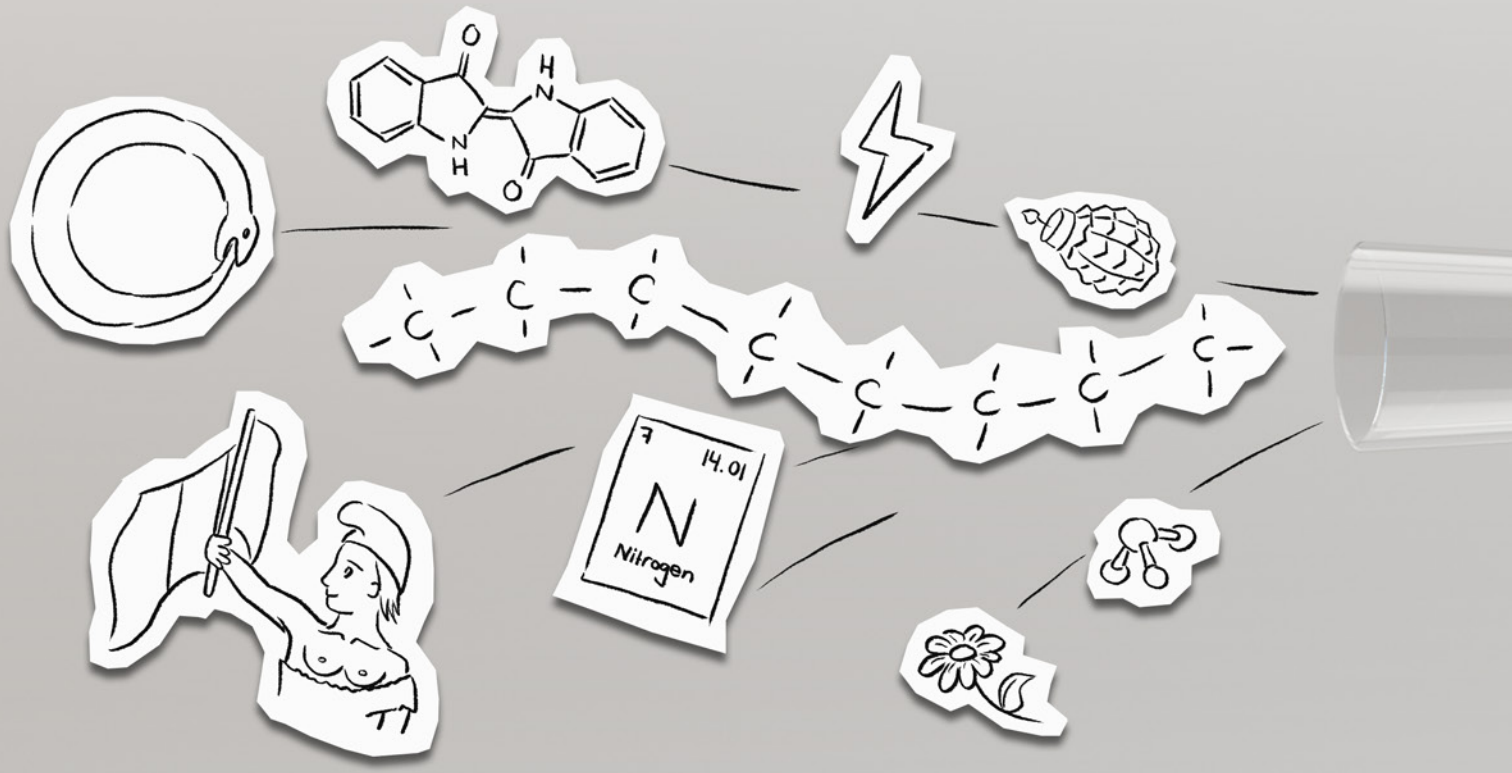
Eine Geschichte der Chemie – Teil 2

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.



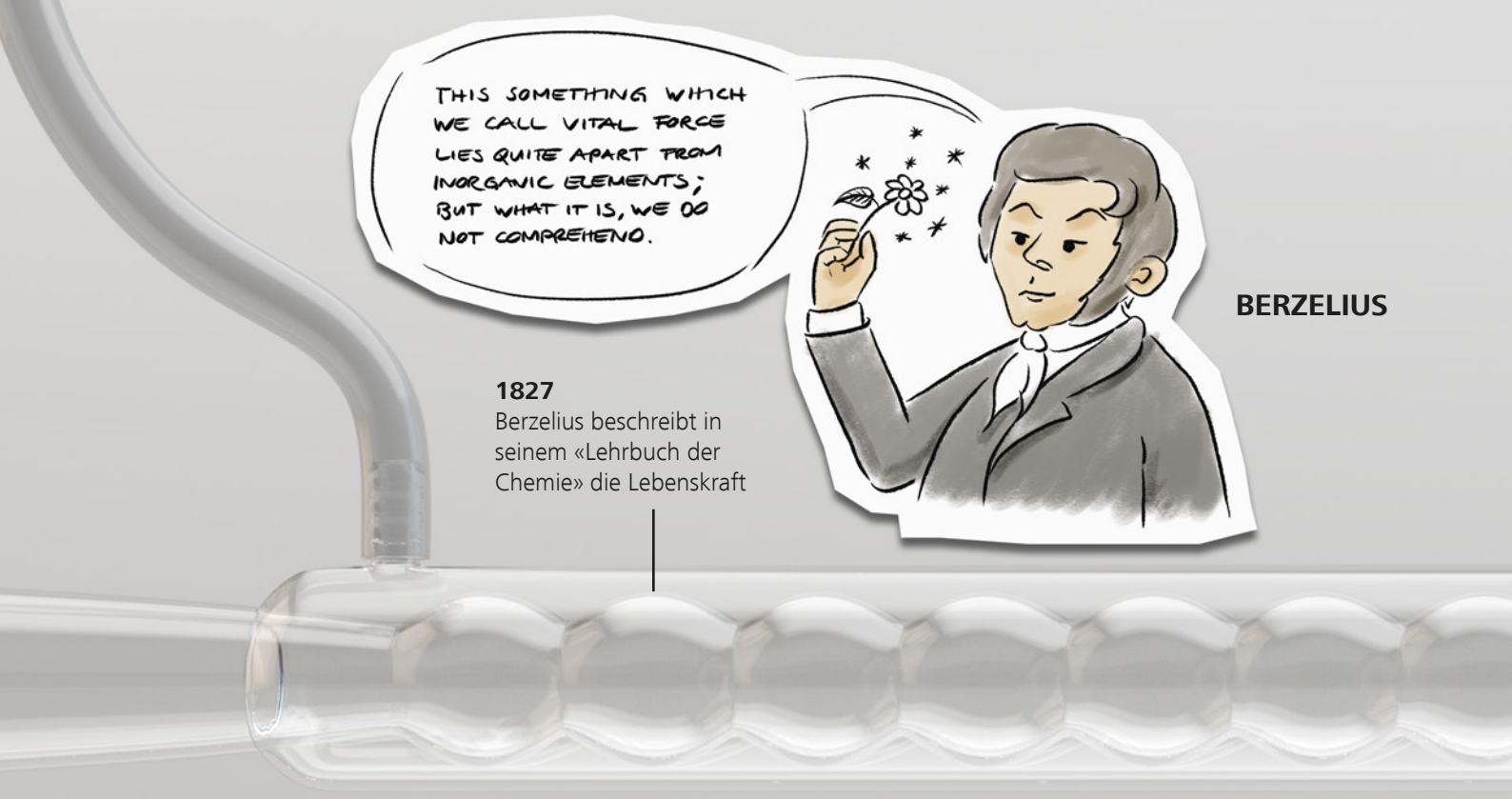
Die Chemie der lebenden Organismen

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 Vetreter 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



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**

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 Kekulés 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 Kekulés 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 Prominenz aus preußischer Bürokratie, gründerzeitlicher Industrie und Geheimratsuniversität – die Ironie kaum zu überhören»[1].

Künstliche Farben: Benzol macht's möglich

Ganz gleich, ob Kekulés 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

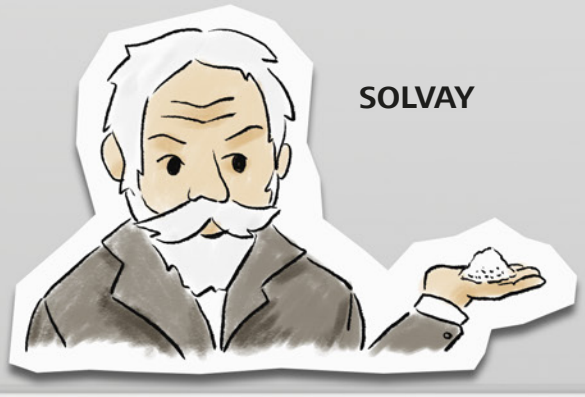
Mitte des 19. Jh.
Faraday legt mit seinen Experimenten zur Elektrolyse die Grundlage für die elektrochemische Industrie

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 Elementeigenschaften 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» gibt[2].

MENDELEJEW

1869
Mendelejew stellt das Periodensystem der Elemente auf

Erster Weltkrieg: Kunstdünger und Kampstoffe

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.

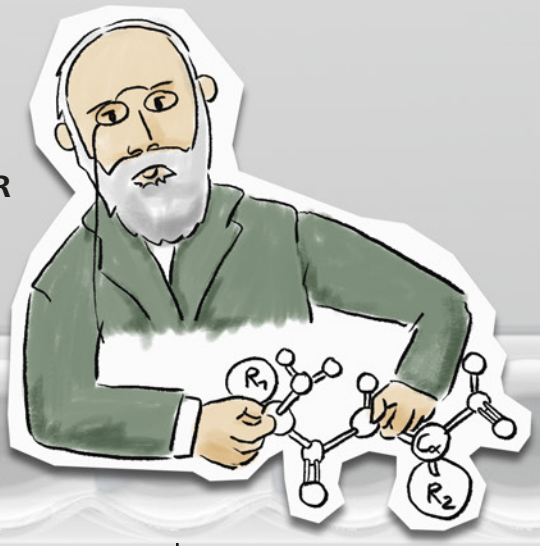
Mit dem rasanten Bevölkerungswachstum kann der Guano-Import nicht ewig mithalten, darum wird ab dem Ende des 19. Jahrhunderts nach einer Lösung gesucht, Stickstoff aus der Luft zu fixieren. Der deutsche Chemiker Fritz Haber (1868–1934) findet sie schliesslich (1909) und verhindert mit seiner Ammoniaksynthese 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 hergeben[3].

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.

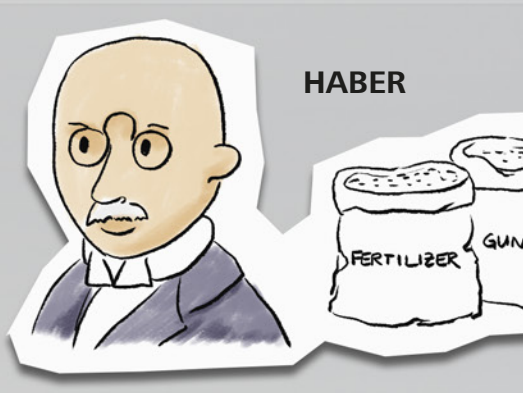
FISCHER



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 Siegermächte[4]. 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

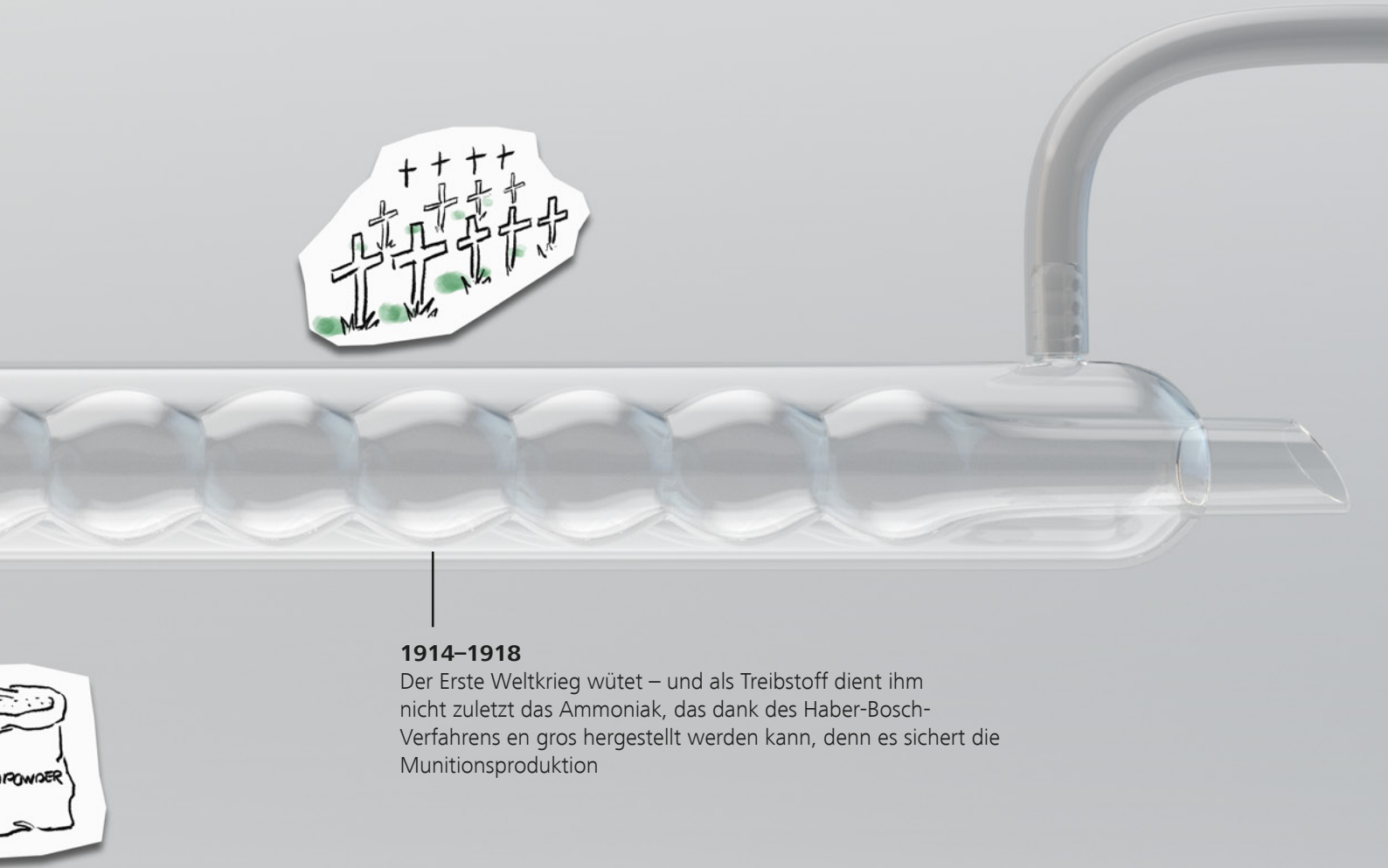
[1] Sponsel, R. and Rathsmann-Sponsel, I. *Kekulés Traum. Über eine typisch-psychoanalytische Entgleisung Alexander Mitscherlichs über den bedeutenden Naturwissenschaftler und Chemiker August Kekulé (1829-1896), Mitschöpfer der Valenz-, Vollender der Strukturtheorie und Entdecker der Bedeutung des Benzolrings. 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