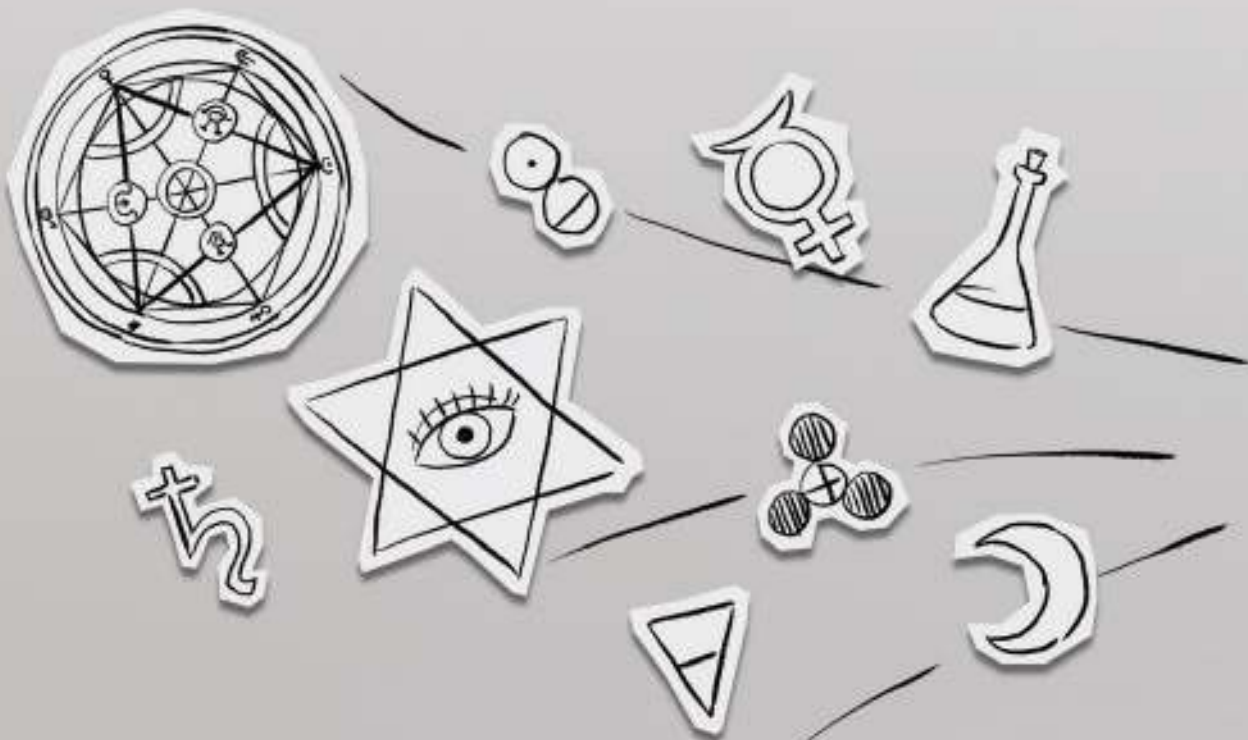


Eine Geschichte der Chemie – Teil 1

Die Chemie: Eine Naturwissenschaft?

Die Chemie war lange Zeit die Nachzüglerin unter den Naturwissenschaften. Zu stark war der Wunsch der Menschen, dem Tod zu entgehen und die Armut zu überwinden, um die Versprechen der Alchemie aufzugeben und den Sprung in die Wissenschaft zu wagen. Wie die Chemie die Mystik der Alchemie hinter sich liess und die chemische Industrie geboren wurde, erfahren Sie hier, im ersten Teil unserer zweiteiligen Reihe zur Geschichte der Chemie.



Die Anfänge der Chemie

Seit Tausenden von Jahren befassen sich Menschen mit Chemie. Die erste Nutzung chemischer Prozesse datiert auf das vierte Jahrtausend vor Christus und dient der Gewinnung von Metallen aus Erzen. Der Schritt von der blossen Nutzung der Chemie zu einer wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit ihren Fragestellungen wird allerdings erst wesentlich später getan: Erst in der griechischen Antike dokumentieren die Naturphilosophen eine solche Auseinandersetzung mit der Natur und die daraus resultierenden Erklärungsversuche zur Erscheinungswelt. So befasst sich z. B. Demokrit (ca. 460–371 v. Chr.) mit dem Aufbau der Materie. Er vertritt wie sein Lehrer Leukipp die Hypothese, dass Materie aus winzigen, unteilbaren Teilchen besteht. Es ist Demokrit, der das Wort «Atom» prägt, das vom griechischen Wort *átomos*, zu Deutsch unteilbar, abgeleitet ist.

Seit der Mensch gelernt hat, Bronze zu isolieren, sind zahlreiche Metalle hinzugekommen, die für unterschiedliche Zwecke genutzt werden. Je nach Verwendung müssen sie gewisse Anforderungen erfüllen. Die Analytik, die das sicherstellt, finden Sie unter bit.ly/metalapplications.

Die Alchemie: eine Geheimwissenschaft

Aus den theoretischen Betrachtungen der griechischen Naturphilosophie entwickelt sich später die Alchemie, die wie die modernen Naturwissenschaften das Ziel hat, anhand von Experimenten Erkenntnisse über die Natur zu gewinnen. Sie wird von Griechenland nach Ägypten und Babylonien gebracht und gelangt wesentlich später auch ins mittelalterliche Westeuropa. Einige Stolpersteine behindern allerdings lange Zeit ihren Fortschritt: Insbesondere einige Grundannahmen der Alchemie, die nicht auf Beobachtungen der Natur, sondern auf Mystik und Aberglauben beruhen, stehen echten wissenschaftlichen Erkenntnissen im Wege. Hinzu kommt, dass die alchemistische Fachsprache uneinheitlich ist und, mehr noch, bewusst vage und unverständlich gehalten wird, um Aussenstehende vom Wissen auszuschliessen.

Ungeachtet ihrer Fehler haben die Alchemisten des Mittelalters eine – für ihre Zeit – solide wissenschaftliche Grundausbildung. Sie lernen, mit Stoffen zu experimentieren, und sie verstehen es besser als jeder andere, Reinstoffe und Stoffbestandteile zu isolieren und neue Gemische herzustellen. Ihre Fähigkeiten qualifizieren die Alchemisten für die Arbeit in Bergwerken, Münzstätten, Schmieden und auch Apotheken.

DEMOKRIT



400 v. Chr.

Leukipp und Demokrit entwickeln die Atomvorstellung

4. Jahrtausend v. Chr.

Metallgewinnung aus Erzen



1. bis 3. Jh. n. Chr.

Erste alchemistische Schriften in Griechenland und Ägypten

Im Zuge ihrer Tätigkeit dort isolieren sie bislang unbekannte Stoffe, verbessern die Lebensmittelkonservierung, schaffen Legierungen – doch die Erkenntnisse bleiben punktuell. Eine umfassende, systematische Chemie kann auf den Grundpfeilern der Alchemie noch nicht wachsen.

Der Zusatz von Konservierungsstoffen ist, wie die Lebensmittelproduktion im Allgemeinen, streng reguliert. Unsere Industrieseite «Lebensmittel und Getränke» fasst das Wichtigste über die dazugehörige Analytik zusammen: www.metrohm.com/industries

Descartes und der Zweifel

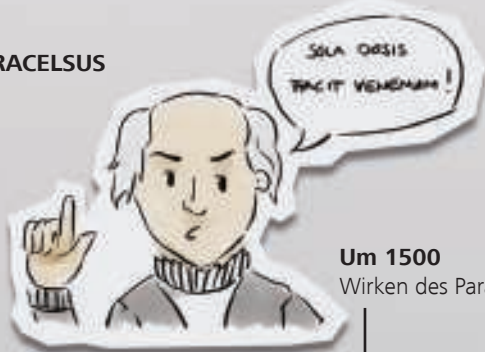
Eine unvoreingenommene naturwissenschaftliche Forschung wird erstmals möglich, als die Denker der Renaissance beginnen, alles kritisch zu hinterfragen, was nicht klar und ohne Zweifel ersichtlich ist. Der französische Philosoph René Descartes (1596–1650) revolutioniert die Naturwissenschaften mit seiner Methode des Zweifelns, mit der Annahmen hinterfragt und überprüft werden können, um systematisch Wissen zu generieren. Selbst die Lehren religiöser Autoritäten werden in Zweifel gezogen – bisher ein absolutes Tabu. Descartes fördert ausserdem die Mathematik als Grundlage aller Naturwissenschaften, um die Natur nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ beschreiben und erklären zu können.

In der Physik setzen sich Descartes Ideen schnell durch und werden von anderen Wissenschaftlern aufgegriffen und weiterentwickelt, etwa von Isaac Newton (1643–1727). Descartes und Newton geben mit ihrer Arbeit den Startschuss für den rasanten Fortschritt in der Physik und der Astronomie ab, doch die Chemie bleibt aussen vor: Noch Newton selbst sucht Zeit seines Lebens nach dem Stein der Weisen, der durch «Transmutation» unedle Metalle in Gold verwandeln soll.

Die Alchemie verliert das «Al»

Robert Boyle (1627–1692) ist ein Vorreiter der modernen Chemie: Er versucht als Erster, das Wissen der Alchemisten über Stoffeigenschaften und Reaktionen in einer umfassenden Theorie zusammenzufassen und entmystifiziert die Chemie und ihre Fachsprache. Er ist es, der das «Element» als das Endprodukt der Analyse definiert, also als Reinstoff. Boyles rationale Herangehensweise ist bis dahin einmalig in der Chemie. Seine Erkenntnisse bringt er 1661 in seinem bahnbrechenden Werk «The Sceptical Chymist» – «Der skeptische Chemiker» – an die Öffentlichkeit. Er läutet damit den Übergang von der Alchemie zur Chemie ein, der im Titel des Buchs durch das Fallenlassen der Vorsilbe «Al» buchstäblich sichtbar wird. Nichtsdestotrotz praktiziert Boyle bis ans Ende seines Lebens Alchemie und glaubt nach wie vor an die Transmutation. Der endgültige Durchbruch der Chemie lässt noch bis ins frühe 19. Jahrhundert auf sich warten.

PARACELSUS



Um 1500
Wirken des Paracelsus

BOYLE



Frühes 17. Jhr.
Descartes fördert die Mathematik als Grundlage der Naturwissenschaften

1100
Erster Kontakt Westeuropas mit der Alchemie

DESCARTES



1661
Boyle veröffentlicht «The Sceptical Chymist»

Exkurs: Elektrochemie

Um 1800 entwickelt Alessandro Volta die erste Batterie: die Voltasche Säule. Mit ihr beginnt die Geschichte der Elektrochemie. Die Säule besteht aus abwechselnd aufeinandergestapelten Kupfer- und Zinkplatten, die jeweils durch ein mit Elektrolytlösung getränktes Tuch voneinander getrennt sind. Humphry Davy (1778–1829) nutzt die Säule in seinen elektrochemischen Experimenten und entdeckt in den Jahren 1807 und 1808 zahlreiche Elemente durch Elektrolyse von Salzlösungen oder heißen Salzschnmelzen. Dazu zählen Natrium, Kalium, Calcium und Magnesium. Ausserdem isoliert Davy durch Elektrolyse von Kochsalzlösung das Chlor, das mit Wasserstoff zu Chlorwasserstoff reagiert. Bis zu diesem Zeitpunkt wird angenommen, Sauerstoff sei der charakteristische Bestandteil aller Säuren. Als im Chlorwasserstoff aber kein Sauerstoff gefunden werden kann, erkennt Davy, dass es der Wasserstoff ist, der Säuren ausmacht.

Vorwärts in die moderne Chemie – durch die Rückkehr zum Atomismus

John Dalton veröffentlicht 1808 sein Buch «A new System of Chemical Philosophy» und markiert damit die Geburtsstunde der modernen Chemie. In seiner Theorie greift Dalton Demokrits Atomismus auf. Er postuliert, dass Atome die kleinsten Bestandteile der Materie sind, und dass sie weder weiter zerteilt, noch in chemischen Reaktionen gebildet oder zerstört werden können. Laut Dalton sind alle Atome desselben Elements gleich, unterscheiden sich jedoch von den Atomen anderer Elemente. In chemischen Reaktionen vereinigen sich Atome zu Verbindungen, werden voneinander getrennt, oder ordnen sich neu an. Da Atome nach diesem Modell nicht teilbar sind und daher immer nur ganze Atome miteinander reagieren, folgert Dalton, dass die Elemente einer Verbindung stets in ganzzahligen Mengenverhältnissen darin vorliegen.

Dalton macht in seiner Atomtheorie zahlreiche Annahmen, die bis heute grundlegend für unser Verständnis der Chemie sind. Einige Punkte der Theorie sind noch nicht schlüssig. So glaubt Dalton, dass ein Atom eines Elements stets mit genau einem Atom eines anderen Elements reagiert. Von dieser Hypothese weicht er nur in den Fällen ab, in denen experimentelle Beobachtungen das zwingend erfordern. Für die Zusammensetzung von Wasser etwa postuliert er daher die Formel H-O. So kommt es, dass Dalton Folgefehler macht, insbesondere bei seiner Bestimmung der relativen Massen der Atome. Doch seine Atomtheorie bringt die Chemie auf die richtige Spur. Ab hier verdichten sich die neuen Erkenntnisse auf dem Zeitstrahl.

Vom Volumen der Gase zu den Atom- und Molekülmassen

Im selben Jahr stellt Joseph Louis Gay-Lussac (1778–1850) fest, dass das Volumenverhältnis miteinander reagierender Gase und ihrer Produkte immer ganzzahlig ist. Er beobachtet zum Beispiel, dass eine Volumeneinheit Sauerstoff mit zwei Volumeneinheiten Wasserstoff zu Wasser reagiert, und dass dieses wiederum, in Gasform, zwei Volumeneinheiten einnimmt. Amedeo Avogadro formuliert 1811 daraus die Hypothese, dass gleiche Volumen Gas egal welcher Substanz die gleiche Anzahl Teilchen enthalten. Avogadros Hypothese kann sich vorerst nicht durchsetzen – erst 1860 kann sein Schüler Stanislao Cannizzaro die wissenschaftliche Gemeinschaft von der Hypothese überzeugen – sie wird zum Avogadroschen Gesetz. Dieses ermöglicht die Bestimmung der molaren Massen zahlreicher Atome und Moleküle und ist damit wegberreitend für den Fortschritt der Chemie.

2. Hälfte des 17. Jh.

Newton beschreibt physikalische Phänomene mithilfe der Mathematik

LEBLANC



1791

Leblanc entwickelt sein Verfahren zur Sodaherstellung



NEWTON

Gay-Lussac ist nicht nur Zeuge der chemischen Revolution, sondern auch der Französischen Revolution, die in seiner Jugend in seinem Heimatland tobt. Sein Vater, ein wohlhabender Jurist, kommt ins Gefängnis, sein Tutor flieht. Der französische Chemiker Antoine Laurent de Lavoisier (1743–1794), der im späten 18. Jahrhundert die erste systematische Nomenklatur und einheitliche Fachsprache für die Chemie entwickelte, stirbt durch die Guillotine. Gay-Lussac aber profitiert von den neuen Strukturen: Er wird an der École Polytechnique, die eine Institution der Revolution ist, aufgenommen, und darf dort hochkarätige Wissenschaftler wie den Mathematiker Pierre Simon de Laplace zu seinen Mentoren zählen.

Die chemische Industrie geht der chemischen Revolution voraus

Die späte Entwicklung der Atomtheorie durch Dalton würde nahelegen, dass eine chemische Industrie sich erst im 19. und 20. Jahrhundert entwickeln kann. Tatsächlich aber werden bereits seit der Mitte des 18. Jahrhunderts chemische Prozesse in industriellem Massstab genutzt. Denn obwohl zu diesem Zeitpunkt noch nicht von einem theoretischen Verständnis der Chemie die Rede sein kann, ermöglichen die experimentellen Erkenntnisse der Alchemisten zahlreiche praktische Anwendungen, sowohl in der Produktion von Chemikalien als auch in deren Analyse. Eine systematische Entwicklung und Optimierung der Prozesse speziell für die Industrie ist wegen des fehlenden Grundlagenwissens allerdings nicht möglich, und

so kommt es, dass die Chemiefabriken des 18. Jahrhunderts eher vergrößerten Laboren gleichen als den Fabriken, die wir heute kennen.

Der erste industrielle chemische Prozess ist das Bleikammerverfahren zur Herstellung von Schwefelsäure, das bereits seit dem Mittelalter bekannt ist und ab 1746 in England in grossem Massstab eingesetzt wird. Ein weiterer wichtiger Prozess ab dem späten 18. Jahrhundert ist das Leblanc-Verfahren zur Herstellung von Soda (Natriumcarbonat), das in der Textilindustrie zum Bleichen von Leinen benötigt wird und ausserdem in der Seifen-, Glas- und Papierherstellung Verwendung findet. Nicolas Leblanc entwickelt das Verfahren 1791 im Rahmen einer Ausschreibung der französischen Académie des sciences, die mit Hochdruck nach einem solchen Prozess sucht, um sich von teuren Importen von Natursoda unabhängig zu machen. Das Leblanc-Verfahren wird der Prozess der Wahl, wenn es um die Herstellung von Soda geht, bis das Solvay-Verfahren 1880 reif für die Massenproduktion ist. Das Preisgeld erhält Leblanc jedoch nicht: Als es fällig wird, ist die Revolution ausgebrochen und die Académie durch den Nationalkonvent der Französischen Revolution verboten.

Soda und Schwefelsäure zählen noch heute zu den wichtigsten Produkten der chemischen Industrie. Erfahren Sie mehr über die Analytik, die in ihren Herstellungsprozessen nötig ist, auf der Branchenseite «Chemie», zu finden unter www.metrohm.com/industries

GAY-LUSSAC



Ca. 1800

Volta entwickelt die erste Batterie

1808

Daltons «A new system of Chemical Philosophy» erscheint

Beginn des 19. Jh.
Gay-Lussac entwickelt neue Titrationsverfahren

DALTON



Analytik in der jungen chemischen Industrie

Neben Soda und Schwefelsäure sind die wichtigsten Produkte der chemischen Industrie des 18. Jahrhunderts Salzsäure für die Chlorherstellung und Chlorwasser. All diese Produkte werden von anderen Industrien benötigt; so wird Soda unter anderem in der Seifenherstellung verarbeitet und Chlor zum Bleichen von Textilien verwendet. Da die Reinheit der Chemikalien in den verarbeitenden Industrien von grosser Bedeutung ist, entwickeln sie bald Methoden für die Qualitätskontrolle. Für schnelle, qualitative Überprüfungen der Rohstoffe werden volumetrische Verfahren entwickelt: Der Chemikalie wird ein Reagenz zugefügt, von dem bekannt ist, dass es mit der zu bestimmenden Substanz reagiert. Der Endpunkt der Reaktion wird durch eine passende Methode sichtbar gemacht. Schliesslich wird die Menge des verbrauchten Reagenz bestimmt. Wird eine empirisch bestätigte Menge des Reagenz verbraucht, so ist die Chemikalie geeignet. Quantitative Bestimmungen sind mit dieser primitiven Vorform der Titration aber noch nicht möglich.

Bis zum Ende des 18. Jahrhunderts werden Säure-Base-Titrationen, Fällungstitrationen und Redox-titrationen in der Literatur beschrieben. Joseph Louis Gay-Lussac, der häufig als der Erfinder der Titration gehandelt wird, entwickelt zu Beginn des 19. Jahrhunderts neue titrimetrische Analysenverfahren und

macht die Titration einfacher, schneller und genauer. Die Entwicklungen in der Titration finden fast ausnahmslos in Frankreich statt, wo nach der Revolution die Mehrheit der Wissenschaftler im Staatsdienst arbeitet und damit beauftragt wird, für den Staat relevante industrielle Probleme zu lösen. Eine Synthese von Wissenschaft und Industrie, wie Frankreich sie vormacht, soll im restlichen Europa bald folgen.

Die Titration ist als einfache, schnelle und gut automatisierbare Methode fester Bestandteil des Alltags vieler analytischer Chemiker. Einen Überblick über die Applikationen der Titration in einer Vielzahl an Industrien erhalten Sie unter bit.ly/titrationapplications

Im 19. Jahrhundert wird die rasante Entwicklung in der modernen Chemie weitergehen: Die organische Chemie wird geboren und öffnet der Chemie die Tür nicht nur zur Nachahmung, sondern auch zur gezielten Manipulation der Natur – zum Beispiel mithilfe von Medikamenten und Düngemitteln. Das und mehr lesen Sie im zweiten Teil der Reihe in der nächsten Ausgabe der Metrohm Information.



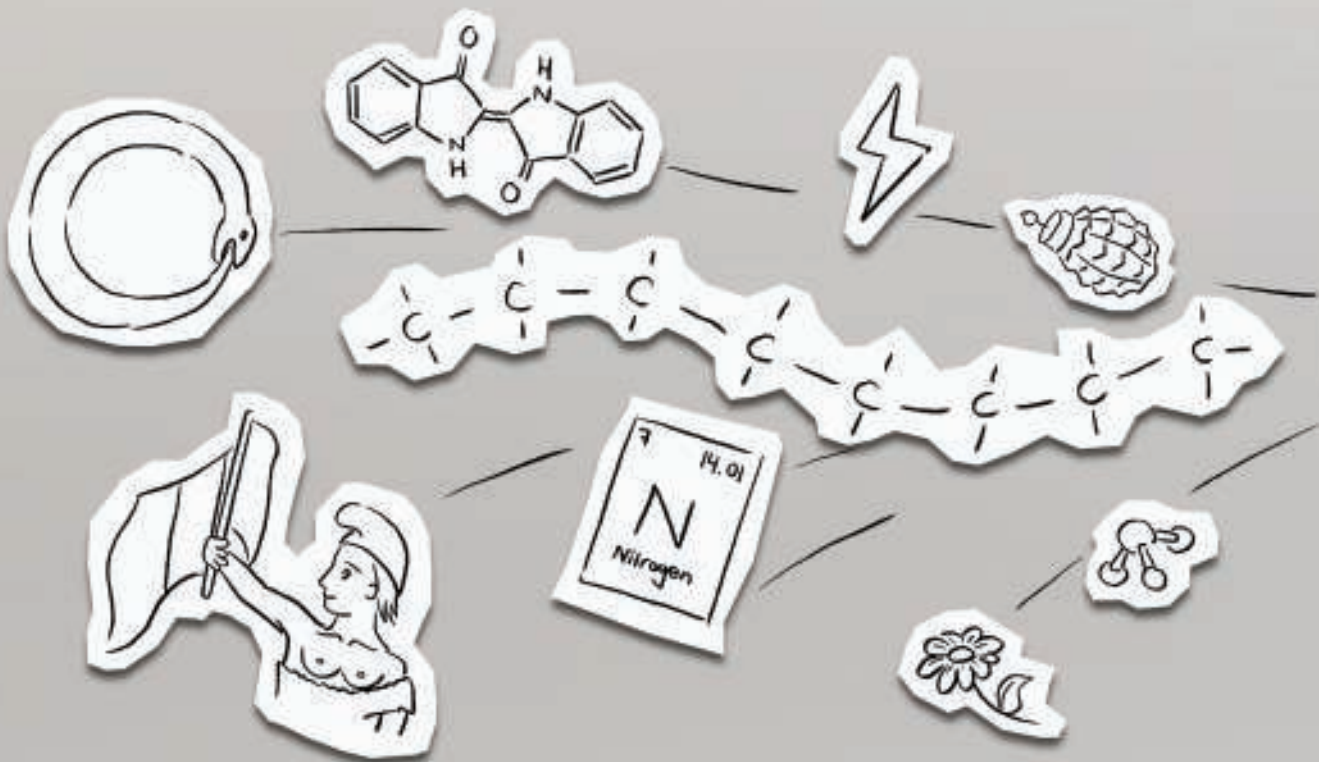
AVOGADRO

1811

Avogadro stellt fest: Gleiche Volumen Gas egal welcher Substanz enthalten die gleiche Anzahl Teilchen

Chemie und Gesellschaft: Ein explosives Paar

Beginn des 19. Jahrhunderts: Die Industrialisierung in Europa ist in vollem Gange. Die enge Zusammenarbeit der chemischen Industrie mit der Forschung – zunächst vor allem in Frankreich, später auch in weiteren europäischen Ländern, treibt beide Bereiche rasant voran. Mit der wachsenden chemischen Industrie gewinnt die Chemie zunehmend an gesellschaftlicher Bedeutung. Der zweite Teil unserer Serie zur Geschichte der Chemie befasst sich mit den Wechselwirkungen von Chemie, Industrie und Gesellschaft ab dem 19. Jahrhundert.



Die Chemie der lebenden Organismen

Einer der bedeutendsten Chemiker des frühen 19. Jahrhunderts ist Jöns Jakob Berzelius (1779–1848). Er verbessert die Labortechnik und entwickelt Methoden zur Elementaranalyse. Durch systematische Analysen in grossem Massstab bestimmt er die Summenformeln quasi aller bekannten anorganischen Verbindungen und die Atommassen der bisher entdeckten Elemente. Ihm sind ausserdem die Elementsymbole zu verdanken: H für Wasserstoff, O für Sauerstoff usw. Der einzige Unterschied zur heutigen Schreibweise ist, dass Berzelius die Proportionen der Elemente in Summenformeln hochstellt, statt sie wie heute tiefzustellen (z. B. H^2O statt H_2O). Er befasst sich auch eingehend mit der Chemie der Organismen, welche er «organische Chemie» tauft. Berzelius ist ein Vertreter des Vitalismus, welcher besagt, dass organische Stoffe nur durch lebende Organismen erzeugt werden könnten, da für ihre Herstellung «Lebenskraft» notwendig sei. Einer seiner Praktikanten wird später den Anstoss geben, diese These zu überprüfen: Friedrich Wöhler.

Organik aus Anorganik – geht das?

Friedrich Wöhler (1800–1882) ist 1828 der Erste, dem es gelingt eine organische Verbindung aus anorganischen Reagenzien zu synthetisieren: Durch Erhitzen von Ammoniumcyanat erzeugt er dessen organisches Isomer Harnstoff. Er zeigt damit, dass sich Organik im Labor erzeugen lässt und damit, dass der Mensch die Natur imitieren und manipulieren kann. Im Laufe des 19. Jahrhunderts werden mehr und mehr organische Synthesen möglich.

Als Wöhler Harnstoff synthetisiert, ist das eine Revolution. Heute werden jedes Jahr über 150 Mio. Tonnen davon produziert, u. a. für dermatologische Produkte und die Polymerindustrie. Metrohm bietet Ihnen Lösungen für die Bestimmung von Harnstoff und dessen Verunreinigungen. Lesen Sie mehr auf unserer Branchenseite «Chemie» unter dem Menüpunkt «Basischemikalien»:

www.metrohm.com/industries

THIS SOMETHING WHICH
WE CALL VITAL FORCE
LIES QUITE APART FROM
INORGANIC ELEMENTS;
BUT WHAT IT IS, WE DO
NOT COMPREHEND.

1827

Berzelius beschreibt in seinem «Lehrbuch der Chemie» die Lebenskraft



BERZELIUS

Wöhler und Liebig: Eine fruchtbare Freundschaft

Wöhler verbindet eine Freundschaft mit Justus von Liebig (1803–1873), seit die beiden 1825 einen Disput über Silberfulminat und Silbercyanat beilegen: Beide Substanzen teilen dieselbe Summenformel, doch das von Liebig entdeckte Silberfulminat ist hochexplosiv – Wöhlers Silbercyanat dagegen nicht. Sie stellen schliesslich fest, dass die Art und Anzahl der Atome in einer Verbindung allein nicht reicht, um eine Substanz zu charakterisieren; auch die Anordnung der Atome muss betrachtet werden. Damit entdecken Liebig und Wöhler – neben ihrer gegenseitigen Wertschätzung – die Isomerie. Eine Bestimmung der Molekülstruktur ist zu diesem Zeitpunkt aber noch nicht möglich.

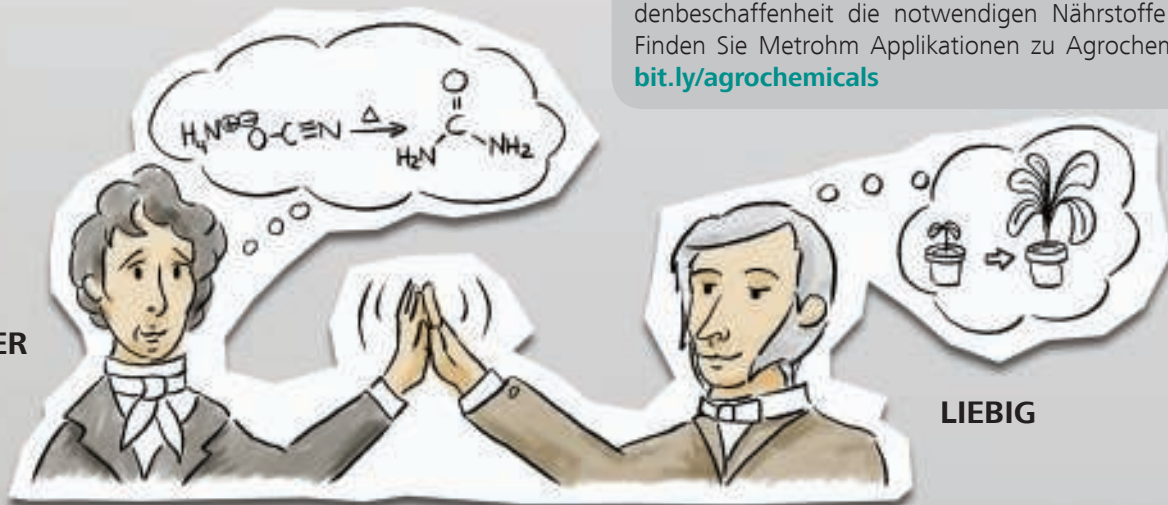
1832 formulieren die beiden Forscher gemeinsam ihre Radikaltheorie, die wegbereitend ist für die moderne organische Chemie. Ihre Theorie besagt, dass organische Stoffe aus Atomgruppen – die sie Radikale nennen – zusammengesetzt sind, die in chemischen Reaktionen unverändert erhalten bleiben und lediglich mit dem Reaktionspartner ausgetauscht werden. Zwar wird der Radikalbegriff in der Chemie später umgedeutet, doch das Prinzip bleibt bis heute ganz ähnlich erhalten – in Form der funktionellen Gruppen.

Superphosphat revolutioniert den Ackerbau

Um 1840 kehrt Liebig, der an der Pariser Sorbonne unter Grössen wie Gay-Lussac studiert und dort die Frankreich eigene Symbiose von Wissenschaft und Industrie erlebt hat, der Grundlagenforschung den Rücken. Er beginnt, die organische Chemie in der Physiologie und der Landwirtschaft zu untersuchen. Dabei erkennt er, dass Pflanzen die Nährstoffe, die sie für ihr Wachstum benötigen, aus dem Boden aufnehmen, mit der Ausnahme von Kohlenstoffdioxid, welches aus der Luft stammt. Aus seinen Erkenntnissen leitet er praktische Folgen ab, die eine Revolution in der Landwirtschaft anstossen. Dank seiner Erkenntnisse kann Liebig erstmals die Notwendigkeit des Düngens auf wissenschaftlicher Basis begründen. Er leitet aus seiner Forschung ausserdem ab, welche Nährstoffe ins Düngemittel gehören. Dazu zählen einfache organische Verbindungen, aber auch anorganische Substanzen, zum Beispiel einige Salze. Liebig entwickelt aus diesem Wissen den ersten Kunstdünger, Superphosphat, dank dem die landwirtschaftlichen Erträge um ein Vielfaches gesteigert werden.

Liebigs Superphosphatdünger ist bis heute im Einsatz. Dank neuer Erkenntnisse gibt es aber inzwischen eine Vielzahl von Düngemitteln, die je nach Pflanze und Bodenbeschaffenheit die notwendigen Nährstoffe liefern. Finden Sie Metrohm Applikationen zu Agrochemikalien: bit.ly/agrochemicals

WÖHLER



LIEBIG

1828

Wöhler stellt Harnstoff aus Ammoniumcyanat her – die erste Synthese einer organischen aus einer anorganischen Substanz

1832

Wöhler und Liebig entwickeln ihre Radikaltheorie

1840

Liebig beginnt, sich mit der Pflanzenphysiologie zu befassen

Kekulé: Geträumt oder geflunkert?

Liebigs Studenten führen dessen Erbe in der chemischen Grundlagenforschung weiter. August Kekulé (1829–1896) etwa, der sich von Liebig zu dessen Giessener Zeiten zur Chemie verführen liess, statt, wie seine Familie es vorsah, Architekt zu werden, erkennt 1858 die Fähigkeit von Kohlenstoffatomen, direkt aneinanderzubinden, um Ketten zu bilden. Damit lässt sich erklären, wie die wenigen an der Organik beteiligten Elemente die Vielfalt an organischen Stoffen bilden. 1865 publiziert Kekulé auch die Struktur des Benzols.

Nach eigenen Aussagen sind die beiden bahnbrechenden Ideen Kekulé's von Träumen inspiriert, die Wahrheit dieser Aussagen ist aber umstritten. Kekulé gilt als Intellektueller, dem die Kultur missfällt, die zu jener Zeit unter Chemikern und Industriellen herrscht: Es macht sich ein pragmatisches und positivistisches Denken breit, ein blinder Empirismus, der keine Fantasie zulässt. Der Chemie-Wissenschaftshistoriker Christoph Meinel bezweifelt die Wahrheit der Traumanekdote, die Kekulé in einer Rede an einer Feier zu seinen Ehren erstmals erzählt, mit folgender Begründung: «Das gespaltene Verhältnis Kekulé's zur Gründermentalität und zum patriarchalischen Stil der Berliner Gesellschaft spricht nur zu deutlich aus seiner Rede. Und wenn die Schilderung seiner Vision dann mit den Worten schließt, «Lernen wir träumen, meine Herren!», so ist – angesichts der versammelten Prominenten aus preußischer Bürokratie, gründerzeitlicher Industrie und Geheimratsuniversität – die Ironie kaum zu überhören»¹.

Künstliche Farben: Benzol macht's möglich

Ganz gleich, ob Kekulé's Anekdote auf einer wahren Begebenheit beruht oder nicht, die Entdeckung der Benzolstruktur durch Kekulé und deren Bedeutung für die Chemie lassen sich nicht leugnen. Die Kenntnis organischer und aromatischer Strukturen ermöglicht die planmässige Synthese ebensolcher Moleküle. Die Arbeit der Chemiker verlagert sich damit zunehmend vom Isolieren von Stoffen aus der Natur zur Synthese künstlicher Stoffe. Die Farbstoffindustrie erlebt nach der Entdeckung der Benzolstruktur einen Aufschwung, weil nun zahlreiche künstliche Farbstoffe synthetisiert werden können. Die Herstellung von Indigo zum Beispiel wird zu einem wirtschaftlich wichtigen industriellen Prozess.

Farbstoffsynthesen haben seit ihren Anfängen um 1900 nicht an Bedeutung eingebüsst, im Gegenteil! Färbemittel sind für zahlreiche Beschaffenheiten und Funktionalitäten weiterentwickelt worden. Dadurch sind sie natürlich komplexer als ihre primitiven Vorgänger. Welche Analytik Sie brauchen, um Farbstoffeigenschaften zu überwachen, lesen Sie auf unserer Branchenseite «Chemie» unter dem Menüpunkt «Lösungsmittel und Farbmittel»:

www.metrohm.com/industries

FARADAY



Mitte des 19. Jh.

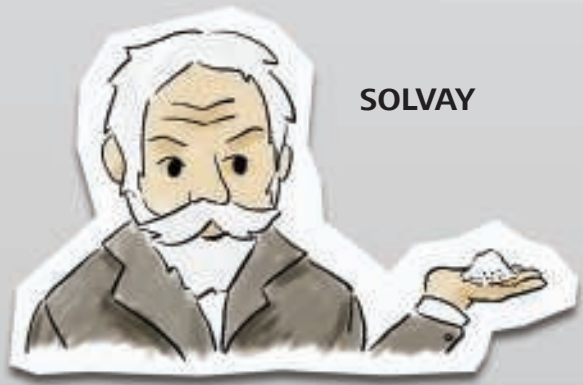
Faraday legt mit seinen Experimenten zur Elektrolyse die Grundlage für die elektrochemische Industrie

Die Industrialisierung der Elektrochemie

Michael Faraday (1791–1867) stammt aus einfachen Verhältnissen. Mit 14 Jahren beginnt er eine Lehre zum Buchbinder. Der junge Faraday liest zahlreiche Werke, die er zum Binden erhält, und bildet sich dadurch in den Naturwissenschaften, aber auch in Literatur und Kunst. Ein Kunde der Buchbinderei wird auf den wissbegierigen Lehrling aufmerksam und erzählt seinem Vater von ihm, der Faraday daraufhin in einige Vorlesungen des Elektrochemie-Pioniers Humphry Davy mitnimmt. Wenig später beginnt Faraday für Davy zu arbeiten. Als sein Assistent reist er mit ihm durch Europa, experimentiert mit ihm und lernt viele einflussreiche Wissenschaftler kennen. Zurück in England entwickelt sich Faraday als Chemiker weiter und wird 1833 Professor der Chemie. Um diese Zeit untersucht er die Grundgesetze der Elektrolyse. Diese bilden die Grundlage der Elektrochemie und ermöglichen in der zweiten Jahrhunderthälfte das Entstehen einer elektrochemischen Industrie, die in ihren bei Wasserkraftwerken gelegenen Werken zum Beispiel Chlor, Wasserstoff, Aluminium, Magnesium, Natrium und Kalium herstellt.

Soda nach Solvay

Die grosstechnische Produktion von Soda (Natriumcarbonat) ist zwar seit der Entwicklung des Leblanc-Verfahrens Ende des 18. Jahrhunderts möglich, aber die Synthese erfordert teure Rohmaterialien und erzeugt als Nebenprodukt grosse Mengen Chlorwasserstoff, der giftig ist für die Umwelt, in die er eingeleitet wird: Wo Chlorwasserstoff durch Schornsteine entweicht, sterben Pflanzen, wo er in Gewässer eingeleitet wird, tötet er Fische. In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts beschäftigt sich ein Belgier mit dem Problem: Ernest Solvay (1838–1922). Solvay, der aus einer Industriellenfamilie stammt, verfügt über wenig formelle Ausbildung, doch dank seiner Mitarbeit in den Werken seines Vaters und seines Onkels ist er vertraut mit chemischen Prozessabläufen. Er entwickelt den nach ihm benannten Prozess zur Sodaherstellung, dessen einziges Nebenprodukt das ungefährliche Calciumchlorid (CaCl_2) ist. 1861 nehmen Ernest Solvay und sein Bruder Alfred in ihrem eigenen kleinen Werk in Brüssel die Sodaproduktion auf – durch weiteres Anpassen des Prozesses sind sie zunehmend erfolgreich und expandieren immer weiter. Solvay, inzwischen sehr wohlhabend, engagiert sich für die wissenschaftliche Forschung und für wohltätige Zwecke. Auch in seinen Fabriken zeigt er seine soziale Ader: Hier setzt er den Achtstundentag, bezahlten Urlaub, ein Sozialversicherungssystem und eine Rente für seine Arbeiter durch, lang bevor dies gesetzliche Pflicht wird.



SOLVAY

1865

Kekulé erkennt die Struktur des Benzols – laut eigener Aussage im Traum

1863

Solvay nimmt die Sodaproduktion nach seinem eigenen Verfahren auf und macht sie damit umweltfreundlicher und kostengünstiger



KEKULÉ

Bis heute wird der grösste Teil des weltweit hergestellten Sodas durch das Solvay-Verfahren gewonnen. Möchten Sie mehr über das Solvay-Verfahren und die damit verbundene Analytik erfahren? Dann lesen Sie weiter auf unserer Branchenseite «Chemie», unter dem Menüpunkt «Anlagenbetrieb»: www.metrohm.com/industries

Das Periodensystem der Elemente

Bis 1868 sind 64 chemische Elemente bekannt. Eine klare Gesetzmässigkeit, nach der bestimmte Kombinationen von Atomen neue Moleküle bilden, ist aber nicht bekannt. Eine Sortierung der Elemente nach ihrer Atommasse hat bis zu diesem Zeitpunkt keine Lösung geliefert. Dmitri Mendelejew (1834–1907) erkennt aber ein Muster: Wenn die Elemente nach ihrer Atommasse geordnet sind, wiederholen sich einige Elementeneigenschaften periodisch – genauer bei jedem achten Element. Mendelejew bewahrt also die Sortierung nach aufsteigender Atommasse, ordnet aber die Elemente, die gleiche Eigenschaften teilen, untereinander an. Wo sich Eigenschaften schon nach weniger als acht Elementen wiederholen, lässt er Lücken, die durch noch nicht entdeckte Elemente gefüllt werden sollen. Die Nebengruppenelemente, die nicht zu seiner Oktettregel passen, ordnet Mendelejew einer eigenen Kolonne zu. So entsteht 1869 das erste Periodensystem der Elemente.

Von Anilin zu Aspirin

Die organische Chemie, die inzwischen weit über die Synthese künstlichen Harnstoffs hinausgeht, ist zu einer bedeutenden und schnell wachsenden Industrie geworden. Die Teerfarbenunternehmen BASF, Bayer und Hoechst, allesamt in den 1860er Jahren gegründet, wachsen derart schnell, dass sie noch vor der Jahrhundertwende Tausende beschäftigen. Die Teerfarbenindustrie entwickelt ab dem Ende des 19. Jahrhunderts auch synthetische organische Arzneimittel. Zum Beispiel ist es die Firma Bayer, die 1898 die nebenproduktfreie Synthese von Acetylsalicylsäure zum Patent anmeldet und ab Beginn des 20. Jahrhunderts das Produkt unter dem Namen Aspirin vertreibt.

In der Grundlagenforschung widmen sich Chemiker immer komplexeren organischen Molekülen. Emil Fischer (1852–1919) untersucht biologisch bedeutende Moleküle wie Zucker und Aminosäuren. 1890 synthetisiert er ausgehend von Glycerol die drei Zucker Glucose, Fructose und Mannose. Später untersucht er Proteine. Dabei findet er bis dahin unbekannte Aminosäuren und klärt die Art der Bindung auf, die sie miteinander verknüpft: eine Amidbindung, der er den Namen «Peptidbindung» gibt².

MENDELEJEW



1869

Mendelejew stellt das Periodensystem der Elemente auf

Erster Weltkrieg: Kunstdünger und Kampfstoffe

Seit Liebig die Ertragssteigerung durch Düngemittel bewiesen hat, ist deren Einsatz in der Landwirtschaft gang und gäbe. Der Stickstoff, den die Pflanzen für das Wachstum benötigen, wird den Düngern meist in Form von Guano zugefügt. Guano besteht aus den verwitterten Exkrementen von Seevögeln, die insbesondere an den niederschlagsarmen Stränden Südamerikas über die Jahre meterdicke Schichten bilden. Um den hohen Bedarf an Lebensmitteln – und infolgedessen auch Düngern – zu decken, werden ganze Schiffsladungen von Guano nach Europa importiert.

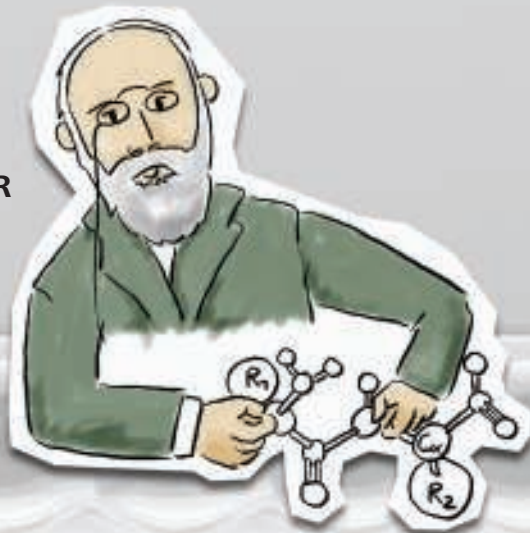
Mit dem rasanten Bevölkerungswachstum kann der Guano-Import nicht ewig mithalten, darum wird ab dem Ende des 19. Jahrhunderts nach einer Lösung gesucht, Stickstoff aus der Luft zu fixieren. Der deutsche Chemiker Fritz Haber (1868–1934) findet sie schliesslich (1909) und verhindert mit seiner Ammoniaksynthese die der westlichen Welt prophezeite Hungersnot. Allerdings ermöglicht er damit auch Deutschlands Kampfmittelproduktion im Ersten Weltkrieg. Denn aus Ammoniak kann Ammoniumnitrat hergestellt werden, das wiederum in Munition verwendet wird. Im Haber-Bosch-Verfahren entsteht Ammoniak durch Reaktion von Wasserstoff und Stickstoff. Fritz Haber gelingt die Synthese bei hoher Temperatur, hohem Druck und unter Zuhilfenahme eines Katalysators. Carl Bosch (1874–1940) erarbeitet die grosstechnische Umsetzung des Verfahrens. Dafür entwickelt er eigens Apparaturen aus modernen Materialien, die den hohen Drücken und Temperaturen standhalten.

Was wäre, wenn ...

... es das Haber-Bosch-Verfahren nicht gäbe? Ohne den Stickstoffdünger, der mithilfe des Haber-Bosch-Verfahrens hergestellt wird, gäbe es wohl deutlich weniger Menschen auf der Erde: Das Bevölkerungswachstum von ca. 1.6 Milliarden im Jahr 1900 auf über 7 Milliarden heute wäre ohne die Ertragssteigerung durch künstlichen Stickstoffdünger nicht möglich gewesen. Und noch heute ist die Landwirtschaft darauf angewiesen: Ohne das Verfahren würde die Erde nur ausreichend Nahrung für die Hälfte ihrer Bevölkerung hergeben³.

1914 bricht der Erste Weltkrieg aus. Die beteiligten Staaten, aber auch die neutralen sehen sich mit blockierten Handelswegen konfrontiert und müssen neue Wege finden, sich mit allem Nötigen zu versorgen. Durch staatliche Strukturierung und Förderung führt das weltweit zu einem Aufschwung der industriellen Forschung. Zahlreiche namhafte Wissenschaftler engagieren sich aktiv im Krieg oder befürworten ihn, darunter Fritz Haber, Walther Nernst und Emil Fischer. Neben dem Haber-Bosch-Verfahren bringt der Innovationsdruck, der vor und während des Kriegs herrscht, auch den ersten Synthesekautschuk sowie Senfgas und das Giftgas Phosgen hervor. Auch das Chlorgas, das bei der Ammoniaksynthese entsteht, wird im ersten Weltkrieg als Kampfstoff verwendet.

FISCHER



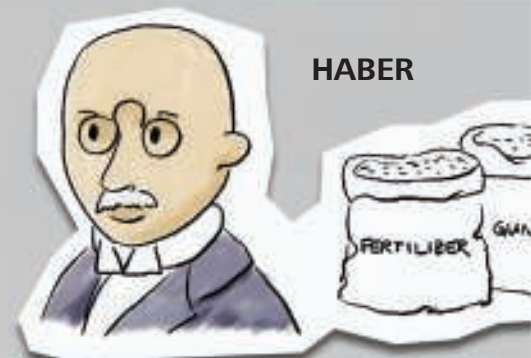
Um 1900

Fischer klärt die Bindung auf, die Ketten von Aminosäuren, z. B. Proteine, zusammenhält: die Peptidbindung

1909

Haber gelingt die Ammoniaksynthese aus N_2 und H_2 , die in Form des Haber-Bosch-Verfahrens bis heute industrielle Anwendung findet

HABER



Die Chemie seit dem Ersten Weltkrieg

Nach dem Beschluss des Waffenstillstands 1918 verliert die deutsche chemische Industrie, die bis dahin weltweit führend ist, all ihre Patente und muss zahlreiche Produktionsgeheimnisse preisgeben – das verlangen die Reparationsforderungen der alliierten Siegermächte⁴. Die deutsche chemische Industrie, bis dahin die grösste der Welt, muss ihre Stellung an der Weltspitze abgeben. Zwar erlebt sie im Auftakt des Zweiten Weltkriegs einen erneuten Aufschwung, doch der Schwerpunkt der chemischen Industrie liegt nun in den USA und Frankreich. Es sind in der Nachkriegszeit insbesondere die Polymerchemie und die Pharmachemie, die starken Fortschritt erleben und unzählige Produkte hervorbringen, die heute aus dem Alltag nicht wegzudenken sind, darunter diverse Polymere, einschliesslich synthetischer Fasern wie Nylon und Polyester, und künstlich hergestellte Vitamine und Hormone.

Die Zeit um die Wende zum 20. Jahrhundert bringt rasanten Fortschritt in der Chemie, sowohl in der Grundlagenforschung als auch in der Industrie – und in grossem Masse ist es deren Zusammenspiel, dass das ermöglicht. Zahlreiche Prozesse, die diese Zeit hervorbringt, u. a. der Haber-Bosch- und der Solvay-Prozess, bleiben bis heute die Verfahren der Wahl, um Chemikalien, in diesem Fall Ammoniak bzw. Soda, herzustellen.

Referenzen

- [1] Sponzel, R. and Rathsmann-Sponzel, I. *Kekulé's Traum. Über eine typisch-psychoanalytische Entgleisung Alexander Mitscherlichs über den bedeutenden Naturwissenschaftler und Chemiker August Kekulé (1829-1896), Mitschöpfer der Valenz-, Vollender der Strukturtheorie und Entdecker der Bedeutung des Benzolrings. Alternative Analyse und Deutung aus allgemeiner und integrativer psychologisch-psychotherapeutischer Sicht.* http://www.sgipt.org/th_schul/pa/kek/pak_kek0.htm (accessed Aug 15, 2016).
- [2] *The Components of Life: From Nucleic Acids to Carbohydrates*; 1st ed., Rogers, K., Ed.; Britannica Educational Publishing/Rosen Educational Services: New York, 2011; p 59.
- [3] Erisman, J. W., Sutton, M. A., Galloway, J., Klimont, Z., and Winiwarter, W. (2008) *Nat. Geosci.* 1, 636–639.
- [4] Kricheldorf, H. R. *Menschen und ihre Materialien: Von der Steinzeit bis heute*; 1st ed., Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA: Weinheim, 2012; p 111.

Sie haben Teil 1 verpasst? Finden Sie ihn im Application Finder unter www.metrohm.com/applications mit der Dokumentennummer MI-2016-2-AP-2.



1914–1918

Der Erste Weltkrieg wütet – und als Treibstoff dient ihm nicht zuletzt das Ammoniak, das dank des Haber-Bosch-Verfahrens en gros hergestellt werden kann, denn es sichert die Munitionsproduktion

