

Chemische Prozesse und chemische Industrie

1

Lernergebnisse

- Besonderheiten chemischer Prozesse
- Chemische Produktion und Umweltbelastungen
- Die chemische Industrie mit ihren Produkten; historische und aktuelle Entwicklungen
- Aufbau von Firmen in der chemischen Industrie
- Bedeutung von Forschung und Entwicklung für die chemische Industrie
- Entwicklungstendenzen und Zukunftsaussichten

1.1 Besonderheiten chemischer Prozesse

Produktionsverfahren, die mit einer Stoffumwandlung verbunden sind, werden nicht nur von der chemischen Industrie genutzt, sondern auch in einer ganzen Reihe anderer Industriezweige, wie der Hüttenindustrie zur Gewinnung von Metallen, der Zementindustrie und der Lebensmittelindustrie. Bei diesen Industrien ist die Anzahl der durch Stoffumwandlungsprozesse hergestellten Produkte jeweils überschaubar, während in den Prozessen der chemischen Industrie sehr viele verschiedenartige Produkte hergestellt werden.

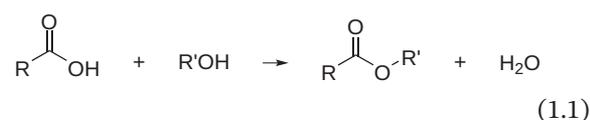
Bei einem Vergleich chemischer Prozesse mit den Produktionsverfahren anderer Industrien fallen weitere Besonderheiten auf. Während die Produktionsmethoden, z. B. der Textilindustrie und der Automobilindustrie, jeweils relativ gleichartig sind, müssen Chemieanlagen speziell auf die darin ablaufenden chemischen Reaktionen und die jeweiligen Produkte hin konzipiert sein. Keine Anlage sieht wie die andere aus. Diese Vielfalt wird dadurch noch vergrößert, dass es für viele Produkte mehrere Herstellungswege und dementsprechend mehrere Prozesse gibt.

Weiterhin ist für chemische Produktionen charakteristisch, dass die Produktionsanlagen für die einzelnen Prozesse aus vielen Einzelementen bestehen und dementsprechend ausgesprochen komplex auf-

gebaut sind. Das gilt in ganz besonderem Maße für Anlagen mit kontinuierlicher Prozessführung, da dort für jeden Arbeitsschritt des Prozesses eine speziell dafür geeignete apparative Anordnung vorhanden sein muss (vgl. Abschn. 11.6). Insgesamt sind chemische Produktionsanlagen durch *hohe Komplexität* gekennzeichnet.

Eine weitere Besonderheit chemischer Prozesse besteht darin, dass man nicht nur das gewünschte Produkt erhält, sondern je nach Reaktionssystem auch *Koppel- und Nebenprodukte*. Koppelprodukte werden aufgrund der Stöchiometrie der Hauptreaktion zwangsläufig gebildet. Zusätzlich können Nebenprodukte durch Parallel- und Folgereaktionen entstehen; ihre Bildung kann über die Reaktionsbedingungen (z. B. Temperatur, Katalysator) beeinflusst werden.

Beispiele für die Bildung von *Koppelprodukten* sind die Veresterung von Carbonsäuren (Gl. (1.1)) mit dem Koppelprodukt Wasser sowie die Chlorierung von Kohlenwasserstoffen (Gl. (1.2)) unter der Bildung von Chlorwasserstoff. Das primäre Ziel dieser Umsetzung ist die Erzeugung eines Chlorkohlenwasserstoffs (RCl); aus wirtschaftlichen Gründen muss man aber auch den als Koppelprodukt anfallenden Chlorwasserstoff (HCl) verwerten.



Eine ähnliche Problematik stellt die *Bildung von Nebenprodukten* dar. Bei den allermeisten chemischen Reaktionssystemen läuft nicht nur eine einzige chemische Reaktion ab; vielmehr wird die Ausbeute der gewünschten Umsetzung durch Parallel- und Folgereaktionen gemindert. Deutlich wird der Effekt unerwünschter Parallelreaktionen bei der Substitution am aromatischen Kern. So können bei der einfachen Kernchlorierung von Toluol prinzipiell drei Isomere entstehen, wobei meist nur eines der Isomere als Produkt erwünscht ist. Als ein Beispiel für unerwünschte

4 | 1 Chemische Prozesse und chemische Industrie

Folgereaktionen sei die Bildung von Di- und Triethylenglykol bei der Herstellung von Glykol aus Ethylenoxid und Wasser (vgl. Abschn. 17.1.1.8) genannt. Mit geeigneten Katalysatoren und optimierter Reaktionstechnik gelingt es zwar häufig, die Umsetzung in Richtung auf das gewünschte Produkt zu lenken, jedoch nicht so weit, dass die Bildung der Nebenprodukte vollständig unterdrückt wird. Man muss also versuchen, die entstandenen Nebenprodukte zu verwerten. Das ist in einem größeren Anlagenkomplex mit vielen Produkten eher möglich als in einem Werk mit wenigen Produktionsanlagen.

Schließlich gibt es noch eine weitere Besonderheit chemischer Prozesse, nämlich den Umgang mit *gefährlichen Stoffen*. Die wesentlichen Ursachen für Gefährdungen sind die Toxizität, die Brennbarkeit, die Explosionsfähigkeit und die geringe Stabilität vieler chemischer Substanzen. Diese gefährlichen Eigenschaften können auch zu schädlichen Einwirkungen auf die Umgebung von Chemieanlagen, also auf die *Umwelt* führen.

1.2 Chemie und Umwelt

Das Wissenschaftsgebiet, das sich mit Problemen der Umwelt befasst, ist die *Ökologie*. Schon seit langer Zeit hat der Mensch Ökosysteme in gravierender Weise verändert, z. B. durch Abholzen von Wäldern. Mit der Industrialisierung kam es durch emittierte Schadstoffe zu ganz neuartigen Störungen von Ökosystemen. Beispiele dafür sind die Herstellung von Soda nach dem Leblanc-Verfahren (Schadstoff HCl) und die Röstung sulfidischer Erze (Schadstoff SO₂).

Mit der Zunahme der Produktionskapazitäten wuchsen auch die Mengen der von Chemieanlagen emittierten Schadstoffe. Etwa ab 1960 kam es zu verstärkten Aktivitäten zur Vermeidung von Emissionen aus chemischen Produktionen. Dabei wurden neue Verfahrensvarianten und zum Teil völlig neuartige Prozesse entwickelt. Die Resultate dieser Maßnahmen zeigten sich schon bald. So sank beispielsweise für das Stammwerk Ludwigshafen der BASF die Abwasserbelastung durch organische Verunreinigungen von 1972 bis 1991 um mehr als den Faktor 10 bei gleichzeitiger Steigerung der Produktionsmenge um 50%. Danach wurde die Umweltbelastung noch weiter reduziert, wie Abb. 1.1 am Beispiel der produktionsspezifischen Umweltbelastung durch die BASF für 2002, 2005 und 2018 zeigt.

Bis heute besteht ein großes Interesse an der Senkung von produktionsbedingten Emissionen. In dem Zeitraum zwischen 2001 und 2018 konnten nach Berichten der BASF die Emissionen von organischen

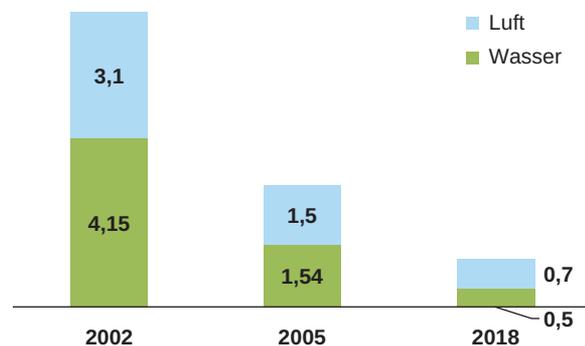


Abb. 1.1 Produktionsspezifische Umweltbelastung in kg je Tonne Verkaufsprodukt der BASF SE für 2002, 2005 und 2018.

Stoffen (−54%), Stickstoffverbindungen (−67%) und Schwermetallen (−57%) im Abwasser weiter reduziert werden.

Interessant ist die Herkunft von Kohlendioxid und weiteren klimawirksamen Gasen aus menschlichen Tätigkeiten. Abbildung 1.2 zeigt, dass die chemische Industrie zur Gesamtemission von etwa 50 Gt a^{−1} nur einen geringen Anteil von 3% beiträgt.

Neben unerwünschten Emissionen können auch chemische Endprodukte umweltkritische oder toxische Eigenschaften aufweisen. Ein Beispiel dafür ist das Insektizid *DDT* (Dichlordiphenyltrichlorethan). Die breite Wirkung von DDT gegen Insekten führte dazu, dass das Produkt nicht nur im chemischen Pflanzenschutz, sondern in großem Maß auch zur Bekämpfung von krankheitsübertragenden Insekten, z. B. Fiebertücken, sehr erfolgreich eingesetzt wurde. Es zeigte sich jedoch, dass das DDT aufgrund seiner hohen Stabilität in der Umwelt nur langsam abgebaut wird. Mögliche schädliche Wirkungen führten deshalb zu Einschränkungen und Verboten für den Einsatz von DDT.

Wie problematisch ein striktes Verbot einer Chemikalie sein kann, zeigt das Beispiel von Sri Lanka, wo es gelungen war, die Malaria durch den Einsatz von DDT fast auszurotten. Während es dort vor 1950 über 2 Mio. Malariafälle mit mehr als 10 000 jährlichen Todesfällen gab, waren es 1963 nur noch 17. 1964 wurden die DDT-Aktionen eingestellt, was zur Folge hatte, dass die Malariaerkrankungen wieder drastisch zunahmen; 1968 überstieg die Zahl der Malariafälle 1 Mio. Seit 1969 wurde DDT deshalb wieder in begrenztem Maß zur Bekämpfung der Malaria eingesetzt. In einem Beschluss der WHO von 2009 wurde festgelegt, auch diese begrenzte Nutzung bis 2020 komplett einzustellen.

Auch bestimmte Schwermetalle, wie Quecksilber und Cadmium, gelangen über das Abwasser oder als Verunreinigungen von Produkten in die Ökosysteme.

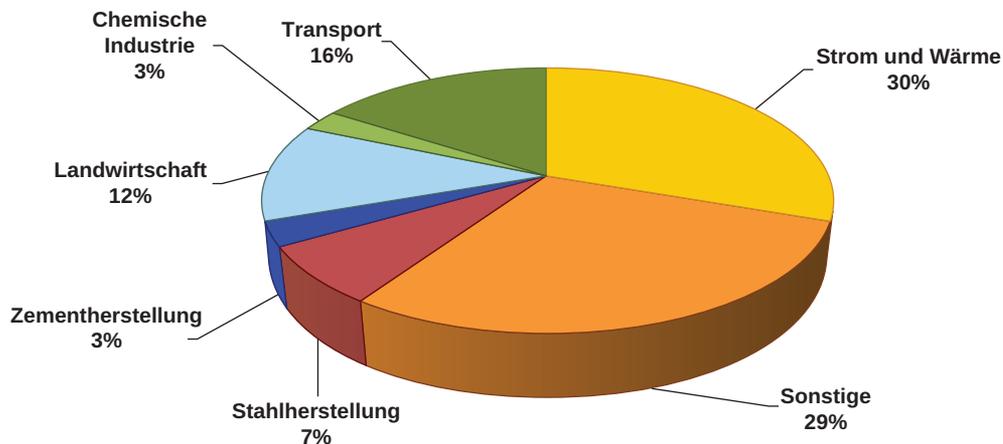


Abb. 1.2 Verteilung der globalen Treibhausgas-Emissionen (2016).

Für diese in der Umwelt verteilten Stoffe hat sich der Begriff *Umweltchemikalien* herausgebildet.

Außer durch Umweltchemikalien und durch Abwasser, Abgase und Abfälle können Umweltbelastungen auch durch sog. *Störfälle* beim Betrieb von Chemieanlagen verursacht werden. Als Störfall bezeichnet man eine Störung beim Betreiben einer Anlage, die zu Gefährdungen für Mensch und Umwelt oder Sachschäden führen kann, z. B. das Austreten von gefährlichen Stoffen, Brände und Explosionen. Besonders folgenreiche Störfälle ereigneten sich 1984 in Bhopal mit Tausenden von Todesopfern (vgl. Abschn. 11.4.3) und 1976 in Seveso, wo es zu schwerwiegenden Umweltschäden kam (vgl. Abschn. 11.4.1.3).

1.3 Chemiewirtschaft

1.3.1 Einteilung der Chemieprodukte

In allen Industrieländern ist die *chemische Industrie* ein wesentlicher Bestandteil der Volkswirtschaft. In Deutschland betrug 2017 der wertmäßige Anteil der chemischen Industrie an der gesamten Industrieproduktion 19,3%. Von dem Umsatz in Höhe von 195,5 Mrd. € entfielen mit 115 Mrd. € 59% auf den Export. Gleichzeitig wurden Chemieerzeugnisse im Wert von 79 Mrd. € eingeführt. In der Chemiewirtschaft besteht also eine starke Tendenz zu internationaler Arbeitsteilung.

Dies hängt mit der Struktur der chemischen Industrie zusammen. Sie ist gekennzeichnet durch ein außerordentlich breites Spektrum von Produkten, angefangen mit den in großer Menge produzierten Grundchemikalien, wie Schwefelsäure, Ammoniak, Chlor und Ethen, über die vielen daraus hergestellten Zwischenprodukte, z. B. Ethylenoxid, Styrol und Vinyl-

Tab. 1.1 Weltproduktion wichtiger Chemieprodukte.

Wichtige Chemieprodukte	Mt
Anorganika	
Schwefelsäure (100 %)	266 (2018)
Ammoniak	146 (2016)
Chlor	88 (2018)
Stickstoffdüngemittel (gerechnet als N)	120 (2017)
Phosphordüngemittel (gerechnet als P ₂ O ₅)	56 (2017)
Kalisalze (gerechnet als K ₂ O)	45 (2017)
Organika	
Ethen	147 (2016)
Propen	99 (2016)
Benzol	65 (2016)
Methanol	92 (2016)
Kunststoffe	335 (2016)

chlorid, bis hin zu hochveredelten Spezialprodukten wie Pharmaka und Pflanzenschutzmittel (Tab. 1.1).

Generell lassen sich die Chemieprodukte in vier Kategorien einordnen:

- **Basischemikalien und Massenprodukte.** Hierzu gehören die anorganischen Grundstoffe, die Petrochemikalien und ihre Derivate, die in großen Mengen produziert werden, z. B. niedere Alkohole und organische Säuren sowie Massenprodukte wie Düngemittel und Massenkunststoffe. In diesem Sektor hat sich die Chemie zu einer reifen Industrie entwickelt, d. h., die Herstellungstechnologien sind weitgehend bekannt und käuflich. Im Wettbewerb spielen die Herstellkosten die entscheidende Rolle; Reinheit und Qualität sind durch das Herstellungsverfahren mehr oder weniger vorgegeben. Hauptziel von Forschung und Entwicklung ist die Verbesserung und Weiterentwicklung der Produk-

6 | 1 Chemische Prozesse und chemische Industrie

tionstechnik, z. B. durch Katalysatoren von höherer Selektivität oder durch leistungsfähigere Apparate. Daneben interessiert die Entwicklung von Verfahren, die von preisgünstigeren Rohstoffen oder auch von den langfristig verfügbaren nachwachsenden Rohstoffen ausgehen.

- **Feinchemikalien.** Dies sind vor allem die vielen Zwischenprodukte, die in kleineren Mengen aus Basischemikalien hergestellt werden, z. B. die Vorprodukte für Farbstoffe, Pflanzenschutzmittel und Pharmaka. Auch bei dieser Produktkategorie steht die Produktionstechnik im Mittelpunkt von Forschung und Entwicklung. Gleichzeitig kommt es darauf an, den häufigen Nachfrageschwankungen zu folgen oder auch ein neu verlangtes Produkt schnell liefern zu können. Im letzteren Fall ist häufig ein Verfahren zu konzipieren, mit dem in einer bereits vorhandenen Klein- oder Technikumsanlage produziert werden kann. Hier ist hohe Kompetenz in Verfahrensentwicklung und Ingenieurtechnik gefordert.

Basischemikalien und Feinchemikalien sind chemische Verbindungen mit definierter Molekülstruktur. Sie werden von den Abnehmern überwiegend als Vorprodukte und Bausteine für weitere chemische Synthesen eingesetzt oder vereinfacht gesagt: Die Kunden kaufen Moleküle. Im Unterschied dazu handelt es sich bei den beiden anderen Kategorien, nämlich den Spezialchemikalien und den Wirkstoffen, um Produkte für bestimmte Anwendungen.

- **Spezialchemikalien** dienen vor allem technischen Anwendungen. Ein Beispiel dafür sind die Autolacke. Ein Autolack soll die Karosserie vor Verschmutzung und Korrosion schützen und das Auto gut aussehen lassen. Für den Autobesitzer, der einen kleinen Lackschaden ausbessern will, muss der Lack, der ihm vom Kundendienst verkauft wird, selbstverständlich die Farbnuance seines Wagens haben; dagegen hat ein derartiger Lack wegen der anderen Handhabung eine ganz andere Zusammensetzung („Formulierung“) als der Lack für den Karosserielackierer. Das Herausfinden der optimalen Zusammensetzung des jeweiligen Produkts ist typisch für Spezialchemikalien. Weitere typische Vertreter dieser Produktkategorie sind z. B. Textil-, Papier- und Lederhilfsmittel. Der Erfolg am Markt hängt hier entscheidend von einer hohen Kompetenz in der Anwendungstechnik ab. Wichtig ist dabei, neue Kundenbedürfnisse zu erkennen und zu deren Befriedigung neue Produkte und Formulierungen zu entwickeln.
- **Wirkstoffe.** Zu dieser Kategorie gehören die Pharmaka und Pflanzenschutzmittel. Die gewünsch-

te Wirkung, z. B. die Bekämpfung einer Infektion oder eines Schädlings, wird von diesen Produkten aufgrund einer bestimmten Molekülstruktur erzielt. Das Auffinden von Wirkstoffen und die anschließende Testung bis zur Zulassung und Markteinführung erfordern einen enorm hohen Aufwand. Außer hoher Forschungskompetenz ist für den wirtschaftlichen Erfolg ein effizientes weltweites Vertriebssystem erforderlich, das imstande ist, einen neuen Wirkstoff schnell auf den Markt zu bringen, denn die hohen Entwicklungskosten lassen sich nur über die Erlöse während der Patentlaufzeit finanzieren.

1.3.2 Chemiefirmen werden Großunternehmen – ein historischer Rückblick

Im folgenden Abschnitt finden Sie einen kurzen Überblick über die ersten Anfänge der weltweiten chemischen Industrie:

- Die Entwicklung einer eigenständigen chemischen Industrie begann in der Zeit um 1860, als es gelungen war, *organische Farbstoffe* zu synthetisieren (vgl. Abschn. 19.3). Diese Erfindungen wirkten als Auslöser für die Gründung zahlreicher Firmen, die man heute als „Start-ups“ bezeichnen würde, in denen die neuen Farbstoffe produziert wurden. Basis dieser sog. „Teerfarbstoffe“ waren Verbindungen, die man aus dem Steinkohlenteer isoliert hatte, wie Benzol, Anilin und Phenol.
- Zu den Farbstoffen kamen als weitere wichtige Produkte von 1885 an die ersten *synthetischen Pharmaka*, ebenfalls aus aromatischen Kohlenstoffverbindungen hergestellt. Bei diesen Entwicklungen waren vor allem deutsche Chemiefirmen erfolgreich. Ihr Anteil an der Weltproduktion von Farbstoffen betrug 1877 schon 50 % und stieg bis 1913 auf 87 %. Wesentliche Gründe dafür waren enge Kontakte zur Forschung an den Universitäten und die Einrichtung eigener Forschungslaboratorien in der Industrie. Einige dieser neuen als „Farbenfabriken“ gegründeten Firmen entwickelten sich im Lauf der Zeit zu großen Chemiefirmen:
 - 1863 Bayer und Hoechst
 - 1865 BASF = Badische Anilin- und Sodafabrik
 - 1867 Agfa = Actien-Gesellschaft für Anilin-Fabrication
- Auch bei anderen chemischen Produkten errangen deutsche Firmen eine führende Stellung auf dem Weltmarkt. 1913 lag die Exportquote der deutschen chemischen Industrie bei 70 %. Wegen des verschärften Wettbewerbs auf dem Weltmarkt schlossen sich 1925 die acht bedeutendsten deutschen

Chemieunternehmen auf Initiative von Carl Duisberg (Bayer) und Carl Bosch (BASF) zu dem damals größten Chemiekonzern, den IG Farben (Interessengemeinschaft Farbenindustrie AG), zusammen, der nach dem Zweiten Weltkrieg von den Alliierten aufgelöst wurde. Aus den in der Bundesrepublik gelegenen Teilen des Konzerns wurden u. a. die drei Nachfolgegesellschaften BASF, Bayer und Hoechst gegründet.

- Auch in anderen Ländern kam es zu Zusammenschlüssen von Chemiefirmen. So entstanden 1926 die britische Firma ICI (Imperial Chemical Industries), 1928 in Frankreich die Rhône-Poulenc, sowie in den USA die Chemiefirmen 1917 Union Carbide, 1802 die ursprünglich als Schießpulverfabrik gegründete Firma DuPont, 1897 Dow und 1901 Monsanto.

Die chemische Industrie der USA produzierte bis ins 20. Jahrhundert hinein in erster Linie anorganische Grundstoffe. Den wesentlichen Anstoß zum verstärkten Ausbau organisch-chemischer Produktionen gab das Ausbleiben der Lieferungen von Spezialchemikalien aus Deutschland während des Ersten Weltkriegs. Schwerpunkt der Entwicklung waren zunächst Grundstoffe und Zwischenprodukte. Recht bald entwickelten amerikanische Firmen aber auch neuartige Produkte, z. B. DuPont mit den Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffen als unbrennbare ungiftige Kältemittel (1929) und mit Nylon als der ersten Chemiefaser (1939).

Ebenfalls in Amerika hat eine andere, besonders einschneidende Entwicklung ihren Ursprung, nämlich die *Petrochemie*, d. h. die Verwendung von Erdöl als Chemierohstoff, die sich nach dem Zweiten Weltkrieg sehr schnell auch in allen anderen Industrieländern durchgesetzt hat. Im Zusammenhang damit sind sehr bald mehrere große Erdölfirmen im Bereich der Chemie tätig geworden (z. B. Exxon, Shell, British Petroleum).

Auch für die Chemiefirmen in der Bundesrepublik wurde nach dem Zweiten Weltkrieg das Erdöl schnell zum wichtigsten Rohstoff. So wurden Verfahren für Basischemikalien auf petrochemischer Basis entwickelt, z. B. für Acetaldehyd und Vinylacetat. Auch auf dem Weltmarkt fassten deutsche Chemiefirmen bald wieder Fuß. Die drei IG-Nachfolgefirmen BASF, Bayer und Hoechst übertrafen schon Anfang der 1970er Jahre jede allein in ihrer Produktion die frühere IG.

In Tab. 1.2 sind die 20 größten Chemiefirmen der Welt zusammengestellt. Dass sich im Laufe der Zeit

Tab. 1.2 Die 20 umsatzstärksten Chemiefirmen der Welt (2018, nur Chemieumsätze) [28].

Firma	Hauptsitz (Land)	Umsatz (Mrd. \$)
DowDuPont	USA	86,0
BASF	Deutschland	74,1
Sinopec	Volksrepublik China	69,2
SABIC	Saudi-Arabien	42,1
Ineos	Großbritannien	37,0
Formosa Plastics	Republik China (Taiwan)	36,9
ExxonMobil Chemical	USA	32,4
LyondellBasell Industries	Niederlande	30,8
Mitsubishi Chemical	Japan	28,8
LG Chem	Südkorea	25,6
Reliance Industries	Indien	25,2
PetroChina	Volksrepublik China	24,8
Air Liquide	Frankreich	24,3
Toray Industries	Japan	18,7
Evonik Industries	Deutschland	17,8
Covestro	Deutschland	17,3
Bayer	Deutschland	16,9
Sumitomo Chemical	Japan	16,1
Braskem	Brasilien	15,9
Lotte Chemical	Südkorea	15,1

große Chemiefirmen herausgebildet haben, die international tätig sind (sog. „Multis“), hat mehrere Ursachen:

- *Verbundwirtschaft*. Große Anlagenkomplexe für chemische Produktionen bieten wirtschaftliche Vorteile, da bei der Herstellung der vielen Produkte, die über mehrere chemische Stufen erfolgt, und bei den zahlreichen Prozessen mit Koppel- und Nebenprodukten lange Transportwege vermieden werden.
- Die *Kapitaldegression* (Abnahme der spezifischen Investition mit der Anlagengröße, vgl. Abschn. 13.2.2) verstärkt die Tendenz zum Bau großer Produktionseinheiten.
- Der *hohe Einsatz an Investitionskapital*. Chemieanlagen sind wegen ihrer aufwendigen Technik ausgesprochen kapitalintensiv.
- *Streuung des wirtschaftlichen Risikos*. Die chemische Industrie ist nach wie vor besonders innovationsfreudig. Damit sind aber auch Risiken verbunden, zum einen durch eine erfolgreiche Neuent-

8 | 1 Chemische Prozesse und chemische Industrie

wicklung seitens eines Konkurrenten, zum andern durch den Fehlschlag eines eigenen Projekts. Derartige Risiken sind von großen Unternehmen mit einer breiten Produktpalette leichter abzudecken.

- *Größere Finanzkraft für Forschung und Entwicklung.* Ein Charakteristikum der chemischen Industrie ist der hohe Forschungsaufwand (vgl. Abschn. 13.3). Die erfolgreiche Umsetzung von Neuentwicklungen in marktfähige Produkte und Verfahren erfordert oft viele Jahre und entsprechend hohe Finanzmittel.

Insbesondere durch die Erschließung und das enorme Wachstum neuer Märkte in Fernost, aber auch durch Zusammenlegung bzw. Akquisitionen, haben sich in den vergangenen Jahren enorme Verschiebungen ergeben. Insbesondere China und Indien bauen die chemische Industrie massiv aus.

1.3.3 Strukturwandel in der Chemieindustrie

Gegen Ende des letzten Jahrhunderts zeigte sich, dass die zunehmende Firmengröße auch Nachteile mit sich bringt. Großunternehmen sind wegen der längeren Entscheidungswege schwerfälliger und weniger flexibel als kleine Firmen. Dazu kommt, dass sich die Produktbereiche in ihrer Geschäftstätigkeit stark voneinander unterscheiden. Um auf dem Markt erfolgreich zu sein, haben Produzenten von Grundchemikalien eine hochentwickelte Produktionstechnik und eine günstige Rohstoffversorgung, aber häufig keine eigene Forschung. Dagegen verspricht bei Pharmaka und Spezialchemikalien gerade die Entwicklung neuer eigener Produkte wirtschaftliche Erfolge; zudem spielen hier im Gegensatz zu den Grundchemikalien Verkauf und Vertrieb eine wichtige Rolle.

Diese Probleme führten zusammen mit der zunehmenden Globalisierung, zunächst in den USA und später auch in Europa zu Umstrukturierungen der chemischen Industrie. Sie bestanden zum einen darin, dass sich die Firmen auf ihre „Kernkompetenzen“ konzentrierten, d. h. auf die Arbeitsgebiete, in denen sie besonders stark und im Wettbewerb führend waren. Andere Arbeitsgebiete gab man auf, indem man die entsprechenden Geschäftsteile verkaufte oder im Tausch mit anderen Firmen Teilbereiche erwarb, um die eigenen Kernbereiche zu verstärken.

Die andere Art der Umstrukturierung war radikaler; sie bestand darin, dass man die Firma teilte. So wurde 1993 der „Life-Science“-Bereich (Pharmaka und Pflanzenschutz) der ICI als neue Firma Zeneca abgetrennt. Das weiterhin unter ICI firmierende Unternehmen wurde in der Folgezeit durch Übernahmen (u. a. des Chemikaliengeschäfts von Unilever) zu

einem bedeutenden Hersteller von Farbstoffen und anderen Feinchemikalien.

Noch einschneidender war die Umstrukturierung des Hoechst-Konzerns. Nach Abtrennung einer Reihe von Arbeitsgebieten wurden 1998 die verbliebenen Chemieanteile (im Wesentlichen organische Zwischenprodukte) in der Firma Celanese zusammengefasst. Aus den Pharmabereichen von Hoechst und der französischen Firma Rhône-Poulenc entstand das Unternehmen Aventis, das 2004 nach Übernahme durch Sanofi unter Sanofi firmiert. Ein reines Pharmaunternehmen ist auch die Firma AstraZeneca (1997 durch Fusion von Zeneca und Astra entstanden), die 1999 ihren Bereich Agrochemikalien in die zusammen mit Novartis gegründete Syngenta einbrachte. Wie diese Firma ist im Zuge der nach 1990 erfolgten Umstrukturierungen eine ganze Reihe neuer Chemiefirmen entstanden, die sich auf bestimmte Geschäftsfelder konzentrieren.

Auch im Pharmabereich hat eine Konzentration stattgefunden, sodass die großen Pharmafirmen heute Umsätze von derselben Größenordnung wie große Chemiefirmen aufweisen (vgl. Tab. 1.3). Wesentlicher Grund für diese Konzentration ist der riesige Aufwand, den die Entwicklung eines neuen Arzneimittels erfordert. Bis zur Markteinführung eines neuen Wirkstoffs muss man heute mit einem Zeitraum von 10 bis 12 Jahren und mit Kosten von bis zu 2 Mrd. € oder sogar mehr rechnen. Das damit verbundene finanzielle Risiko kann nur von einer großen Firma mit entsprechend hohen Rücklagen getragen werden.

Tab. 1.3 Die 16 umsatzstärksten Pharmafirmen (2018).

Firma	Hauptsitz (Land)	Umsatz (Mrd. €)	F&E Aufwendung (%)
Johnson & Johnson	USA	74,4	13,2
Roche	Schweiz	53,0	19,4
Pfizer	USA	48,9	14,9
Novartis	Schweiz	48,5	16,3
Bayer	Deutschland	42,6	13,3
Merck & Co.	USA	38,6	22,7
Sanofi	Frankreich	38,4	16,5
GlaxoSmithKline	United Kingdom	37,5	12,1
AbbVie	USA	29,9	31,5
Eli Lilly	USA	22,4	21,6
Amgen	USA	21,6	15,7
Bristol-Myers Squibb	USA	20,6	22,4
AstraZeneca	United Kingdom	20,2	23,8
Gilead Sciences	USA	20,2	21,9
Boehringer Ingelheim	Deutschland	17,5	18,1
Novo Nordisk, AS	Dänemark	16,1	12,1

Neben den Großfirmen spielen auch mittlere und kleine Firmen in der Chemiewirtschaft eine wichtige Rolle. Ihre bevorzugten Tätigkeitsfelder sind Spezialprodukte und Feinchemikalien. Häufig handelt es sich dabei um Produkte mit hohem Veredelungsgrad für einen begrenzten Kreis von Abnehmern. Beispiele dafür sind Analysesubstanzen, Diagnostika, Aromastoffe und Produkte für spezielle technische Zwecke, wie Katalysatoren, Adsorptionsmittel, Filterhilfsmittel und Schmierstoffe. Auch wenn viele dieser Produkte zum Teil von Großunternehmen hergestellt und auf den Markt gebracht werden, haben kleinere Firmen wegen der speziellen Verwendungszwecke der Produkte und wechselnder Anforderungen an die Produkteigenschaften den Vorteil größerer Flexibilität und Anpassungsfähigkeit an besondere Kundenwünsche.

Als wesentliches Ergebnis der Umstrukturierung der chemischen Industrie seit Beginn der 1990er Jahre bleibt festzuhalten, dass auch die großen Firmen in der Regel nicht mehr das ganze Produktspektrum abdecken, sondern sich auf bestimmte Geschäftsfelder konzentrieren. Die sog. Rückwärtsintegration, also die Herstellung eines Produkts beginnend mit dem Grundstoff über alle Zwischenstufen bis zum Endprodukt in derselben Firma und möglichst am selben Standort, wird damit aufgegeben. Man bezieht Vor- und Zwischenprodukte und Hilfsstoffe von Herstellern, die sich auf bestimmte Produktgruppen spezialisiert haben.

Dabei braucht man die Vorteile der Verbundwirtschaft nicht zu verlieren, wenn man in der Nachbarschaft der Vorlieferanten produziert, am besten im selben Anlagenkomplex. Derartige Anlagenkomplexe, in denen mehrere Chemiefirmen vertreten sind, nennt man *Chemieparks*. Sie entstanden zunächst Anfang der 1990er Jahre in Ostdeutschland durch die Auflösung und Privatisierung der staatlichen Chemiekombinate z. B. in Leuna und in Bitterfeld-Wolfen. Weitere Chemieparks bildeten sich im Zuge von Umstrukturierungen. So gehen die Chemieparks Frankfurt-Höchst und Knapsack (bei Köln) auf den Hoechst-Konzern zurück und der Chemiepark Marl auf die Chemischen Werke Hüls. Ein anderer Grund für die Bildung von Chemieparks ist eine günstige Rohstoffversorgung, so z. B. in Antwerpen mit seinem Überseehafen.

Allen Chemieparks ist gemeinsam, dass sie den einzelnen Firmen die nötige Infrastruktur anbieten, d. h. Energieversorgung (elektrischer Strom, Dampf, Wasser), Abfallentsorgung (z. B. Kläranlage), Straßen und Serviceleistungen (z. B. Werkstätten und ingenieurtechnische Leistungen, Werkschutz, Arbeits- und Gesundheitsschutz, Sozialeinrichtungen). Für Organi-

sation und Betrieb dieser Infrastruktur ist in der Regel eine Servicegesellschaft zuständig, die ihre Leistungen den Nutzern in Rechnung stellt.

1.4 Struktur von Chemieunternehmen

Chemiefirmen beschäftigen sich mit der Herstellung chemischer Produkte. Produktionsanlagen und Betriebspersonal sind nur ein Bestandteil einer Chemiefirma; für eine erfolgreiche Geschäftstätigkeit sind weitere Funktionsbereiche erforderlich. Vor allem müssen die erzeugten Produkte verkauft werden, und zwar zu solchen Preisen, dass aus den Erlösen alle aufgewendeten Kosten gedeckt werden können und darüber hinaus ein Gewinn erzielt wird, der u. a. dazu dient, die zukünftige Entwicklung der Firma zu sichern.

Deshalb gibt es in jeder Chemiefirma einen Bereich, dessen Aufgabe der *Verkauf* der erzeugten Produkte ist. Eine weitere notwendige Funktion ist der *Einkauf* der für die Erzeugung der Produkte benötigten Ausgangsstoffe und Hilfsstoffe. Dazu kommt eine Aktivität, die abgesehen von Basischemikalien und Massenprodukten zum Bestehen im Wettbewerb besonders wichtig ist, die *Forschung und Entwicklung*. Die Ausrichtung der Forschung hängt von der Art der Firma ab. So werden bei kleineren Firmen meist Produkt- und Verfahrensverbesserungen im Vordergrund stehen und weniger oft neue Produkte. Nicht selten sind dabei auch Fragestellungen zu bearbeiten, die auf spezielle Anforderungen von Kunden zurückgehen. In größeren Firmen gibt es für eine solche kundennahe Forschung und Entwicklung besondere Abteilungen unter der Bezeichnung *Anwendungstechnik*. Forschung mit dem Ziel des Auffindens und der Entwicklung neuer Produkte und Verfahren wird vor allem von großen und mittleren Chemiefirmen betrieben.

Kleine Firmen sind flexibler als Großunternehmen und können auf Marktveränderungen schneller reagieren. Um diesen Nachteilen entgegenzuwirken, sind große Chemiefirmen in weitgehend selbstständige Unternehmensbereiche gegliedert, die auf bestimmte Produktgruppen und Abnehmerbranchen hin orientiert sind. Abbildung 1.3 zeigt als Beispiel dafür das Organisationsschema der Evonik Industries AG. Die Unternehmensbereiche (bei der Evonik Industries AG als Segmente bezeichnet) agieren wie selbstständige Firmen und haben neben der Produktion eigene Abteilungen für Marketing und Vertrieb und für Forschung und Entwicklung.

Neben diesen am Markt agierenden Unternehmensbereichen gibt es in den großen Firmen Bereiche (bei der Evonik Industries AG die sog. Services

10 | 1 Chemische Prozesse und chemische Industrie

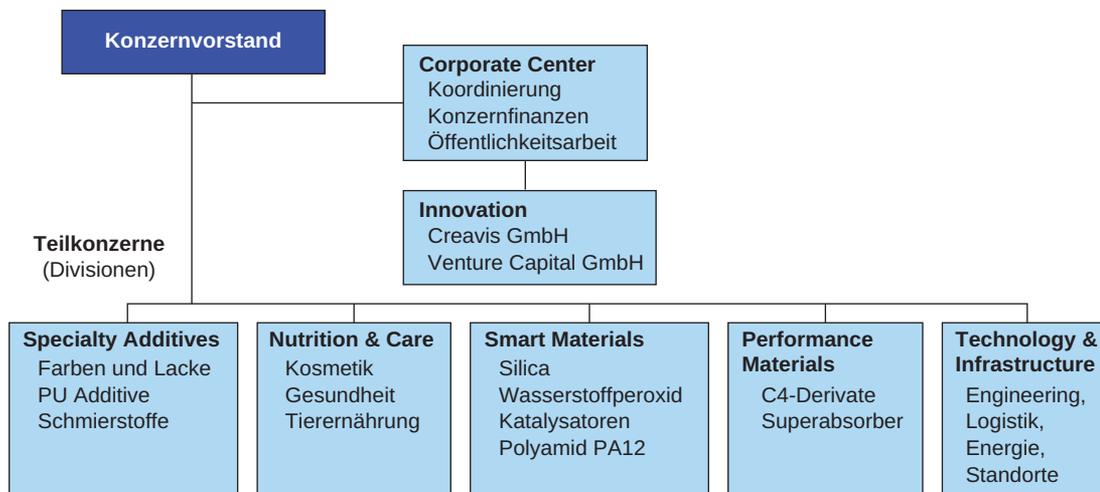


Abb. 1.3 Organisationsschema eines chemischen Großunternehmens am Beispiel der Evonik Industries AG (2022).

„Technology & Infrastructure“, vgl. Abb. 1.3), die bestimmte, nicht geschäftsspezifische Aufgaben für die Unternehmensbereiche als Dienstleistungen übernehmen. Auch diese Bereiche werden als unternehmerisch selbstständige Einheiten geführt und stehen im Wettbewerb mit externen Firmen. Gleichzeitig können die Servicebereiche aber auch für konzernfremde Firmen tätig werden. Die Aufgabenteilung zwischen produzierenden Unternehmensbereichen und dienstleistenden Servicebereichen ist von Konzern zu Konzern verschieden.

Die Koordinierung der Aktivitäten der Unternehmens- und Servicebereiche obliegt dem Vorstand des Konzerns, wobei die einzelnen Mitglieder des Vorstands für bestimmte Aufgabenbereiche wie Personalwesen, Finanzen, Umwelt, Sicherheit, Forschung und Entwicklung zuständig sind. Neben der Forschung in den Unternehmensbereichen, die auf das jeweilige Geschäftsfeld ausgerichtet ist, betreiben größere Firmen auch Forschungsprojekte mit dem Ziel, sich neue und aussichtsreiche Arbeitsgebiete zu erschließen. Diese sog. *strategische Forschung* wird in der Regel der Konzernzentrale zugeordnet (bei der Evonik Industries AG die Evonik Creavis GmbH, vgl. Abb. 1.3).

1.5 Bedeutung von Forschung und Entwicklung für die chemische Industrie

1.5.1 Wissenschaft und chemische Technik

Von Beginn an war die chemische Technik eng mit der Entwicklung der Naturwissenschaften insgesamt

und insbesondere der Chemie verbunden. Im Folgenden werden einige wichtige „Meilensteine“ dieser historischen Entwicklung aufgeführt:

- Das erste technische Verfahren zur Herstellung von Soda, das *Leblanc-Verfahren*, geht auf ein Preisausschreiben der französischen Akademie der Wissenschaften im Jahre 1775 zurück.
- Die Isolierung des *Anilins* und des Phenols als Bestandteile des Steinkohlenteers (1834) durch *F.F. Runge* und die Entdeckung des ersten künstlichen Farbstoffs, des *Mauveins*, hergestellt aus Anilin (1856), durch den Engländer *W.H. Perkin*, waren entscheidende Anstöße für den Aufbau der Teerfarbenindustrie.
- Die Erkenntnisse von *Justus v. Liebig* über den Minimalbedarf der Pflanzen an den drei Elementen Stickstoff, Kalium und Phosphor (*Minimumgesetz*, 1840) standen am Anfang der Düngemittelindustrie, d. h. der Gewinnung von Mineralsalzen für die künstliche Düngung (vgl. Abschn. 18.6.1).
- Der letzte Schritt in dieser Entwicklung war die Nutzung des Luftstickstoffs zur großtechnischen Erzeugung von Ammoniak, der sog. *Ammoniak-synthese*. Gerade die Entwicklung dieses Verfahrens in den Jahren von 1908 bis 1913 durch *Fritz Haber* (Nobelpreis 1918) und *Carl Bosch* (Nobelpreis 1931) ist ein eindrucksvolles Beispiel für die enge Verknüpfung zwischen grundlegenden wissenschaftlichen Erkenntnissen und deren Nutzung in der chemischen Technik (vgl. Abschn. 18.2.1).
- Als besonders fruchtbar erwies sich der Kontakt zwischen Forschung und chemischer Technik bei der Entdeckung und Entwicklung neuer Arzneimittel. Auch hier waren die aus dem Steinkohlenteer isolierten aromatischen Verbindungen der

Ausgangspunkt. 1883 synthetisierte *Ludwig Knorr* bei der Suche nach einer Substanz mit der fiebersenkenden Eigenschaft des Naturstoffs Chinin das *Phenazon*. Schon ein Jahr später wurde es als erstes Antipyretikum unter der Bezeichnung *Antipyrin* auf den Markt gebracht.

- Weitere Pharmaka folgten wie das *Aspirin* (1897 Bayer) und das *Salvarsan* (1910 Hoechst), das von *Paul Ehrlich*, dem „Vater der Chemotherapie“, entwickelt wurde (vgl. Abschn. 19.4.2).
- In die gleiche Zeit fällt die Entwicklung der *Serumtherapie* durch *Emil von Behring*. Voraussetzung dafür waren die Entdeckungen von *Robert Koch*, der erstmalig Mikroorganismen als Ursache von Infektionskrankheiten nachwies. Als Assistent am Koch'schen Institut fand von Behring 1892 ein Heilserum gegen Diphtherie, das ab 1894 von Hoechst produziert wurde.
- Weitere Schritte in der Bekämpfung von Infektionskrankheiten waren die Entwicklung der *Sulfonamide* als wirksame Chemotherapeutika durch *Gerhard Domagk* und die Entdeckung der antibakteriellen Wirkung von *Penicillin* durch *Alexander Fleming*. Während *Prontosil* als erstes Sulfonamid unmittelbar nach seiner Entdeckung 1935 produziert und in der Therapie eingesetzt werden konnte, dauerte es über 15 Jahre, bis größere Mengen an *Penicillin* produziert wurden. Der Grund dafür ist einfach: Während Sulfonamide in einem klassischen chemischen Prozess mit mehreren Reaktionsstufen hergestellt werden, ist *Penicillin* ein Stoffwechselprodukt von Mikroorganismen; über die Kultivierung solcher Mikroben zur industriellen Gewinnung von Wirkstoffen gab es damals noch keine Erfahrungen. Die Isolierung von *Penicillin* gelang erst 1939. Neben der extrem niedrigen Konzentration des Wirkstoffs in der Kulturbrühe und seiner Hydrolyseempfindlichkeit gab es ein weiteres Problem: Um eine Kontamination durch Fremdkeime auszuschließen, mussten die Mikroorganismen unter absolut sterilen Bedingungen kultiviert werden. Durch koordinierten Einsatz mehrerer US-Pharmafirmen gelang es, diese Schwierigkeiten zu überwinden und im Jahr 1943 einen technischen Prozess für ein bis dahin absolut unübliches Verfahren zu entwickeln.
- Eine bahnbrechende Entwicklung aus neuester Zeit ist die *Gentechnik*, d. h. die Nutzung genetisch veränderter Zellen zur Produktion von Wirkstoffen. Auch für diese Technik gaben neue Erkenntnisse der Grundlagenforschung den Anstoß, und zwar in der Molekularbiologie und in der Biochemie. Inzwischen werden mit dieser Technik bestimmte Hormone (z. B. seit 1981 das *Human-Insulin* und

seit 1993 das *menschliche Wachstumshormon Somatotropin*) und andere Wirkstoffe (z. B. *Hepatitis-Impfstoff*) hergestellt.

1.5.2 Betriebsinterne Forschung

Bei der großen Bedeutung von Innovationen für die Verfahren und Produkte der chemischen Industrie stellte sich schon früh heraus, dass es nicht ausreichte, Forschungsergebnisse aus Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen einfach zu übernehmen, um sie optimal zu nutzen. Es erwies sich vielmehr als notwendig, eigene Laboratorien einzurichten. Dabei ging es nicht nur darum, aus den Ergebnissen externer Forschung verkaufsfähige Produkte und die entsprechenden Herstellungsverfahren zu entwickeln; vielmehr begann man auch mit der systematischen Untersuchung von Stoffgruppen, um neue Verbindungen für wirtschaftlich interessante Anwendungen zu finden. Die schon erwähnte Entdeckung der therapeutischen Wirksamkeit der Sulfonamide durch G. Domagk war das Ergebnis einer solchen breit angelegten Untersuchung.

Natürlich ist der wirtschaftliche Erfolg nicht von vornherein sicher; auch lässt sich zu Beginn einer Neuentwicklung der Aufwand an Zeit und Mitteln nur schwer abschätzen. Die Höhe des tragbaren finanziellen Engagements hängt von der Finanzkraft der Firma und damit im Wesentlichen von ihrer Größe ab. Die Entwicklung der ersten Polyamidfaser *Nylon* (vgl. Abschn. 19.1.3) dauerte zehn Jahre und kostete DuPont 27 Mio. Dollar, bevor 1939 ein verkaufsfähiges Produkt auf den Markt gebracht werden konnte (zum Vergleich: der Umsatz von DuPont betrug 1929 203 Mio. Dollar). Die Entwicklungsarbeiten für die *Kohlehydrierung* (vgl. Abschn. 15.3.4.3) hatten 1931 während der Weltwirtschaftskrise die Finanzkraft der damals größten Chemiefirma, der IG Farben (Umsatz 1929 1,5 Mrd. Reichsmark), so stark strapaziert, dass man daran dachte, das Projekt einzustellen, nachdem man dafür weit mehr als 100 Mio. Reichsmark investiert hatte.

Forschungsaufwand

Die intensiven Forschungsaktivitäten der chemischen Industrie erfordern entsprechend hohe Aufwendungen. Weltweit werden von Chemiefirmen 2–5 % des Umsatzes für Forschung und Entwicklung aufgewendet. Bei Pharmafirmen ist der Forschungsaufwand mit 15–20 % noch weitaus höher.

In der deutschen chemischen Industrie machten die Forschungskosten 2017 einen Anteil von 5,5 % am Gesamtumsatz aus. Zwischen den verschiedenen Produktgruppen gibt es große Unterschiede. Außer

Tab. 1.4 Aufgaben von Forschung und Entwicklung in Chemieunternehmen.

Forschungsbereich	Neuentwicklungen („offensive Forschung“)	Verbesserungen, Weiterentwicklung („defensive Forschung“)
Grundlagen und Methoden	Eröffnen neuer Arbeitsgebiete	—
Produkte	Neue Produkte	Verbesserte Produkte und Produktformulierungen
Verfahren	Verfahren für neue Produkte, neue Verfahren für bekannte Produkte	Verfahrensverbesserungen, Kapazitätserhöhung
Anwendungstechnik	Anwendungstechnik für neue Produkte, neue Anwendungen für bekannte Produkte	Anwendungstechnische Verbesserungen und Weiterentwicklungen, kundennahe Forschung

bei den Pharmazeutika sind auch bei den Wirkstoffen für den Pflanzenschutz die Forschungskosten mit ca. 10 % vom Umsatz überdurchschnittlich hoch. Dagegen wird in den Bereichen der Massenprodukte sehr viel weniger für Forschung und Entwicklung aufgewendet. Hier kann man mit Durchschnittswerten von höchstens 2–3 % des Umsatzes rechnen. Im Bereich der chemischen Grundstoffe betreiben nur wenige Hersteller eigene Forschung; Neuentwicklungen, meist Verfahrensverbesserungen, können in der Regel gegen Zahlung von Lizenzgebühren genutzt werden. Ähnlich ist die Situation bei vielen anderen Massen- und Zwischenprodukten, bei denen es zahlreiche Hersteller ohne eigene Forschung gibt.

Ziele von Forschung und Entwicklung

In Industriefirmen sind Forschung und Entwicklung auf den wirtschaftlichen Erfolg ausgerichtet, d. h. auf die Sicherung und Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens. Hierbei sind in der chemischen Industrie zwei verschiedenartige Zielsetzungen zu unterscheiden, und zwar zum einen die *Entwicklung neuer Produkte, Verfahren oder Produktanwendungen* („offensive“ Forschung) und zum anderen die *Verbesserung von Produkten oder Verfahren und anwendungstechnische Weiterentwicklungen* („defensive“ Forschung) (Tab. 1.4).

Wege der Produkt- und Verfahrensentwicklung

Neue Produkte werden in der Regel für bestimmte Verwendungszwecke entwickelt, z. B. für den Schutz von Kulturpflanzen gegen einen bestimmten Schädling. Wenn man einen geeigneten Wirkstoff gefunden hat, ist es bis zur Produktionsaufnahme und Vermarktung noch ein langer Weg. Zur Weiterverfolgung eines solchen Projekts sind folgende Arbeiten durchzuführen:

- Untersuchungen zur Beantragung der Zulassung des Produkts für die beabsichtigte Verwendung (Toxikologie, Umweltverträglichkeit),

- die anwendungstechnische Entwicklung (bei einem Pflanzenschutzmittel die Entwicklung von sog. Formulierungen, in denen das Produkt angewendet wird, z. B. Dispersionen, die versprüht werden können) und
- die Entwicklung des Herstellungsverfahrens für das Produkt.

Alle diese Arbeiten gehören zur Forschung und Entwicklung. Nach ihrem erfolgreichen Abschluss und nach Zulassung des Produkts können Produktion und Vermarktung aufgenommen werden. Ob eine Produktionsanlage gebaut wird, hängt vor allem von der Produktmenge ab. Für Produkte, die nur in kleinen Mengen benötigt werden, also für Wirkstoffe (Pharmazeutika und Pflanzenschutzmittel) und Spezialchemikalien, benutzt man häufig die bereits vorhandenen Standardapparate, oder man produziert zunächst in der Versuchsanlage (vgl. Abschn. 12.4), um möglichst schnell auf den Markt zu kommen.

Zu den Neuentwicklungen gehören nicht nur neue Produkte; es kann sich dabei auch um *neue Verfahren für bekannte Produkte* handeln. Dabei geht es häufig um einen neuen Reaktionsweg. Ein Beispiel ist die Entwicklung eines Verfahrens für die Herstellung von Propylenoxid ohne Koppelprodukte durch Direktoxidation von Propen (vgl. Abschn. 11.5.2 und 17.1.4.2). Auch Veränderungen in der Rohstoffsituation können Anlass für die Entwicklung neuer Verfahren sein, wie es z. B. beim Übergang von Ethin auf Ethen als C₂-Grundstoff in der Zeit von 1955 bis 1965 der Fall war (vgl. Abschn. 16.4.2). Im Hinblick auf die abzusehende Verknappung von Erdöl wurden in den 1980er Jahren Verfahren entwickelt, in denen das über die Vergasung von Kohle zugängliche Methanol zu Benzin (MTG-Prozess) und zu Alkenen (MTO-Prozess) umgewandelt wird (vgl. Abschn. 17.1.1.1). Für die Zukunft interessant ist angesichts der begrenzten Vorräte an fossilen Rohstoffen (Erdöl, Erdgas, Kohle) die Entwicklung von Verfahren, die von nachwachsenden

den Rohstoffen wie natürliche Fette und Öle oder Cellulose ausgehen (vgl. Abschn. 15.4.1).

Als Beispiele für *Verbesserungen und Weiterentwicklungen von Produkten und Verfahren* seien genannt:

- Veränderungen an einem Polymeren zwecks Erzielung höherer Festigkeiten
- Variation der Zusammensetzung von Faservorprodukten zur Vermeidung der Brennbarkeit der Faser
- Erhöhung der Ausbeute durch einen selektiveren Katalysator
- Reduzierung der Abwasserbelastung bei der Herstellung eines Zwischenprodukts
- Verwertung eines Nebenprodukts

Einen erheblichen Teil des Forschungsaufwands sowohl für neue Produkte als auch für Produktverbesserungen beansprucht die *Anwendungstechnik*. Bei neuen Produkten hat sie die Aufgabe, die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten zu erproben und die günstigsten Bedingungen und Formen der Anwendung zu ermitteln, z. B. die schon erwähnte Entwicklung von Formulierungen für Pflanzenschutzmittel oder die Verarbeitung eines Kunststoffes. Ähnlicher Art sind die Aufgabenstellungen bei Produktverbesserungen. Die Anregungen dazu gehen häufig auf Kontakte mit Kunden zurück. Zudem erfolgen viele anwendungstechnische Entwicklungen in Zusammenarbeit mit Kunden. Teilweise geht die anwendungstechnische Tätigkeit in die technische Kundenberatung über, also in die unmittelbare Unterstützung des Verkaufs.

Forschung zur Entwicklung neuer Verfahren und neuer Produkte und zum Auffinden neuer Anwendungen für bekannte Produkte geschieht naturgemäß in den Arbeitsgebieten, in denen ein Unternehmen tätig ist. Neben dieser produktorientierten Forschung werden vor allem von größeren Firmen Forschergruppen auf ausgewählte Themen außerhalb der eigenen Produktpalette angesetzt, um neue aussichtsreiche Arbeitsgebiete zu erschließen und die Geschäftsaktivitäten auszuweiten.

1.6 Entwicklungstendenzen und Zukunftsaussichten der chemischen Industrie

Die chemische Industrie ist seit jeher ausgesprochen forschungsorientiert und innovationsfreudig. Nach wie vor wird im Vergleich zu anderen Industrien ein überdurchschnittlich hoher Anteil des Umsatzes für Forschung und Entwicklung aufgewendet, vor allem in den Bereichen der Spezialchemikalien und

Wirkstoffe. Im Vordergrund steht dabei die Entwicklung neuer Produkte für die verschiedensten Anwendungsfelder, z. B. hochspezifische Arzneimittel und Diagnostika für den Gesundheitssektor, neue Werkstoffe für die Nachrichtentechnik und für Motoren, Fahrzeuge und Flugzeuge, Pflanzenschutzmittel mit hoher Selektivität und leichter Abbaubarkeit. Daneben ist für alle Produktbereiche die Entwicklung und Verbesserung der Herstellungsverfahren von Bedeutung.

Um mit diesen Forschungsaktivitäten Erfolg zu haben, muss man neueste Erkenntnisse und Methoden benutzen. Sie sind die Basis für Innovationen, d. h. für neuartige Produkte und Verfahren. Die Quelle für Innovationen sind vor allem Forschungsgebiete, die sich in einem Stadium intensiver Entwicklung befinden. Meist handelt es sich dabei um Forschungsfelder zwischen den Fachgebieten, also um interdisziplinäre Forschung.

Für die Chemieindustrie sind derzeit und für die absehbare Zukunft vor allem die in Tab. 1.5 aufgeführten Forschungsfelder als Quellen für Innovationen interessant. Wie daraus zu ersehen ist, können bestimmte Neuentwicklungen aus der Forschung bei sehr verschiedenartigen Problemen genutzt werden. So ist mit den Methoden der automatisierten Synthese die Suche nach neuen Stoffen erheblich effizienter geworden. Inzwischen setzt man diese Methoden aber auch bei der Suche nach neuen und besseren Katalysatoren ein, und zwar unter Verwendung einer größeren Anzahl von Minireaktoren. Besonders vielfältig ist die Nutzung der Biotechnologie. So benutzt man Enzymkatalysatoren nicht nur für biochemische Reaktionen, sondern auch für enantioselektive Synthesen. Eine weitere Anwendung finden Enzyme in den Biochips, vor allem in der Diagnostik. Bei diesen Mikroenzymsonden handelt es sich um eine Kombination von Biotechnologie und Nanotechnologie.

Die chemische Industrie wird auch in Zukunft in weiten Bereichen durch eine hohe Dynamik gekennzeichnet sein, insbesondere dort, wo neue Produkte und Verfahren entwickelt werden. Neben der damit verbundenen Expansion wird sich die seit einiger Zeit stattfindende Verlagerung von Produktionen aus Westeuropa und Nordamerika in andere Länder fortsetzen. Räumliche Nähe zu Verbrauchern einerseits und zu Rohstoffen andererseits sowie das örtliche Lohnniveau sind dabei die maßgeblichen Faktoren. So wird schon jetzt ein beträchtlicher Anteil bestimmter Basischemikalien in den arabischen Erdölländern produziert, und bei Fasern und Farbstoffen ist eine Verlagerung von Produktionen nach Südostasien zu beobachten. Gleich-

Tab. 1.5 Innovationen aus neuen Forschungsfeldern.

Innovationen aus	interessant für	Ziel
Automatisierte Synthese	Hochdurchsatz-Screening Wirkstoffe, Materialien, Katalysatoren	Hoher Informationsgewinn Gute Reproduzierbarkeit
Biotechnologie	Wirkstoffe, Nutzung nachwachsender Rohstoffe	Neue Wirkstoffe Nachhaltige Produktion
Nanotechnologie	Spezialchemikalien	Bessere Produkteigenschaften Bessere Katalysatoren
Mikroverfahrenstechnik	Feinchemikalien Spezialchemikalien	Effizientere Produktionsverfahren in Minireaktoren und Miniplants
Modularisierung	Apparate- und Anlagenbau, Fein- und Spezialchemie	Beschleunigte Prozessentwicklung und schnellere Marktbedienung
Einwegausrüstung (engl.: <i>single-use equip- ment</i>)	Bioprozesstechnik	Schneller Produktwechsel, geringer Qualifizierungs- und Validierungsaufwand
Bio-/Chemoinformatik	Versuchsplanung und Datenauswertung	Mehr Information in kurzer Zeit
Power-to-X	Katalysatorentwicklung nachhaltige Produktion	Chemische Energiespeicherung, nachhaltige Entwicklung
Energieintegration	Elektrochemische Prozesse	Nutzung regenerativer Energiespitzen
Kreislaufwirtschaft (engl.: <i>circular economy</i>)	Neue Rohstoffbasis Polymer-Werkstoffe Seltene Erden, strategische Werkstoffe	Effizienter Umgang mit Rohstoffen Rohstoffknappheit vorbeugen
Digitalisierung (<i>Industrie 4.0</i>)	Alle Bereiche	Vernetzung der Sensorik und Steuerungstechnik, Logistik resultierend in effizienteren Produktionspro- zessen; Einsatz von „künstlicher Intelligenz (KI)“

zeitig ist die Volksrepublik China zu einem bedeutenden Erzeuger für Grundchemikalien, Petrochemikalien und Feinchemikalien aufgestiegen. Natürlich bergen diese Entwicklungen auch gewisse Nachteile, wie die Versorgungsengpässe mit Medikamenten und einigen anderen kritischen Gütern während der jüngsten COVID-19 Pandemie gezeigt haben.

Pharmazeutika werden vorzugsweise dort produziert, wo der Verbrauch hoch ist, also in den USA, Westeuropa und Japan. Dabei hat die stärkere Spezialisierung in der Chemieindustrie dazu geführt, dass die Pharmafirmen Vorprodukte häufig von anderen Firmen beziehen, die auf die Herstellung von Feinchemikalien spezialisiert sind. Staatliche Eingriffe in die Preisgestaltung und Verschreibung von Pharmazeutika können zur Verlagerung von Produktion und Forschung in Länder führen, in denen es keine Restriktionen für den Arzneimittelmarkt gibt. Das Auffinden neuer Wirkstoffe ist mit den Entwicklungen in der Molekularbiologie und dem daraus resultierenden besseren Verständnis der Wirkung von Arzneimitteln wesentlich effizienter geworden. Dazu tragen auch neue Methoden bei, z. B. die Anwendung der kombinatorischen Chemie beim Stoffscreening. Ana-

log gilt das für die Suche nach neuen Wirkstoffen für den Pflanzenschutz.

Auch im Bereich der Spezialchemikalien werden weiterhin neue Produkte für die verschiedensten Anwendungsfelder entwickelt werden, z. B. neue anorganische und organische Werkstoffe für die Informationstechnik und für Motoren und Fahrzeuge. Im Bereich der Feinchemikalien wird die Entwicklung verbesserter und neuer Katalysatoren höhere Ausbeuten und damit eine bessere Rohstoffausnutzung ermöglichen. Dazu ist hier durch den Einsatz der Mikroverfahrenstechnik mit wesentlichen Verfahrensverbesserungen zu rechnen, wie z. B. sicherere Reaktionsführung und höhere Selektivitäten.

Bessere Katalysatoren sind nach wie vor auch für die Herstellung von Grundchemikalien und Zwischenprodukten interessant, vor allem zur Erzielung höherer Ausbeuten, zumal sich die fossilen Rohstoffe, insbesondere das Erdöl, weiterhin verteuern werden. Neue Aufgaben stellen sich durch das zunehmende Interesse an der Nutzung nachwachsender Rohstoffe (Kohlenhydrate, Fette und Öle) zur Herstellung von Chemieprodukten, und zwar nicht nur wegen der höheren Preise für fossile Rohstoffe, sondern auch wegen ihrer langfristig zu erwartenden Verknappung.

Derartige Entwicklungen und Veränderungen rein wirtschaftlicher Art sind für die chemische Industrie nicht neu; sie hat darauf immer flexibel mit Innovationen reagiert. Seit den 1970er Jahren ist aber ein ganz anderes Problem hinzugekommen, nämlich eine zunehmend kritische Einstellung der Öffentlichkeit zur chemischen Technik und Industrie. Wenn bis dahin das Bild der chemischen Industrie mit der Vorstellung neuer und fortschrittlicher Technik und dem Wert und Nutzen ihrer Produkte verbunden war, hat sich damals eine starke Veränderung ins Negative vollzogen. Dabei spielten einige spektakuläre Chemieunfälle (Seveso 1976, Bhopal 1985, Sandoz/Basel 1986) sicher eine Rolle (vgl. Abschn. 11.4). Unabhängig davon ist jedoch eine zunehmende Sensibilisierung der Öffentlichkeit gegenüber Fragen der Sicherheit und der Gefährdung der Umwelt eingetreten. Auch das hat zu einer kritischeren Einstellung gegenüber den Produkten der chemischen Industrie geführt. Ein Beispiel ist die weltweite Problematik der enormen Mengen an Plastikmüll, vor allem in den Weltmeeren. Dies führt derzeit zu großen Anstrengungen zur Müllvermeidung, aber auch zum Recycling von Kunststoffen, die deutlich über die bisherigen Anstrengungen hinausgehen, hin zu einer tatsächlichen stofflichen Wiederverwendung, z. B. durch Depolymerisation.

Eine gravierende Folge dieser Entwicklung waren neue und verschärfte gesetzliche Regelungen für den Bau und Betrieb von Chemieanlagen und für die Zulassung und Verwendung chemischer Produkte. Dadurch wurde es erheblich schwerer, neue Produkte auf den Markt zu bringen und neue Produktionsanlagen zu errichten. Zum einen verlängerten sich die Genehmigungsverfahren für den Bau neuer Produktionsanlagen, zum anderen wurden umfangreichere experimentelle Untersuchungen, z. B. zur Toxizität, erforderlich. Gerade für kleinere Firmen wird es damit erschwert, neue Produkte auf den Markt zu bringen. Ein entsprechendes Regelwerk ist seitens der EU unter dem Namen REACH – Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals – zusammengefasst worden (vgl. Abschn. 11.1).

Trotz dieser negativen Einflüsse wird die chemische Industrie auch in der weiteren Zukunft eine Wachstumsindustrie bleiben. Nach wie vor erfordern Probleme aus den verschiedensten Bereichen unseres Alltags zu ihrer Lösung neue Produkte und Verfahren der Chemie. Dazu wird es aus den Grundlagenwissenschaften und aus anderen technischen Disziplinen immer wieder Anstöße zu Innovationen in der chemischen Technik geben.

Literatur

- 1 The European Chemical Industry Council (2022). Facts and Figures Report 2022: https://cefic.org/app/uploads/2022/01/Leaflet-FactsFigures_interactif_V02.pdf (letzter Aufruf: 29.10.2022).
- 2 Jess, A. und Wasserscheid, P. (2020). *Chemical Technology: An Integral Textbook*, 2. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH.
- 3 Verband der Chemischen Industrie (Hrsg.) (2019). *Chemiewirtschaft in Zahlen*. Ausgabe 2019, online-Version unter: www.vci.de (letzter Aufruf: 29.10.2022).
- 4 Umweltbundesamt (2017). Daten zur Umwelt 2017. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/daten-zur-umwelt-2017> (letzter Aufruf: 29.10.2022).
- 5 Hipple, J. (Hrsg.) (2017). *Chemical Engineering for Non-Chemical Engineers*. John Wiley & Sons.
- 6 Emig, G. und Klemm, E. (2017). *Technische Chemie*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- 7 Behr, A., Agar, D.W., Jörissen, J. und Vorholt, A.J. (2016). *Einführung in die Technische Chemie*, 2. Aufl. Springer Spektrum.
- 8 Kley, K.-L. (2014). *Deutschland braucht Chemie*. München: Deutsche Verlags-Anstalt (DVA).
- 9 ProcessNet (2014). *Lehrprofil Technische Chemie*, 4. Aufl. DECHEMA. https://processnet.org/processnet_media/Hellwig/Lehrprofil_TC_final_25_09_14_komplett_final-p-8195.pdf (letzter Aufruf: 29.10.2022).
- 10 Roussak, O. und Gesser, H.D. (2013). *Applied Chemistry – A Textbook for Engineers and Technologists*. Springer USA.
- 11 Ley, C. (Editor-in-Chief) und Elvers, B. (Senior editorial adviser) (2011–2014). *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 7. Aufl. in 40 Bänden, sowie online-Version mit vierteljährlichen Ergänzungen. John Wiley & Sons.
- 12 Girard, J.E. (2009). *Principles of Environmental Chemistry*, 2. Aufl. Burlington: Jones & Bartlett.
- 13 Van Loon, G.W. und Duffy, S.J. (2011). *Environmental Chemistry: A Global Perspective*. Oxford: Oxford Univ. Press.
- 14 Pani, B. (2007). *Textbook of Environmental Chemistry*. Delhi: I.K. International.
- 15 Doble, M. und Kruthiventi, A.K. (2007). *Green Chemistry and Engineering*. Elsevier, Academic Press.
- 16 Fent, K. (2007). *Ökotoxikologie: Umweltchemie – Toxikologie – Ökologie*, 3. Aufl. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.

16 | 1 Chemische Prozesse und chemische Industrie

- 17 Dittmeyer, R., Keim, W., Kreysa, G. und Oberholz, A. (2006). *Winnacker-Küchler: Chemische Technologie*, 9 Bde., 5. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH.
- 18 Budde, F., Felcht, U.H. und Frankemölle, H. (Hrsg.) (2005). *Value Creation – Strategies for the Chemical Industry*, 2. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH.
- 19 Jenck, J.F. (2004). Products and processes for a sustainable chemical industry: A review of achievements and prospects. *Green Chem.* 6 (11): 544.
- 20 Wagner, K., Pratsinis, S.E. und Köhler, M. (2004). Nanomaterialien und Nanotechnologie. In: *Winnacker-Küchler: Chemische Technik*, 5. Aufl., Bd. 2, S. 821. Weinheim: Wiley-VCH.
- 21 Schwarzenbach, R.P., Gschwend, P.M. und Imboden, D.M. (2003). *Environmental Organic Chemistry*. Hoboken: Wiley-Interscience.
- 22 Green, M.M. und Wittcoff, H.A. (2003). *Organic Chemistry Principles and Industrial Practice*. Weinheim: Wiley-VCH.
- 23 Bliefert, C. (2002). *Umweltchemie*, 3. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH.
- 24 Chenier, P.J. (2002). *Survey of Industrial Chemistry*, 3. Aufl. Berlin, New York: Springer-Verlag.
- 25 Jakobi, R. (2002). *Marketing and Sales in the Chemical Industry*, 2. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH.
- 26 Festel, G., Söllner, F. und Bamelis, P. (2001). *Volks-wirtschaftslehre für Chemiker*. Berlin: A.D. Little.
- 27 Köhler, M. (2001). *Nanotechnologie. Eine Einführung in die Nanostrukturtechnik*. Weinheim: Wiley-VCH; englische Ausgabe: Köhler, M. und Fritzsche, W. (2004) *Nanotechnology*. Weinheim: Wiley-VCH.
- 28 Tullo, H. (2019). C&ENs global top 50 chemical companies of 2018. *Chem. Eng. News* 97 (30): 30–35.