



„We Create Chemistry for a Sustainable Future“: Chemie schafft nachhaltige Lösungen für eine wachsende Weltbevölkerung**

Andreas Kreimeyer,* Peter Eckes, Christian Fischer, Harald Lauke und
Peter Schuhmacher

Industrielle Chemie · Katalyse · Polymere · Wirkstoffe ·
Wissenschaftsgeschichte

1. Innovationsmotor Chemie

Seit Gründung der BASF sind Innovationen auf Basis naturwissenschaftlicher, insbesondere chemisch-technischer Forschung und Entwicklung die Grundlage für unseren unternehmerischen Erfolg. Am 6. April 1865 gründete Friedrich Engelhorn in Mannheim die Aktiengesellschaft „Badische Anilin- & Soda-fabrik“. Er war von der Idee überzeugt, aus dem Abfallprodukt Steinkohleer Anilin und den roten Farbstoff Fuchsin herzustellen. Bald zeigte sich jedoch, dass die ersten Teerfarbstoffe die Anforderungen der Kunden nach Wasch- und Lichtechnik nicht erfüllen konnten. Intensive chemische Forschung war erforderlich, um bessere Farbstoffe zu entwickeln. Bereits 1868 stellte die BASF daher den Chemiker Heinrich Caro als ersten „Forschungsleiter“ ihrer Geschichte ein.^[1]

Heute ist die BASF ein breit aufgestelltes Chemieunternehmen, das seine Kunden weltweit mit rund 200 000 verschiedenen Produkten beliefert. Wir sind Lieferant und Partner der meisten Branchen, insbesondere der Automobil-, Bau-, Elektronik- und Konsumgüterindustrie sowie der Bereiche Landwirtschaft, Gesundheit & Ernährung, Energie & Ressourcen.^[2] Die Grundlagen für unseren Erfolg sind nach wie vor Innovationen auf Basis naturwissenschaftlich-technischen Wissens sowie Forschung und Entwicklung. Wir erforschen und entwickeln für und mit unseren Kunden Technologien und Produkte für die Bedürfnisse einer wachsenden

Weltbevölkerung. Intelligent angewandte Chemie ist der Innovationsmotor, wenn es darum geht, nachhaltige Lösungen bereitzustellen, d. h. ökologische, ökonomische und soziale Anforderungen in Einklang zu bringen. Dies war schon in den Anfangsjahren der BASF der Fall, als es darum ging, die verfügbaren Rohstoffe besser zu nutzen.^[1] Heute haben wir Nachhaltigkeit als wesentlichen Wachstumstreiber in der Unternehmensstrategie verankert. Dies drücken wir mit unserem Unternehmenszweck „We create chemistry for a sustainable future“ aus.^[3]

Immer mehr Menschen leben auf der Erde. Im Jahr 2050 werden es über 9 Milliarden sein (Abbildung 1).^[4] Sie alle haben Anspruch auf ausreichend Rohstoffe, gesunde Nahrungsmittel und angemessene Lebensqualität. Ändern wir unsere Art zu leben und zu produzieren nicht, werden unsere Nachfahren im Jahr 2050 fast dreimal so viele Ressourcen benötigen, wie die Erde liefern kann.^[5] Die Herausforderungen, die vor uns liegen, sind gewaltig, und die Chemie hilft, Antworten auf drängende Fragen zu finden. Wie kann es genug Nahrung und sauberes Wasser für alle geben? Woher kommt die Energie, die wir benötigen? Wie werden wir leben, arbeiten und uns fortbewegen? Die Menschheit braucht Produkte, die nachhaltig, einfach anzuwenden und bezahlbar

[*] Dr. A. Kreimeyer
Research Executive Director, BASF SE
67056 Ludwigshafen (Deutschland)
Dr. C. Fischer, Dr. H. Lauke, Dr. P. Schuhmacher
BASF SE
67056 Ludwigshafen (Deutschland)
Dr. P. Eckes
BASF Plant Science LP
27709 Research Triangle Park (USA)

[**] Wir danken all unseren Forschern, die in 150 Jahren mit ihren Arbeiten die Grundlage für den hier präsentierten Essay gelegt haben, und den Kollegen, die uns bei der Ausarbeitung des Manuskripts unterstützt haben, unter anderem Florian Dötz, Anja Feldmann, Manuela Gaab, Regina Klein, Michael Limbach, Richard Trethewey und Matthias Witschel.

[Mrd. Menschen]

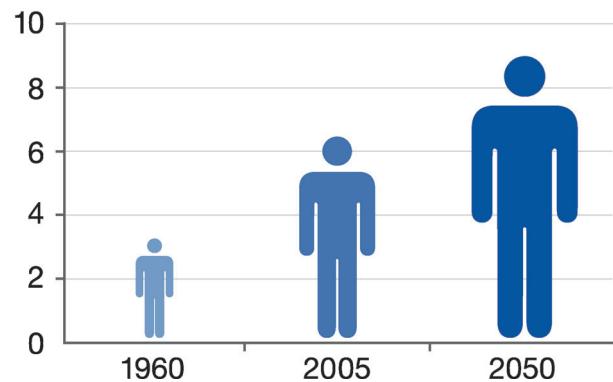


Abbildung 1. Wachstum der Weltbevölkerung.^[4]

sind. Denn die Bevölkerung wächst vor allem in Regionen mit niedrigem verfügbarem Einkommen.

Deshalb fokussieren wir unsere Forschung und Entwicklung auf drei große Bedarfsfelder:

1) Nahrungsmittel und Ernährung: Eine wachsende Weltbevölkerung braucht mehr Nahrungsmittel und eine Ernährung besserer Qualität. Pflanzenzucht, Pflanzenbiotechnologie, Pflanzenschutz, Agrartechnik und Nachernteverarbeitung sind wichtiger denn je. Die BASF liefert heute ein breites Portfolio chemischer und biologischer Pflanzenschutzmittel, Lösungen zur Saatgutbehandlung und für verbessertes Bodenmanagement ebenso wie intelligente chemische Lösungen und Membransysteme zur Wasseraufbereitung. Wir forschen an Innovationen auf allen Stufen der Nahrungsmittelkette ebenso wie an der effizienten Herstellung lebenswichtiger Vitamine und anderer Nährstoffe durch Synthese und Biotechnologie. Wir entwickeln auch innovative Methoden, um die Futternutzung in der Tierernährung zu optimieren.

2) Rohstoffe, Umwelt, Klima: Schutz der Umwelt und des Klimas sowie der effiziente Umgang mit natürlichen Ressourcen werden uns immer mehr beschäftigen. Wir bieten Lösungen von der Rohstoffgewinnung über die -nutzung bis hin zur Emissionskontrolle an. Unsere Produkte zur effizienteren Erdölförderung, hochselektive Prozesskatalysatoren für Erdölraffinerien und die Chemie-Industrie, Korrosionsschutzlacke für Industrie und den Transportsektor, Kunststoffe und Beschichtungen für Windkraftanlagen ebenso wie Abgaskatalysatoren für Fahrzeuge erfüllen gleichzeitig ökologische und ökonomische Anforderungen. Wir forschen an neuen chemischen und biochemischen Verfahren zur Nutzung von Erdgas, Kohlendioxid und nachwachsenden Rohstoffen als Alternative zu Erdöl. Neben nachhaltigen Produktionsprozessen entwickeln wir vor allem innovative Lösungen für die Energiewertschöpfungskette von der Energieerzeugung über die -speicherung und -leitung zur -nutzung.

3) Lebensqualität: Im Zentrum dieses Bedarfsfeldes stehen die Themen Bau, Mobilität und Kommunikation, für die



Von links:
C. Fischer, H. Lauke, A. Kreimeyer, P. Eckes, P. Schuhmacher

Andreas Kreimeyer studierte Biologie an den Universitäten Hannover und Hamburg. Nach der Promotion zum Thema „DNA-Reparatur assoziierte ADP-Ribosylierung *in vivo*“ unter der Anleitung von H. Hilz (Institut für physiologische Chemie, Uniklinik Eppendorf, Hamburg) trat er 1986 als Proteinchemiker in die Abteilung Biotechnologie des Hauptlaboratoriums der BASF ein und war dort für die biotechnologische Herstellung und Aufreinigung rekombinanter Proteine zuständig. Ab 1993 war er Leiter des Stabs des Vorstandsvorstandes, 1995 zuständig für Investition, Strategie und Regionales Marketing in Asien und 1998 bis 2002 Präsident der Unternehmensbereiche Dispersions-, Veredlungspolymeren und Düngemittel. Zum 1. Januar 2003 wurde er in den Vorstand der BASF berufen. Er verantwortet heute die Bereiche Crop Protection, Coatings und Bioscience Research sowie die Region Südamerika. Seit 2008 ist er Sprecher der Forschung der BASF.

Peter Eckes promovierte 1990 in organischer Chemie an der Universität Frankfurt a.M. und absolvierte ein Postdoktorat an der Harvard University, USA. Er trat 1992 ins Hauptlabor der Feinchemikalien Forschung der BASF in Ludwigshafen ein und wurde 1994 Assistent des Forschungssprechers. 1997 kehrte er in die USA zurück und wurde technischer Manager für den Bereich Intermediates im Verbundstandort in Geismar, Louisiana. Kurz danach übernahm er eine Aufgabe als Marketing Manager in Mount Olive, New Jersey, bevor er im Jahr 2000 als Direktor der Geschäftsentwicklung für Chemical Intermediates nach Ludwigshafen zurückkehrte. 2002 wurde er als Senior Vice President verantwortlich für die globale Forschung und Entwicklung im Pflanzenschutz im Limburgerhof. Von 2009 bis 2014 war er Bereichsleiter der Plant Science, seit 2015 ist er Leiter des

Kompetenzzentrums Bioscience Research im Research Triangle Park, North Carolina, USA.

Christian Fischer studierte Chemie an der Universität Regensburg, wo er 1991 in der organischen Chemie promovierte. Nach einem Postdoktorat am Institute of Materials Science an der Universität von Illinois fing er 1993 als Laborteamleiter bei der Polymerforschung der BASF an. Von 1993–1996 studierte er parallel Betriebswirtschaft in Mannheim. Ab 1995 arbeitete er vier Jahre in verschiedenen Funktionen bei der BASF in Hongkong. Nach leitenden Funktionen im Bereich Marketing und Vertrieb von Styrol-Copolymeren in Europa übernahm er 2004 die Leitung des Feinchemikalien-Geschäfts in Asien. 2008 wurde er Leiter der Materialforschung. 2014 wurde ihm eine Honorarprofessur von der Technischen Universität München verliehen. 2015 übernahm er die Leitung des Geschäftsbereichs Performance Chemicals.

Harald Lauke studierte Chemie an der Technischen Universität in Berlin. Nach Beendigung eines Forschungsaufenthalts an der Northwestern University in Evanston, Illinois, promovierte er mit dem Thema „Darstellung neuer metallorganischer Lanthanoid- und Actinoid-Verbindungen“ unter der Anleitung von Herbert Schumann. 1986 trat er als Laborleiter in das damalige Kunststofflabor der BASF ein. Nach verschiedenen Positionen im Bereich Engineering Plastics wurde er 1996 Managing Director von Comparex Sistemas Informáticos S.A. in Madrid. Zwei Jahre später war er in Singapur im regionalen Marketing für Engineering Plastics tätig. 2002 wurde er Bereichsleiter der BASF South East Asia und war ab 2004 für Functions and Market Efficiency Asia Pacific verantwortlich. Ab 2006 war er für den Bereich Performance Polymers zuständig, ehe er 2010 nach Ludwigshafen zurückkehrte und dort das Kompetenzzentrum Biological & Effect Systems Research leitete. Seit Januar 2015 leitet er den Bereich Advanced Materials & Systems Research.

Peter Schuhmacher studierte Chemie an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz sowie der University of Amherst, Massachusetts. Nach seiner Promotion am Institut für Organische Chemie in Mainz trat er 1995 als Laborleiter in das Farbenlabor der BASF ein. 1998 wechselte er als Senior Consultant in die Inhouse Consulting Gruppe der BASF, bevor er im Jahr 2000 als Leiter des Globalen Marketings Humanernährung in den Unternehmensbereich Feinchemie übertrat. Danach wechselte er in den Unternehmensbereich Zwischenprodukte, wo er zunächst das globale Strategische Marketing verantwortete und im Anschluss die Leitung für das Asiengeschäft des Unternehmensbereichs mit Sitz in Hongkong übernahm. Als Senior Vice President leitete er ab 2010 die Strategische Planung und war unter anderem verantwortlich für die Entwicklung der „We create chemistry“-Strategie der BASF SE. Im Mai 2013 übernahm er die Leitung des globalen Kompetenzzentrums Process Research & Chemical Engineering.

wir zeitgemäße Lösungen bereitstellen wollen. Bereits heute bietet die BASF ein umfangreiches Portfolio beispielsweise an Baumaterialien von Spezialbeton über Zementadditive zu Anstrichmitteln, Wärmedämm-Verbundsystemen, Lacken für die Automobilindustrie, Polyurethan-Systemen, Hochleistungs-Kunststoffen und Biopolymeren an. Wir forschen an Lösungen für den automobilen Leichtbau, das Gebäudewärmemanagement, Farbstoffen für brillante, flexible Displays, Lichtsammelfolien für funktionale Fassaden und Batteriematerialien für sichere und komfortable Elektromobilität.

In unserem Jubiläumsjahr haben wir aus jedem der drei Bedarfssfelder ein Thema ausgewählt, das wir fokussiert bearbeiten und vorstellen wollen:

Ernährung: Der weltweite Bedarf an Nahrungsmitteln wird in den nächsten 35 Jahren voraussichtlich um über 30 % wachsen. Gleichzeitig drohen die weltweit verfügbaren Ackerflächen aufgrund von Erosion, Versalzung und Urbanisierung weiter zu schrumpfen.^[6] Um den steigenden Bedarf an Nahrungsmitteln zu decken, müssen die Ernteerträge daher Schätzungen zufolge bis 2050 verdoppelt werden.^[7] Entscheidend wird sein, die Produktivität der Landwirtschaft zu erhöhen und gleichzeitig die Qualität der Nahrungsmittel zu verbessern.

Intelligente Energie: Setzt sich die derzeitige Entwicklung fort, werden das Bevölkerungswachstum und die zunehmende Industrialisierung in Indien und China bis zum Jahr 2050 zu einer Verdoppelung oder gar Verdreifachung des Primärenergiebedarfs führen. Bereits im Jahr 2035 wird der weltweite Strombedarf auf etwa 32 000 TWh ansteigen.^[8] Dies entspricht einem Marktwert der Größenordnung des Bruttoinlandsprodukts von Deutschland. Wir brauchen dringend Antworten auf die Fragen: Wie können wir die benötigten Energiemengen kostengünstig, zuverlässig und umweltschonend bereitstellen und effizienter nutzen? Wie sieht der Energiemix der Zukunft aus? Welche Rolle wird dabei regenerative Energie spielen können?

Städtisches Leben: Derzeit leben 54 % der Weltbevölkerung in Stadtgebieten.^[9] Die Zahl der Megastädte mit über 10 Millionen Einwohnern steigt kontinuierlich und hat sich seit 1990 verdreifacht. Während London über einen Zeitraum von 130 Jahren zur Acht-Millionen-Metropole heranwuchs, vollzogen Mexiko City, São Paulo oder Shanghai eine vergleichbare Entwicklung in nur 30 Jahren. Im Jahr 2050 werden bereits zwei Drittel der Weltbevölkerung in Städten leben.^[10] Die Frage ist, wie wir den urbanen Wohn- und Lebensraum für so viele Menschen in Zukunft ökologisch und ökonomisch gestalten und gleichzeitig eine hohe Lebensqualität sichern.

Die Chemie war und ist der Innovationsmotor für alle Bedarfssfelder der wachsenden Weltbevölkerung. Dabei haben wir die Schwerpunkte unserer Forschung im Lauf der Geschichte immer wieder neu gesetzt: Während bis in die 70er Jahre die Entwicklung einzelner Verbindungen im Mittelpunkt stand, konzentrierten wir uns in den 80er und 90er Jahren auf die Entwicklung von Materialien mit verbesserten Anwendungseigenschaften. Seit der Jahrtausendwende stehen zunehmend maßgeschneiderte Systemlösungen im Vordergrund.^[11] Eines ist in den 150 Jahren BASF-Innovation aber gleich geblieben: Mit einem breiten Portfolio an Pro-

dukten, Verfahren und Technologien gehen wir gezielt auf die vielfältigen Bedürfnisse unserer Kunden ein.

In diesem Essay zum 150-jährigen Jubiläum der BASF zeigen wir an ausgewählten Beispielen, wie die Chemie mit ihrem Innovationspotenzial zur Lösung der Herausforderungen von morgen beiträgt. Unser Blick richtet sich zunächst auf herausragende BASF-Innovationen in der Vergangenheit. Damals entwickelte chemisch-technische Kompetenzen^[12] spielen auch heute noch bei unseren Projekten eine wesentliche Rolle.

2. 150 Jahre Forschung bei der BASF

In den letzten 150 Jahren hat die BASF mehr als 2 Millionen Produkte und Technologien in den Markt eingeführt. In Abbildung 2 sind einige wichtige Meilensteine aufgeführt, die näher beschrieben werden.

Unter Heinrich Caro, dem ersten Forschungsleiter der BASF, gelang eine Reihe wegweisender Innovationen (Abbildung 2), die über 60 Jahre die ersten beiden Produktsegmente Farben und Düngemittel prägten. Gemeinsam mit den Forschern Carl Graebe und Carl Liebermann sicherte Caro der BASF 1869 „mit der Priorität eines Tages“^[13] das Patent für die Herstellung des Farbstoffs Alizarin im großindustriellen Maßstab. Weitere Farbstoffe folgten. Mit Indanthren-Blau entdeckte René Bohn 1901 einen Farbstofftyp, der aufgrund seiner hervorragenden Farbechtheit alle bis dahin bekannten künstlichen organischen Farbstoffe übertraf. Nach Methylenblau und Indigo war dies ein weiterer wichtiger Fortschritt in der Farbenchemie und in der noch jungen Unternehmensgeschichte der BASF^[1].

Auf die Erfolge in der Farbstoffforschung folgten bedeutende Durchbrüche in der chemischen Prozessentwicklung. Einer der wichtigsten Meilensteine des 20. Jahrhunderts – nicht nur für die BASF – ist die Ammoniaksynthese mithilfe des Haber-Bosch-Verfahrens. Das Verfahren war der entscheidende Schritt ins Zeitalter der Mineraldünger und sichert bis heute die Ernährung von Milliarden Menschen.

2.1 Ammoniak

Die Grundlage lieferte 1909 Fritz Haber, Professor der Chemie in Karlsruhe, mit der ersten experimentellen Ammoniaksynthese.^[14] 1910 fand Alwin Mittasch, der spätere Leiter des „Ammoniaklagers für Prozessentwicklung“ bei der BASF, nach systematischem Probieren in ca. 20 000 Einzelversuchen (Abbildung 3) einen neuen Katalysator. Das hochtoxische und teure Osmium aus Habers Versuchen konnte gegen Eisen(II/III)-oxid (Fe_3O_4) ersetzt werden. Als Promotoren dienten K_2O , CaO , Al_2O_3 und SiO_2 . Nun konnten die Edukte Stickstoff und Wasserstoff bei einer Temperatur von 450 °C zur Reaktion gebracht werden.^[15] Haber und Mittasch von der akademischen bzw. industriellen Seite legten damit den Grundstein für die heterogene Katalyse und für moderne Hochdurchsatzverfahren. Beide sind heute die Basis für die Entwicklung funktionaler anorganischer Materialien.

Wachstum durch neue Geschäftsfelder Innovationshighlights der BASF

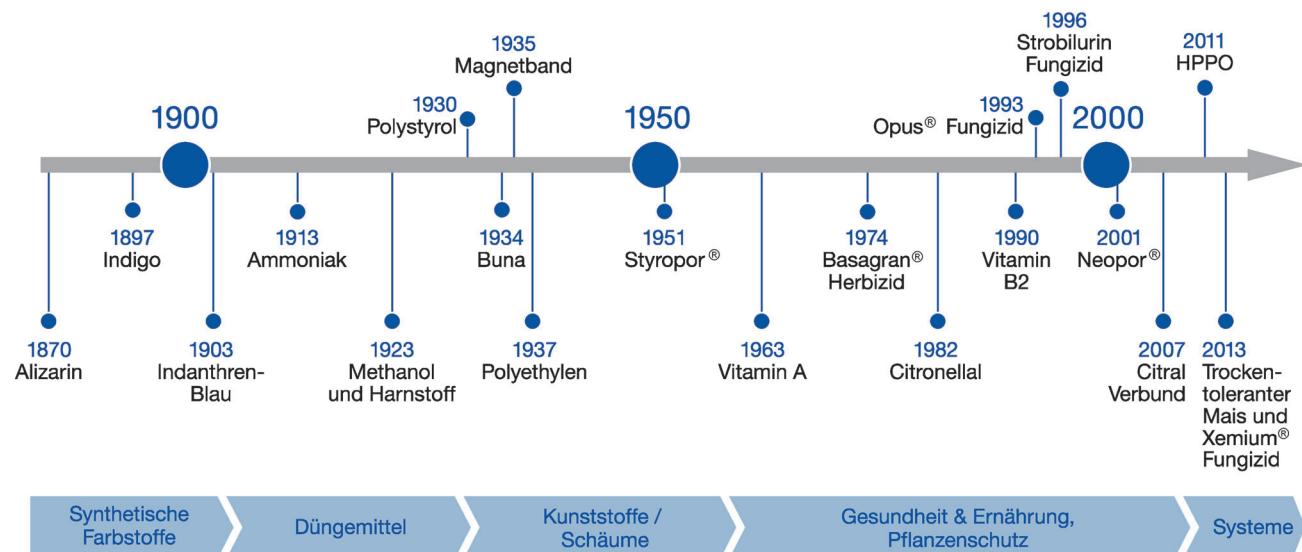


Abbildung 2. Meilensteine der BASF-Forschung.

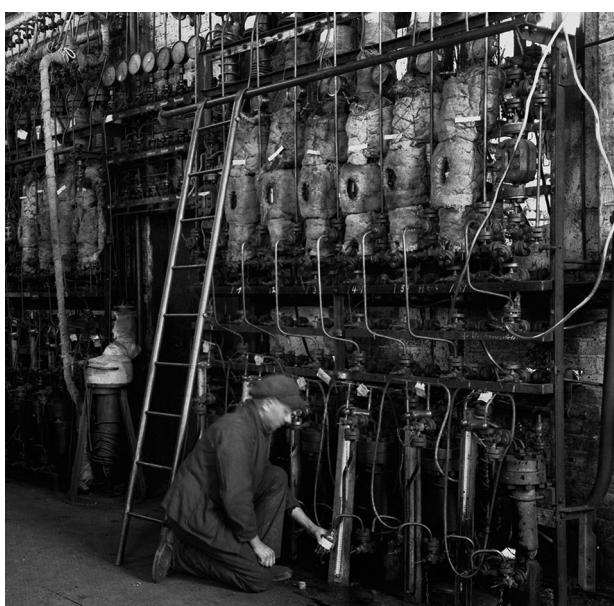


Abbildung 3. Hochdurchsatzsynthese zu Mittaschs Zeiten.

Die großtechnische Umsetzung der Ammoniaksynthese erforderte eine Kombination hoher Temperaturen und hoher

Drücke im Bereich von 300 bar, denen die bis dahin üblichen Stahlreaktoren nicht standhielten. 1913 erkannte der spätere Vorstandsvorsitzende Carl Bosch die Ursache: Der heiße, unter hohem Druck stehende Wasserstoff löste den für die Festigkeit maßgeblichen Kohlenstoff aus den Stahlwänden, die dadurch weich und spröde wurden. Mit neuen Lösungsansätzen im Apparatebau und in der Werkstoffentwicklung gelang es Bosch einen Hochdruckreaktor zu konstruieren, in dem die Ammoniaksynthese großtechnisch sicher durchgeführt werden konnte. Er kleidete die Apparate innen mit einem dünnen, kohlenstoffarmen Weicheisenfutter aus und bohrte Löcher in die äußere Stahlwand. So konnte der in den Werkstoff eingedrungene Wasserstoff nach außen entweichen, ohne Schäden anzurichten. Noch im selben Jahr ging die erste großindustrielle Ammoniakanlage, basierend auf dem Haber-Bosch-Prozess, auf dem Gelände der BASF in Ludwigshafen in Betrieb. Beiden Wissenschaftlern wurde später für ihre bahnbrechenden Arbeiten der Nobelpreis verliehen (Haber 1918, Bosch 1931).

Mit dem Haber-Bosch-Prozess ermöglichte die BASF die Produktion von Düngemitteln und sicherte sich damit ein zweites Standbein neben der Farbenchemie.^[1] Darüber hinaus legte sie mit der Gewinnung von Ammoniak den Grundstein für die Entwicklung vieler neuer Stickstoff-basierter Produktgruppen. Heute stellt die BASF aus Ammoniak vor allem

Leime und Tränkharze zur Imprägnierung von Papier auf Harnstoffbasis, verschiedene Amine und Caprolactam her. Weltweit gehen jedoch noch immer rund drei Viertel des erzeugten Ammoniaks in die Produktion von Düngemitteln.

Die mit der Hochdrucktechnologie gewonnenen Erfahrungen und die Fortschritte in der Katalyse-Forschung führten in den folgenden Jahrzehnten zu weiteren Verfahrensinnovationen. Ende der 20er Jahre entwickelte Walter Reppe vier katalytische Druckreaktionen von Acetylen: Vinylierung, Ethinylierung, Carbonylierung und cyclisierende Polymerisation. Sie sind heute als „Reppe-Chemie“ bekannt und ermöglichen den Aufbau zahlreicher organischer Verbindungen und Zwischenprodukte wie Vinylether, Butandiol oder Acrylsäure. Sie sind immer noch wichtige Grundstoffe für die Entwicklung von Kunstfasern oder Kunststoffen wie Spandex-Fasern für Kleidung oder Superabsorbern für Babywindeln.

2.2. Styropor®

Parallel zu Reppes Arbeiten gelang es Carl Wulff, Chemiker bei BASF, in den 1920er Jahren, Ethylbenzol katalytisch zu Styrol zu dehydrieren (1929) und daraus im folgenden Polystyrol (1930) herzustellen. Dies war die Grundlage für die Entwicklung von Styropor® (1951).^[16] Zwei Faktoren kamen damals zusammen: Einerseits versuchte man Polystyrol vielseitiger verwendbar zu machen. Andererseits benötigte die Bundespost eine preisgünstige Kabelisolierung mit geringem dielektrischem Verlustfaktor für die Einführung des Selbstwählverkehrs. Die Idee war, die günstigen dielektrischen Eigenschaften von Kunststoffen mit denen von Schaumstoffen (bekannt waren damals Hartgummischäum oder Schaumgummi auf Basis von Latex) zu kombinieren. Fritz Stastny, Chemiker und Ingenieur in der Anwendungstechnik bei der BASF mit Erfahrung in der Herstellung von Hartgummischäum, versuchte deshalb Polystyrol aufzuschäumen. Zunächst mischte er dem Polymer Substanzen wie Ammoniumbicarbonat bei, die bei hoher Temperatur Gase abspalten. Dies führte jedoch nicht zum gewünschten Ergebnis. Er experimentierte weiter mit niedrigsiedenden Flüssigkeiten und behielt sich mit Schuhcremedosen als gasdicht verschließbaren Reaktionsbehältern (Abbildung 4).

Ein Zufall führte dazu, dass man in einem dieser Schuhcremedosen-Experimente einen 25 cm hohen starren



Abbildung 4. Schuhcremedose als Reaktionsbehälter zur Herstellung von Styropor®.

Schaumstrang entdeckte. Die Dose, gefüllt mit einer Mischung aus Styrol, Polystyrol, Petrolether und Benzoylperoxid, war statt am Abend erst am nächsten Tag aus dem 80 °C warmen Trockenschrank geholt worden. Stastny erkannte das Potenzial und entwickelte in den nächsten Jahren zusammen mit seinen Kollegen ein Suspensionsverfahren, bei dem Styrol in Gegenwart von Pentan polymerisiert und so in ein schäumbares Perlpolymerat umgewandelt wird. 1951 wurde Styropor® als Produktmarke der BASF registriert und trat ab 1952 einen weltweiten Siegeszug an. Styropor®, zu 98% aus Luft bestehend, ist bis heute der Klassiker unter den Schaumstoffen für Verpackung und Dämmung. Im Bauwesen, eingesetzt vor allem in Verbundsystemen zur Wärmedämmung, trägt Styropor® maßgeblich dazu bei, Energie zu sparen und Häuser ökonomischer und ökologischer zu konstruieren.

2.3. Magnetbänder

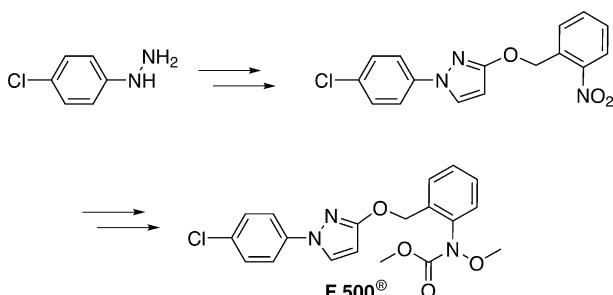
Auch wenn Magnetbänder der BASF längst nicht mehr auf dem Markt sind, waren sie lange in der öffentlichen Wahrnehmung präsent. Sie waren 1932 das Ergebnis der Zusammenarbeit von AEG und der BASF mit dem Ziel reißfester, gleichmäßiger beschichtete Magnetbänder für die Tonträgerproduktion zu entwickeln. Die neuen Bänder basierten auf dem Trägerkunststoff Acetylcellulose und Carbonyleisen, d.h. feinteiligem, durch Zersetzung von Eisenpentacarbonyl gewonnenem Eisenpulver, als magnetisch aktiver Substanz.

Diese Magnetbänder sind ein frühes Beispiel erfolgreicher Zusammenarbeit im BASF-Wissenschaftsverbund und interdisziplinär genutzten Wissens zur Entwicklung einer Systemlösung. Seit 1924 beherrschte die BASF die Herstellung feinteiligen Carbonyleisenpulvers für Induktionsspulen von Fernsprechleitungen. Systematische Laborversuche von Mittasch mit verschiedenen Eisenquellen führten zu einem großtechnischen Syntheseverfahren für das bis dahin schwer zugängliche Eisenpentacarbonyl aus Eisen und Kohlenmonoxid. Aus dem so gewonnenen hochreinen Eisencarbonyl ließ sich durch oxidative und thermische Zersetzung hochreines Eisenoxid gewinnen (Teilchengröße ca. 0.2 µm). Die Farbenproduktion unterstützte dieses Produkt mit Erfahrung zur Herstellung außerordentlich feiner Dispersionen, und der damals neue Kunststoffbereich lieferte das Know-how zur Bereitstellung der Trägerfolien. So konnten bereits 1934 die ersten 50000 m Band großtechnisch produziert werden.^[17] In der Folge etablierte sich die BASF als führender Hersteller von Carbonyleisenpulver und baute ihre Expertise in der großtechnischen anorganischen Synthese aus. Darauf basierend werden heute magnetokalorische und supraleitende Stoffe sowie Batteriematerialien für das Energiemanagement entwickelt.

2.4. Strobilurine

Neben den Düngemitteln, deren Produktion dank dem Haber-Bosch-Verfahren möglich wurde, sind Pflanzen-

schutzmittel und unter ihnen die Strobilurin-Fungizide^[18] ein weiterer historischer Meilenstein für die Landwirtschaft. Die effizienten Wirkstoffe gegen Schadpilze haben inzwischen einen Anteil von über 20 % am weltweiten Fungizid-Markt.^[19] Sie leiten sich aus fungiziden Naturstoffen ab, die aus Pilzen der Gattung Strobilurus (Tannenzapfenfrübling) isoliert wurden. Die ersten Arbeiten hierzu erfolgten in den 1980er Jahren in einer Hochschulkooperation, wobei die Stabilisierung der Wirkstoffe gegenüber Sonnenlicht die größte Herausforderung darstellte. Dies gelang schließlich durch Ersatz der lichtempfindlichen Doppelbindungen durch verschiedene photostabile Gruppen mit dem ersten BASF-Wirkstoff Kresoxim-Methyl. Es folgte eine ganze Serie weiterer innovativer Wirkstoffe dieser Molekülklasse, u.a. F500® (Schema 1).^[20]



Schema 1. Synthese von F500®.

F500® wirkt nicht nur effektiv gegen die wichtigsten Schadpilze, sondern verbessert auch die Toleranz vieler Kulturpflanzen gegenüber Umweltstressfaktoren wie Trockenheit oder Ozonbelastung. Dieser Effekt basiert auf der Wirkungsweise von F500® in der Atmungskette.^[21]

Strukturinformationen, wie sie z.B. über das Bc1-Ziel-enzym von F500®, bekannt sind (Abbildung 5), ermöglichen die Optimierung der Wechselwirkungen des Wirkstoffs mit dem zu hemmenden Enzym. Heute sind Enzym-Kristallstrukturanalysen fester Bestandteil unseres wissenschaftlichen Werkzeugkastens für die Wirkstoff-Forschung.

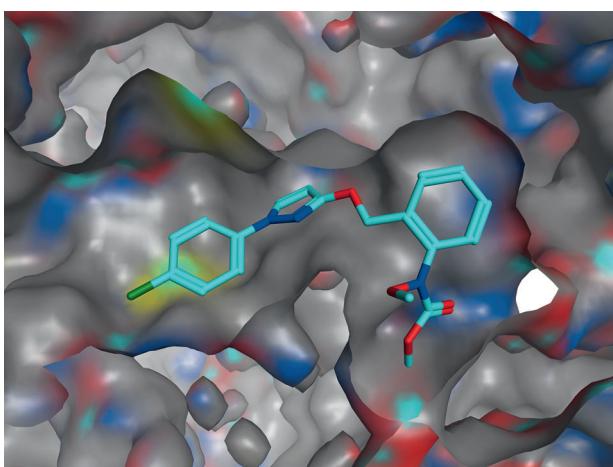


Abbildung 5. F500® in der Tasche des Bc1-Enzyms.^[22]

Innovative Pflanzenschutzwirkstoffe wie F500® führen im integrierten Einsatz zu gesünderen Pflanzen und ermöglichen höhere Ernteerträge und -qualität. Sie sind heute essentiell für die Landwirtschaft, um die Produktivität der Nahrungsmittelindustrie weiter zu steigern.

Die genannten Innovationen zeigen exemplarisch, wie die BASF durch kontinuierliche Forschung ihr Produktportfolio über Jahrzehnte ausbaute und nach den Farbstoffen so unterschiedliche Produktgruppen wie Düngemittel, Kunststoffe, Informationssysteme und Pflanzenschutzmittel entwickelte und auf den Markt brachte. Mit ihren wissenschaftlichen Durchbrüchen haben die frühen Innovationen den Grundstein für die aktuellen Forschungsfelder der BASF gelegt und waren wegweisend für unser heutiges Verständnis von Nachhaltigkeit. Darüber hinaus trugen sie entscheidend zum Aufbau der Kompetenzen bei, die wir heute zur Lösung der Herausforderungen in den Bereichen „Ernährung“, „Intelligente Energie“ und „Städtisches Leben“ anwenden.

3. Aktuelle Forschungsfelder der BASF

Unsere über 10000 Mitarbeiter in Forschung und Entwicklung arbeiten mit 600 Partnern aus Wissenschaft und Industrie an rund 3000 Projekten. Dafür geben wir ca. 1.8 Mrd. Euro jährlich aus. Drei Viertel davon gehen in die Optimierung und Weiterentwicklung bestehender Arbeitsgebiete. Ein Viertel, ca. 400 Mio. Euro, nutzen wir zur Entwicklung neuer Arbeitsgebiete, sogenannter Wachstums- und Technologiefelder (Abbildung 6). In ihnen erarbeiten wir ganz neue Konzepte mit großem Lösungspotenzial für die Schlüsselindustrien Transport, Bau, Konsumgüter, Energie & Ressourcen, Elektronik, Gesundheit & Ernährung und Landwirtschaft.

Von den 3000 Forschungsprojekten können hier nur einige prominente Beispiele herausgegriffen werden, die wir für die drei Fokusthemen ausgesucht haben.

3.1. Ernährung

Der steigende Nahrungsmittelbedarf einer wachsenden Weltbevölkerung bei weniger verfügbaren Anbauflächen erfordert deutliche Produktivitätsfortschritte in der Landwirtschaft (Abbildung 7) und mithin Innovationen auf allen Stufen der Nahrungsmittelkette.

3.1.1. Innovativer Pflanzenschutz für effizientere Nahrungsmittelproduktion

Bereits während der „Grünen Revolution“ im letzten Jahrhundert wurde die Nahrungsmittelproduktion enorm gesteigert: Bei Erweiterung der genutzten Ackerfläche um nur 30 % wurde die Getreideproduktion verdreifacht.^[24] Damit sich dieser Trend fortsetzt, sind weitere technologische Fortschritte notwendig.

Vor rund 100 Jahren, parallel zur Entwicklung des synthetischen Stickstoffdüngers, gründete die BASF ihre landwirtschaftliche Versuchsstation in Limburgerhof. Dort trieb

Forschungsschwerpunkte: Wachstums- und Technologiefelder



Abbildung 6. Von den drei globalen Bedarfssfeldern abgeleitete Wachstumsfelder der BASF.

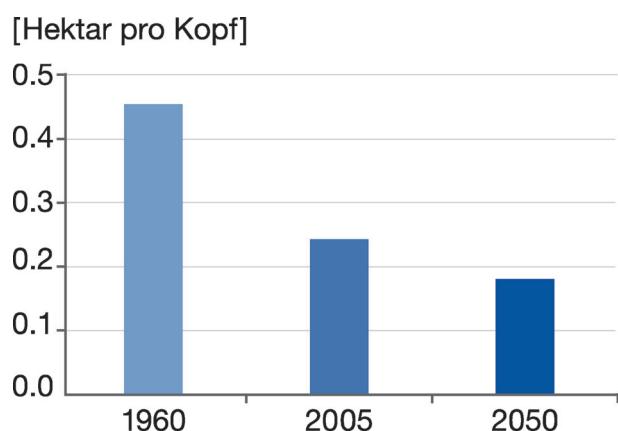


Abbildung 7. Agrarfläche pro Kopf.^[23]

sie die agrochemische Forschung systematisch voran.^[25] Neben Düngemitteln wurden Herbizide, Fungizide und Insektizide entwickelt und Themen aus der Pflanzengesundheit und Pflanzenzucht bearbeitet. Diesen umfassenden Ansatz zur Förderung einer nachhaltigen Landwirtschaft und Optimierung der Ernteerträge verfolgen unsere Forscher auch heute.

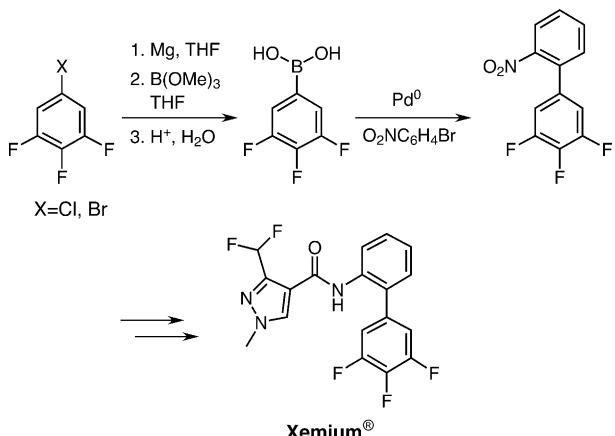
Die BASF brachte bereits 1948 die erste Agrochemikalie, das Herbizid 2,4-D, auf den Markt. Eine Vielzahl weiterer innovativer Herbizide, Fungizide und Insektizide folgten. Oft wurde diese Entwicklung erst durch zukunftsweisende Technologien aus dem BASF-Wissenschaftsverbund ermöglicht. Dies ist z.B. beim eingangs erwähnten Kresoxim-Methyl (Ab-

schnitt 2.4) der Fall, das über eine gekoppelte elektrochemische Synthese gewonnen wird.^[26]

Mit steigenden Sicherheitsanforderungen für Umwelt, Landwirte und Verbraucher und zunehmender Resistenz von Unkräutern, Pilzen und Insekten gegen viele Wirkstoffklassen werden heute viele der frühen Pflanzenschutzwirkstoffe durch zeitgemäße Alternativen ersetzt. Die Forschung muss mehr denn je neue Wirkstoffe mit günstigen Umwelteigenschaften und hoher Wirksamkeit identifizieren. Ein aktuelles Beispiel der BASF ist das Fungizid Xemium®, das einen neuen Standard bei der Bekämpfung von Pilzen setzt, die zur Erkrankung von Kulturpflanzen wie Getreide, Mais und Soja führen. Dabei müssen weniger als 100 g Wirkstoff pro Hektar eingesetzt werden. Auch in der Saatgutbehandlung zeigt Xemium® außergewöhnliche Schutzaktivitäten gegen zahlreiche Schadpilze. Mit dieser Technologie bleibt die Pflanze von Beginn an gesund. Spätere Fungizid-Anwendungen entfallen oder können reduziert werden.

Eine Schlüsselreaktion bei der Synthese von Xemium® ist die Palladium-katalysierte Suzuki-Kupplung (Schema 2), mit der die BASF seit der Herstellung des Fungizids Boscalid großtechnische Erfahrung gesammelt hat. So können heute mehr als 1000 t/a von Xemium® produziert werden.^[27]

Ein wichtiges Instrument zur Entwicklung von Agrochemikalien, die sicher für Landwirt und Verbraucher sind, ist für uns die frühe toxikologische Bewertung neuer Kandidaten. Die BASF hat eine Reihe von Indikatortests entwickelt, die die Reduktion dafür erforderlicher Tierversuche ermöglichen. Vor allem Tests zur Überprüfung der haut- und augenirritierenden Eigenschaften, aber auch für die Vorhersage toxischer Eigenschaften wurden entwickelt.^[28]



Schema 2. Xemium®-Synthese.

3.1.2. Enzyminhibitoren und Pflanzenbiotechnologie für verbesserte Ernteerträge

Neben den Schäden durch Unkräuter, Pilze und Insekten haben Umweltfaktoren wie Trockenstress oder Nährstoffmangel einen massiven Einfluss auf den Ertrag. Eine Innovation zur Verbesserung der Nährstoffverfügbarkeit ist der Ureaseinhibitor Limus®. Ammoniak wird synthetisch in Harnstoff überführt, der als Dünger auf das Feld ausgebracht wird. Der in Harnstoff gebundene Stickstoff wird durch ein im Boden allgegenwärtiges Enzym, die Urease, wieder als Ammoniak freigesetzt. Vor allem unter warmen und trockenen Bedingungen kann aber ein großer Teil des freigesetzten Ammoniaks in die Atmosphäre entweichen. Dies ist ökologisch, wirtschaftlich und energetisch wenig wünschenswert. Limus®, eine neuartige Mischung zweier synergistischer Ureaseinhibitoren, verlangsamt diese Freisetzung und reduziert dadurch den Ammoniakverlust in die Atmosphäre um bis zu 90 %. Damit erhöhen sich die Effizienz sowie die Zuverlässigkeit der Harnstoffdünger und der Ertrag.^[29]

Auch die Biotechnologie leistet einen Beitrag zur Effizienzsteigerung in der Landwirtschaft. Seit Einführung der ersten pflanzenbiotechnologischen Produkte vor rund 20 Jahren fanden genmodifizierte Pflanzen schnelle Verbreitung im Markt. Im Jahr 2013 wurden auf 175 Millionen Hektar Agrarfläche genmodifizierte Pflanzen angebaut. Weltweit rund 18 Millionen Landwirte setzen die Technologie heute ein.^[30] Bisher gehen diese Erfolge hauptsächlich auf die Kombination aus Insektenresistenz und Herbizidtoleranz zurück. Das Potenzial der Pflanzenbiotechnologie geht aber deutlich darüber hinaus. Die nächste Generation von genmodifizierten Pflanzen, auf die sich die Forschung der BASF konzentriert, hat die Verbesserung von Ertrag und Stress-toleranz zum Ziel.

Ein erstes innovatives Beispiel einer genmodifizierten Pflanze der nächsten Generation stammt aus der Zusammenarbeit der BASF mit Monsanto und wurde 2013 als Genuity® DroughtGard® in den Markt gebracht. Hierzu wurde ein Trockentoleranz-Gen, das sogenannte cspB-Gen aus dem Bakterium *Bacillus subtilis*,^[31] in das Genom von Maispflanzen integriert. Dieses Gen reduziert die Auswirkungen von



Abbildung 8. Genuity® DroughtGard® Mais.

Trockenperioden auf die Erträge. In Kombination mit optimierten trockentoleranten Sorten und spezifischen agronomischen Empfehlungen hat das Genuity® DroughtGard® System (Abbildung 8) in den Jahren 2012 und 2013 Ertragsvorteile um mehr als 300 kg ha⁻¹ im Vergleich zu nicht-genmodifizierten trockentoleranten Maissorten gezeigt. In Zusammenarbeit mit Monsanto werden zurzeit weitere transgene Mais- und Soja-Pflanzen entwickelt, die zusätzliche Ertragssteigerungen ermöglichen werden.

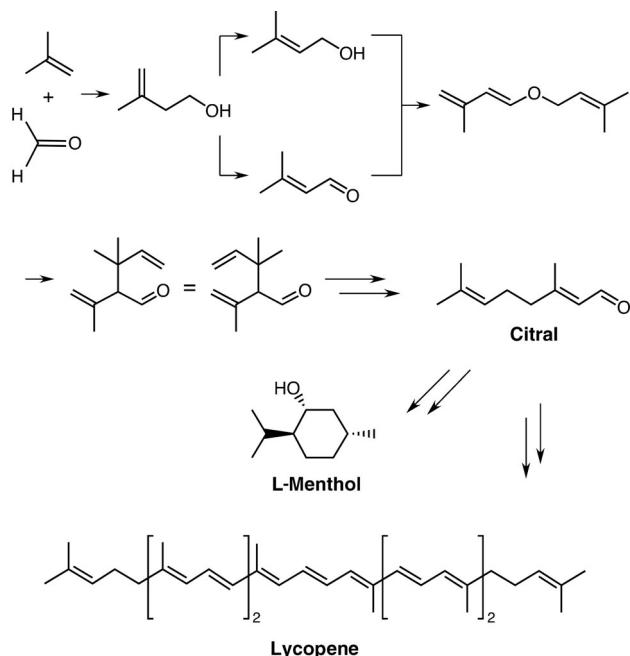
Um die nächste Generation von pflanzenbiotechnologischen Eigenschaften zu entwickeln, hat die BASF eine neue Technologieplattform etabliert, die auf eigenen Arbeiten zu Metabolomics aus den 1980er Jahren basiert. Mittels Hochdurchsatzanalytik werden Gene mit spezifischen Pflanzenmetaboliten und Biosynthesewegen verbunden („functional genomics“). Zusätzlich erlaubt die Technologieplattform die Charakterisierung entscheidender Gene für Ertragssteigerung und Stresstoleranz.^[32]

3.1.3. Vitamine und Nahrungsergänzungsmittel für eine gesündere Ernährung

Unsere Lösungen für den Pflanzenanbau ergänzen wir mit innovativen Produkten, die unsere Ernährung gesünder machen und die Ernährungsqualität in der Tierproduktion erhöhen. Dazu gehören synthetische Vitamine und Nahrungsergänzungsmittel.

Eines der wichtigsten Zwischenprodukte der BASF für viele Nahrungsergänzungsmittel ist das Terpen Citral. Nicht nur die Vitamine A und E, sondern auch die Carotenoide β-Carotin und Lycopin sowie zahlreiche Aromachemikalien und Duftstoffe wie Menthol, Geraniol und Linalool werden großtechnisch auf der Basis von Citral produziert. Eine Sequenz katalysierter Syntheseschritte ermöglichte die Produktion von Citral im Industriemaßstab (Schema 3). Schlüsselreaktionen sind die En-Reaktion von Isobuten und Formaldehyd, gefolgt von einer Domino-Claisen-Cope-Umlagerung, bei der Citral mit hoher Atomökonomie hervorgeht, da Wasser als einziges Nebenprodukt entsteht.^[33]

Citral wird seit 2004 in Ludwigshafen in einer kontinuierlich arbeitenden Anlage mit 40 000 Tonnen Jahreskapazität hergestellt. Diese Kapazitäten werden derzeit weiter ausgebaut. Ausgehend von Citral wird bei der BASF seit 2005 der als Antioxidanz wirkende Tomatenfarbstoff Lycopin im Industriemaßstab als Nahrungsmittelzusatz hergestellt.^[34] In den letzten Jahren wurde eine neue Citral-basierte Wert schöpfungskette zu enantiomerenreinem L-Menthol aufgebaut und im Jahr 2012 eine Anlage mit der weltgrößten kontinuierlichen asymmetrischen Hydrierung in Betrieb genommen.



Schema 3. Synthese von Citral.

Als eines der ersten Unternehmen setzte die BASF auch Biotechnologie zur Synthese von Chemikalien ein. In den frühen 1930er Jahren entwickelten wir eine fermentative Reduktion für die Synthese des Arzneimittels Ephedrin, die auch heute noch Stand der Technik ist. Ebenfalls auf fermentativem Weg wurde 1987 das Vitamin B2, Riboflavin, erhalten.^[35] Ähnlich bedeutsam ist die biotechnologische Herstellung von Enzymen. So ist der effiziente Einsatz von Futtermitteln in der Tierernährung ein zunehmend wichtiger Faktor bei der Welternährung. Mit ergänzenden Enzymen wie Glukanasen, Xylanasen und Phytasen kann die Futterverwertung deutlich verbessert werden. Das von der BASF biotechnologisch hergestellte Enzym Phytase (NatuphosTM, Abbildung 9) beispielsweise steigert die Verfügbarkeit von Phosphat aus ansonsten nicht verwertbarem Inositolhexaphosphat in pflanzlichem Tierfutter. Hierdurch wird ein wichtiger Beitrag gegen die Phosphat-Überdüngung in Gewässern geleistet. Xylanasen und Glukanasen als Futterzusatz ermöglichen die Verwertung von ansonsten nicht verdaulichen Pflanzenbestandteilen im Futter. Dadurch kann das Futter besser verwertet werden. Neben der biotechnologischen Optimierung der Enzymproduktion ist auch die Erhöhung der Stabilität der Enzyme essentiell, denn sie müssen den Produktionsprozess zur Herstellung von Futter überstehen. Eine der neuesten BASF-Innovationen ist daher eine thermostabile Phytase, die durch strukturbasierte Optimierung des Enzyms erhalten werden konnte.

Ein weiterer Beitrag der BASF-Forschung zu einer gesünderen Ernährung sind mehrfach ungesättigte Fettsäuren. Eine Vielzahl wissenschaftlicher Studien bescheinigt den beiden essentiellen mehrfach-ungesättigten Omega-3-Fettsäuren Eicosapentaensäure (EPA) und Docosahexaensäure (DHA) positive Effekte auf Herz und Kreislauf.^[37] Deshalb können sie zahlreiche Nahrungsmittel des täglichen Gebrauchs, wie z. B. Backwaren und Milchprodukte, verbessern. In Zusammenarbeit mit dem Nahrungsmittelhersteller Cargill entwickelt die BASF über biotechnologische Methoden Rapspflanzen, die EPA und DHA produzieren. Um dieses Ziel zu erreichen, hat die BASF den natürlich in Algen vorkommenden metabolischen Stoffwechselweg für EPA und DHA kopiert und in Rapspflanzen eingebracht. Keine andere Pflanze ist heutzutage in der Lage, EPA und DHA in kommerziellen Mengen und gleichzeitig ökonomisch zu produzieren. Die Markteinführung ist Ende dieser Dekade vorgesehen.

3.2. Intelligente Energie

Chemie nimmt auch eine Schlüsselrolle bei der Beantwortung der eingangs genannten Energiefragen ein. Viele zentrale Elemente der Stromwertschöpfungskette (Abbildung 10) müssen grundlegend verbessert oder verändert werden, um eine nachhaltige Energieversorgung zu realisieren: von der Stromerzeugung über die Stromleitung und -speicherung bis hin zur Verwendung des Stroms. Bei der BASF arbeiten wir an materialbasierten Lösungen für die gesamte Wertschöpfungskette, um auch regenerative Energie nutzbar zu machen. Im Folgenden seien die drei Themen Energiespeicherung, -umwandlung und -nutzung exemplarisch beschrieben.

3.2.1. Energie effizient speichern mit Kathodenmaterialien für Batterien

Als weltweit größter Automobilzulieferer in der Chemieindustrie arbeitet die BASF unter anderem an nachhaltigen Lösungen für die Elektromobilität. Wir wollen dazu beitragen, dass Elektroautos bezahlbar, energieeffizient und alltagstauglich werden.

Die Batterie macht mit bis zu 10000 Euro rund ein Viertel der Kosten eines Elektrofahrzeugs aus und bestimmt dessen Reichweite. Wir forschen intensiv an Materialien für fortgeschrittene Lithium-Ionen-Batterien (Kathodenmaterialien, Elektrolyte) und neuen Technologien wie Lithium-Schwefel-Batterien. Mit diesen Arbeiten wollen wir erreichen, dass zukünftige Batterien eine deutlich höhere Fahrzeugreichweite bei gleichbleibendem Gewicht und geringeren Kosten

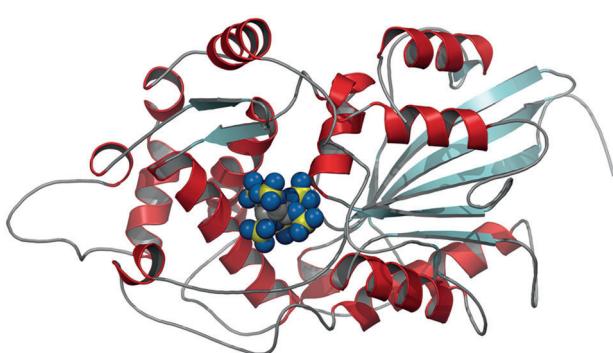


Abbildung 9. Kristallstruktur von Phytase.^[36]

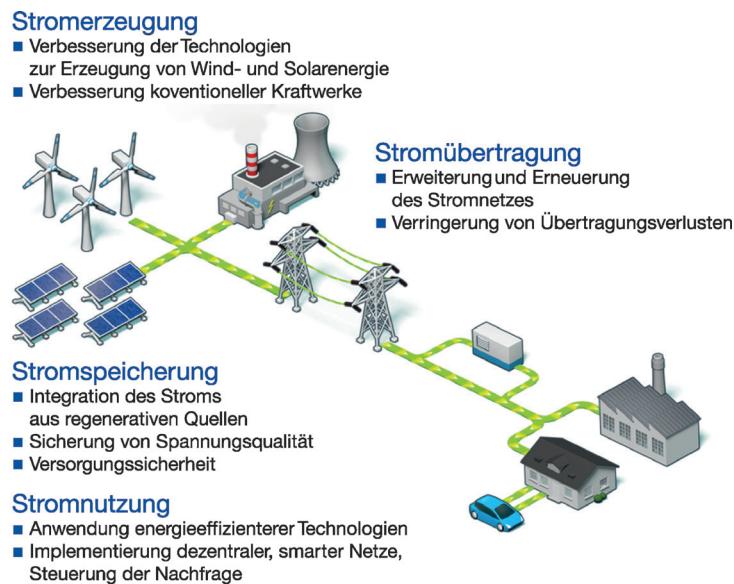


Abbildung 10. Stromwertschöpfungskette.

ermöglichen. Natürlich dürfen keine Abstriche bei der Sicherheit gemacht werden. Entscheidend für die höhere Reichweite ist die Energiedichte. Wird sie bei gleichem Batteriegewicht erhöht, wird die Reichweite gesteigert. Heute wird für zukünftige Lithium-Ionen-Batteriezellen eine Energiedichte von bis zu 350 Wh kg^{-1} angestrebt. Dieses ist nur mit wesentlich verbesserten Kathodenmaterialien zu erreichen. Der Elektrolyt muss dann ebenfalls den höheren Anforderungen entsprechend weiterentwickelt werden. Hieran arbeiten wir bereits mit hoher Intensität gemeinsam mit unseren Kunden.

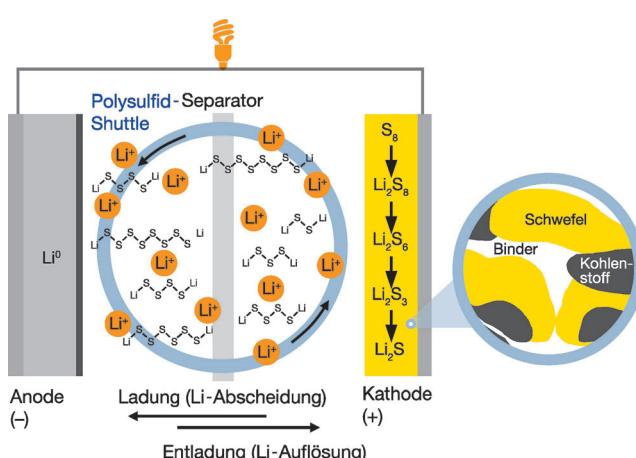
Lithium-Schwefel-Zellen (Schema 4) ermöglichen mit 2600 Wh kg^{-1} eine 4- bis 5-mal höhere theoretische Energiedichte als Lithium-Ionen-Batterien.^[38] Im praktischen Betrieb sind 500 Wh kg^{-1} erreichbar, und die Lithium-Schwefel-Batterie könnte damit zu einer weiteren Erhöhung der gravimetrischen Energiedichte führen.

Lithium-Schwefel-Batterien befinden sich noch in der Grundlagenforschung. Wir forschen seit 2009 gemeinsam mit

Sion Power (in Tucson, Arizona), dem weltweiten Technologieführer, aber auch mit universitären Partnern an Lithium-Schwefel-Batterien. Mittelfristiges Ziel ist die deutliche Verbesserung der Lebensdauer und Zyklenstabilität. Wir stehen dabei vor zwei technischen Herausforderungen: a) Die beim Lade-/Entladeprozess entstehenden gelösten Polysulfide führen zu einer hohen Selbstentladungsrate.^[38] b) Der Elektrolyt wird auf der hochreaktiven Li-Anode langsam reduktiv zersetzt.^[38a, 40]

Ein Lösungsansatz für beide Herausforderungen ist die Ausbildung einer Schutzschicht auf der Lithiumoberfläche, die zwar für Li-Ionen durchlässig ist, nicht aber für Polysulfide und den Elektrolyten.^[38a, 39, 41] Sie kann mit zwei Methoden aufgebaut werden. Entweder kann bei der Herstellung der Anode direkt eine Li-Ionen leitende keramische Schutzschicht aufgebracht werden, oder der Elektrolyt wird gezielt mit Additiven (Salzen oder organischen Molekülen) versetzt. Diese Additive zersetzen sich beim Betrieb der Batterie an der Lithiumanode und bilden dabei mit dem Lithium eine anorganisch-organische Schicht. Die so erhaltene Schutzschicht verhindert nicht nur den direkten Kontakt des Elektrolyten mit dem Lithium und damit seine Zersetzung, sondern soll auch das Wachstum von Lithiumdendriten auf der Lithiumoberfläche während des Ladeprozesses unterbinden. So wird der Kontakt mit der Kathode und ein gefährlicher Kurzschluss verhindert, der zum Versagen der Zelle führen würde.

Ein zweiter Lösungsansatz zur Verhinderung der Selbstentladung und Elektrolytzersetzung basiert auf einer Optimierung der Kathodenformulierung. Da sowohl ihr Hauptbestandteil Schwefel, als auch das Entladeprodukt Li_2S Isolatoren sind, muss ein elektrisch leitfähiges Material wie Kohlenstoff zugesetzt werden. Kohlenstoff bildet im Zusammenspiel mit einem polymeren Binder ein elektronenleitendes Grundgerüst, an dessen Oberflächen die elektrochemischen Reaktionen der Schwefelspezies ablaufen. In der Vergangenheit wurden beispielsweise nanostrukturierte Koh-



Schema 4. Vereinfachte Darstellung einer Lithium-Schwefel-Batterie.^[39]

lenstoffmaterialien untersucht, die durch eine definierte Porosität und Struktur das Aktivmaterial, den elementaren Schwefel, zugänglich machen und den elektrischen Kontakt herstellen.^[40,42] Mithilfe dieser Materialien konnte die Zyklusstabilität und die Nutzung des Schwefels über die Lebensdauer einer Lithium-Schwefel-Batterie gesteigert werden. Ein weiterführender Lösungsansatz beruht auf dem Einbau von Adsorbentien in die Kathode. Sie bewirken, dass bei den Lade-/Entladeprozessen intermediär gebildete, lösliche Polysulfide in der Kathode gebunden bleiben und verhindern so die Selbstentladungsrate. All diese Ergebnisse bilden die Grundlage für die Entwicklung neuer, besserer Batteriematerialien für die Elektromobilität.

3.2.2. Effizient Kühnen mit magnetokalorischen Materialien

Der Anteil des Energieverbrauchs eines US-amerikanischen Haushalts für Kühlanwendungen (Kühlschrank, Gefrierschrank und Klimaanlagen) liegt gemäß Studien des US Department of Energy bei ca. 20%, das entspricht 4×10^{15} kJ.^[43] Zur Reduktion des Energieverbrauchs fordern die Gesetzgeber immer höhere Energieeffizienzklassen und die entsprechende Kennzeichnung der Geräte. Die thermodynamische Effizienz magnetischer Kühlsysteme ist deutlich höher als die Effizienz der Verdichtungszyklen herkömmlicher Kompressoren. Darum bietet die Kühlung mit Magneten das Potential, die Energiekosten im Vergleich zu bekannten Kühl- und Klimageräten um bis zu 50% zu reduzieren. Gleichzeitig entfällt bei der Magnetokalorik der Einsatz eines herkömmlichen Kompressors. Dadurch entstehen beim Betrieb der Geräte kaum Vibrationen und Geräusche und die Technologie kommt ohne den Einsatz klimaschädlicher gasförmiger Kühlmittel aus.

Der magnetokalorische Effekt wurde 1881 von E. Warburg entdeckt. Er basiert auf sogenannten magnetokalorischen Materialien, die sich in einem Magnetfeld erwärmen und außerhalb des Feldes wieder abkühlen.^[44] Die BASF arbeitet seit 2006 an der Entwicklung und Produktion magnetokalorischer Materialien und an Konzepten, diese in Kühlsysteme zu integrieren. Die optimale Anordnung in Wärmetauscherbetten zum Betrieb einer Kältemaschine hängt dabei von den physikalischen Eigenschaften der Materialien ab. Kommerziell werden diese magnetokalorischen Materialien bisher nur in der Kryotechnik eingesetzt, um beispielsweise Helium unterhalb von 4 K zu kühlen. Die Entwicklung neuer Materialien, die bei Raumtemperatur aktiv sind, ermöglicht nun den Einsatz in konventionellen Kühlanwendungen wie Klimaanlage und Kühlschrank.^[45] Abbildung 11 zeigt schematisch die Funktionsweise einer magnetokalorischen Kältemaschine. Als magnetokalorischer Vergleichsprozess ist der Brayton-Zyklus im Temperatur-Entropie-Diagramm dargestellt.

Eine besonders leistungsstarke Klasse magnetokalorischer Materialien stellt $Mn_{2-x}Fe_xP_{1-y}Si_y$ dar, das in der hexagonalen Fe_2P -Struktur vorliegt, wobei Eisen teilweise durch Mangan und Phosphor durch Silicium ersetzt ist (Abbildung 12).^[46] Diese Materialklasse ist aus der seit dem Jahr 2008 bestehenden Zusammenarbeit der BASF mit den niederländischen Stiftungen für Materialgrundlagenforschung

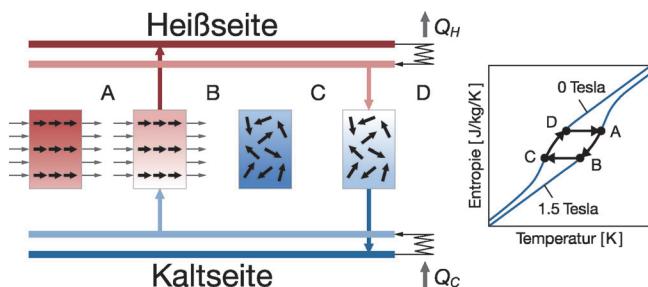


Abbildung 11. Schematische Darstellung des magnetokalorischen Kreisprozesses (links). D→A: Magnetisierung im Magnetfeld. Der magnetokalorische Effekt führt zu einer Temperaturerhöhung. A→B: Wärmeübertragung an ein Wärmeträgermedium wie Wasser. B→C: Entmagnetisierung durch Magnetfeldentfernung. Der magnetokalorische Effekt führt zu einer Temperaturerniedrigung. C→D: Aufwärmen auf die Ausgangstemperatur durch das Wärmeträgermedium. Temperatur-Entropie-Diagramm des Brayton-Kreisprozesses (rechts)

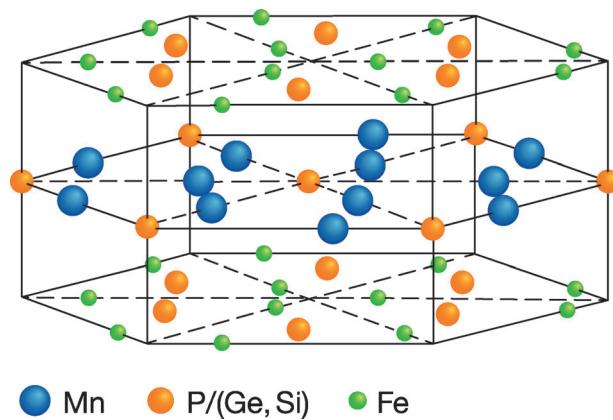


Abbildung 12. Struktur von $Mn_{2-x}Fe_xP_{1-y}Si_y$.

(FOM) und Technische Wissenschaften (STW), der Technischen Universität Delft, der Universität Amsterdam und der Radboud Universität Nijmegen hervorgegangen.

Die Materialien sind unterhalb der charakteristischen Curie-Temperatur ferromagnetisch und gehen oberhalb dieser Sprungtemperatur in eine paramagnetische Phase über. Mit diesem strukturell-magnetoelastischen Übergang geht eine starke Entropie- und Temperaturänderung einher, die im magnetokalorischen Kreisprozess ausgenutzt wird.^[47] Ein starker magnetokalorischer Effekt tritt nur in einem sehr engen Temperaturintervall von wenigen Grad um den Phasenübergang auf. Da in konventionellen Kühlanwendungen allerdings ein Temperaturhub von >40°C erforderlich ist, werden mehrere Materialien mit unterschiedlichen Curie-Temperaturen in einer Kaskade aneinander gereiht. Durch Kontrolle der Stöchiometrie ist es uns möglich, die Curie-Temperatur und die magnetokalorischen Eigenschaften einzustellen und so eine optimale Zusammenarbeit in der Kaskade sicherzustellen. Die Materialien sind dabei beispielsweise in ein poröses Polymerbett eingebunden (Abbildung 13), das vom Wärmeträgermedium durchströmt wird.

Entscheidend für die Anwendung ist ein effizienter Wärmeübergang vom Material ins Fluid und somit eine hohe zur Verfügung stehende Oberfläche bei gleichzeitig niedrigem

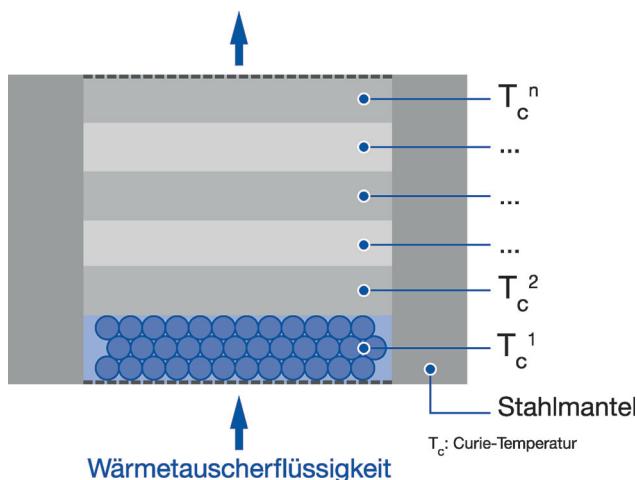


Abbildung 13. Kaskadiertes poröses Bett aus magnetokalorischen Materialien in Kugelform.

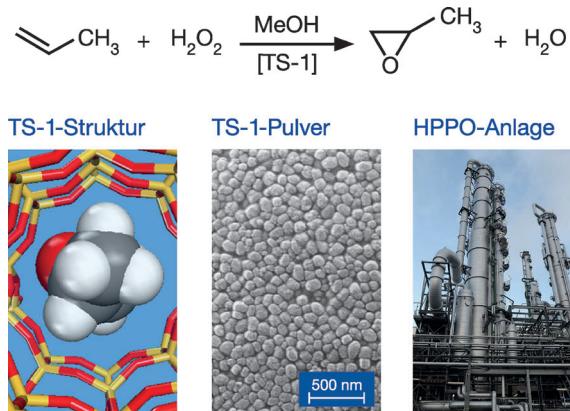
Druckverlust.^[48] Diese Aufgabenstellung gleicht der Auslegung von heterogen katalysierten chemischen Prozessen. Mithilfe von Fluid-Dynamikrechnungen lassen sich die effizientesten Geometrien ermitteln. Neben der großtechnischen Umsetzung der Synthese kommt somit der Formgebung im Wärmetauscherbett eine hohe Bedeutung zu.

3.2.3. Energieeffizient produzieren mit intelligenten Prozessen am Beispiel HPPO

Die Chemieindustrie gehört zu den energieintensiven Industrien. Verfügbarkeit von Energie und konkurrenzfähige Energiekosten sind für unsere internationale Wettbewerbsfähigkeit ausschlaggebend. Die BASF gibt für den Betrieb ihrer Produktionsanlagen weltweit jedes Jahr allein 2 Mrd. Euro für die Energieversorgung aus.^[2] Deshalb arbeiten wir kontinuierlich an der Verbesserung der Energieeffizienz unserer Prozesse und Anlagen. Das gelingt vor allem durch Investitionen in innovative Technologien wie katalysierte Prozesse.

Ein Beispiel ist eines der jüngsten großtechnischen Verfahren der BASF, die Direktsynthese von Propylenoxid (PO) aus Propylen und Wasserstoffperoxid (HPPO-Prozess).^[49,50] Mit einer globalen Kapazität von 7.5 Millionen t/a zählt PO zu den 50 „unsterblichen“ Chemikalien. Es dient als Baustein für Polyurethane, Propylglykole und Glykolether. Im Jahr 2009 hat die BASF zusammen mit ihrem Joint-Venture-Partner Dow in Partnerschaft mit Solvay als H₂O₂-Lieferanten eine erste Anlage am Standort Antwerpen in Betrieb genommen (Schema 5). Eine zweite Anlage (Dow) folgte 2011 in Thailand und eine dritte soll 2015 in Saudi Arabien anfahren. Weitere sind geplant. Die genannten Anlagen haben in Summe eine Kapazität von über 1 Million t/a.

Die ökonomischen und ökologischen Vorteile der neuen Technologie sind enorm. Im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren ist die Abwassermenge um 70–80% geringer (0.5 t Abwasser pro Tonne PO), es werden bis zu 35% Energie eingespart und es fallen keine Koppelprodukte an. Lediglich Wasser wird neben PO gebildet. Da in einer HPPO-Anlage nur die Einsatzstoffe Wasserstoffperoxid und Propylen gebraucht werden, kommt es zu einer erheblichen Reduzierung

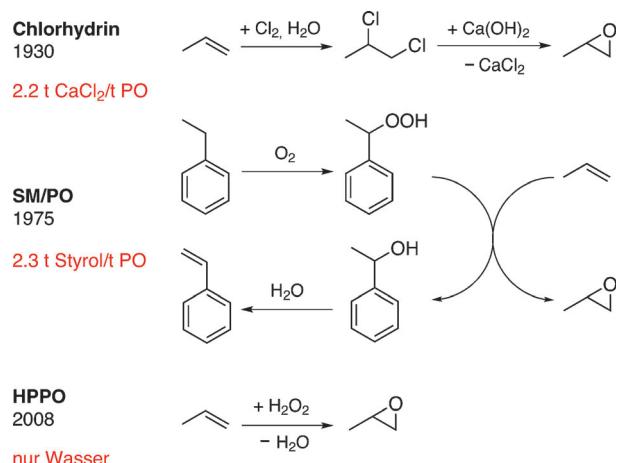


Schema 5. HPPO-Verfahren der BASF/Dow mit TS-1 als Katalysator.

der Komplexität der Infrastruktur. Die Investition für eine nach der neuen Technologie errichtete Anlage ist deshalb bis zu ein Viertel geringer als bei herkömmlichen Prozessen.

Zum Vergleich: Beim teilweise heute noch betriebenen, aber nicht mehr reinvestitionsfähigen CHPO(Chlorhydrin)-Verfahren,^[51] das in den 1930er Jahren entwickelt wurde, erfordert jede produzierte Tonne PO den Einsatz von 1.4 t Chlor und 1 t Ca(OH)₂. Es fallen 2.2 t CaCl₂ als Abfallprodukt, 40 t Abwasser und signifikante Mengen von 1,2-Dichlorpropan als Nebenprodukt an (bis zu 10% Ausbeute). Selbst beim Styrolmonomer (SM)/PO-Prozess, dem Standardprozess zur Synthese von PO seit den 1980er Jahren, entstehen pro Tonne PO noch 2.3 t Styrol als Koppelprodukt und 1.6 t Abwasser (Schema 6).^[52]

Die technischen Herausforderungen bei der Entwicklung des neuen HPPO-Prozesses zur Produktionsreife waren



Schema 6. Historische und aktuelle Verfahren zur PO-Herstellung.

enorm. Propylen wird bevorzugt in allylischer Position zu Acrolein bzw. Acrylsäure oxidiert, aber nicht zu PO. Mit wässrigem Wasserstoffperoxid wurde ein Oxidationsmittel gefunden, das die Reaktion ermöglicht. Als Katalysator dient im HPPO-Prozess der Titan-dotierte Silicalit-1 (TS-1),^[53] ein Zeolith mit MFI-Struktur und einer Porengröße von ca. 0.55 nm,^[54] der 1979 bei der EniChem entdeckt wurde^[55] und sich in einer Vielzahl von Oxidationsprozessen mit H₂O₂

etabliert hat. Das Verfahren wurde aufgrund seiner ökonomischen und ökologischen Nachhaltigkeit mehrfach ausgezeichnet.^[56]

3.2.4. Nachwachsende Rohstoffe energieeffizient und ressourcenschonend nutzen

Auch die Nachfrage nach Produkten aus erneuerbaren Rohstoffen steigt zunehmend. Die Forschungsthemen in den Technologiefeldern Rohstoffwandel und Weiße Biotechnologie nehmen daher eine zentrale Stelle in unserer Forschungsstrategie ein. Für die Produktion und Vermarktung biobasierter Bernsteinsäure z.B. hat die BASF gemeinsam mit Corbion Purac im Jahr 2012 das 50-50-Gemeinschaftsunternehmen Succinicity gegründet. Grundlage für die Produktion ist das von der BASF selektierte und optimierte Bakterium *Basfia succiniciproducens*, das Bernsteinsäure in einem hocheffizienten Prozess aus einer Vielzahl natürlicher Ressourcen synthetisiert. Die erste Fermentationsanlage mit einer jährlichen Kapazität von 10000 Tonnen ist im ersten Quartal 2014 am Corbion-Purac-Standort in Montmelo bei Barcelona (Spanien) in Betrieb gegangen. Bernsteinsäure wird bei der Herstellung von Biokunststoffen, chemischen Zwischenprodukten, Lösemitteln, Polyurethanen und Weichmachern eingesetzt. Wir entwickeln an unseren Forschungsstandorten in Ludwigshafen, Düsseldorf und Tarrytown weitere fermentative oder biochemische Prozesse zur energieeffizienten und ressourcenschonenden Herstellung chemischer und biochemischer Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen. So nutzen wir die Syntheseleistungen der Natur, um Verbindungen zu gewinnen, die durch klassisch chemische Methoden und Reaktionen nicht wettbewerbsfähig herstellbar sind.

3.3. Städtisches Leben

Die rasante Verstädterung bringt eine Vielzahl an Herausforderungen mit sich, wie beispielsweise Bereitstellung von Trinkwasser, Abwasserentsorgung, energieeffizientes Bauen, emissionsarme Fortbewegung und nicht zuletzt die weitere Verbesserung des Lebensstandards. Die BASF stellt sich diesen Aufgaben mit ganzheitlichen Ansätzen und sieht einen Schlüssel hierzu in Multimaterialsystemen. Während in der Vergangenheit der Schwerpunkt unserer Kunststoffforschung auf monomeren Bausteinen, Basispolymeren und einigen technischen Kunststoffen lag, hat sich der Fokus heute hin zu Materialien und Systemen verschoben. Systementwicklung bedeutet für uns das gezielte Vereinigen einzelner Komponenten zur Erzeugung neuer Eigenschaften, die die Summe der einzelnen Eigenschaften übertreffen. In diesem Sinne haben wir in den letzten Jahren ein komplementäres Portfolio an Technologien für leistungsfähige funktionelle Polymere und Additive aufgebaut, sowie ein erweitertes Verständnis für die betreffenden Industrien. So hat sich die klassische Polymerforschung hin zur Entwicklung von Materialien und Systemen erweitert. Unsere Forschungspipeline in diesem Gebiet sei mit wenigen Beispielen dargestellt.

3.3.1. Wasseraufbereitung

Wasser wird oft unser kostbarstes Gut genannt. In den vergangenen 100 Jahren hat sich der weltweite Wasserverbrauch verzehnfacht, und derzeit haben rund 800 Millionen Menschen keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser.^[57] Im Jahr 2050 wird ein um 55 % erhöhter Wasserverbrauch erwartet, bedingt durch das Bevölkerungswachstum, steigende industrielle Produktion und Energieerzeugung.^[57] Bei der Wasseraufbereitung fällt der Membrantechnologie eine Schlüsselrolle zu.^[58] Keime und Bakterien können mit Mikro- und Ultrafiltration entfernt werden. Enthärtung und Entsalzung können mit Nanofiltrations- und Umkehrosmoseverfahren erzielt werden (Abbildung 14).

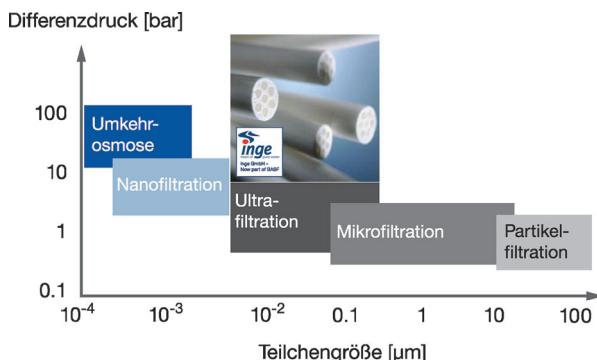


Abbildung 14. Membrantrennprozesse im Überblick in Abhängigkeit der Größe der abzutrennenden Komponenten und des notwendigen aufzubringenden Drucks. Man unterscheidet Lösungs- bzw. Diffusionsmembrane (blau) und poröse Membrane (grau).

Hatte die BASF mit Hochleistungskunststoffen wie Poly(ether)sulfon (PSU, PESU) bereits seit den 1990er Jahren Ausgangsstoffe für die Membranherstellung und Chemie zum Betrieb von Filter- und Kläranlagen geliefert, so hat sie durch die Akquisition der inge® watertechnologies im Jahr 2011 ihre Aktivitäten auf Systeme ausgeweitet und sich in der Wertschöpfungskette deutlich vorwärts integriert (Abbildung 15). Chemiker, Physiker, Materialwissenschaftler und Ingenieure arbeiten heute eng auf den verschiedenen Stufen der Systementwicklung zusammen. Hoher Wasserdurchsatz und verbesserte Energieeffizienz können sowohl durch innovative Membranmaterialien als auch durch technische Konzepte erreicht werden.

Um einen hohen Wasserfluss über einen langen Zeitraum zu gewährleisten, ist das Vermeiden von biologischen oder anorganischen Ablagerungen (Fouling bzw. Scaling) auf der Membranoberfläche von entscheidender Bedeutung.^[59] Die BASF verfolgt hier verschiedene Ansätze: Modifikation des Membranpolymers, Steuerung der Porenmorphologie, Zusatz von Additiven bzw. Oberflächenfunktionalisierung. Hydrophilere Membranpolymere oder eine regelmäßige Porenstruktur beispielsweise können Fouling reduzieren.^[60] Aber auch Polyvinylpyrrolidon oder Blockcopolymere als Additive in der Membranmatrix können die Ausbildung eines Biofilms auf der Membranoberfläche minimieren.^[61] Nicht zuletzt bietet die Funktionalisierung der Oberflächen, beispielsweise durch Ppropfung hydrophiler, antiadhäsiver Monomere, eine

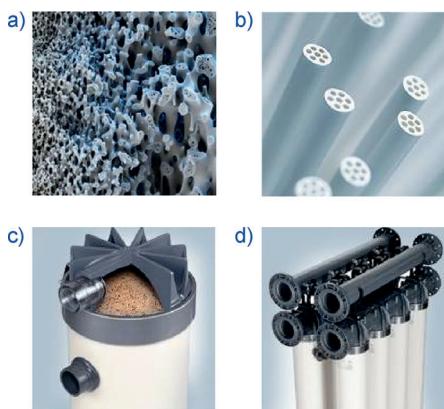


Abbildung 15. Membranentwicklung entlang der Wertschöpfungskette:
a) poröses Membranmaterial; b) inge® Multibore®-Membranen;
c) dizzier®-Modul; d) T-Rack®.

Möglichkeit, um einen dauerhaft hohen Wasserfluss zu gewährleisten.^[62]

Membrane sind aber letztlich nur ein Forschungsschwerpunkt im Bereich Wasser. Darüber hinaus entwickelt die BASF Prozesschemikalien wie umweltfreundliche Flockungsmittel oder Korrosions- und Kalkinhibitoren, um den steigenden Wasserbedarf weltweit zu decken.

3.3.2. Nachhaltiges Bauen

Schnelles, energieeffizientes und qualitativ hochwertiges, aber kostengünstiges Bauen, den individuellen Designwünschen entsprechend, in allen Klimazonen der Erde – das sind die Herausforderungen, die sich der Bauindustrie stellen. Mit mehr als 9 Milliarden Kubikmeter ist Beton, bestehend aus den Hauptkomponenten Zement, Sand, Kies und Wasser, weltweit das mit Abstand am meisten vom Menschen verwendete Material.^[63] Seit dem Ende des 20. Jahrhunderts hat sich hier viel getan. Verbesserte Zusammensetzungen der Ausgangsstoffe, maßgeschneiderte Additive und ein tieferes Verständnis der ablaufenden chemischen Prozesse erlauben architektonische Neuerungen und spektakuläre Bauprojekte (Abbildung 16).

Die beschleunigte, energieeffiziente Aushärtung von Beton bei gleicher oder verbesserter Materialqualität ist und



Abbildung 16. One World Trade Center in New York City gebaut mit Green Sense® Concrete der BASF.

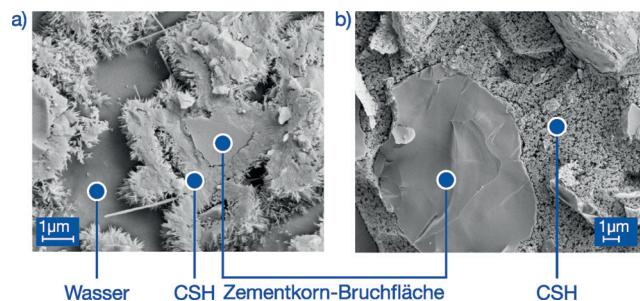


Abbildung 17. Kryo-SEM von Zementpasten bei gleichem Hydrationsgrad, aber unterschiedlichen Aushärtungszeiten: a) ohne Additive, nach 14 Stunden; b) mit 1 Gew. % Master X-Seed®, nach vier Stunden. Neben der signifikanten Beschleunigung des Hydratationsprozesses fördert Master X-Seed® eine gleichmäßige Verteilung der C-S-H-Phase.

bleibt Gegenstand akademischer und industrieller Forschung und Entwicklung. Mit dem Erhärtungsbeschleuniger Master X-Seed® ist es der BASF jüngst gelungen, die Betonhärtung ohne Wärmezufuhr im sehr frühen Stadium (6–12 Stunden) signifikant zu beschleunigen – bei gleichbleibender Endfestigkeit und Dauerhaftigkeit des Betons (Abbildung 17). Das Konzept beruht auf kolloidalen Suspensionen von nanopartikulären Calciumsilicathydrat-Kristallen (C-S-H), welche als Kristallisationskeime wirken.^[64] Die Herausforderung bestand unter anderem darin, die nur zwei Nanometer dicken C-S-H-Impfkristalle in Lösung zu stabilisieren, ohne die aktive C-S-H-Oberfläche weitflächig zu besetzen.^[65] Dazu wurden Polymere entwickelt, die auf der positiven Oberfläche der anorganischen Nanopartikel adsorbieren (z.B. über Carboxylat- oder Phosphat-Gruppen) und gleichzeitig neutrale hydrophile Segmente enthalten, die als Abstandhalter fungieren.

Die Kristallisationsforschung ist tief in der BASF-Historie verankert und spielte bereits bei der Herstellung von Indigo eine wichtige Rolle. Doch erst die grundlegenden Untersuchungen des Einflusses polymerer Additive auf die Kristallisation von Calciumcarbonat in den 1990er Jahren im Waschmittelbereich (Inkrustationsinhibition) und bei der Meerwasserentsalzung^[66] trugen maßgeblich zur Entwicklung des späteren Crystal Speed Hardening™ Konzepts bei. Dies ist nur ein Beispiel, bei dem die interdisziplinäre Bündelung von Know-how in der BASF-Forschung (in diesem Fall Polymer- und Anorganik-Expertise) eine nachhaltige Innovation ermöglichte.

3.3.3. Wärmemanagement in Gebäuden

Heutzutage entfallen rund 40 % des allgemeinen Energiebedarfs auf den Gebäudesektor. Globale Erwärmung und steigende Preise für Energie und Rohstoffe machen innovative Lösungen zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden unabdingbar. Für ein ganzheitlich optimiertes Wärmemanagement arbeitet die BASF neben Lösungen für das Management von Licht- und Wärmestrahlung an Hochleistungsdämmstoffen.

Die BASF kann auf eine lange Historie im Bereich der Dämmstoffe zurückblicken. Diese reicht, wie in Abschnitt 2.2 ausgeführt, bis in die 1950er Jahre zurück. Die BASF ist nicht

nur Erfinder und Pionier von Polystyrol-basierten Schäumen wie Styropor®, Styrodur® oder Neopor®, sondern kann unter anderem mit Polyurethan-basierten Hartschäumen eine breite Produktpalette an Dämmmaterialien anbieten (Abbildung 18).

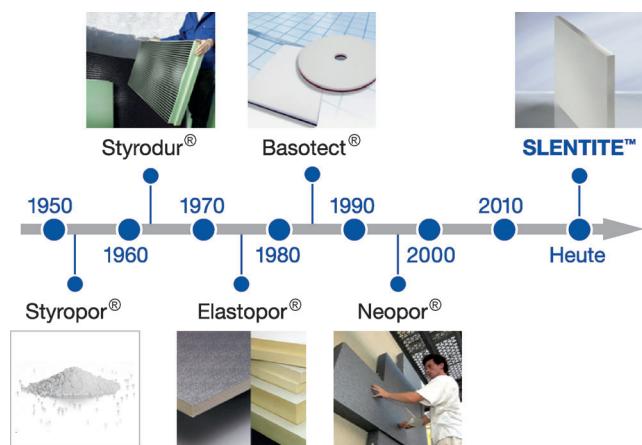


Abbildung 18. BASF-Entwicklungen von innovativen Dämmstoffen für die Bauindustrie.

Auch hier hat sich der Fokus auf Materialsysteme verlagert. Mit SLENTITE™ haben BASF-Forscher 2013 eine Hochleistungsdämmplatte auf Polyurethan-Basis entwickelt, die bei gleicher Dämmleistung nur halb so viel Platz benötigt wie herkömmliche Materialien (Abbildung 19).^[67] Dieses Polyurethan-Aerogel kann als stabile, monolithische Platte hergestellt werden. Die Arbeiten dazu begannen im Postdoc-Center der BASF am ISIS in Strasbourg. Damals bestand die Aufgabe darin, neue chemische Konzepte für nanoporöse Materialien zu entwickeln, die sich durch eine besonders geringe Wärmeleitfähigkeit auszeichnen. Je kleiner der Porendurchmesser, desto geringer ist die Wärmeleitfähigkeit (Knudsen-Effekt). Im Vergleich zu heutigen Dämmstoffen ist eine Verringerung der Porengröße um den Faktor 1000 nötig, um einen signifikanten Effekt zu erzielen. Die offenen 50–100 Nanometer großen Poren von SLENTITE™ garantieren die hohe Dämmleistung und die Wasserdampfdurchlässigkeit, welche für ein angenehmes Raumklima sorgt.

Für heutige Dämmstofflösungen sind nicht nur geringe Wärmeleitfähigkeiten entscheidend, sondern auch maßgeschneiderte Materialeigenschaftskombinationen. Technische Problemstellungen der Anwender, wie Verarbeitung und Transport, sowie baurechtliche Zulassungen werden früh in der Entwicklung partnerschaftlich bearbeitet. Die Weiterentwicklung von SLENTITE™ bis zur Marktreife erfolgt beispielsweise in enger Kooperation mit Bauphysikern und Kunden.

3.3.4. Automobiler Leichtbau

Mit zunehmender Bevölkerung und Verstädterung steigt auch das Bedürfnis nach Mobilität. Im Jahr 2020 werden weltweit 1.2 Milliarden Fahrzeuge auf den Straßen unterwegs sein, 300 Millionen mehr als heute.^[68] Begrenzte Verfügbarkeit von fossilen Brennstoffen und der Klimawandel zwingen zu höherer Effizienz und niedrigeren Emissionen der Auto-

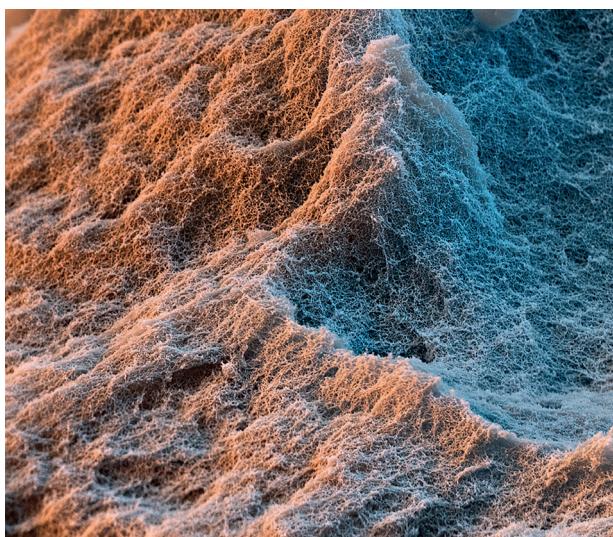


Abbildung 19. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Polyurethan-Aerogels SLENTITE™.

mobile. Weltweit haben Länder die Reduktion von CO₂ auch gesetzlich verankert. Die EU beispielsweise gibt vor, den CO₂-Ausstoß von heute 127 g km⁻¹ auf 95 g km⁻¹ im Jahr 2021 zu reduzieren.^[69] Eine weitere Absenkung wird diskutiert.

Für diese Ziele liegen die Forschungsschwerpunkte der BASF als weltweit führenderem Automobilzulieferer der chemischen Industrie neben Autoabgaskatalysatoren und neuen Batteriematerialien auf innovativen Leichtbaumaterialien. Diese ermöglichen es, den Energieverbrauch pro Fahrzeug deutlich zu reduzieren.^[70] Für die Entwicklung von Leichtbau-Verbundwerkstoffen ist ein holistischer Ansatz essentiell. Nicht nur das Material, sondern das gesamte Bauteil inklusive Design, Prozess und tatsächlicher Anforderung muss zusammen mit dem Kunden betrachtet werden.

Die Herstellverfahren für glas- und karbonfaserverstärkte Epoxid-, Polyurethan- und Polyamidharze müssen großserienfähig sein, um in der Automobilindustrie Einzug zu halten. Dies ist bei Kurz- und Langfaserverbundwerkstoffen der BASF bereits heute der Fall: So finden sich beispielsweise im BMWi3 unter anderem Karbonfasern in Kombination mit einer Polyurethan-Matrix in Rücksitzschalen. Diese Verbundlösung spart Gewicht und erfüllt trotz seiner geringen Wandstärke von nur 1.4 Millimetern die hohen Sicherheitsanforderungen der BMW-Gruppe.

Der Ersatz von Aluminium und Stahl in tragenden Strukturauteilen wird erst durch eine Endlosfaserverstärkung von Kunststoffen möglich. Endlosfaserverstärkte, thermoplastische Verbundwerkstoffe stellen allerdings eine besondere technologische Herausforderung dar, da sie sich nicht im hocheffizienten Spritzgussverfahren herstellen lassen. 2013 hat die BASF dafür einen neuen Ansatz auf den Markt gebracht. Das Produkt- und Servicepaket Ultracom™ besteht aus endlosfaserverstärkten Halbzeugen, angepassten Spritzgießmassen und einem umfangreichen Serviceteil, welcher Simulation, Prozessbetreuung und Prüflabor umfasst (Abbildung 20). Die zentrale Neuheit sind dabei die Halbzeuge, also Lamine aus Fasergeweben bzw. -gelegten und unidirektionale Bänder, die mit Polyamid imprägniert sind. Die

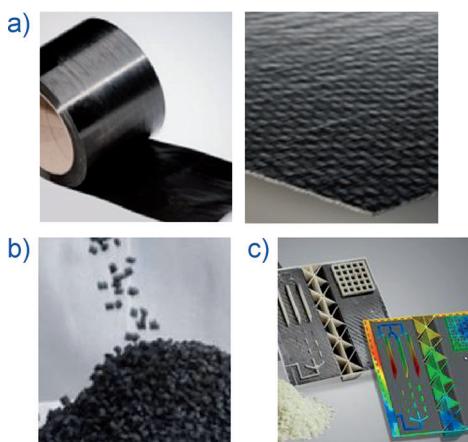


Abbildung 20. Ultracom™ – ganzheitlicher Ansatz für kosten- und gewichtsoptimierte automobile Strukturauteile: a) Endlosfaser-verstärktes Halbzeug (Laminate und Tapes), b) Umspritzmaterial, c) Engineering-Service bestehend aus dem Simulationsinstrument Ultrasim®, Betreuung bei der Bauteilherstellung und Unterstützung durch das Bauteil-Prüflabor der BASF.

Herausforderung auf der Materialseite bestand darin, ein abgestimmtes System aus Faser und Kunststoff einerseits und Tape bzw. Laminat und Umspritzmasse andererseits zu entwickeln. Die Oberfläche der Fasern muss an die Kunststoffe, die sie tränken, angepasst sein und umgekehrt. Das Umspritzmaterial wiederum muss die klassischen Anforderungen des Spitzgusses erfüllen und gleichzeitig optimal an die Rippen der Halbzeuge anbinden. Mit diesem ganzheitlichen Ansatz lassen sich komplexe Bauteile entwerfen und fertigen, die an genau definierten Stellen über eine sehr hohe mechanische Verstärkung verfügen. Eine erste serienmäßige Anwendung findet das Konzept im Frontsitz des Opel Astra OPC.

Hürden, die es für Leichtbauverbundwerkstoffe noch zu überwinden gilt, sind nach wie vor: verbessertes Faser-Matrix-Verständnis inklusive Simulationsfähigkeit, hohe Faserkosten und hohe Prozesskosten bedingt durch niedrige Taktzeiten. Generell wird die Entwicklung hin zur Elektromobilität die Anforderungen an die Verbundwerkstoffe noch erhöhen. Parameter wie Temperaturbeständigkeit, elektromagnetische Abschirmung, Flammenschutz und weitere Gewichtsreduktion aufgrund des zusätzlichen Batteriegewichts werden eine zunehmende Rolle spielen.

4. Erfolgsfaktoren der BASF-Forschung

Die beispielhaft vorgestellten Innovationen zeigen: Mit den globalen Herausforderungen werden auch die erforderlichen Lösungen immer komplexer. Das Wirkungsfeld der Chemie erweitert sich über den Vertrieb großer Mengen an Basischemikalien, Zwischenprodukten oder Kunststoffen hinaus. Unser Innovationsfokus verschiebt sich noch stärker zu Materialien und System-Lösungen. Dabei hat die Zeitkomponente eine immer größere Bedeutung. „Time to Market“ ist ein entscheidender Erfolgsfaktor, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Bei der BASF haben wir unsere Forschungsorganisation technisch und organisatorisch so aufge-

stellt, dass wir die Entwicklungszeit einer Erfindung bis hin zu ihrer Marktreife verkürzen können. Gleichzeitig verfügen wir über Ressourcen und Ausdauer, um bahnbrechende, langfristige Projekte beispielsweise in der Pflanzenbiotechnologie oder der Prozessentwicklung erfolgreich voranzutreiben. Hier gilt wie zu Carl Boschs Zeiten, „ein großes technisches Problem braucht 10 Jahre, um fabrikreif zu werden“.

Innovation ist und bleibt unser Erfolgsmotor. Voraussetzung dafür sind auch in Zukunft Forschung und Entwicklung auf hohem Niveau und die enge Zusammenarbeit mit unseren Kunden. In den vergangenen 150 Jahren hat die BASF kontinuierlich und intensiv in Forschung und Entwicklung investiert – allein 1.8 Mrd. Euro im Jahr 2013. Gleichzeitig haben wir uns weiterentwickelt und arbeiten heute enger mit unseren Kunden zusammen. Ein aktuelles Beispiel ist der neue adidas-Laufschuh „Energy Boost“ mit dem Zwischensohlenmaterial Infenergy® der BASF. Dieser innovative leichte und elastische Polyurethan-Partikelschaum gibt aufgenommene Energie zu einem Großteil wieder zurück. Er ist damit ideal für Sportler, die sich mit Laufen fit halten.

Um langfristig erfolgreich zu bleiben, wollen wir die Herausforderungen unserer Kunden noch besser verstehen. Wir bringen uns frühzeitig in die Entwicklung nachhaltiger Lösungen ein: mit unserem chemischen Know-How und mit neuen Querschnittstechnologien, wie der Nano- und Biotechnologie. Vom Verständnis der Kundenmärkte bis hin zur technischen Lösung verzahnen wir uns eng mit den Wertschöpfungsketten unserer Kunden.

Das Rückgrat unserer Forschung ist unser weltweiter Wissensverbund mit über 10000 Mitarbeitern mit unterschiedlichen Kompetenzen. Damit arbeitet fast jeder zehnte BASF-Mitarbeiter in Forschung & Entwicklung. Die hier diskutierten Beispiele sind das Ergebnis der Arbeit herausragender Persönlichkeiten und großartiger Teams, denen unser Dank gilt. Menschen machen Innovationen möglich und erfolgreich. Das heutige interdisziplinäre Team aus Chemikern, Ingenieuren, Physikern, Biologen, Medizinern und Pharmazeuten arbeitet an den rund 3000 Projekten in den Bereichen Chemie, Materialien und Biowissenschaften. Im Jahr 2013 haben wir mehr als 300 neue Produkte am Markt eingeführt, 8 Mrd. Euro Umsatz mit Produkten erzielt, die weniger als 5 Jahre am Markt sind, und rund 1300 Patentanmeldungen eingereicht. Beim Patent Asset Index,^[71] der industrieweit Patentportfolios miteinander vergleicht, lagen wir 2013 bereits zum fünften Mal in Folge an der Spitze.

Maßgeblich für den Erfolg unserer Forschung ist nicht zuletzt unsere globale Präsenz. Wir betreiben weltweit eigene Forschungsstandorte (z.B. in Research Triangle Park, Iselin, Tarrytown und San Diego in Nordamerika; in Ludwigshafen, Basel, Düsseldorf und Gent in Europa; in Shanghai und Mumbai in Asien) und kooperieren mit externen Forschungseinrichtungen. In einem globalen Netzwerk arbeiten Forscher der BASF mit rund 600 exzellenten Universitäten, Forschungsinstituten und Unternehmen in vielen verschiedenen Disziplinen und zahlreichen Einzelprojekten zusammen. So können wir unseren Kunden auf der ganzen Welt auf ihre Bedürfnisse zugeschnittene globale, regionale oder lokale Lösungen anbieten. Auch für die Rekrutierung wissenschaftlicher Talente ist es wichtig, weltweit vor Ort zu sein.

Während unser F&E-Schwerpunkt traditionell Ludwigshafen war, ist es unser Ziel, im Jahr 2020 50% unserer Forschungsaktivitäten in Nordamerika und Asien durchzuführen. Daher bauen wir insbesondere in diesen Regionen unsere Forschungseinrichtungen und -kooperationen an innovationsstarken Standorten aus. Im Jahr 2013 hat die BASF z. B. in Shanghai das „Network for Advanced Materials Open Research“ (NAO) gemeinsam mit sieben Spitzen-Universitäten in China, Japan und Korea gegründet. Mit der University of California Berkeley, der Stanford University und der University of California in Los Angeles rief die BASF 2014 die „California Research Alliance by BASF“ (CARA) als multidisziplinäres Postdoc-Zentrum ins Leben. Weitere Postdoc-Zentren an der amerikanischen Ostküste (Harvard, MIT, University of Massachusetts) und in Europa (Straßburg, Heidelberg, Freiburg, Zürich) haben bereits in den letzten Jahren den Betrieb aufgenommen.

Ein weiterer Erfolgsfaktor ist unsere Offenheit für neue Technologien und Methoden. Sie sind die Grundlage für neue Lösungsansätze. Die Nanotechnologie beispielsweise ermöglicht mit ihrer Vielfalt an Effekten und Anwendungen die Entwicklung von Materialien und Produkten mit neuen Eigenschaften, wie wir mit Master X-Seed® und SLENTITE™ gezeigt haben (Abschnitt 3.3). Darüber hinaus trägt sie zur effizienten Verwendung von Ressourcen bei. Wir nutzen moderne Hochdurchsatzmethoden zur Identifizierung optimaler Katalysatoren, Syntheseverfahren und Wirkstoffe. Computergestützte Methoden wie Modellierung, Data-Mining und statistische Versuchsplanung sind heute Standards in unseren Laboratorien. Im Zuge der Digitalisierung werden wir den Einsatz sogenannter cyberphysikalischer Systeme ausweiten, in denen Mechanik über Sensoren präzise gesteuert wird. Computersoftware und die internetgestützte Vernetzung mit weiteren Anlagen ermöglichen schnellen Datenaustausch und -auswertung weltweit.

Schon Ronald H. Coase, britischer Wirtschaftswissenschaftler und Nobelpreisträger, hatte festgestellt: „Knowledge is the only competitive advantage of our times, it grows through open interaction with others“.^[72] Dies trifft mehr denn je zu. Denn Differenzierung findet immer stärker über Innovationen statt. Sie sind der wesentliche Treiber für Wachstum in den kommenden Jahren. Dazu zählen neue Produkte und Technologien und auch innovative Geschäftsmodelle. Um die komplexen Fragen in den Bereichen Ernährung, Energie und städtisches Leben zu beantworten, müssen wir herausragende Innovationen auf den Weg bringen. Das erfordert noch stärkere interdisziplinäre Zusammenarbeit und Nutzung vorhandener Kompetenzen und Potenziale. Daher wollen wir uns weiterentwickeln und noch enger mit Kunden und Partnern vernetzen. Denn die Herausforderungen, die vor uns liegen, können wir nur gemeinsam lösen. Die Chemie wird als Schlüsseltechnologie dabei helfen.

Eingegangen am 10. Oktober 2014
Online veröffentlicht am 11. Februar 2015

- [1] *BASF: Stationen ihrer Geschichte 1865–2010*, BASF SE Corporate History, Ludwigshafen, **2010**.
- [2] *BASF Bericht 2013*, BASF SE Communications & Government Relations, Ludwigshafen, zu finden unter <http://www.bASF.com/bericht>.
- [3] *We create chemistry. Our corporate strategy*, BASF SE Communications & Government Relations, Ludwigshafen, <http://www.bASF.com/group/corporate/en/about-bASF/strategy>.
- [4] United Nations, *World Population Prospects: The 2008 Revision*, zu finden unter http://www.un.org/esa/population/publications/wpp2008/wpp2008_highlights.pdf.
- [5] WWF, *Living Planet Report 2012*, zu finden unter <http://www.wwf.de/publikationen/?q=WWF+living+report+2012>.
- [6] G. Conway, K. Wilson, *One Billion Hungry: Can We Feed the World?*, Cornstock Pub. Associates, Ithaca, New York, **2012**.
- [7] Food and Agriculture Organization of the United Nations, *World agriculture towards 2030/2050: The 2012 Revision*, zu finden unter <http://www.fao.org/docrep/009/a0607e/a0607e00.htm>.
- [8] International Energy Agency, *New Policies Scenario*, zu finden unter <http://www.worldenergyoutlook.org/resources/energydevelopment/energyaccessprojectionsto2030>.
- [9] United Nations, *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision*, zu finden unter <http://esa.un.org/unpd/wup>.
- [10] United Nations, *World Urbanization Prospects: The 2009 Revision Population Database*, zu finden unter <http://esa.un.org/wup2009/unup/index.asp?panel=2>.
- [11] A. Kreimeyer, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2013**, *52*, 147–154; *Angew. Chem.* **2013**, *125*, 158–165.
- [12] H.-J. Quadbeck-Seeger, *Angew. Chem. Int. Ed.* **1990**, *29*, 1177–1188; *Angew. Chem.* **1990**, *102*, 1213–1224.
- [13] A. Bernthsen, *Angew. Chem.* **1911**, *24*, 1059–1064.
- [14] F. Haber, R. Le Rossignol, *Z. Elektrochem.* **1913**, *19*, 53–72.
- [15] a) A. Mittasch, W. Frankenberger, *Z. Elektrochem.* **1929**, *35*, 920–927; b) A. Mittasch, *Chem. Ing. Tech.* **1949**, *21*, 449–452; c) J. Soentgen, *Chem. Unserer Zeit* **2014**, *48*, 72–75.
- [16] F. Störi, *Der Stoff, aus dem die Schäume sind*, Schriftenreihe des Unternehmensarchivs der BASF Aktiengesellschaft.
- [17] P. A. Zimmermann, *Magnetbänder, Magnetpulver, Elektroden – neue Mittel der Kommunikation*, Schriftenreihe des Firmenarchivs der Badischen Anilin- & Soda-Fabrik AG, **1969**.
- [18] H. Sauter, W. Steglich, T. Anke, *Angew. Chem. Int. Ed.* **1999**, *38*, 1328–1349; *Angew. Chem.* **1999**, *111*, 1416–1438.
- [19] P. McDougall, *Agri Services, Product Section* **2012**, 253–260.
- [20] E. Ammermann, G. Lorenz, K. Schelberger, B. Mueller, R. Kirstgen, H. Sauter, *BCPC Conf.–Pests Dis.* **2000**, *2*, 541–548.
- [21] T. Jabs, J. Pfirrmann, S. Schafer, Y. X. Wu, A. von Tiedemann, *BCPC Conf.–Pests Dis.* **2002**, *2*, 941–946.
- [22] MOE-minimierte Struktur in einem *S. tritici* Bc1-Homologiemodell basierend auf PDB 1SQB.
- [23] J. Bruinsma, *The Resource Outlook to 2050*, Expert Meeting on How to Feed the World in 2050, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Economic and Social Development Department, **2009**, zu finden unter <ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/ResourceOutlookto2050.pdf>.
- [24] P. Pingali, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2012**, *109*, 12302–12308.
- [25] BASF, *Zusammen Gewachsen – 100 Jahre Agrarzentrum Limburgerhof*, Eigenverlag, Limburgerhof, **2014**.
- [26] H. Pütter, H. Hannebaum in *New Directions in Organic Electrochemistry* (Hrsg.: A. J. Fry, Y. Matsumura), The Electrochemical Society Inc., **2000**, S. 25–28.
- [27] V. Maywald, S. P. Smidt, K. Wissel-Stoll, J. Schmidt-Leithoff, A. G. Altenhoff, M. Keil (BASF), WO 2009156359, **2009**.
- [28] a) C. Bauch, S. N. Kolle, T. Ramirez, T. Eltze, E. Fabian, A. Mehling, W. Teubner, B. van Ravenzwaay, R. Landsiedel, *Regul. Toxicol. Pharmacol.* **2012**, *63*, 489–504; b) H. G. Kamp, D.

- Ahlbory-Dieker, E. Fabian, M. Herold, G. Krennrich, E. Leibold, R. Looser, W. Mellert, A. Prokoudine, V. Strauss, T. Walk, J. Wiemer, B. van Ravenzwaay in *Modern Methods in Crop Protection Research* (Hrsg.: P. Jeschke, W. Krämer, U. Schirmer, M. Witschel), Wiley-VCH, Weinheim, **2012**, S. 335–349.
- [29] A. Wissemeier, P. Deck, O. Huttenloch, M. Mauss, G. Pasda, R.-T. Rahn, W. Weigelt, W. Zerulla (BASF), EP 1820788, **2007**.
- [30] C. James, *International Service for the Acquisition of Agri-Bio- tech Applications, Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops*, ISAAA, Ithaca, New York **2013**.
- [31] P. Castiglioni, D. Warner, R. J. Bensen, D. C. Anstrom, J. Harrison, M. Stoecker, M. Abad, G. Kumar, S. Salvador, R. D'Ordine, S. Navarro, S. Back, M. Fernandes, J. Targolli, S. Dasgupta, C. Bonin, M. H. Luethy, J. E. Heard, *Plant Physiol.* **2008**, *147*, 446–455.
- [32] R. N. Trethewey, A. J. Krotzky in *The Handbook of Metabonomics and Metabolomics* (Hrsg.: J. C. Lindon, J. K. Nicholson, E. Holmes), Elsevier, Amsterdam, **2006**, S. 443–488.
- [33] G. Wegner, G. Kaibel, J. Therre, W. Aquila, H. Fuchs (BASF), WO 2008037693, **2008**.
- [34] H. Ernst, *Pure Appl. Chem.* **2002**, *74*, 2213–2226.
- [35] M. Budde, M. Breuer, C. Petigny, *Actual. Chim.* **2013**, 375–376, 37–41.
- [36] Unveröffentlichte Ergebnisse der BASF-Forschung.
- [37] D. Swanson, R. Block, S. A. Mousa, *Adv. Nutr.* **2012**, *3*, 1–7.
- [38] a) S. S. Zhang, *J. Power Sources* **2013**, *231*, 153–162; b) D. Aurbach, E. Pollak, R. Elazari, G. Salitra, C. S. Kelley, J. Affinito, *J. Electrochem. Soc.* **2009**, *156*, A694–A702; c) J. Kulisch, H. Sommer, T. Brezesinski, J. Janek, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2014**, *16*, 18765–18771.
- [39] Z. Tu, Y. Kambe, Y. Lu, L. A. Archer, *Adv. Energy Mater.* **2014**, *4*, 1300654.
- [40] Y.-X. Yin, S. Xin, Y.-G. Guo, L.-J. Wan, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2013**, *52*, 13186–13200; *Angew. Chem.* **2013**, *125*, 13426–13441.
- [41] a) M. Armand, J.-M. Tarascon, *Nature* **2008**, *451*, 652–657; b) Y. Mikhaylik, I. Kovalev, R. Schock, K. Kumaresan, J. Xu, J. Affinito, *ECS Trans.* **2010**, *25*, 23–34.
- [42] a) X. Ji, K. T. Lee, L. F. Nazar, *Nat. Mater.* **2009**, *8*, 500–506; b) X. Ji, L. F. Nazar, *J. Mater. Chem.* **2010**, *20*, 9821–9826.
- [43] Energy Savings Potential and RD&D Opportunities for Non-Vapor-Compression HVAC Technologies, US Department of Energy, March 2014, <http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f12/Non-Vapor%20Compression%20HVAC%20Report.pdf>.
- [44] E. Warburg, *Ann. Phys.* **1881**, *249*, 141–164.
- [45] V. K. Pecharsky, K. A. Gschneidner, *Phys. Rev. Lett.* **1997**, *78*, 4494–4497.
- [46] O. Tegus, E. Brück, K. H. J. Buschow, F. R. de Boer, *Nature* **2002**, *415*, 150–152.
- [47] V. Basso, *J. Phys. Condens. Matter* **2011**, *23*, 226004.
- [48] A. Rowe, *Int. J. Refrig.* **2011**, *34*, 178–191.
- [49] a) J. H. Teles, A. Rehfinger, A. Berg, P. Rudolf, N. Rieber, P. Bassler (BASF), WO 2002062779, **2002**; b) P. Bassler, W. Harder, P. Resch, N. Rieber, W. Ruppel, J. H. Teles, A. Walch, A. Wenzel, P. Zehner (BASF), US 6479680, **2002**; c) H. Schultz, P. Schultz, R. Patrascu, M. Schultz, M. Weidenbach (BASF), EP 1778659, **2008**; d) H.-G. Goebbel, H. Schultz, P. Schultz, R. Patrascu, M. Schultz, M. Weidenbach (BASF), US 20070238888, **2007**; e) R. Patrascu, S. Astori, M. Weidenbach (BASF), WO 2004083196, **2004**.
- [50] a) F. Cavani, J. H. Teles, *ChemSusChem* **2009**, *2*, 508–534; b) P. Bassler, H.-G. Göbbel, M. Weidenbach, *Chem. Eng. Trans.* **2010**, *21*, 571–576.
- [51] D. Kahlich, U. Wiechern, J. Lindner, *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley-VCH, Weinheim, **2012**.
- [52] J. K. F. Buijink, J.-P. Lange, A. N. R. Bos, A. D. Horton, F. G. M. Niele in *Mechanisms in Homogeneous and Heterogeneous Epoxidation Catalysis* (Hrsg.: S. T. Oyama), Elsevier, Amsterdam, **2008**, S. 355–371.
- [53] B. Yilmaz, U. Müller, *Top. Catal.* **2009**, *52*, 888–895.
- [54] P. F. Henry, M. T. Weller, C. C. Wilson, *J. Phys. Chem. B* **2001**, *105*, 7452–7458.
- [55] a) M. Taramasso, G. Perego, B. Notari (Snamprogetti S. p. A.), US 4,410,501, **1983**; b) C. Neri, B. Anfossi, A. Esposito, F. Buonomo (EniChem), EP 100119, **1986**; c) G. Paparatto, A. Forlin, P. Tegon (Dow), EP 1072599, **2004**; d) M. G. Clerici, P. Ingallina (EniChem), US 5221795, **1993**.
- [56] Auszeichnungen für das HPPO-Verfahren: IChemE Award **2009**, Kirkpatrick Award **2009**, Presidential Green Chemistry Challenge Award **2010**, Innovationspreis der BASF **2011**.
- [57] United Nations, *World Water Development Report 2014*, zu finden unter <http://www.unwater.org/publications/publications-detail/en/c/218614/>.
- [58] M. A. Shannon, P. W. Bohn, M. Elimelech, J. G. Georgiadis, B. J. Marinas, A. M. Mayes, *Nature* **2008**, *452*, 301–310.
- [59] G. R. Guillen, G. Z. Ramon, H. Pirouz Kavehpour, R. B. Kaner, E. M. V. Hoek, *J. Membr. Sci.* **2013**, *431*, 212–220.
- [60] a) M. Radjabian, J. Koll, K. Buhr, U. Vainio, C. Abetz, U. A. Handge, V. Abetz, *Polymer* **2014**, *55*, 2986–2997; b) W. A. Philipp, B. O'Neil, M. Rodwgin, M. A. Hillmyer, E. L. Cussler, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2010**, *2*, 847–853.
- [61] F. Fischer, S. Bauer, *Chem. Unserer Zeit* **2009**, *43*, 376–383.
- [62] a) S. Frost, M. Ulbricht, *J. Membr. Sci.* **2013**, *448*, 1–11; b) D. Menne, F. Pitsch, J. E. Wong, A. Pich, M. Wessling, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2014**, *53*, 5706–5710; *Angew. Chem.* **2014**, *126*, 5814–5818.
- [63] a) A. Göthlich, S. Koltzenburg, G. Schornick, *Chem. Unserer Zeit* **2005**, *39*, 262–273; b) N. Nestle, M. Kutschera, L. Nicoleau, M. Leitl, M. Bräu, *Phys. Unserer Zeit* **2009**, *40*, 203–209; c) K. van Vliet, R. Pellenq, M. J. Buehler, J. C. Grossman, H. Jennings, F.-J. Ulm, S. Yip, *MRS Bull.* **2012**, *37*, 395–402; d) E. Gartner, *Cem. Concr. Res.* **2004**, *34*, 1489–1498; e) IMF, *World Economic Outlook*, April **2013**, zu finden unter <http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2013/01/weodata/index.aspx>.
- [64] J. Rieger, M. Kellermeier, L. Nicoleau, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2014**, *53*, 12380–12396; *Angew. Chem.* **2014**, *126*, 12586–12603.
- [65] L. Nicoleau, T. Gädt, L. Chitu, G. Maier, O. Paris, *Soft Matter* **2013**, *9*, 4864–4874.
- [66] a) J. Rieger, E. Hädicke, I. U. Rau, D. Boeckh, *Tenside Surfactants Deterg.* **1997**, *34*, 430–435; b) J. Detering, W. Bertleff, M. Essig, A. Kistenmacher, *Tenside Surfactants Deterg.* **1999**, *36*, 399–408.
- [67] M. Fricke, M. Elbing (BASF), WO 2012059388, **2012**.
- [68] LMC Automotive Studie **2012**.
- [69] a) European Environmental Agency, *Monitoring CO₂ emissions from new passenger cars in the EU: summary of data for 2013*, zu finden unter <http://www.eea.europa.eu/publications/monitoring-co2-emissions-from-new-1>; b) European Commission, *Climate Action, Verordnung (EU) Nr. 333/2014*, zu finden unter http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars/documentation_en.htm.
- [70] *Automotive News, Top Suppliers* 2013, June 16, **2014**.
- [71] H. Ernst, N. Omland, *World Patent Information* **33**, Elsevier Ltd, Lidlington, **2011**, S. 34–41.
- [72] R. H. Coase, *Economica New Series* **1937**, *4*, 386–405.