten hatte er nämlich gefunden, daß der Verlauf einer Reaktion auch von den beteiligten Stoffmengen oder präziser: den Konzentrationen der Reaktionspartner abhängt. Mit anderen Worten: Die Affinität ist niemals die einzige Triebkraft einer Umsetzung, sondern deren Verlauf hängt von etwas ab, was Berthollet als das Produkt von Affinität und Stoffmenge definierte. Es bestand für ihn daher keine Notwendigkeit anzunehmen, daß Stoffe nur in diskreten Mengen miteinander reagieren sollten. Eine quantitative Veränderung bei den Reaktanden bewirkte qualitative Veränderungen bei den Reaktionsprodukten. Damit war der traditionellen Affinitätslehre der Boden entzogen und bekam die Aussagekraft elementaranalytische Daten einen höchst zweifelhaften Wert. Die Krise war perfekt. Lapidar stellte der Mecklenburger Chemiker Carl Karsten 1803 fest:

... so bleibt uns jetzt nur die traurige Gewißheit, daß alle unsere bisher über diesen Gegenstand angestellten Untersuchungen, alle Bemühungen vieler zum Theil der größten und ausgezeichnetsten Chemiker um diesen wichtigen Theil der Chemie, vergebens unternommen wurden; daß die Verhandlungen darüber zum großen Theil unnützer Weise unsere Archive füllen.¹⁶

Es war nicht Lavoisier sondern John Dalton, der die Chemische Revolution vollenden und das Programm einer quantitativen Chemie aus jener Sackgasse herausführen sollte.¹⁷ Aufgewachsen in der Tradition des britischen Newtonianismus, der sich die Materie korpuskular und in hierarchischen Ordnungen

zusammengesetzt vorstellte, galt Daltons Interesse der Mathematik und der Meteorologie. Beim Studium der Luftfeuchtigkeit war er zu der Überzeugung gelangt, daß es sich bei der Luft um ein Gasgemisch handeln müsse und nicht um eine - wenn auch lose - Verbindung, wie dies noch bei Lavoisier der Fall war. Die fehlende Entmischung der Luftbestandteile sowie die Druckabhängigkeit der Löslichkeit von Gasen deutete er als rein physikalische Phänomene. Für Dalton besitzt jedes chemische Element genau eine Art von Atomen, die sich vor allem durch ein definiertes Gewicht auszeichnen. Indem Dalton das Lavoisiersche Konzept des chemischen Elements mit der Atomtheorie verband, erhielt er eine Theorie der Verbindungsbildung, die sich erfolgreich in analytisch-chemische Praxis umsetzen ließ. Ziel der chemischen Forschung war es nach Dalton, Atomgewichte sowie die Anzahl der elementaren Teilchen in einer Verbindung zu ermitteln.

Die entscheidende Wendung, die Dalton mit seinen *A New System of Chemical Philosophy* (London 1808) dem Quantifizierungsprogramm gegeben hatte, bestand darin, daß es ihm nicht darum ging, Anziehungskräfte zu quantifizieren, sondern darum, die Massen der chemischen Elementarbausteine zu bestimmen. Damit war die Auseinandersetzung um die Möglichkeit einer quantitativen Chemie von der Frage nach dem Reaktionsmechanismus (der Frage nach dem *Warum*) auf die Frage nach den *Einheiten* einer Reaktion (der Frage nach dem *Was* und nach dem *Wieviel*) verschoben. Das fruchtlose Bemühen um eine Quantifizierung chemischer Kräfte war durch das Programm einer gewichtsmäßigen Quantifizierung der chemischen Einheiten abgelöst worden. Daltons Atomtheorie ist deshalb auch als die eigentliche Chemische Revolution bezeichnet worden.

Ich habe zu zeigen versucht, daß seit dem 18. Jahrhundert unterschiedliche Forschungsprogramme einer quantitativen Chemie miteinander konkurriert haben. Von diesen kommt der Affinitätsforschung und der Elementaranalytik besondere Bedeutung zu. Dabei erscheint die Gesamtentwicklung weniger als kontinuierliche Zunahme messender Verfahren und fortschreitender Präzisierung, sondern als ein Prozeß, der von mindestens drei scharfen Brüchen gekennzeichnet ist. Der erste Bruch verbindet sich mit der Vorstellung, man könne die Chemie als Mikrodynamik wirkender Kräfte behandeln. Dies war der Anfang des Affinitätsprogramms. Der zweite verbindet sich mit dem Namen Lavoisiers und der strengen Bilanzierung von Massen in geschlossenen Systemen. Damit erhalten Zahlen in Form von Bilanzen und Gleichungen als wissenschaftliche Fakten neuer Art einen bis dahin unbekanntem Stellenwert. Der dritte schließt an Daltons Verknüpfung von Lavoisierschem Elementbegriff und Atomlehre an und führt zur ersten Theorie der chemischen Verbindung im modernen Sinn. In dieser spielte das Atomgewicht als charakteristische Größe die entscheidende Rolle, und damit war erstmals die Voraussetzung für ein erfolgreiches analytisch-chemisches Forschungsprogramm gegeben.

- * Nach einem Vortrag auf der Pharmaziehistorischen Biennale 1992 "Apotheker und Analytik" am 17. Oktober 1992 in Binz auf Rügen.
- 1 Immanuel Kant, *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft* [1786], Vorrede, in: *Immanuel Kant Werke*, Bd. 8 (Darmstadt 1975), S. 15 / A X.
 - 2 Henry Guerlac, "Quantification in Chemistry," *Isis* 52 (1961), 194-214.
 - 3 Wolfgang Schneider, *Geschichte der pharmazeutischen Chemie* (Weinheim 1972), S. 169.
 - 4 Anders Lundgren, "The Changing Role of Numbers in 18th-Century Chemistry," in: Tore Frängsmyr, J.H. Heilbron und Robin E. Rider (Hrsg.), *The Quantifying Spirit in the Eighteenth Century* (Berkeley 1990), S. 245-266.
 - 5 Arnold Thackray, *Atoms and Powers: An Essay on Newtonian Matter-Theory and the Development of Chemistry* (Cambridge 1970).
 - 6 A.L. Lavoisier, "Mémoire sur l'affinité du principe oxygène [1782]," in: *Oeuvres de Lavoisier*, Bd. 2 (Paris 1862), S. 550.
 - 7 William A. Smeaton, "Guyton de Morveau and Chemical Affinity," *Ambix* 11 (1963), 55-64.
 - 8 Michelle Goupil, *Du flou au clair? Histoire de l'affinité chimique de Cardan à Prigogine* (Paris 1991).
 - 9 Martin Carrier, "Die begriffliche Entwicklung der Affinitätstheorie im 18. Jahrhundert: Newtons Traum - und was daraus wurde," *Archive for the History of Exact Sciences* 36 (1986), 327-389.
 - 10 J.R. Partington, "Jeremias Benjamin Richter and the Law of Reciprocal Proportions," *Annals of Science* 7 (1951), 172-198; 9 (1953), 289-314.
 - 11 Jeremias Benjamin Richter, *Anfangsgründe der Stöchiometrie oder Meßkunst chymischer Elemente* (Breslau/Hirschberg 1792-1794).
 - 12 Frederick Gregory, "Romantic Kantianism and the End of the Newtonian Dream in Chemistry," *Archives Internationales d'Histoire des Sciences* 34 (1984), 108-123.
 - 13 C.E. Perrin, "Research Traditions, Lavoisier, and the Chemical Revolution," *Osiris* 4 (1988), 53-81; Evan M. Melhado, "Chemistry, Physics, and the Chemical Revolution," *Isis* 76 (1985), 195-211.
 - 14 Charles B. Gillispie, *The Edge of Objectivity: An Essay in the History of Scientific Ideas* (Princeton 1960), S. 231-232.
 - 15 Frederick Lawrence Holmes, *Lavoisier and the Chemistry of Life: An Exploration of Scientific Creativity* (Madison 1985).
 - 16 Gustav Karsten, "Bemerkungen über Berthollets chemische Affinitätslehre," *Allgemeines Journal der Chemie* 10 (1803), 135-156, hier S. 137.
 - 17 Arnold Thackray, "Quantified Chemistry - The Newtonian Dream," in: *John Dalton and the Progress of Science* (Manchester/New York 1968), S. 92-108; Robert Siegfried und Betty Jo Dobbs, "Composition: A Neglected Aspect of the Chemical Revolution," *Annals of Science* 24 (1968), 275-293.