

Die Karriere der quantitativen Spektralanalyse: Experimentalkulturen zwischen Physik, Chemie und Industrie

Dr. Charlotte Bigg, Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte,
Boltzmannstr. 22, 14195 Berlin <bigg@mpiwg-berlin.mpg.de>

In einem großen Raum, in dem Luft und Wasser reichlich vorhanden sind, wurden vor den Fenstern breite, lichtüberflutete Tische gestellt. Diese sind in der Länge durch zwei Regalebenen geteilt, auf denen sich, wie Bücher in einer Bibliothek, eine Sammlung von griffbereiten Reagenzgläsern befindet. Bedeckt von Utensilien und Gefäßen werden diese Tische für alle gängigen Operationen verwendet. Da tropft eine geklärte Flüssigkeit durch einen Filtertrichter; dort glüht ein Platinschmelztiigel in der Flamme; weiter hinten sprudelt eine Flüssigkeit, deren Dampf in eine ständig von frischem Wasser gekühlte Glasröhre geleitet wird. Die kondensierten Dämpfe fließen in einen Becher, wo die Produkte der Destillation gesammelt werden. Aber woher kommt das Gas für die Heizung und das viel gebrauchte kalte Wasser zum Auflösen, Kühlen und Waschen? Beide werden durch Bleirohre unter dem Fußboden und entlang der Wände geleitet. Somit sind Feuer und Wasser in jedermanns Reichweite.¹

So lobte und bewunderte der französische Chemiker Adolphe Wurtz 1870 die Ausstattung eines modernen Chemielabors, als er im Auftrag der französischen Regierung die wissenschaftlichen Einrichtungen in den deutschen Ländern besichtigte und darüber Bericht erstattete. Diese Ausstattung eines modernen Chemielabors, die zum Teil auf das Gießener Labor von Julius Liebig der 1820er Jahre zurückgeht, ist bis in das 20. Jahrhundert kennzeichnend. Noch in den 1930er Jahren "war der Analytiker umgeben von chemischen Reagenzien und die auffälligste Einrichtung war der Dunstabzug. Seine Schubladen waren gefüllt von den berufstypischen Handwerkszeuge: Becher, Filter, Bürette, und Pipette."²

Wie sah im Vergleich damit ein Physiklabor derselben Zeit aus, beispielsweise die Laboratorien der Berliner oder Straßburger Universität, welche 1878 bzw. 1882 gegründet wurden und bis zum Ersten Weltkrieg als vorbildlich galten? In diesen Einrichtungen war das zentrale Labor mit Tischen auf massiven Steinsäulen ausgestattet, um so die experimentellen Aufbauten vor mechanischen Vibrationen zu schützen. Die Fußbodenbeläge bestanden aus Asphalt oder Eiche;

Räume, die für magnetische Untersuchungen reserviert waren, wurden eisenfrei gebaut. Spezielle Dunkelkammern sowie temperaturstabile Bereiche befanden sich im Keller. Stromgeneratoren, angetrieben durch Dampfmaschinen oder Gasmotoren, sorgten überall für die Stromzufuhr über Kupferleitungen an den Wänden und lieferten auch die Antriebskraft für Experimente.³

Glas, Porzellan und Platin statt Holz, Stein und Kupfer; kondensierende, verdunstende, blubbernde Flüssigkeiten und Gase statt Funken, Drahtspulen und Messgeräte. Auch durch die Adern der Laboratorien flossen unterschiedliche vitale Flüssigkeiten. Während Wasser, Gas und Luft durch das Chemielabor strömten, zirkulierte mechanische und elektrische Kraft durch das Physiklabor. Die unterschiedlichen Arbeitsgewohnheiten spiegelten sich selbst in der Raumaufteilung wider: Adolphe Wurtz befand, dass Chemiker dazu neigten, dicht beieinander in multifunktionalen Räumen zu arbeiten, während die Physiker eher zueinander Distanz bewahrten und das laute Sprechen vermieden, um die empfindlichen Instrumente nicht zu stören. Im Physiklabor waren viele kleinere Räume permanent mit größeren Apparaten oder komplizierten experimentellen Aufbauten besetzt, deren Kalibrierung und Abstimmung so aufwendig war, dass sie nur schwer bewegt werden konnten.⁴

Die Einrichtung der Laboratorien entsprach den besonderen Obsessionen ihrer Bewohner. Um Kontamination und Verunreinigung zu vermeiden, entwickelten Chemiker Lüftungssysteme sowie ausgefeilte Prozeduren zur Lagerung, Säuberung und Entsorgung von chemischen Substanzen.⁵ Die Physiker ihrerseits bemühten sich, allerlei Störungen von außen, thermischer, akustischer, magnetischer oder elektrischer Natur bzw. simplen Staub, fernzuhalten. Beide Umgebungen waren ausdrücklich für die Durchführung von extrem präzisen Arbeiten geschaffen, aber Präzision besaß bei Chemikern und Physikern eine unterschiedliche Bedeutung. Nach Adolphe Wurtz beschäftigten sich die Physiker mit exakten Messungen, dem Bau von präzisen Instrumenten, mit Untersuchungen der Beziehung und Umwandlung von Kräften. Dagegen bestand die Aufgabe der Chemiker in der "Entdeckung, Einordnung, Zersetzung und Wiederherstellung einer immensen Anzahl an Substanzen."⁶ Kurz gesagt: Physiker und Chemiker gehörten verschiedenen wissenschaftlichen Kulturen an; deren Unterschiede waren zwar nicht unüberbrückbar, aber deutlich.

Instrumentelle Kulturen

In welche dieser Kulturen gehörten die Spektroskope? Angesichts der Tatsache, dass die Spektralanalyse bekanntlich gemeinschaftlich von einem Chemiker, Ro-

bert Bunsen, und einem Physiker, Gustav Kirchhoff, erfunden wurde, hätte man erwarten können, dass Spektroskope sowohl in physikalischen als auch chemischen Laboratorien zuhause waren.⁷ Dies war allerdings nicht ganz der Fall. Ende des 19. Jahrhunderts wurden Spektroskope vorwiegend als physikalische Instrumente betrachtet und verwendet. Physiklehrbüchern dieser Zeit ist zu entnehmen, dass Spektroskope Teil der Standardausstattung des Physikunterrichts waren und routinemäßig für Messungen des Brechungsindex von Prismen sowie für eine ganze Reihe von Untersuchungen verwendet wurden. Für Physiker gehörten sie zu einer häufig gebrauchten Familie optischer Instrumente. Wie Goniometer, Photometer oder Theodoliten bestanden Spektroskope aus Glas, Kupfer und Holz; und sie benötigten dieselben Arbeitsbedingungen: eine dunkle, staub- und schwingungsfreie Atmosphäre. Ihre Linsen, Prismen, Spiegel und optischen Röhren waren größtenteils mit denen der anderen Geräte austauschbar.⁸ Hierfür ist zum Beispiel bezeichnend, dass das von August Steinheil vertriebene Bunsen-Kirchhoffsche Spektroskop zu einem Goniometer umfunktioniert werden konnte.

PRELIMINARY TABLE OF SOLAR SPECTRUM WAVE-LENGTHS. III.
By HENRY A. ROWLAND.

| Wave-length | Substance and Character | Wave-length | Substance and Character | Intensity |
|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-----------|
| 4135.384 | 000 | 4135.804 | Ba | 2 |
| 4135.509 | 000 | 4135.847 | 000 | 000 |
| 4135.615 | Fe | 4135.913 | 0 N d? | 0 |
| 4135.739 | 0 | 4135.951 | 0 | 000 |
| 4135.850 | Fe | 4135.971 | Ma | 1 |
| 4135.900 | Y | 4135.987 | Cr | 000 |
| 4136.144 | Fe | 4135.998 | 0 | 000 |
| 4136.332 | Cr | 4136.008 | 0000 | 0 |
| 4136.573 | 0 | 4136.050 | 000 | 0 |
| 4136.798 | 0 | 4136.100 | V | 3 |
| 4137.007 | Cr | 4136.235 | Fe | 10 |
| 4137.076 | 00 N | 4136.351 | 0 N | 0 |
| 4137.225 | 0 | 4136.500 | Ba? | 0 |
| 4137.246 | Cr | 4136.560 | 3 | 0 |
| 4137.279 | Ca | 4136.660 | 0 | 000 |
| 4137.589 | Tl | 4136.703 | Fe | 1 |
| 4137.797 | Fe | 4136.860 | Fe | 4 |
| 4137.957 | Fe | 4136.984 | 000 N | 0 |
| 4138.061 | 0 | 4137.041 | 000 | 0 |
| 4138.251 | V. | 4137.510 | 0 | 000 |
| 4138.281 | 0 | 4137.525 | 0 | 0 |
| 4138.343 | 0 | 4137.571 | Fe | 0 |
| 4138.458 | Cr | 4137.573 | 0000 | 0 |
| 4138.747 | 0 | 4137.695 | Cr | 2 |
| 4138.804 | 2 | 4137.810 | Fe | 3 |
| 4139.054 | 000 N | 4137.850 | 0 N | 0 |
| 4139.127 | 0 | 4137.845 | 0 | 0 |
| 4139.337 | 3 | 4137.950 | Fe? | 0 |
| 4139.476 | Cr | 4137.992 | V-Fe? | 1 |
| 4139.610 | 2 | 4137.995 | 3 | 0 |
| 4139.657 | 000 | 4138.000 | Fe | 5 |
| 4139.780 | 0 | 4138.050 | 00 N | 0 |
| 4139.882 | 1 | 4138.061 | 0 | 0 |
| 4139.912 | 0 | 4138.345 | 0000 | 0 |
| 4139.960 | 2 | 4138.487 | 0? | 0 |
| 4139.991 | 000 | 4138.610 | 0 N d? | 0 |
| 4140.001 | 00 | 4138.828 | 0 | 0 |
| 4140.520 | 00 | 4138.915 | Zr | 0 |
| 4140.604 | 0 | 4138.990 | 00 N | 0 |

| Wave-length | Substance and Character | Wave-length | Substance and Character | Intensity |
|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-----------|
| 4136.245 | 0000 | 4143.200 | 00 | 00 |
| 4136.245 | 00 | 4143.310 | 000 | 000 |
| 4136.527 | 000 | 4143.530 | Tl | 4 |
| 4136.628 | Fe | 4143.572 | Fe | 0 |
| 4136.700 | 0 N d? | 4143.584 | 2 | 0000 |
| 4137.133 | 000 | 4143.782 | 00 N | 0000 |
| 4137.169 | Fe | 4143.801 | 00 N | 0000 |
| 4137.272 | 0000 | 4144.038 | Fe | 15 |
| 4137.272 | 0 N d? | 4144.158 | 00 N | 0 |
| 4137.507 | 2 | 4144.238 | 1 | 000 |
| 4137.509 | Fe, Cr | 4144.303 | 00 | 000 |
| 4137.925 | 000 | 4144.403 | 00 | 000 |
| 4138.038 | 00 | 4144.538 | 00 N | 00 N |
| 4138.134 | 0 | 4144.674 | Ca? | 00 d? |
| 4138.288 | 00 N | 4144.874 | 0000 | 0000 |
| 4138.371 | 0 N | 4144.903 | 00 | 000 |
| 4138.448 | 00 | 4145.018 | 00 | 000 |
| 4138.771 | 0000 | 4145.152 | 0 | 000 |
| 4138.909 | 000 | 4145.242 | 0000 | 0000 |
| 4139.008 | 0 | 4145.337 | 1 | 000 |
| 4139.149 | 00 | 4145.465 | 00 | 000 |
| 4139.244 | 0 | 4145.600 | 00 | 000 |
| 4139.370 | 00 | 4145.914 | 1 N | 0 N |
| 4139.534 | 00 | 4146.000 | 0 N | 0 |
| 4139.585 | 000 | 4146.133 | Fe | 0 |
| 4139.704 | 00 | 4146.225 | 3 | 0 |
| 4139.811 | 000 | 4146.399 | 0 | 0 |
| 4139.899 | Fe | 4146.411 | 0 | 0 |
| 4140.216 | 0000 | 4146.544 | 00 | 000 |
| 4140.316 | 0000 | 4146.655 | 00 | 000 |
| 4140.400 | 0 | 4146.845 | 0 N | 0 |
| 4140.528 | 0 | 4146.907 | 00 | 000 |
| 4140.611 | 00 | 4147.145 | 2 | 0 |
| 4140.658 | 0 | 4147.360 | 00 | 000 |
| 4140.685 | 00 | 4147.502 | Ma | 2 |
| 4141.096 | 000 | 4147.645 | 1 | 000 |
| 4141.208 | 000 | 4147.677 | Fe | 4 |
| 4141.455 | 00 N | 4147.830 | 0 | 000 |
| 4141.500 | 0 | 4148.113 | 00 N | 000 |
| 4141.509 | La | 4148.310 | 00 | 000 |
| 4141.515 | Fe | 4148.419 | 00 | 000 |
| 4141.780 | 00 N | 4148.518 | 00 | 000 |
| 4142.139 | Cr | 4148.558 | 00 | 000 |
| 4142.495 | 2 | 4148.660 | 0 | 000 |
| 4142.502 | Cr | 4148.770 | 00 | 000 |
| 4142.509 | Cr | 4148.808 | 00 | 000 |
| 4142.744 | 2 | 4148.908 | Ma | 0 |
| 4142.803 | 0000 | 4149.077 | 0 | 000 |
| 4143.000 | 00 | 4149.285 | C | 0 |
| 4143.193 | 0 | 4149.390 | Zr | 2 |

Abb. 1: Eine der ca. 200 Seiten aus Henry Rowlands „Preliminary Table of Solar Spectrum Wavelengths,“ die in den ersten Ausgaben des *Astrophysical Journal* erschien. H. A. Rowland, „Preliminary table of solar spectrum wave-lengths,“ *Astrophysical Journal* 1 (1895), 222-223.

Spektroskope waren Teil der instrumentellen Kultur des Physikers im späten 19. Jahrhundert und wurden dementsprechend für die neueren physikalischen Untersuchungen weiterentwickelt; zu erwähnen wäre hier insbesondere die immer genauere Messung der Position von Spektrallinien, entweder für die Aufstellung

von Wellenlängentabellen der verschiedenen Elemente oder für die Untersuchung der Verschiebung von Spektrallinien durch magnetische und elektrische Felder. Um die Empfindlichkeit der Spektroskope zu erhöhen, wurden diese im Laufe der Jahrzehnte mit immer mehr Messschrauben und Vorrichtungen versehen. Zugleich bedeutete dies, dass die Instrumente eine zunehmend aufwendigere Kalibrierung und Abstimmung benötigten, bevor sie Präzisionsmessungen liefern konnten.⁹ Selbst die billigsten Studentenspektroskope boten eine große Anzahl an möglichen Einstellungen und Justierungen. Nach den Behauptungen eines Lehrbuches von 1898 war dies durchaus gewollt, denn solch ein Instrument sollte “möglichst viele Gelegenheiten für die Ausbildung in der genauen Beobachtung und Manipulation” bieten.¹⁰ Das Spektroskop sollte somit den Studenten die Disziplin der Präzisionsmessung der Experimentalphysik näher bringen.

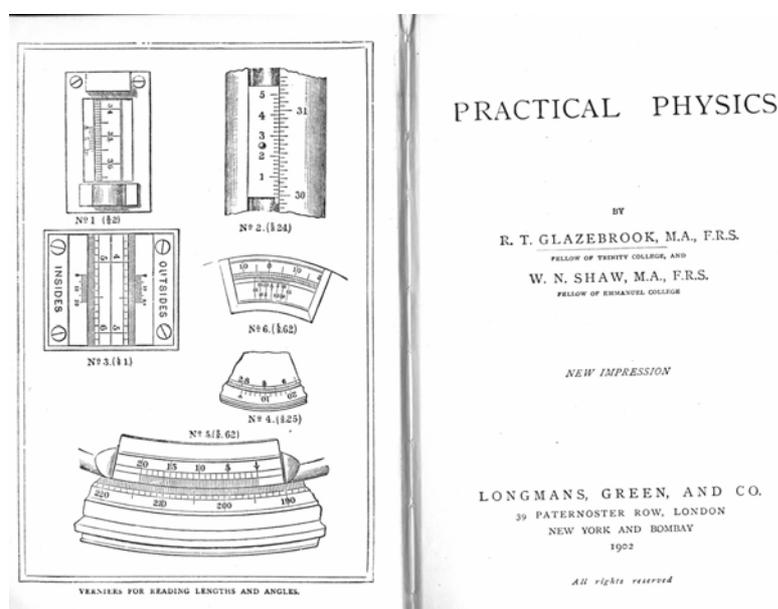


Abb. 2: Die erste Seite eines Physiklehrbuches betont die zentrale Bedeutung der Skala- und Teilkreismessungen in der experimentellen Physik. R. T. Glazebrook, W.N. Shaw, *Practical Physics* (London 1902).

In der Chemie war die Situation eine ganz andere; hier fehlte in vielen Laboratorien eine vergleichbare spektroskopische Kultur. Zwar wurden von Spezialisten im Laufe der Jahrzehnte mehrere neue chemische Elemente mit Hilfe des Spektroskops entdeckt, aber routinemäßig wurde das Instrument in den meisten Laboratorien nur für die Durchführung einer kleinen Anzahl von Experimenten verwendet.¹¹ Diese unterschieden sich im Grunde nicht wesentlich von den Bunsen-Kirchhoffschen Methoden der 1860er Jahre, es ging vor allem um den Nachweis von Elementen mit den einfachsten Spektren – Alkali-, Erdalkalimetalle und Ga-

se – mittels Flamme oder Geißlerröhre.¹² Für die Analyse aller anderen Elemente griffen Chemiker auf die altbekannten, nasschemischen Techniken zurück. Die Spektralanalyse war mit wenigen Ausnahmen, auf die ich zurückkommen werde, eher eine Randerscheinung in den meisten Chemielaboratorien. Damit übereinstimmend fanden Spektroskope in den Chemielehrbüchern der Zeit kaum Erwähnung oder den Chemiestudenten wurde der Rat erteilt, sie sollten die Anwendung des Instruments im Physikunterricht lernen.¹³ Die dritte Auflage von Ernst von Meyers viel gelesener *Geschichte der Chemie* von 1906, schließlich, widmete der Spektralanalyse ganze 14 Zeilen von rund 700 Seiten Text.¹⁴

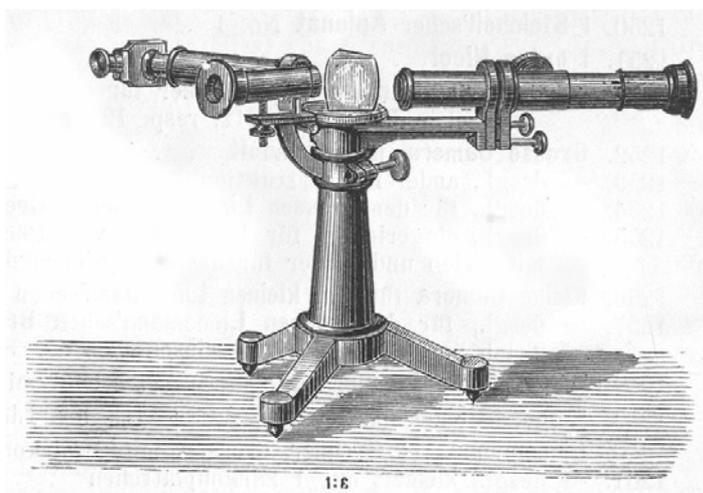


Abb. 3: Ein Bunsensches Spektroskop, ca. 1890. *Preisliste n. 11 über Physikalische Apparate, Chemische Instrumente und Gerätschaften von Ferdinand Ernecke* (Berlin ca. 1890), 72.

Eine Erklärung für diese relative Missachtung ist darin zu erkennen, dass um 1900 noch keine befriedigende Methode der *quantitativen* Spektralanalyse vorlag. 1900 behauptete der Physiker und Spektroskopiker Heinrich Kayser,

dass eine quantitative Analyse in practischem Sinne unmöglich ist. Denn es müsste für jeden einzelnen Inductionsapparat die Fundamentaluntersuchung der Empfindlichkeit besonders ausgeführt werden, es müsste ferner Spannung und Stromstärke und Art der Unterbrechung genau constant gehalten werden; auch weiss Jeder, der etwa mit einem Hammerunterbrecher gearbeitet hat, wie oft sich dabei plötzlich ohne sichtbaren Grund die Art der Entladung ändert. Wenn man noch dazu photographiert, was ja zweifellos grosse Vortheile gewährt, muss die Expositionszeit und die Empfindlichkeit der Platten constant gehalten werden, was bekanntlich auch practisch unmöglich ist.¹⁵

Während Physiker und Astrophysiker mit dem Nachweis eines Elements oder der Bestimmung von Linienpositionen zufrieden waren, interessierten sich die Chemiker hauptsächlich für die quantitative Erfassung eines chemischen Elements innerhalb eines Substanzgemisches. Die Instrumente, Methoden und Ergebnisse der physikalischen Spektralanalyse erwiesen sich dementsprechend als für die chemische Analyse oft ungeeignet. Im Gegenteil, der Fortschritt der physikalischen Spektralanalyse trug dazu bei, dass sich Chemiker von der Methode abwandten. Einem damaligen Instrumentenhersteller zufolge

beschränkt sich der Chemiker auf die Spektroskopie linienarmer Elemente, dagegen kann er mit den Hunderte von Druckseiten füllenden Tabellen der Emissionslinien der Elemente, dem Produkte des Fleißes zweier Generationen von physikalisch geschulten Spektroskopikern, nichts anfangen, sie stellen für den Chemiker eine erdrückende Fülle dar.¹⁶

Bis um 1900 betrachteten also viele Chemiker das Spektroskop als ein physikalisches Instrument, von dem sie wenig zu erwarten hatten.

Physikochemiker

In den darauf folgenden Jahrzehnten änderte sich die Situation allerdings drastisch. Spätestens bis Mitte des 20. Jahrhunderts etablierte sich die Spektralanalyse als eines der bedeutendsten und am weitesten verbreiteten analytischen Verfahren in chemischen Laboratorien. Dass es dazu kommen konnte, ist hauptsächlich zwei Gruppen von Akteuren zu verdanken: *Instrumentenherstellern* und *Physikochemikern*. Ferner sollte hier auch die *Metallindustrie* erwähnt werden, die eine wesentliche Rolle in dieser Geschichte spielte.

Wie bereits erwähnt, gab es unter den Chemikern einige Ausnahmen, die sich intensiv mit der Spektralanalyse beschäftigten und sich in den letzten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts der schwierigen Aufgabe widmeten, zuverlässige Methoden für die quantitative Spektralanalyse zu entwickeln. Diese Wissenschaftler gehörten zu einer kleinen Gruppe von Chemikern, die sich für physikalische Instrumente und Theorien interessierten, die disziplinübergreifend arbeiteten und in der Einführung von physikalischen Instrumenten und Methoden eine Chance für die Chemie sahen – und die nicht, wie manche traditionelleren Chemiker eine mögliche Übernahme durch die Physik fürchteten. Derartige Physikochemiker argumentierten beispielsweise wie folgt:

Unter den analytischen Methoden ist die spektroskopische diejenige, welche durch ihre Empfindlichkeit und leichte Ausführung alle anderen bekannten Me-

thoden übertrifft. Trotz dieser Vorzüge wird dieselbe von den Chemikern verhältnismäßig wenig genutzt und meistens nur von den Physikern angewendet. Und doch muss gestanden werden, dass das Spektroskop ein ausgezeichnetes Instrument ist, mittelst dessen man in der Analyse rascher zum Ziele gelangt und sich manche lästige Untersuchung abkürzen und erleichtern kann.¹⁷

William Abney in Chatham, Walter Hartley in Dublin, Georges Urbain oder Armand de Gramont in Paris sind einige der bedeutendsten Vertreter und Befürworter der chemischen Spektralanalyse im späten 19. Jahrhundert.¹⁸ Allerdings arbeiteten diese Chemiker meistens voneinander isoliert; sie entwickelten unterschiedliche Techniken der quantitativen Spektralanalyse, die selten auf andere Laboratorien übertragen wurden. Dies lag zum Teil daran, dass das Erscheinungsbild der Linien leicht starke Abweichungen zeigen konnte, wenn Temperatur und Länge des Lichtbogens, Luftdruck und Feuchtigkeit oder die Form der Elektroden, usw. nicht absolut stabil gehalten wurden. Dies erforderte aber viel Erfahrung und Geschicklichkeit. Die von Hartley und später de Gramont entwickelte Methode basierte auf Reduktion der Linienanzahl bei abnehmender Konzentration: Hierzu bereiteten sie Proben eines bestimmten chemischen Elements mit abnehmender Konzentration vor und photographierten die jeweiligen Spektren. Diese Methode ermöglichte die quantitative Messung eines Elements mit einer Genauigkeit von +/-10%. Anders verfahren Norman Lockyer oder später Walter Gerlach. Beide werteten für die quantitative Analyse die winzigen Veränderungen der Linienbreite bei unterschiedlicher Konzentration aus.¹⁹

Obwohl diese Physikochemiker mit großer Überzeugung und Engagement für die quantitative Spektralanalyse warben, blieben sie von ihrem Chemikerkollegen weitgehend ungehört. Noch 1926 beschwerte sich Georges Urbain:

es ist außerordentlich bedauerlich, dass viele Chemiker solche wertvollen Methoden vernachlässigen. Ich kann es ihnen nicht zum Vorwurf machen: es ist immer anstrengend und manchmal enttäuschend, so lange nach dem Studium neue Prozeduren auszuprobieren, auf die man nicht vorbereitet wurde.²⁰

Industrieforschung

In den 1920er Jahren waren die quantitativen spektralanalytischen Methoden also weiterhin sehr aufwendig, und eine Einarbeitung in diese Technik erschien den meisten Chemikern daher nicht unbedingt der Mühe wert. Der Impuls, die quantitative Spektralanalyse weiter zu entwickeln und zu verbreiten, kam statt dessen von der Industrie. Ab 1922 veröffentlichten vor allem W.H. Bassett und C.H. Davis, beide von der American Brass Company, eine Reihe von Artikeln in den

Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, in welchen über die Verfeinerung und Anwendung der Methoden von de Gramont und Hartley für die Analyse von Legierungen berichtet wurde.²¹ Diese Veröffentlichungen standen am Anfang einer stetig wachsenden Zahl an Untersuchungen, welche allmählich dazu führten, dass die quantitative Spektralanalyse einen festen Platz in Stahlwerken und anderen Metallindustrien erhielt.²²

Dies war kein Zufall: Die Entwicklung der qualitativen sowie der quantitativen Spektralanalyse war von Anfang an mit der Metallindustrie, insbesondere der Stahlindustrie, verbunden. Bereits Bunsen und Kirchhoff hatten 1862 auf einer Englandreise die Stahlfabrik Sheffield Atlas Works besichtigt und dabei die Anwendung der neu entwickelten Spektralanalyse für die Stahlherstellung diskutiert.²³ Allerdings fand diese neue Technik in den 1860er Jahren wenig Verbreitung in Stahlwerken.²⁴ Nach Ansicht der Stahlhersteller war das Spektroskop nicht unbedingt besser als die geschulten Augen ihrer Arbeiter. Hingegen wünschten sie sich analytische Methoden zur Feststellung von Phosphor und Schwefel in den Erzen, da das Bessemer-Verfahren nur mit phosphor- und schwefelarmen Erzen erfolgreich eingesetzt werden konnte.²⁵ In diesem Bereich aber war die Spektralanalyse bis dahin erfolglos geblieben.

Dieser Herausforderung stellte sich Walter Hartley.²⁶ Anlässlich der Jahresversammlung der *British Association for the Advancement of Science* 1879 hatte Walter Hartley sein Spektroskop mitgenommen, um es in den Sheffielder Stahlwerken auszuprobieren.²⁷ Aus diesem Versuch entwickelte sich ein Forschungsprogramm, welches den Wissenschaftler über 25 Jahre beschäftigen sollte. Sein Ziel war, die

Kenntnisse der Spektralanalyse auf eine solide Grundlage zu stellen, so dass sie systematisch zur quantitativen Analyse von Mineralien angewendet wird, insbesondere für die Prüfung bei der Metallherstellung, zum Beispiel für die Beschaffenheit von Eisenerzen.²⁸

Auch der Chemiker, Aristokrat und Privatier de Gramont beabsichtigte, seine eigenen Methoden der quantitativen Spektralanalyse der Metallindustrie zur Verfügung zu stellen. Insbesondere während des Ersten Weltkrieges machte er sich nützlich, indem er aus eigenem Antrieb Metallproben von deutschen Flugzeugen oder Gewehren sammelte und analysierte. Seine präzisen Analysen deutscher Stahllegierungen halfen der französischen Industrie; diese gewann Einblicke in die deutschen Herstellungsprozesse und konnte die eigene Produktion optimieren.²⁹

Ein wichtiger Faktor für die Aufnahme der spektralanalytischen Methoden von Hartley und de Gramont durch die Industrie war die Gründung von Forschungslaboratorien innerhalb industrieller Firmen. Diese Vorläufer aktueller *Research and Development Departments* gehen, was die Metallindustrie betrifft, in die 1920er und 1930er Jahre zurück, wie das Beispiel der *American Brass Company* zeigt. Vor dieser Zeit waren zwar schon lange analytische Chemiker in Fabriken beschäftigt, allerdings führten diese fast nur Routineanalysen durch, die wenig Kreativität und Initiative erforderten. Das Neue der Industrielaboratorien nach dem Ersten Weltkrieg bestand in ihrer Zielsetzung, dass künftig gut ausgebildete Wissenschaftler Forschung betreiben sollten, um industrielle Prozesse zu verbessern und weiter zu entwickeln.³⁰

Obwohl die Industriechemiker eifrig daran arbeiteten, die quantitative Spektralanalyse für die Routine zu standardisieren, blieb die Methode noch lange so aufwendig, dass nur erfahrene und gut ausgebildete Chemiker sie ausführen konnten. Wie Bassett und Davis betonten,

muss jeder Operator die Probleme mit dem Instrument und den Hilfsapparaten unter seiner Verantwortung selbst bewältigen. Die Erfahrung führt allerdings allmählich dazu, dass man eine immer klarere Vorstellung von dem prozentualen Anteil jedes Elementes in einer unbekanntenen Probe bekommt, besonders wenn alle Beleuchtungskonditionen so konstant wie möglich gehalten werden.³¹

Um die quantitative Spektralanalyse tatsächlich zu etablieren, war das Mitspiel des letzten Akteurs, des *Instrumentenherstellers*, nötig. Um diesen soll es im Folgenden gehen.

Instrumentenhersteller

Unter den Spektroskopfabrikanten des späten 19. und frühen 20. Jahrhunderts war die Londoner Firma Adam Hilger sicherlich nicht die größte, dafür aber eine der innovativsten. Ab ca. 1900 verfolgte der Leiter Frank Twyman das Ziel, die Spektralanalyse und die Spektroskope bei den Chemikern zu etablieren. 1901 brachte Twyman ein vereinfachtes Instrument auf den Markt, das *constant deviation spectroscope*.³² Bei diesem Gerät war die Anzahl der möglichen Einstellungen erheblich vermindert. Wenig später wurde das Spektroskop mit einem so genannten *Drum*, d.h. einer Trommel versehen, damit nach einer relativ leichten Kalibrierung die Wellenlängen direkt abgelesen werden konnten, was die sonst übliche aufwendige Berechnung ersparte.³³ Twyman wurde ursprünglich durch die Arbeiten von Hartley inspiriert, bei Chemikern einen Absatzmarkt für seine

Spektroskope zu suchen.³⁴ Anders als die Physikochemiker, die sich über die Widerwilligkeit ihrer Kollegen beschwerten, argumentierte Twyman, dass „vielleicht der wichtigste Grund, dass der Chemiker die Spektroskopie meidet, ein Mangel an geeigneten Geräten ist.“³⁵

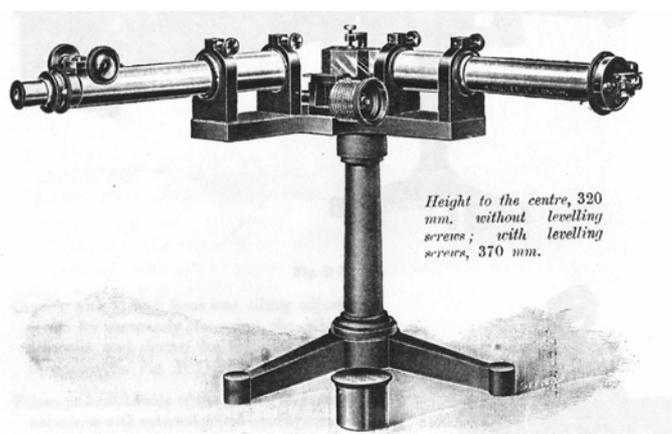


Abb. 4: Eine frühe Version des „constant deviation wavelength spectrometer“ von Hilger. *Optical Convention Catalogue 1905* (London 1905), 220.

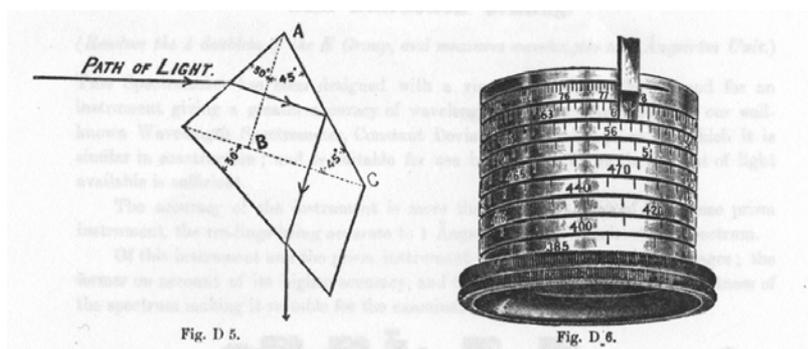


Abb. 5: Detail des „Constant Deviation Wavelength Spectrometer“: die mit Index und Wellenlängen versehene Trommel. Links ist die optische Bahn des Lichts im „constant deviation prism“ dargestellt. Beide Vorrichtungen erleichterten erheblich die Bedienung des Spektroskops. Adam Hilger, Limited, *Catalogue 1912*, D 3-4.

1906 kam der Spektrograph, ein Spektroskop mit einer integrierten photographischen Kamera, heraus, der „pre-adjusted and ready to use“ verkauft wurde.³⁶ Das bedeutet, die Vorrichtungen der herkömmlichen Instrumente, die zutiefst Ausdruck der experimentalphysikalischen Präzisionskultur waren, beispielsweise die große Anzahl der Schrauben und Teilkreise, wurden abgeschafft bzw. durch einfachere Systeme ersetzt. Zudem lieferte Hilger photographische Spektren und skalierte Schablonen, um die Erkennung bestimmter Elemente zu vereinfachen.³⁷ Twyman legte den Schwerpunkt also mehr auf die Erkennung von Linienmu-

stern, statt auf die Messung der Wellenlänge einer Linie. Damit versuchte er, an die spezifische Kultur der Chemiker anzuknüpfen. Statt zu verlangen, dass Chemiker sich eingehend mit den Methoden der Spektralanalyse beschäftigten, arbeitete der Instrumentenhersteller daran, möglichst viel von diesem Wissen in dem Instrument selbst und in der begleitenden Dokumentation einzubauen.

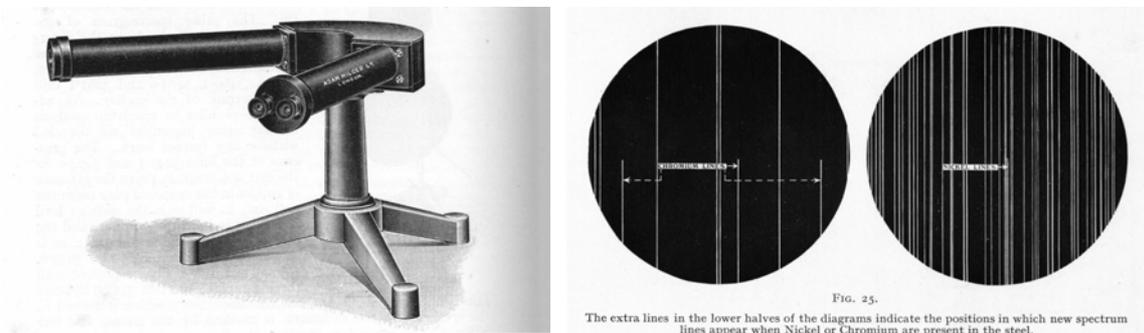


Abb. 6 u. 7: Ein (optisches) „constant deviation wavelength spectrometer“ zum Nachweis von Nickel and Chrom in Stahl wurde von Hilger in 1929 entworfen: „The two eyepieces are fixed so that they view only one section of the spectrum: in the field of one eyepiece appears a characteristic group of nickel lines if that metal is present (right hand above), while in the field of the other appears a characteristic group of chromium lines if that material is present (left).“ W. A. Naish and J. E. Clennell, *Select Methods of Metallurgical Analysis* (London, 1929), 454.

Über Jahrzehnte setzte Twyman sich für die Entwicklung, Vereinfachung, Standardisierung und Verbreitung der quantitativen Spektralanalyse ein. Kurz nach dem Ersten Weltkrieg wandte er sich auch zunehmend an Chemiker in der Metallindustrie. Er oder seine Mitarbeiter veröffentlichten in den 1920er Jahren eine Reihe von Büchern, Prospekten und Tabellen über die Hartley-de-Gramont-Methoden.³⁸ Hilger vertrieb sogar von 1923 an das nach de Gramont genannte *R[aies] U[ltimes] Powder*, eine sorgfältige Zusammenstellung von Elementen sehr niedriger Konzentration. Zusammen mit einer Photographie des Spektrums dieses Pulvers konnte jeder Besitzer eines Hilger-Spektrographen schnell lernen, Elemente zu erkennen und Konzentrationen zu bestimmen.³⁹ Somit fungierte Hilger nicht nur als Erbauer von Instrumente, sondern als aktiver Entwickler und Befürworter der Methoden der quantitativen Spektralanalyse in Chemie und Industrie. Der Instrumentenhersteller spielte eine wichtige Rolle, indem er sich zwischen den verschiedenen Experimentalkulturen (Physik, Chemie, physikalische Chemie, Metallindustrie) bewegte und wesentlich zum Austausch unter diesen Disziplinen und Kulturen beitrug.

Die Bemühungen unterschiedlicher Akteure, wie Physikochemiker, industrielle Forschungschemiker und Instrumentenhersteller, führten letzten Endes dazu, dass

die quantitative Spektralanalyse allmählich Verbreitung fand. Ein zuverlässiges Zeichen dafür ist, dass ab Mitte der 1920er Jahre eine Reihe von Konkurrenten auf dem Markt der quantitativen Spektrographen auftraten. Insbesondere Carl Zeiss, Jena in Deutschland, sowie Bausch & Lomb in den USA, brachten eigene Modelle auf dem Markt.⁴⁰ Fritz Löwe, der Vorsteher der Zeiss-Werke, Abteilung für optische Messinstrumente, schrieb 1925 in seinem Buch *Optische Messungen des Chemikers und des Mediziners*, dass die Methoden der quantitativen Spektralanalyse in Vergessenheit geraten und erst durch den Krieg wieder aktuell geworden seien.⁴¹

„Instrumental Revolution“

Die Geschichte der Entwicklung, Einführung und Verbreitung der quantitativen Spektralanalyse ist nur ein Beispiel oder der Anfang einer umfassenderen Bewegung, die den Name *Instrumental Revolution* trägt. Die quantitative Spektralanalyse gehört einer Familie von ursprünglich physikalischen Techniken an, die im Laufe des 20. Jahrhunderts in die Chemie aufgenommen wurden. Dazu gehören auch Infrarot- und Röntgenspektrometrie, Massenspektrometrie oder NMR. Die Aufnahme solcher Techniken führte allmählich zu einer grundlegenden Verwandlung des chemischen Labors und der Tätigkeit des Chemikers.⁴²

Darüber hinaus zeigt diese Geschichte, wie bestimmte Instrumente, Methoden, oder *know-hows* zirkulieren, wie sie von einer Disziplin oder einem Umfeld in ein anderes übergehen und sich dabei den Wünschen und Interessen der Anwender entsprechend verändern. Die Wissenschafts- und Technikgeschichte hat sich eingehend mit der Geschichte der Entdecker und Entdeckungen beschäftigt. Ergänzend wäre die Geschichte der Verbreitung und Anwendung von wissenschaftlichen Techniken und Wissen wünschenswert. Tatsächlich ist nicht immer davon auszugehen, dass sich eine neue Technik, ein Instrument oder eine Theorie von selbst verbreitet und Anhänger findet, nur weil sie besonders ‘gut’ oder ‘innovativ’ sind. Vielmehr bedarf die erfolgreiche Durchsetzung einer neuen Technik meist des aktiven Zusammenspiels verschiedener Akteure und Faktoren: Nicht nur die wissenschaftlichen Entdecker, sondern auch Instrumentenhersteller, andere Wissenschaftler oder aber auch Industrielle, spielen oft eine wichtige, manchmal übersehene Rolle im wissenschaftlichen Fortschritt.⁴³

Die Berücksichtigung der komplexen, heterogenen Netzwerke, welche die Durchsetzung einer Entdeckung ermöglichen, bietet zudem spannende Einsichten in die Wissenschafts- und Technikgeschichte. Die Geschichte der Entdeckung und Verwendung wissenschaftlicher Instrumente hilft uns zum Beispiel, neue

Perspektiven über die Geschichte wissenschaftlicher Disziplinen zu entwickeln, indem diese nicht nur als einen Korpus von Theorien, sondern auch als ein Ensemble von Praktiken, Gesten und *know-hows* betrachtet werden. Nicht nur die Theorien, sondern auch die praktischen Handlungen im Labor bieten aufschlussreiche Einsichten in die Natur der Chemie und des Chemiker-Seins.

Schließlich kann ein solcher historischer Ansatz auch zu einem differenzierteren Verständnis der viel debattierten Frage um Innovation beitragen: Innovation entsteht manchmal nicht nur im Geist des Wissenschaftlers, sondern auch durch alltägliche Handlungen, Versuche und den Austausch zwischen Labor, Werkstatt und Fabrik.

Vortrag aus Anlass der Verleihung des Paul-Bunge-Preises für die Geschichte wissenschaftlicher Instrumente am 24. Mai 2007 auf der Jahrestagung der GDCh-Fachgruppe Geschichte der Chemie. Es handelt sich um einen Auszug aus meiner Doktorarbeit *Behind the Lines: Spectroscopic Enterprises in early 20th-century Europe* (University of Cambridge 2002). Für Kritiken und Anmerkungen bin ich den Teilnehmern der Tagung dankbar. Ich danke Annik Pietsch und Christoph Meinel für ihre Hilfe bei der sprachlichen Überarbeitung des Textes.

- 1 A. Wurtz, *Les Hautes Etudes Pratiques dans les Universités allemandes. Rapport présenté à son excellence le Ministre de l'Instruction Publique* (Paris 1870), 7-8. Alle Übersetzungen sind von mir.
- 2 J. K. Taylor, 'The impact of instrumentation on analytical chemistry', in J. Stock und M. Orna (Hrsg.), *The History and Preservation of Chemical Instrumentation* (Dordrecht 1985), 1.
- 3 D. Cahan, 'The institutional revolution in German physics, 1865-1914', *Historical Studies in the Physical Sciences* 15 (1984-5), 30-33.
- 4 A. Wurtz, *Les Hautes Etudes Pratiques dans les Universités d'Allemagne et d'Autriche-Hongrie. Deuxième Rapport présenté à M. le Ministre de l'Instruction Publique* (Paris 1882), 14.
- 5 *Ibid.*, 15.
- 6 A. Wurtz, *Les Hautes Etudes Pratiques dans les Universités Allemandes. Rapport présenté à son excellence le Ministre de l'Instruction Publique* (Paris 1870), 6-7.
- 7 Über den hybriden Status der Spektralanalyse in den ersten Jahrzehnten nach ihrer Entdeckung siehe: F.A.J.L. James, 'The extension of terrestrial chemistry in the mid-nineteenth century: spectrochemical analysis and the composition of the solar system', *Proceedings of the Royal Institution* 58 (1986), 17-30; D. Aubin, 'Le beau climat d'Italie: Jules Janssen, the spectroscope and travel: orchestrating observatory, laboratory and scientific expedition in the late 1860s' *Nuncius* 17 (2002), 143-162; Klaus Staubermann, 'Investigating vision and the reversion spectroscope', *Nuncius* 18 (2003), 755-764.

- 8 Siehe J. A. Bennett, *The Divided Circle* (Oxford 1987).
- 9 Eine Beschreibung einer spektroskopischen Kalibration ist zum Beispiel in F. Kohlrausch, *Lehrbuch der Praktischen Physik*, 12. Aufl. (Leipzig und Berlin 1914), 302, angegeben.
- 10 J. Landauer, *Spectrum Analysis* (London, 1898), vii-viii.
- 11 A. Wurtz, *Les Hautes Etudes Pratiques dans les Universités Allemandes. Rapport Présenté à son Excellence le Ministre de l'Instruction Publique* (Paris 1870), 9. Spektroskopie kommt auch in zeitgenössischen Wörterbüchern der Chemie vor, z. B. A. Wurtz, 'Analyse spectrale', *Dictionnaire de Chimie Pure et Appliquée* Bd. I, 294-7 (Paris 1874) oder A. Ladenburg, 'Spectralanalyse', *Handwörterbuch der Chemie* Bd. XI, 1-45 (Breslau 1893).
- 12 G. Urbain, *Einführung in die Spektrochemie* (Dresden und Leipzig 1913), 8
- 13 K. Hentschel, 'The Culture of visual representations in spectroscopic education and laboratory instruction', *Physics in Perspective* 1 (1999), 286.
- 14 E. von Meyer, *A History of Chemistry from earliest times to the present day* (London 1906).
- 15 H. Kayser, *Handbuch der Spectroscopie* (Leipzig, 1900-1910), Bd. V, 26.
- 16 F. Löwe, *Optische Messungen des Chemikers und des Mediziners* (Dresden und Leipzig, 1925), 39.
- 17 J. Formánek, *Qualitative Spectralanalyse* (Berlin 1900), III-IV. Siehe auch C. Gänge, *Anleitung zur Spectralanalyse* (Leipzig, 1893); J. Landauer, *Spectral Analysis* (London 1898).
- 18 Siehe auch W. Hempel, 'Über quantitative Spectralanalyse', *Zeitschrift für Angewandte Chemie* 23 (1910), 1756-1759; L. C. Glaser, 'Die metallurgischen Vorgänge beim sauren und basischen Windfrischverfahren auf Grund spektralanalytischer Beobachtungen', *Stahl und Eisen* 40 (1919), 73-80, 111-117 und 188-193; G. Krüss, 'Zur Quantitativen Spectralanalyse', *Bericht der Deutschen Chemischen Gesellschaft zu Berlin* 18 (1885), 983-6; G. Krüss, 'Ueber einen Universalspectralapparat für qualitative und quantitative chemische Analyse', *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft zu Berlin* 19 (1886), 2739-45; G. Krüss, 'Beziehungen zwischen Zusammensetzung und Absorptionsspektrum organischer Verbindungen', *Zeitschrift für Physikalische Chemie* 2 (1888), 312-337; G. und H. Krüss, 'Beiträge zur quantitativen Spektralanalyse', *Zeitschrift für Anorganische Chemie* 1 (1892), 104-111; G. Krüss, *Spezielle Methode der Analyse* (Hamburg, 1892); G. und H. Krüss, *Kolorimetrie und Quantitative Spektralanalyse* (Hamburg and Leipzig 1909).
- 19 J. N. Lockyer und W. Chandler Roberts, 'On the quantitative analysis of certain alloys by means of the spectroscope', *Philosophical Transactions* 164 (1874), 499.
- 20 G. Urbain in J. Bardet, *Atlas de Spectres de l'Arc* (Paris 1926), 6-13.
- 21 W. H. Bassett und C. H. Davis, 'Spectrum analysis in an industrial laboratory', *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers* 68 (1923), 662-669. Siehe auch: W. F. Meggers, C. C. Kiess, und F. J. Stimson, 'Practical spectrographic analysis', *U.S. National Bureau of Standards Scientific Papers* n. 444 (1922-3), 235-55.

- 22 Wie man zum Beispiel aus dieser Bibliographie entnehmen kann: W. F. Meggers and B. F. Scribner, *Index to the Literature on Spectrochemical Analysis 1920-1939* (Philadelphia 1941).
- 23 Die Besichtigung wird beschrieben in Sir J. N. Alleyne, 'On the estimation of small quantities of phosphorus in iron and steel by spectrum analysis', *Journal of the Iron and Steel Institute* (1875), 76. Bei der Stahlherstellung nach dem Bessemer-Verfahren wird das flüssige Roheisen mit Luft gefrischt, die über Düsen im Konverterboden eingepresst wird. Durch diese Luftzufuhr kommt es zum Verbrennen der unerwünschten Eisenbegleiter wie Kohlenstoff, Silizium und Mangan. Entscheidend für die Qualität des Stahls war hierbei der Zeitpunkt der Unterbrechung der Luftzufuhr. Traditionell wurde dieser Zeitpunkt durch genaue Beobachtung der Veränderung der Flammenfarbe bestimmt; das Spektroskop konnte eingesetzt werden, um diesen Zeitpunkt zu bestimmen. Bunsen hatte sich schon lange mit der Anwendung wissenschaftlicher Methoden in der Metallindustrie beschäftigt. Siehe u.a.: R. Bunsen und L. Playfair, 'Untersuchungen über die englische Roheisenbereitung', *Journal für Praktische Chemie* 42 (1847), 145-8, 257-74, und 385-400; R. Bunsen, *Gasometrische Methoden* (Braunschweig 1857).
- 24 Vor allem in England; siehe S. T. Turner, 'Applying a new science to a new industry: the promise of spectrum analysis and the reality of the Bessemer process of making steel', *Rittemhouse* 8 (1994), 58; Sir J. N. Alleyne, 'On the estimation of small quantities of phosphorus in iron and steel by spectrum analysis', *Journal of the Iron and Steel Institute* (1875), 76.
- 25 Siehe J. C. Carr und W. Taplin, *History of the British Steel Industry* (Oxford 1962), 98.
- 26 Zu Hartley siehe J. Y. B., 'Sir Walter Noel Hartley, 1846-1913', *Proceedings of the Royal Society of London A* 90 (1914), VI-XIII.
- 27 W. N. Hartley, 'Flame spectra at high temperatures part III: the spectroscopic phenomena and thermo-chemistry of the bessemer process', *Philosophical Transactions* 185 (1894), 1047.
- 28 W. N. Hartley, 'Researches in spectrum photography in relation to new methods of quantitative chemical analysis- Part II', *Philosophical Transactions* 175 (1884), 326; W. N. Hartley und H. Ramage, 'An investigation of the spectra of flames at different periods during the basic bessemer blow', *Journal of the Iron and Steel Institute* (1901), 197-233.
- 29 A. de Gramont, *Bulletin de Recherches et d'Inventions* 9:480 (1920); A. de Gramont, 'Sur l'emploi de l'analyse spectrographique en métallurgie: spectres de dissociation des aciers spéciaux', *Revue de Métallurgie (Mémoires)* 19 (1922), 90-100.
- 30 Über die Geschichte industrieller Forschungslaboratorien siehe R. Fox und A. Guagnini, *Laboratories, Workshops and Sites. Concepts and Practices of Research in Industrial Europe, 1800-1914*, *Historical Studies in the Physical Sciences* 29 (1998-1999). Speziell in der Chemieindustrie siehe A. S. Travis, W. J. Hornix und R. Bud (Hrsg.), *Organic Chemistry and High Technology, 1850-1950*, *British Journal for the History of Science* 25 (1992).
- 31 W. H. Bassett und C. H. Davis, 'Spectrum analysis in an industrial laboratory', *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers* 68 (1923), 666-7.
- 32 'Spectroscope of constant deviation', A. Hilger, *Price list of spectroscopes, spectroscopic accessories and optical work* (Januar 1901), 4-5.

- 33 *Wavelength spectroscope* (Oktober 1903), Hilger Akte 2/12, Trade Literature Collection, Science Museum Library, Imperial College, London.
- 34 F. Twyman, 'Reflections on fifty years in the scientific instrument industry', *Instrument Practice* 4 (Feb. 1950), 177.
- 35 F. Twyman, *On the Development and Present Position of Chemical Analysis by Emission Spectra* (London, 1927), 13-14.
- 36 Adam Hilger Ltd., *Spectrographs for the Ultra-violet*, (London 1908), 1.
- 37 *Ibid.*, 2.
- 38 z.B. S. Judd Lewis, F. Twyman, *Optical Methods in Control and Research Laboratories* (London, 1920); Adam Hilger Ltd., *Hilger Instruments in Industry* (London 1921); J. N. Goldsmith und F. Twyman, *Wavelength Tables for Spectrum Analysis* (London, 1923), Adam Hilger, Ltd., *Spectrographic Outfits for Metallurgical Analysis* (London 1930).
- 39 *Mr Twyman's lecture about Aug. 1944*, 21. Hilger Akte 3/1, Trade Literature Collection, Science Museum Library, Imperial College, London. Später wurden die *H. S. Substances* entwickelt. Adam Hilger, Ltd., *Hilger Spectroscopically Standardised Substances* (London 1934).
- 40 Siehe z.B. F. Löwe, *Optische Messungen des Chemikers und des Mediziners* (Dresden und Leipzig 1925),
- 41 F. Löwe, 'Eine vergessene Methode der quantitativen Spektralanalyse', *Zeitschrift für Technische Physik* 5 (1924), 567.
- 42 Über die Instrumental Revolution siehe insb. P. J. T. Morris und A. S. Travis, 'The role of physical instrumentation in structural organic chemistry' in J. Krige und D. Pestre (Hrsg.), *Science in the Twentieth Century* (Amsterdam 1997), 715-740; Y. M. Rabkin, 'Technological innovation in science, the adoption of infrared spectroscopy by chemists', *Isis* 78 (1987), 31-54; P. T. J. Morris (Hrsg.), *From Classical to Modern Chemistry: the Instrumental Revolution* (London 2002); C. Reinhardt, *Shifting and Rearranging: Physical Methods and the transformation of modern chemistry* (Sagamore Beach 2006).
- 43 Siehe u.a. E. von Hippel, *The Sources of Innovation* (Oxford 1988), T. J. Pinch and W. E. Bijker, 'The social construction of facts and artifacts: or how the sociology of science and the sociology of technology might benefit each other', *Social Studies of Science* 14 (1984), 399-441; B. Joerges und T. Shinn (Hrsg.), *Instrumentation, between Science, State and Industry* (Dordrecht 2001).