

# KATALYSE

IN DEUTSCHLAND



– EINE ERFOLGSSTORY –

**CONNECAT**  
Kompetenznetzwerk Katalyse

Gefördert durch das



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>VORWORT</b>	<b>3</b>
<b>KATALYSE MACHT UMSATZ</b>	<b>4</b>
Was Katalysatoren können und warum sie für einen Nobelpreis gut sind	
<b>KATALYSE MACHT MOBIL</b>	<b>6</b>
Wie die Katalyse unsere individuelle Mobilität ermöglicht	
<b>KATALYSE – HEUTE UND MORGEN</b>	<b>8</b>
Warum wir auch sonst auf die Katalyse angewiesen sind	
<b>KATALYSATOREN NACH MASS GESCHNEIDERT</b>	<b>10</b>
Wie man Katalysatoren findet und ihnen bei der Arbeit zusieht	
<b>KATALYSE GEHT NEUE WEGE</b>	<b>12</b>
Wie sich die Katalyse weiter entwickeln könnte	
<b>KATALYSE – EIN BAUSTEIN FÜR DIE CHEMIE DER ZUKUNFT</b>	<b>14</b>
Was die Katalyse mit einer nachhaltigen Chemie zu tun hat	
<b>KATALYSE IN DEUTSCHLAND</b>	<b>16</b>
Wo Katalytiker forschen – einige Beispiele	
<b>GESCHICHTE DER KATALYSE</b>	<b>18</b>
<b>IMPRESSUM</b>	<b>19</b>

# VORWORT



Katalyse ist die Schlüsseltechnologie der Chemie – ohne katalytische Prozesse sind viele Verfahren und Produkte der modernen Welt undenkbar. Sie kann auf eine lange Tradition in der Hochschulforschung und in der industriellen Anwendung zurückblicken, aber auch in Zukunft wird sie weitere neue hochinteressante wissenschaftliche und wirtschaftliche Ergebnisse liefern. So leistet sie z.B. wesentliche Beiträge für die Energieversorgung und zum Klima- und Umweltschutz, zwei der wichtigsten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts.

Auf dem Gebiet der Katalysforschung hat Deutschland eine Spitzenposition inne, die wir sichern und weiter ausbauen müssen. Eine starke Grundlagenforschung, die Freiraum für Ideen und ungewöhnliche Denkansätze nutzen kann, ist die Basis für den Erhalt dieser Spitzenposition. Darüber hinaus muss eine enge Vernetzung der Grundlagenforschung und der angewandten Forschung stattfinden, um einen kontinuierlichen wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn zu gewährleisten und diesen schnell in Innovationen in der Praxis umzusetzen. Dafür ist eine starke Verzahnung der Forschungs- und Innovationsaktivitäten an Hochschulen und Forschungsinstituten und Industrie nötig, die durch eine effiziente öffentliche Forschungsförderung – im Grundlagenbereich und in der anwendungsorientierten Forschung – erreicht werden kann.

Qualifizierte und motivierte Nachwuchswissenschaftler sind der Schlüssel, um die Katalysforschung in Deutschland auf dem hohen Niveau zu erhalten. Hierzu tragen die in Deutschland gegründeten regionalen Katalyselehrverbände bei, die den Studenten eine fachübergreifende Ausbildung und ein interdisziplinäres Lernen auf dem umfassenden Gebiet der Katalyse ermöglichen.

In dieser Broschüre wird die große Bandbreite und das enorme Potential der Katalysforschung anhand konkreter Praxisbeispiele dargestellt. Sie richtet sich an alle Interessierten, die mehr über dieses faszinierende Gebiet lernen möchten, das uns in unserem täglichen Leben überall begleitet. Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre.

*Gerhard Ertl*

Gerhard Ertl  
(Chemie-Nobelpreisträger 2007)



# KATALYSE MACHT UMSATZ

## Was Katalysatoren können und warum sie für einen Nobelpreis gut sind

Ohne sie wäre unsere Welt nicht so, wie wir sie kennen: Fast alles, was uns im Alltag umgibt, ist bei der Herstellung mit Katalysatoren in Berührung gekommen. Mit Substanzen also, die chemische Reaktionen kostengünstig, umweltverträglich oder überhaupt erst möglich machen. Und nur dank der Katalyse können wir in unseren Städten wieder durchatmen, konnten sich unsere Wälder vom sauren Regen erholen. Katalysatoren werden auch in Zukunft unverzichtbar sein: Der Wandel der Energiewirtschaft wird von ihnen genauso abhängen wie die Nutzung nachwachsender Rohstoffe.



### Manchmal lohnt ein Umweg

Auf der Südseite des Himalaja führen die Wege oft schnurgerade über die Berge. Dörfer sind fast auf der Luftlinie miteinander verbunden. Das verlangt dem Wanderer Einiges ab: Er muss unwegsame Passagen auf sich nehmen – über steile Hügelketten und quer durch Flusstäler.

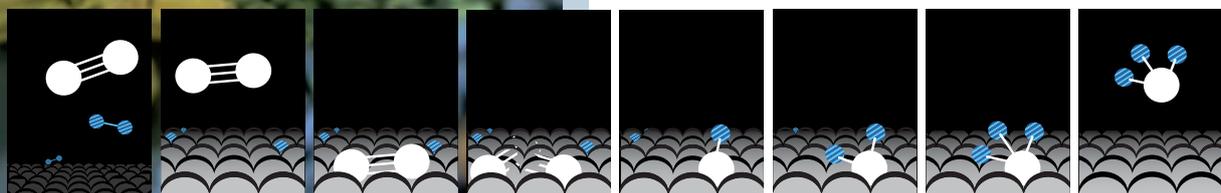
Anders in den Alpen: Hier sind die Pfade so angelegt, dass eine Wanderung möglichst wenig anstrengt. Serpentinien erleichtern den Marsch; Plateaus werden möglichst lange genutzt, auch wenn die Route einen Umweg bedeutet.

In der Chemie ist die „Himalaja-Strategie“ häufig unmöglich: Bei vielen Reaktionen würde der direkte Weg von den Ausgangsstoffen zu den Produkten zuviel Energie benötigen. Zu hoch ist die „Energiebarriere“, die wie ein steiler Hügel dazwischen liegt. In diesen Fällen lohnt ein Umweg. Um ihn zu ermöglichen, muss ein weiterer Stoff im System bewirken, dass der hinderliche Berg umgangen wird. Eine solche Substanz, ein Katalysator, nimmt die Ausgangsstoffe quasi wie ein Bergführer an der Hand und führt sie über energieärmere Zwischenstufen zum gewünschten Ziel.

Der Begriff Katalysator wird oft mit „Reaktionsbeschleuniger“ übersetzt, der bei der Umsetzung (fast) nicht verbraucht wird: Nach getaner Arbeit ist der Katalysator wieder frei, um weiteren Molekülen des Ausgangsstoffs den günstigsten Weg über das Energiegebirge zu zeigen. Die Chinesen bezeichnen Katalysatoren deshalb als „Heiratsvermittler“, die sich diskret zurückziehen, wenn sie ihre Aufgabe erfüllt haben.

### Wie Katalysatoren funktionieren

In den letzten Jahrzehnten hat sich gezeigt, dass das Bild vom Bergführer, der seine Schützlinge an der Hand nimmt, der Wirklichkeit recht nahe kommt. Katalysatoren treten zunächst in physikalische oder chemische Wechselwirkung mit den Ausgangsstoffen. Dabei entstehen Zwischenprodukte, die sonst nicht auf dem Reaktionspfad lägen. So wird der Weg in die Richtung der gewünschten Produkte geebnet.



Der Chemie-Nobelpreisträger des Jahres 2007, Gerhard Ertl, konnte das für eine der wirtschaftlich bedeutendsten Reaktionen demonstrieren: die Synthese von Ammoniak aus den Elementen Stickstoff und Wasserstoff an einer Eisen-Oberfläche. An ihr wird das Stickstoffmolekül gespalten und die Stickstoff-Atome lagern sich zwischen die Eisenatome ein. Diese Spaltung gelingt nur in Gegenwart des Metalls, denn in einer anderen Umgebung ist die extrem starke Dreifachbindung des Stickstoffs praktisch unlösbar. Auch die Wasserstoffmoleküle adsorbieren an der Eisen-Oberfläche, wobei sich ebenfalls die Atome voneinander lösen. Nur auf dem Katalysator bestehen also die Voraussetzungen dafür, dass sich die beiden Elemente über mehrere Zwischenstufen zu Ammoniak verbinden.

### Wie man Katalysatoren herstellt

Viele Katalysatoren in der chemischen Industrie enthalten Metalloxide (zum Beispiel Aluminium- oder Siliziumoxid) oder Edelmetalle auf einem Träger. Diese Festkörper werden meist bei Umsetzungen in der Gas- oder Flüssigphase eingesetzt und daher „heterogene“ Katalysatoren genannt. Für ihre Herstellung gibt es unterschiedliche Verfahren, zum Beispiel:

- das Metalloxid wird nasschemisch aus einer Lösung gefällt und filtriert, anschließend getrocknet und zu Tabletten oder Kugeln gepresst;

- ein Trägermaterial wird in einer (Edel-)Metallsalzlösung mit dem Katalysator imprägniert;
- käufliche Metalloxide werden unter Zusatz eines Bindemittels gemischt und in Formen beispielsweise zu Tabletten gepresst,
- Keramik- oder Metallwabenkörper (etwa im Autoabgaskatalysator) werden mit Metallen als aktiven Komponenten und weiteren Stoffen zur Erhöhung der Oberfläche beschichtet.

In jüngster Zeit werden auch „homogene“ Katalysatoren immer wichtiger. Sie lassen sich in derselben Phase lösen, in der die Reaktion abläuft. Diese Klasse von Katalysatoren enthält häufig Übergangsmetalle wie Rhodium, die mit organisch-chemischen Molekülanteilen (so genannten Liganden) verknüpft sind. Homogen katalysierte Reaktionen sind eher bei der Herstellung von Spezialchemikalien und Pharmaka wichtig. Auch Biokatalysatoren werden wieder für Reaktionen in der chemischen Industrie entdeckt: Isolierte Enzyme oder ganze Zellen ermöglichen Umsetzungen, die sonst nur mit großem Aufwand ablaufen würden.

Die Details der Entwicklung und Herstellung von Katalysatoren sind „extreme Geheimniskrämerei“, heißt es bei einem der führenden deutschen Katalysatoren-Hersteller. Selbst die Patentschriften liefern nur die allernötigsten Informationen.

### KATALYSE ALS WIRTSCHAFTSFAKTOR

- Weltweit werden durch katalytische Prozesse jedes Jahr Chemikalien im Wert von rund 3 Billionen US-Dollar hergestellt.
- Vier von fünf Chemikalien sind während ihrer Produktion mit Katalysatoren in Berührung gekommen.
- Katalysatoren tragen somit zu etwa 20 Prozent des Werts aller Handelsgüter bei.
- Ein Viertel des Bruttosozialprodukts wird direkt oder indirekt dank der Katalyse erwirtschaftet.
- Der Markt für Katalysatoren wird jährlich auf 13 Milliarden US-Dollar geschätzt.

### KATALYSE UND DIE PROBLEME DER MENSCHHEIT

- Katalysatoren sind schon jetzt unverzichtbar für den Schutz der Umwelt. Ihre Bedeutung wird noch steigen. „Der Kat“ unserer Automobile ist hier ebenso zu nennen wie viele Systeme in allen Industriebranchen, die von vornherein verhindern, dass Schadstoffe entstehen.
- Katalysatoren tragen wesentlich zur effizienten Nutzung von Energie bei. Ohne sie könnten weder Düngemittel noch Kraftstoffe wirtschaftlich hergestellt werden. Für die Zukunft entwickeln Forscher Katalysatoren, um Wasserstoff auf energieeffizientem Wege zu erzeugen, was heute noch nicht möglich ist.
- Zukünftig sollen es Katalysatoren ermöglichen, die Kraftstoffe und die Chemie-Rohstoffe der nächsten Generation herzustellen – aus Pflanzen und anderen nachwachsenden Rohstoffen. Weil bei deren Nutzung deutlich weniger fossil gebundenes Kohlendioxid frei wird, leistet die Katalyse einen direkten Beitrag zum Kampf gegen den Klimawandel.

# KATALYSE MACHT MOBIL

## Wie die Katalyse unsere individuelle Mobilität ermöglicht

Das 20. Jahrhundert war nicht zuletzt das Zeitalter des Automobils. Ohne Katalysatoren wäre das kaum möglich gewesen: Sie machen aus dem Rohöl Kraftstoffe für die Motoren, andere Katalysatoren reinigen die Abgase der Fahrzeuge. Auch im 21. Jahrhundert wird die individuelle Mobilität ein hohes Gut sein. Wie die Autos in fünfzig Jahren aussehen werden, wissen wir noch nicht. Doch sicher ist: Katalysatoren werden dabei neue Aufgaben zukommen – egal, ob die übernächste Generation ihre Fahrzeuge mit Biokraftstoffen, mit Wasserstoff oder über Brennstoffzellen antreiben wird.

### Neues vom guten alten „Kat“

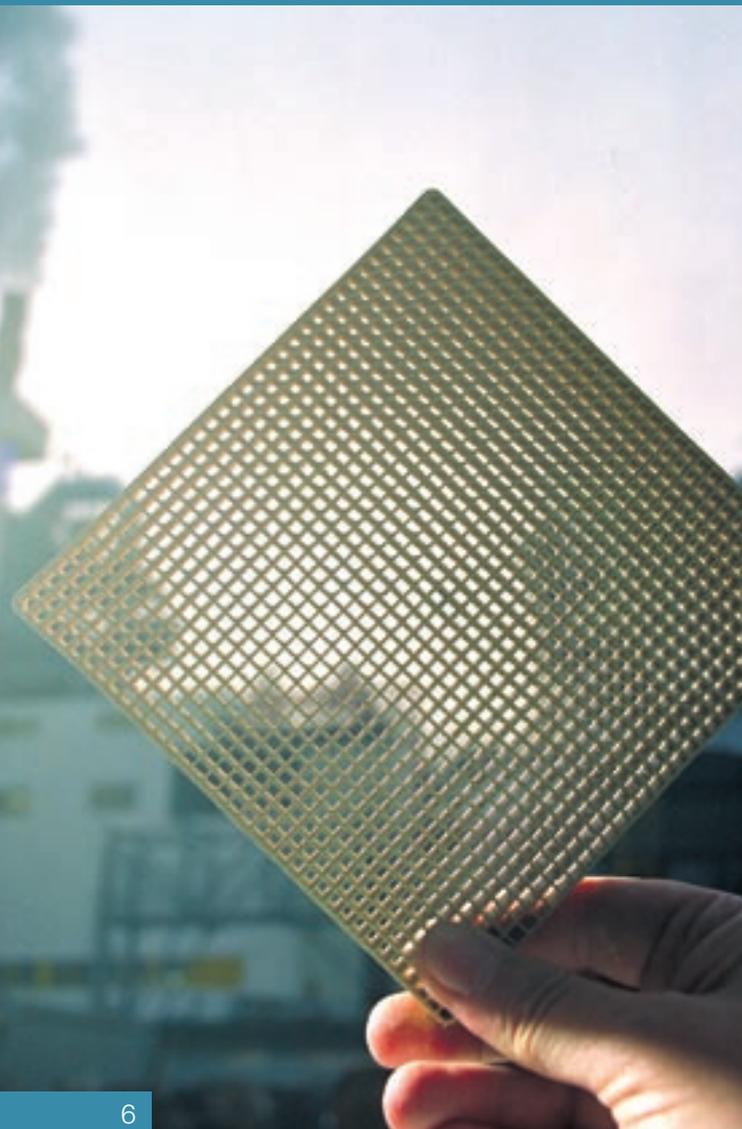
Ein bis zwei Gramm Platin stecken in jedem Autoabgas-Katalysator. Das Edelmetall ist dabei nur die Spitze des Eisbergs: die äußerste von mindestens drei Schichten des von Waben durchzogenen Zylinders im Auspuff. Seit rund zwei Jahrzehnten sorgt „der“ Katalysator für bessere Luft in unseren Städten und verschont die Wälder vor saurem Regen. Er entfernt gleichzeitig Kohlenmonoxid, Stickoxide und Kohlenwasserstoffe (daher „Dreiwege-Katalysator“) aus den Abgasen der Ottomotoren. Dazu benötigt er eine gleich bleibende Menge Sauerstoff. Die „Lambda-Sonde“ regelt deshalb den Sauerstoffgehalt so, dass der Katalysator optimal wirksam ist. Bei Dieselmotoren scheidet der Einsatz dieser kombinierten Abgaskatalysatoren aus. Denn sie werden mit einem Überschuss von Sauerstoff betrieben; es ist also nicht möglich, den Sauerstoffgehalt zu regulieren. Immerhin können Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe mit Edelmetallkatalysatoren oxidiert werden – das ist bei Dieselfahrzeugen inzwischen Standard. Die Entfernung der Stickoxide stellt die Entwickler aber immer noch vor Herausforderungen.

Einen Ausweg bietet die Abwandlung eines Verfahrens, mit dem Industrieabgase gereinigt werden. Beispielsweise werden auch bei der Herstellung von Salpetersäure unvermeidlich Stickoxide frei. Seit den siebziger Jahren werden dafür wabenförmige „DeNOx“-Katalysatoren eingesetzt, die als Trägermaterial Titandioxid und als aktiven Bestandteil Vanadiumpentoxid enthalten. Die unerwünschten Stickoxide (NOx) werden dabei durch Zugabe von gasförmigem Ammoniak zu Stickstoff reduziert.

### Endlich auch für Dieselfahrzeuge

Um dieses Verfahren auch bei Motoren anwenden zu können, wird das Ammoniak direkt aus einer Harnstofflösung (als AdBlue® im Handel) erzeugt. Bei Blockheizkraftwerken, die mit Diesel betrieben werden, bestehen damit bereits gute Erfahrungen. Und seit im Oktober 2007 die Euro-4-Abgasnorm für Nutzfahrzeuge in Kraft getreten ist, haben auch viele Lkw neben dem Dieselnoch einen Harnstofftank an Bord. Omnibusse, Schiffe und Lokomotiven sollen ebenfalls mit dieser Technik ausgerüstet werden. Neue Katalysatoren verwenden Eisen an Stelle von Vanadium, was auch bei höheren Betriebstemperaturen eine wirksame „Entstickung“ ermöglicht.

Auch für dieselbetriebene Pkw wird das Verfahren weiter entwickelt: Stickoxide sollen hier ohne Harnstoffzusatz entfernt werden. Denn beim Pkw lässt sich ein zusätzlicher Tank nicht ohne Weiteres unterbringen. Dazu wurden bei der Heidelberger Firma hte und beim japa-



nischen Autohersteller Honda unabhängig voneinander innovative Katalysatoren entwickelt, die ein modifiziertes „Management“ des Dieselmotors nutzen: In einer „fetten“, also kraftstoffreichen Verbrennungsphase wird aus den Stickoxiden Ammoniak gebildet und im Katalysator eingelagert. In der nachfolgenden „Magerphase“ reagiert das gespeicherte Ammoniak mit den Stickoxiden und entfernt diese aus dem Abgas. Der Katalysator von hte ist das Ergebnis von systematischen Hochdurchsatz-Tests von rund 5000 Materialien (siehe Seite 10).

### Saubere Kraftstoffe lassen Katalysatoren länger leben

In einer Raffinerie sorgt eine Vielzahl katalytischer Reaktionen dafür, dass aus dem braun-schwarzen Rohöl wertvolle Produkte werden: Flüssiggas und Kerosin, hochwertiges Benzin, Dieselmotorkraftstoff und vieles mehr. Doch im Erdöl stecken auch Schwefelverbindungen und Aromaten. Sie sind Gift für die Autoabgas-Katalysatoren und für die Umwelt. Deshalb mussten Verfahren entwickelt werden, um diese Bestandteile vor allem aus dem Dieselmotorkraftstoff zu entfernen. Auch hier kommen Katalysatoren zum Einsatz, zum Beispiel mit Edelmetallen beschichtete Zeolithe. Sie erlauben in einem Schritt die „entschwefelnde Dearomatisierung“ mit Wasserstoff: Schwefel wird zu Schwefelwasserstoff, Aromaten werden zu aliphatischen Kohlenwasserstoffen umgesetzt. Neuere Katalysatoren für diese Reaktion enthalten keine Edelmetalle mehr, sondern Nickeloxid als aktive Komponente.

### Der Weg in die Zukunft: Von Biodiesel zur Brennstoffzelle

Auch aus nachwachsenden Rohstoffen können Kraftstoffe nur mit Hilfe von Katalysatoren hergestellt werden. Biodiesel, der an Tankstellen direkt abgegeben oder dem herkömmlichen Dieselmotorkraftstoff zugemischt wird (bis zu 5 Prozent), besteht überwiegend aus Rapsölmethylester. Dieser wird aus Rapsöl

und Methanol hergestellt, wobei großtechnisch Natriummethylat als homogener Katalysator eingesetzt wird. Das Verfahren ist wasserfrei und liefert als zweites Produkt Glycerin in einer Reinheit von mehr als 80 Prozent. Dieses muss allerdings zunächst in eine wässrige Phase überführt werden, was einen weiteren Reaktionsschritt bedeutet. Forscher aus Bochum haben einen neuen Katalysator gefunden, der eine schnellere Phasentrennung ermöglicht und in einer dänischen Pilotanlage eingesetzt wird.

Neben Biodiesel und Bioethanol werden derzeit auch „Biokraftstoffe der zweiten Generation“ entwickelt. Sie sind prinzipiell aus Biomasse („biomass to liquid“) oder aus natürlichen Gasvorkommen („gas to liquid“) herstellbar. Der „ersten Generation“ von Biokraftstoffen haben diese vor allem eine höhere Qualität voraus. Ein weiterer Vorzug ist die Möglichkeit, alle Pflanzenteile zu nutzen.

Wasserstoff wird ebenfalls als Kraftstoff der Zukunft diskutiert. Bisher gibt es jedoch noch kein effizientes, umweltfreundliches Verfahren, um ihn zu erzeugen; der Transport und die Speicherung sind ebenfalls aufwändig. An Stelle von Verbrennungsmotoren könnte es deshalb interessanter sein, Wasserstoff im Fahrzeug herzustellen und mit ihm direkt eine Brennstoffzelle zu betreiben, ihn also „kalt“ zu verbrennen. Als Quellen für Wasserstoff kommen dabei Ethanol oder Methanol in Frage. So wird in dem Daimler-Brennstoffzellenfahrzeug „Necar 5“ Methanol durch einen so genannten Reformer an Bord in Wasserstoff umgewandelt. Bei diesem Prozess wird eine wasserstoffdurchlässige Membran mit einer Palladium-Silber-Legierung als Katalysator verwendet.



# KATALYSE – HEUTE UND MORGEN

## Warum wir auch sonst auf die Katalyse angewiesen sind

In den Industrieländern hängt ein Viertel des Bruttosozialprodukts von katalytischen Vorgängen ab, haben Wirtschaftsforscher errechnet. Einige Beispiele dafür, wie die Katalyse zu unserem Lebensstandard beiträgt – und was sie in Zukunft dazu beitragen wird.

### Von der Plastikfolie zum Hochleistungskunststoff

Kunststoffe aus Polyethylen sind seit mehr als 50 Jahren auf dem Markt. Von Anfang an waren Katalysatoren aus Aluminium- und Titanverbindungen bei der Herstellung nach dem „Ziegler-Natta-Verfahren“ unverzichtbar. Doch die Kettenlänge und der Verzweigungsgrad der Moleküle ließ sich dabei eher schlecht steuern. Erst seit den 90er Jahren des 20. Jahrhunderts ist eine neuartige Klasse von Katalysatoren auf der Basis von Kupferkomplexen im Einsatz, die einheitliche Produkte liefern. Das ist nur ein Beispiel dafür, dass neue Katalysatoren die Qualität bekannter Kunststoffe verbessern. Auch die so genannten Hochleistungspolymere werden davon profitieren. Sie verdanken ihre Festigkeit eingelagerten Fasern oder Teilchen im Maßstab von Nanometern. Bisher lässt sich kaum verhindern, dass sich diese wie Staub zu „Flusen“ zusammenlagern. Schon bald hofft die Industrie, die winzigen Partikel mit Katalysatoren zu überziehen, von denen ausgehend sich dann die Kunststoffmatrix ausbildet. Nanometergroße Kunststoffteilchen stecken auch in Dispersionsfarben auf Wasserbasis – hergestellt werden sie mit Hilfe neuer wasserstabiler Katalysatoren. Und durch die Zugabe von Kohlenstoffnanoröhrchen, die nach einem von Bayer entwickelten katalytischen Verfahren hergestellt werden, können die mechanische Stabilität und die elektrische Leitfähigkeit von Polymeren wesentlich verbessert werden.

### Vom Naturprodukt zum maßgeschneiderten Medikament

Chinarinde gegen Malaria, Fingerhut gegen Herzleiden, Weihrauch gegen Rheuma – weltweit wird eine breite Palette pflanzlicher Wirkstoffe in der Medizin eingesetzt. Viele davon enthalten asymmetrisch gebaute Moleküle, deren Spiegelbild unwirksam oder gar schädlich ist. Stellt man diese Substanzen im Labor her, erhält man häufig eine Mischung der beiden möglichen Formen. 1968 wurde das erste Verfahren eingeführt, das einen Rhodiumkatalysator nutzte, der selbst asymmetrisch aufgebaut war. Dank dieses Tricks entstand bei dem Prozess nur die wirksame Form eines Parkinson-Medikaments, das so genannte L-Dopa. Mittlerweile wurde dieses Prinzip vielfach abgewandelt, zum Beispiel auf asymmetrische Hydrierungen. Einen neuen Weg hat die Firma Evonik eingeschlagen: Sie nutzt Bakterien, die durch einen gentechnischen Trick über spezialisierte Enzyme verfügen – eine Technologie, die auf Grund der biologischen Herkunft der Enzym-Katalysatoren als Biokatalyse bezeichnet wird. Auf diesem Wege stellt das Unternehmen seit einigen Jahren in großem Maßstab asymmetrisch aufgebaute Alkohole und nicht-natürliche Aminosäuren her,



die als Schlüsselbausteine vor allem von der Pharmaindustrie zu medizinischen Wirkstoffen weiterverarbeitet werden.

### Vom Backen und Brauen bis zum Functional Food

Enzyme nutzt auch die Lebensmittelindustrie. Brot, alkoholische Getränke oder hochwertige Säfte könnten nicht ohne natürliche Biokatalysatoren hergestellt werden. Inzwischen ist das Erbgut vieler der verwendeten Mikroorganismen entschlüsselt worden. Das eröffnet die Möglichkeit, Enzyme gezielt zu verbessern und damit Prozesse noch gezielter und ressourcenschonender zu führen. Und auch bisher unbekannte Enzyme können mit Hilfe der Gentechnik aufgespürt werden, zum Beispiel aus Bodenproben. Die BASF nutzt dieses Verfahren bereits erfolgreich. Der Bedarf an „neuen“ Enzymen ist da. Denn einige Umsetzungen gelingen bisher noch nicht zufriedenstellend, zum Beispiel die Herstellung komplexer Zucker. Sie könnten für Lebensmittel mit einem gesundheitlichen Zusatznutzen (Functional Food) interessant sein.

### Vom Ammoniak zur Nahrung für alle

Zwei Drittel der Menschheit verzehrt Nahrungsmittel aus Pflanzen, die ihren Ertrag einem künstlichen Mineraldünger verdanken. Dessen wichtigste Bestandteile sind Salze des Ammoniaks, das nach dem „Haber-Bosch-Verfahren“ aus den Elementen Stickstoff und Wasserstoff hergestellt wird. Stickstoff ist Bestandteil der Luft; Wasserstoff wird aus Erdgas gewonnen. Katalysatoren sind für die Ammoniak-Herstellung, einen der wichtigsten Prozesse in der chemischen Industrie, in mehrfacher Hinsicht entscheidend:

- Nickelverbindungen ermöglichen die Herstellung von Wasserstoff aus Erdgas und Wasserdampf;
- in einem zweiten Schritt setzen Eisen-/Kupfer-Katalysatoren das dabei entstehende Kohlenmonoxid mit Wasserdampf zu weiterem Wasserstoff um;
- die eigentliche Reaktion von Stickstoff und Wasserstoff zu Ammoniak vollzieht sich an Katalysatoren, die etwa zu zwei Dritteln aus Eisenoxid bestehen.

Obwohl diese Prozesse schon seit fast einem Jahrhundert bekannt sind, versuchen Forscher, sie noch weiter zu optimieren. Denn trotz der Katalyse wird etwa ein Prozent der gesamten weltweit bereitgestellten Energie dafür benötigt, Wasserstoff für die Ammoniaksynthese herzustellen.

### Von den Aminosäuren zum Fleisch

Weizen und Mais, Soja und Erbsen – ein großer Teil der Ernte wird an Tiere verfüttert, die zur Fleischproduktion gezüchtet werden. Doch diesen Pflanzen fehlen jeweils eine oder mehrere der 20 Aminosäuren, aus denen Eiweiße bestehen. Der Stoffwechsel von Tieren und Menschen ist jedoch nicht in der Lage, diese Bestandteile selbst zu erzeugen: D,L-Methionin, L-Lysin, L-Threonin und L-Tryptophan gelten daher als unverzichtbarer Bestandteil der Ernährung. Sie müssen künstlich hergestellt und dem Futter zugesetzt werden, damit die Tiere gedeihen und hochwertiges Fleisch liefern. Die Produktion der drei letztgenannten Aminosäuren erfolgt großenteils mit Hilfe von Biokatalysatoren aus nachwachsenden Rohstoffen. D,L-Methionin wird auf chemischem Wege aus Substanzen hergestellt, die ihrerseits katalytisch erzeugt wurden. Auch Vitamine werden dem Tierfutter zugesetzt; sie werden ebenfalls auf katalytisch-chemischem oder biotechnologischem Wege hergestellt.

### Vom Sand zur Solarzelle

Silizium für photovoltaische Solarzellen könnte schon bald knapp werden. Forscher aus Bochum haben daher ein neues Verfahren entwickelt, um das graue Halbmetall bereitzustellen. Entscheidend ist dabei die Umwandlung vom festen Quarzsand zum Gas Trichlorsilan. Die Wissenschaftler haben herausgefunden, dass Kupfer-Katalysatoren diese Umsetzung beschleunigen. Ebenfalls in Bochum fanden Chemiker eher zufällig, wie sich die Oberfläche von Zinkoxid leitfähig machen lässt. Zinkoxid ist ein wichtiger Katalysator bei der Herstellung von Methanol; in der „veredelten“ Form könnte das Material ebenfalls in Photovoltaik-Solarzellen verwendet werden. Auch Alternativen zu Siliziumzellen werden verfolgt: Die Farbstoff-Solarzellen sollen dank neuer Katalysator-Materialien schon bald einen höheren Wirkungsgrad erreichen. Bisher werden bei ihnen im Labor 8 Prozent der Sonnenenergie in elektrischen Strom umgesetzt.



# KATALYSATOREN NACH MASS GESCHNEIDERT

## Wie man Katalysatoren findet und ihnen bei der Arbeit zusieht

Was gut ist, kann man immer noch verbessern. Das gilt auch in der Entwicklung von Katalysatoren, die laufend weitergeht: In der Wirtschaft bedeuten höhere Ausbeute, weniger Rohstoffeinsatz oder geringerer Kohlendioxid ausstoß bares Geld. Deshalb entwickeln Forscher auch bewährte Katalysatoren weiter, sie optimieren die Reaktoren und sie lernen, katalytischen Reaktionen auf der Ebene einzelner Atome zuzusehen.

### Die Stecknadel im Heuhaufen

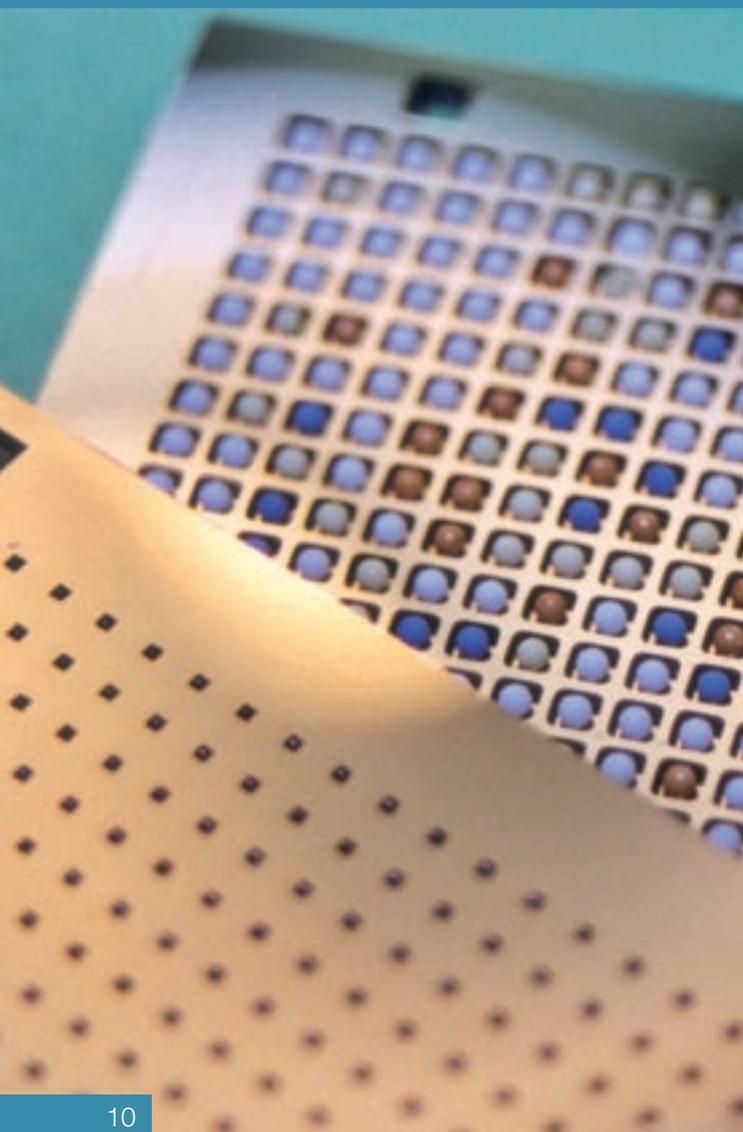
Brauchbare Zufallstreffer gibt es immer wieder, aber für einen Volltreffer reicht Glück allein nicht aus – diese alte Billardregel gilt auch in der Katalysatorforschung. Wer den optimalen Katalysator für eine bestimmte Reaktion finden will, der muss systematisch vorgehen. Ein Ansatz sind so genannte Hochdurchsatz-Techniken, die aus der Wirkstoffsuche in der Pharmaforschung bekannt sind. Das Prinzip ist simpel: Man stelle eine Vielzahl von Katalysatorsystemen her und teste sie gleichzeitig unter denselben Bedingungen. So lassen sich die geeignetsten wesentlich schneller identifizieren.

Inzwischen stehen automatisierte Testsysteme zur Verfügung, in denen 16, 48 oder gar hundert katalytische Umsetzungen zugleich ablaufen. Dabei wird der Strom der Ausgangsstoffe auf eine entsprechende Anzahl von Röhren aufgeteilt. Jede davon ist mit einem anderen Katalysator beschickt. Die meisten dieser Apparaturen sind für eine Temperatur bis zu 800 Grad Celsius bzw. einen Druck bis 200 bar ausgelegt. Sie eignen sich nicht nur für die Suche nach einem geeigneten Katalysatormaterial für eine bestimmte Umsetzung; dank der Parallelexperimente können auch die Prozessbedingungen viel schneller optimiert werden als früher. „Damit gewinnen wir wichtige Informationen für die Übertragung in den großtechnischen Maßstab“, berichtet Dirk Demuth, Geschäftsführer der hte AG in Heidelberg. Auch für Alterungstests, die Bewertung wechselnder Eingangsstoffe und zur Qualitätskontrolle können die Parallelreaktoren sehr effizient eingesetzt werden. Dabei sind nicht nur Chemiker gefragt. Auch Verfahrenstechniker, Software- und Datenbankspezialisten sind für die Hochdurchsatz-Techniken in der Katalysatorentwicklung unverzichtbar.

### Der gleiche ist nicht derselbe

Die Eigenschaften des Katalysators hängen nicht nur von der stofflichen Zusammensetzung ab. Auch die Details der einzelnen Schritte bei der Herstellung können entscheidend sein: Womit und wie schnell wurde gerührt? In welcher Reihenfolge wurden die Bestandteile zugegeben und wie rasch? Wie wurde die Temperatur kontrolliert? Es können viele unterschiedliche Systeme hergestellt werden, die im Prinzip alle aus den gleichen Bestandteilen zusammengesetzt sind. Die Hochdurchsatz-Techniken erlauben es, davon ausgehend rasch und zielgerichtet die bestmögliche Rezeptur zu entwickeln.

Bis vor kurzem mussten die Produkte aus den einzelnen Reaktionsräumen nacheinander analysiert werden. Das hat sich geändert: Am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung in Mülheim haben Forscher Verfahren zur par-



allelen Echtzeit-Analytik der Produkte entwickelt. Neben einer orts aufgelösten Infrarotspektroskopie kommt hier die „photoakustische Detektion“ zum Zug. Bei ihr regt ein Laser die Moleküle im Produktstrom an. Die entstehenden Druckpulse werden mit einem Mikrofon registriert; die Laufzeit verrät, in welchem Kanal eine gewünschte Reaktion abgelaufen ist.

Eine andere Entwicklung von hte basiert auf der Mikrotechnik und ermöglicht eine weitere Steigerung des Durchsatzes. Auf Silizium-Wafern werden bis zu 625 winzige Kanäle auf einer Fläche von 5 mal 5 Zentimetern untergebracht. In jedem davon sitzt ein Kügelchen, das mit einem potenziellen Katalysator beschichtet ist. Auch hier wird der Ausgangsstrom auf die einzelnen Löcher aufgeteilt – und auf der anderen Seite jeder Vertiefung wird gemessen, ob das gewünschte Produkt entstanden ist oder nicht. Die Industrie hat die neuen Hochdurchsatz-Techniken bereits zu schätzen gelernt: In den Entwicklungsabteilungen sind sie längst ein gängiges Werkzeug. Und die ersten Katalysatoren, die mit Hilfe der neuen Technologie gefunden wurden, sind inzwischen im industriellen Einsatz.

### Katalyse sichtbar gemacht

Die Struktur und die Oberfläche von Katalysatoren haben entscheidenden Einfluss auf deren Wirkungsweise. Diese Zusammenhänge sind kompliziert und müssen erforscht werden, wenn Katalysatoren gezielt und effektiv entwickelt werden sollen. Mit Hilfe speziell adaptierter analytischer Methoden gelingt es immer besser, Katalysatoren bei der Arbeit zu beobachten. Hierzu werden zum Beispiel verschiedene Röntgentechniken und Methoden der optischen Spektroskopie eingesetzt, teils bei hohen Temperaturen und Drücken. Mit dieser „In-situ-Analytik“ erhalten Forscher vor allem folgende wichtige Informationen:

- Welches ist das aktive Zentrum eines Katalysators bei einer bestimmten Umsetzung und welche Struktur hat es während der Reaktion?
- Wie sehen Zwischenstufen der Reaktion aus, die an der Oberfläche des Katalysators entstehen?
- Wie kommt es zur Deaktivierung von Katalysatoren, unter welchen Bedingungen werden sie vergiftet und was fördert ihre unerwünschte Alterung?

All diese Untersuchungen laufen berührungs- und zerstörungsfrei ab. Die rasche Entwicklung der In-situ-Analytik hat dazu geführt, dass zurzeit immer mehr industriell relevante Reaktionen genauer untersucht werden. Die Ergebnisse liefern Hinweise darauf, an welchen „Stellschrauben“ sich zu drehen lohnt, um einen Prozess zu

optimieren. Die Verfahren können auch unmittelbar mit einer Produktanalytik in Echtzeit verknüpft werden. Auf diese Weise wird sofort sichtbar, wie sich die Änderung von Reaktionsbedingungen auswirkt – am Katalysator selbst und auch, was die Produktzusammensetzung angeht.

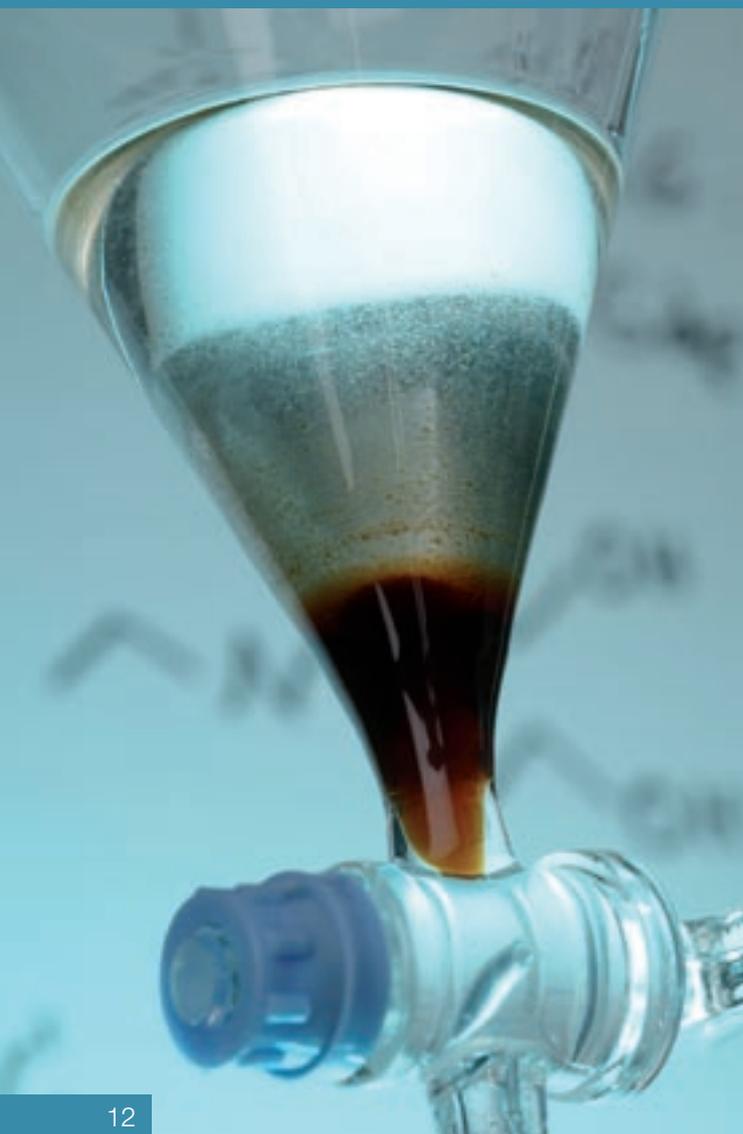
Eine Online-Steuerung von Katalysereaktoren mit Hilfe der In-situ-Analytik rückt so in greifbare Nähe, und die optimale Auslegung des Reaktors wird dadurch ebenfalls erleichtert. Sie ist ebenso wichtig, wie es gilt, den bestmöglichen Katalysator für eine Reaktion zu finden. Auch Rechenmodelle können dazu beitragen, Reaktoren zu optimieren. Inzwischen können lokale Strömungsverhältnisse selbst an Personalcomputern simuliert werden. Darüber hinaus ist es möglich, das Verhalten einzelner Atome vorauszuberechnen und damit die Vorgänge an katalytischen Zentren mathematisch zu modellieren. Die dafür erforderliche Rechenleistung ist allerdings deutlich größer und steht nur in Ausnahmefällen zur Verfügung. Doch schon jetzt ist es mit vereinfachten Modellen möglich, experimentelle Befunde besser zu verstehen. Und langfristig könnte es dank der Mathematik sogar gelingen, katalytische Prozesse vorherzusagen.



# KATALYSE GEHT NEUE WEGE

## Wie sich die Katalyse weiter entwickeln könnte

Wie werden die Katalysatoren im Jahr 2100 aussehen? Das weiß heute noch niemand, doch für die nächsten Jahrzehnte ist der Weg schon gebahnt: Unkonventionelle Lösungsmittel treten auf den Plan; Membranen und Fasern ergänzen die herkömmlichen Trägermaterialien. Und immer mehr Chemikalien werden unter sanften Bedingungen hergestellt - dank des Einsatzes von Enzymen.



### Neue Lösungen für die Katalyse

Viele katalytische Umsetzungen laufen in einem Lösungsmittel ab. Gelöste Katalysatoren werden jedoch häufig bei der Abtrennung zerstört und können nicht wieder verwendet werden. Zwei neue Ansätze bieten hier entscheidende Vorteile: die ionischen Flüssigkeiten und das überkritische Kohlendioxid.

Ionische Flüssigkeiten sind Salze, die bei Raumtemperatur flüssig sind. Als Lösungsmittel haben sie einige Pluspunkte: Sie verdampfen nicht und sind nicht brennbar. Außerdem lösen sich in ihnen nur Substanzen, die chemisch ähnlich aufgebaut sind wie ein Salz. So sind in den Flüssigsalzen beispielsweise viele homogene Katalysatoren gut löslich. Diese katalysieren organisch-chemische Reaktionen, bleiben dabei aber in der ionischen Flüssigkeit, die sich nicht mit der organischen Phase mischt. Dadurch können die Katalysatoren leicht vom Produkt abgetrennt werden. In jüngster Zeit haben Chemiker außerdem Verfahren entwickelt, mit dem sich feste Kügelchen aus Siliziumdioxid mit einem Film aus einer ionischen Flüssigkeit überziehen lassen. Ein darin gelöster Katalysator wird so an den festen Träger gekoppelt – aus dem homogenen wird damit ein heterogener Katalysator, der jedoch molekular genau definierte aktive Zentren aufweist.

Kohlendioxid überschreitet bei einer Temperatur von 31 Grad Celsius und einem Druck von 74 bar seinen so genannten kritischen Punkt, jenseits dessen die flüssige und die Gasphase nicht mehr getrennt existieren. Überkritisches  $\text{CO}_2$  ist eine Art Zwitter aus beiden und vereint die positiven Eigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen. So erleichtert es in der heterogenen Katalyse den Transport der Ausgangsstoffe zum aktiven Zentrum und führt selbst schwer flüchtige Produkte vom Katalysator ab. Auch bei homogen katalysierten Reaktionen kann überkritisches  $\text{CO}_2$  eingesetzt werden. Es lässt sich nach der Umsetzung sehr leicht aus der Reaktionsmischung entfernen: Bringt man den Druck oder die Temperatur wieder unter den kritischen Punkt, wird  $\text{CO}_2$  als Gas frei und lässt das Produkt zurück.

Überkritisches Kohlendioxid wird bereits in einigen industriellen Prozessen als Lösungsmittel eingesetzt. Beispielsweise werden im nordenglischen Consett in einer vielseitig und flexibel einsetzbaren Anlage mit heterogenen Katalysatoren Feinchemikalien hergestellt. Für die homogene Katalyse ergeben sich interessante Möglichkeiten dadurch, dass die Dichte dieses Lösungsmittels – und damit häufig der Reaktionsweg – verändert werden kann, indem man den Druck anpasst. Selbst Biokatalysatoren können in der unnatürlichen Umgebung solcher

Lösungsmittel arbeiten; mögliche Anwendungen werden derzeit an der RWTH Aachen erforscht.

### Bewährtes wieder verwendet

Es wird immer wichtiger, die teuren „Heiratsvermittler“ nach der Reaktion wieder zurückzugewinnen. Bei heterogenen Katalysatoren geschieht das praktisch von selbst, denn sie bleiben entweder im Reaktor oder können – zum Beispiel durch Filtration – abgetrennt werden. In der Regel werden die Ausgangsstoffe kontinuierlich nachgeliefert und die Produkte abgezogen. Anders bei homogenen Katalysatoren: Sie werden im Allgemeinen in chargenweise betriebenen Reaktoren eingesetzt und müssen am Ende der Reaktion abgetrennt werden. Inzwischen werden Möglichkeiten erprobt, dies durch Filtration zu erreichen. Forscher von der TU Berlin wollen dabei die Tatsache nutzen, dass sich Tenside (und mit ihnen der Katalysator) ab einer bestimmten Konzentration zu Mizellen zusammen lagern. Diese kugelförmigen Aggregate können durch Ultrafiltrationsmembranen abgetrennt werden. Und die Firma Evonik entwickelt ein Verfahren, um die teuren homogenen Rhodium-Katalysatorkomplexe durch die so genannte „organophile Nanofiltration“ aus dem Reaktionsgemisch zurückzugewinnen.

### Neue Reaktoren für die Katalyse

Membranen sind nicht nur als Filter interessant: Sie können direkt mit einem Katalysator beschichtet werden. Das erlaubt eine gleichmäßige Verteilung innerhalb des Reaktors und eine kontrollierte Reaktionsführung. Poröse Membranen können zum Beispiel so gestaltet werden, dass sie nur für das Reaktionsprodukt durchlässig sind, wodurch dieses laufend abgetrennt werden kann. Erprobt werden aber auch „dichte“ Membranen, die ausschließlich Sauerstoffmoleküle durchtreten lassen. Diese werden durch die Membran direkt zum Katalysator geleitet, wo selektive Oxidationen stattfinden. Dafür eignen sich verschiedene keramische Materialien wie Perowskite, die zudem hohen Temperaturen standhalten. Um den

Sauerstofffluss kontrollieren zu können, muss die Membran allerdings gasdicht in den Reaktor eingebaut werden, was bisher noch schwierig ist. Deshalb wird auch mit anorganischen Hohlfasern aus diesen Keramiken experimentiert. Sie können in Form von Bündeln dicht in einen Stahlreaktor eingesetzt werden. Versuche zeigen, dass katalysatorbeschichtete Keramikfasern beispielsweise für die selektiv katalysierte Reaktion von Methan zu Synthesegas, einem wertvollen Gemisch aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff, eingesetzt werden könnten.

### Bewährtes neu entdeckt

Warum das Rad neu erfinden? Die Natur verfügt über eine breite Palette von Biokatalysatoren, die Enzyme. Diese Proteine werden in Zellen gebildet und katalysieren Stoffwechselprozesse und biochemische Umsetzungen, die für Lebewesen wichtig sind. Mehr als hundert enzymatische Reaktionen werden in der chemischen und der pharmazeutischen Industrie eingesetzt. Zwei Beispiele:

- Acrylamid – in Lebensmitteln unerwünscht, doch in der Chemie ein wichtiges Zwischenprodukt beispielsweise bei der Herstellung von Kunststoffen – entsteht unter dem Einfluss des Enzyms Nitrilhydratase aus Acrylnitril. Dazu werden ganze Zellen des Bakteriums *Rhodococcus rhodochrous* in Fermentern eingesetzt. Das ersetzt teilweise den üblichen, durch Kupfer katalysierten Prozess.
- Das halbsynthetische Antibiotikum 7-Aminocephalosporinsäure wird aus Cephalosporin C mit Hilfe zweier an Träger fixierter Enzyme hergestellt – bei Raumtemperatur und in wässriger Lösung.

An dieser Reaktion wird der Vorteil biokatalytischer Prozesse deutlich: Sie lässt sich durchaus auch auf chemischem Wege erreichen; dann müssen aber das giftige Dichlormethan als Lösungsmittel und weitere Chemikalien eingesetzt werden. Dabei entstehen hundert Mal so viele Abfälle wie beim enzymatischen Prozess.



# KATALYSE – EIN BAUSTEIN FÜR DIE CHEMIE DER ZUKUNFT

## Was die Katalyse mit einer nachhaltigen Chemie zu tun hat

Die Chemie ist im Wandel begriffen – das war schon immer so. Auch zu Beginn des 21. Jahrhunderts steht sie vor Herausforderungen: Ihre Produkte sollen nicht nur besser und kostengünstiger werden, sondern ihre Herstellung soll auch möglichst wenig Energie und Rohstoffe verbrauchen. Katalysatoren werden einen entscheidenden Beitrag dazu leisten, dass die Chemie sich zu einer nachhaltig wirtschaftenden Branche entwickelt. Wesentlich wird dabei sein, dass ein großer Teil der Erzeugnisse aus nachwachsenden Rohstoffen stammt – und trotzdem die Qualität aufweist, die wir heute gewohnt sind.



### Weniger Energie aufwenden

Katalysatoren machen bei Raumtemperatur Reaktionen möglich, die sonst viel Energie und eine große Zahl von Reaktionsschritten benötigen würden. Vor allem homogene Katalysatoren haben hier der organisch-chemischen Synthese völlig neue Möglichkeiten eröffnet. So wurde am Leibniz-Institut für Katalysatorforschung in Rostock eine ganze Familie neuer Liganden für Palladium entwickelt, die inzwischen bei der Firma Evonik industriell eingesetzt werden. Mit ihrer Hilfe können zum Beispiel Anilinderivate, die als Vorstufen von Pharmaka dienen, erstmals bei Raumtemperatur hergestellt werden. Ebenso sind hoch effiziente Synthesen heterozyklischer Verbindungen unter milden Bedingungen möglich, beispielsweise von Indolalkömmlingen. Und auch heterogene Katalysatoren werden laufend weiter entwickelt, selbst für Prozesse, die in großem Maßstab eingespielt sind. So wurden für die Ammoniaksynthese Rutheniumkatalysatoren entwickelt, die zugleich Barium als „Promotor“ enthalten. Sie erlauben die Umsetzung bei niedrigerem Druck und niedrigeren Temperaturen als die bisher gängigen Eisenoxide. Auch in elektrochemischen Verfahren ermöglichen es neuartige Katalysatoren, den Energiebedarf deutlich zu reduzieren. Beispielsweise setzt die Firma Bayer großtechnisch so genannte Gasdiffusionselektroden mit einem Rhodium-Katalysator ein, um Chlor zurückzugewinnen.

### Rohstoffe effektiver nutzen

Neben Ammoniak können auch andere Grundchemikalien effektiver hergestellt werden, weil Forscher einen bekannten Katalyseprozess genau unter die Lupe nehmen. Das gilt zum Beispiel für die Herstellung von Styrol aus Ethylbenzol. Styrol ist eine der zehn wichtigsten Chemikalien: 20 Millionen Tonnen jährlich werden davon weltweit hergestellt. Als Katalysator dient dabei Eisenoxid. Robert Schlögl vom Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft hat vor einigen Jahren herausgefunden, dass die Reaktion nur dort abläuft, wo Eisenoxid mit Kohlenstoff bedeckt ist – ja sogar dass Kohlenstoff allein als Katalysator wirkt. Dazu muss er in einer Diamantstruktur vorliegen, deren Schichten gleich einer „Nanozwiebel“ in einem ganz bestimmten Winkel gewölbt sind. Nur dann weist der Kohlenstoff genügend aktive Zentren auf. Die Aufklärung dieses Katalyseprozesses hat enorme wirtschaftliche Konsequenzen. Zum einen, weil die Kohlenstoff-Zwiebeln für eine höhere Ausbeute und damit eine effizientere Nutzung der Rohstoffe sorgen. Der zweite Vorteil: „Beim heutigen industriellen Verfahren kann man den Eisenkatalysator nicht alleine betreiben, sondern muss einen zehnfachen Überschuss an Wasserdampf zusetzen, den man eigentlich nicht haben will“, sagt Schlögl. Setzt man die Nano-Diamantzwiebeln ein,

ist das nicht mehr nötig – und die Energie für die Erzeugung der großen Menge Wasserdampf kann sinnvoller genutzt werden.

### Abfälle veredeln statt verbrennen

Von Saudi-Arabien bis Venezuela – bei Ölförderanlagen bietet sich weltweit das gleiche Bild: Große Fackeln verbrennen Gas, das gemeinsam mit dem Erdöl aus dem Boden geholt wird. Denn die Nutzung dieses Gases ist in der Regel nicht wirtschaftlich. Das könnte sich bald ändern: Katalysatoren sorgen dafür, dass „Erdölbegleitgas“ für die Produktion von Grundchemikalien genutzt werden kann. Wie Erdgas besteht dieses hauptsächlich aus Methan. Es kann katalytisch zu Methanol oxidiert werden, wobei die bekannten Katalysatoren auf der Basis von Kupfer-Zink-Aluminiumoxid in den vergangenen Jahren deutlich verbessert werden konnten. Methanol kann weiter zu Propen (Propylen) umgesetzt werden, einem wichtigen und relativ teuren Zwischenprodukt, das vor allem zum Kunststoff Polypropylen weiter verarbeitet wird. Das „Methanol to propylene“(MTP)-Verfahren der Firma Lurgi nutzt dabei Katalysatoren der Süd-Chemie, die auf Zeolithen basieren.

### Nachwachsende Rohstoffe nutzen

Die Vision ist bestechend: Die Raffinerie der Zukunft bezieht ihren Rohstoff von Landwirten, die Holz, Stroh oder

Grüngut liefern. Erdöl hat ausgedient. Bei der Herstellung der gewohnten Grundbausteine für die Chemieindustrie wird deshalb kein Kohlendioxid frei, das über Jahr-millionen fossil gebunden war, sondern nur so viel von dem Treibhausgas, wie die Pflanzen einige Jahre zuvor aufgenommen hatten. Eine Illusion? Einerseits ja, denn eine solche „Bio-Raffinerie“ gibt es noch nicht. Aber die ersten Teilreaktionen werden in kleinem Maßstab erprobt und Katalysatoren dafür entwickelt. So ging in Karlsruhe Mitte 2007 eine Pilotanlage in Betrieb, die trockene Bio-masse bei 500 Grad zersetzt. „Dabei entsteht ein lager-stabiles, pumpbares Öl“, sagt Eckhard Dinjus vom For-schungszentrum Karlsruhe, „das dann in herkömmlichen Raffinerien zu Synthesegas weiter verarbeitet werden kann“. Entsprechende Katalysatoren werden erprobt.

Auch die Nutzung pflanzlicher Rohstoffe für chemische Prozesse wird immer wichtiger: Öle und Fette, Zucker und vieles mehr werden nicht nur zu Treibstoffen, sondern auch zu Chemierohstoffen weiter verarbeitet. So arbeiten mehrere Unternehmen daran, Acrylsäure aus Zucker oder Glycerin (einem Nebenprodukt der Biodiesel-Herstellung) herzustellen. Acrylsäure ist ein Vorprodukt zur Herstellung moderner „Superabsorber“ für Babywindeln. Auch Tenside, Lösungsmittel und Kunststoff-Bausteine lassen sich schon jetzt aus Pflanzen erzeugen. Was sich davon durchsetzen wird, ist noch offen. Doch eines ist sicher: Katalysatoren werden auch in der „Bio-Raffinerie“ der Zukunft unverzichtbar sein.



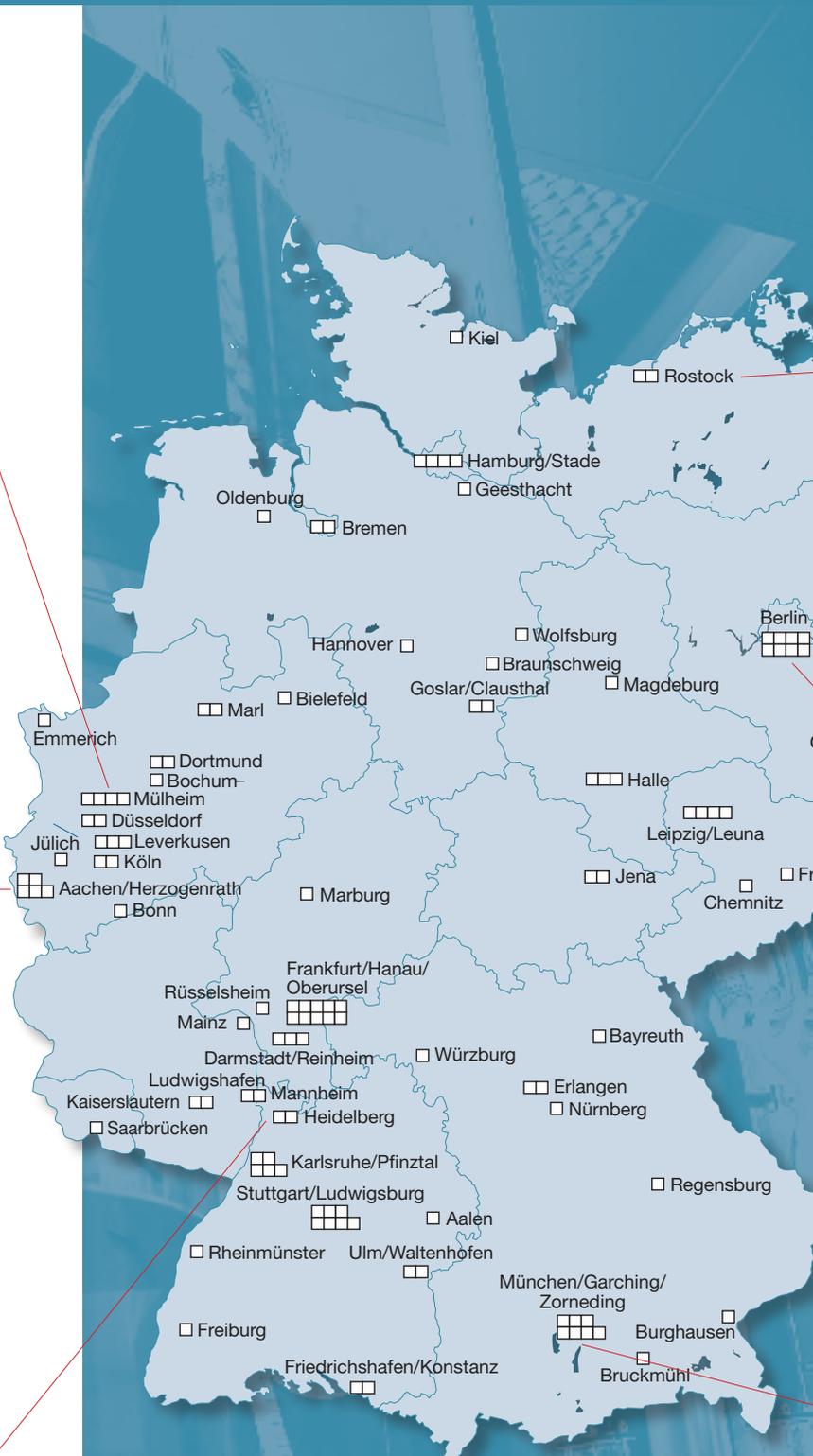
# KATALYSE IN DEUTSCHLAND

## Wo Katalytiker forschen – einige Beispiele

Das **Max-Planck-Institut für Kohlenforschung** ist vollständig auf die Katalyse ausgerichtet und vereinigt in fünf Abteilungen die Bereiche homogene Katalyse inklusive der Organokatalyse, heterogene Katalyse, Enzymkatalyse und Theorie in der Katalyse. Die Arbeit des Instituts zielt auf das Auffinden neuer katalytischer Systeme und Materialien, aber auch Untersuchungen zum Verständnis katalytischer Reaktionen spielen eine wesentliche Rolle. Das Institut ist in eine Reihe von Aktivitäten mit externen Partnern eingebunden, wie in den Sonderforschungsbereich 558 „Metall-Substrat-Wechselwirkungen in der Heterogenen Katalyse“ mit der Ruhr-Universität Bochum, in den Exzellenzcluster „Tailor-made fuels from biomass“ mit der RWTH Aachen sowie in eine Reihe von Industriekooperationen. [www.mpi-muelheim.mpg.de](http://www.mpi-muelheim.mpg.de)

Das **Zentrum für Katalysforschung** wurde gemeinsam von der RWTH Aachen, Bayer MaterialScience AG und Bayer Technology Services GmbH gegründet. In dem mit Unterstützung des Landes Nordrhein-Westfalen etablierten Zentrum forschen etwa 15 Wissenschaftler an grundlegenden Fragestellungen im Bereich der homogenen und heterogenen Katalyse. Ziel ist die Erforschung und Entwicklung nachhaltiger katalytischer Prozesse im Bereich der technischen Chemie und der Polymerchemie mit Schwerpunkten in der Synthese niedermolekularer Polymerbausteine, CO<sub>2</sub>-Fixierung in Polymeren, Aktivierung von CH-Bindungen, und Redoxkatalyse. Der wissenschaftliche Ansatz umfasst die Katalyse von den molekularen Grundlagen bis zur reaktionstechnischen Umsetzung. [www.catalyticcenter.rwth-aachen.de](http://www.catalyticcenter.rwth-aachen.de)

Das an der **Universität Heidelberg** angesiedelte „Catalysis Research Laboratory“ (CaRLa) vereint Grundlagenforschung der Universität mit angewandter Forschung der BASF. CaRLa wird von der BASF, der Universität und dem Land Baden-Württemberg finanziert. Gemeinsam mit den Forschern des Heidelberger Sonderforschungsbereich 623 „Molekulare Katalysatoren“ arbeiten ein international zusammengesetztes Team aus zwölf Postdoktoranden und einem vor Ort verantwortlichen Laborleiter der BASF im Technologiepark Heidelberg auf dem Campus der Universität an akademischer und industriell motivierter Grundlagenforschung. [www.carla-hd.de](http://www.carla-hd.de)



Die komplette Forschungslandkarte finden Sie unter [www.connecat.de](http://www.connecat.de)



Das **Leibniz-Institut für Katalyse e. V. an der Universität Rostock (LIKAT)** ist durch die Fusion des Leibniz-Instituts für Organische Katalyse (IfOK) mit dem Institut für Angewandte Chemie Berlin-Adlershof (ACA) entstanden und zählt jetzt zu den größten europäischen Forschungseinrichtungen auf dem Gebiet der angewandten Katalysforschung. Schwerpunkt der Arbeiten im Bereich der homogenen und heterogenen Katalyse ist die Weiterentwicklung von Ergebnissen der Grundlagenforschung hin zur technischen Umsetzung. Enge industrielle Kooperationen, wie z.B. durch einen langfristigen Rahmenforschungsvertrag mit der Evonik Industries AG, gewährleisten eine große Effizienz der Forschung an der Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Industrie.

[www.catalysis.de](http://www.catalysis.de)

Der Exzellenzcluster **„UniCat-Unifying Concepts in Catalysis“** vereint 40 Arbeitsgruppen aus der Chemie, Physik, Biologie und den Ingenieurwissenschaften aus den drei Berliner Universitäten, der Universität Potsdam, dem Fritz-Haber-Institut und dem Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung mit sechs Industriepartnern in einem Konsortium, das neue (bio)chemisch-technologische Konzepte und Verfahren für eine effiziente Nutzung von Ressourcen erarbeiten möchte. Schwerpunkte sind die „Überwindung der Materialienlücke in der Katalyse“, „Intelligente, natürliche und künstliche Enzyme“ und „Komplexe Reaktionstechnik“.

[www.unicat.tu-berlin.de](http://www.unicat.tu-berlin.de)

Das **TUM Catalysis Research Center (TUM-CRC)** bündelt als Zentralinstitut die breit angelegte Katalysforschung zu einem strategischen hochschulweiten Forschungsschwerpunkt der TU München. Die Forschung reicht von homogener und heterogener Katalyse über Organo-, Bio- und Elektrokatalyse hin zur Theoretischen und Physikalischen Chemie der Katalyse und der Reaktionstechnik. Mit einem neuen Laborgebäude auf dem Campus Garching und fünf neuen Professuren antworten die TUM und der Freistaat Bayern auf aktuelle Herausforderungen mit Schwerpunkten wie „Multifunktionelle und nanostrukturierte Katalysatoren“, „Katalyse für Energieträger und Energieumwandlung“ und „Katalyse in der Weißen Biotechnologie“.

[www.tum.de](http://www.tum.de)

## Wie Katalytiker ausgebildet werden

Das Prinzip Nachhaltigkeit wird in der Chemie immer wichtiger. Auch deshalb hat sich die Katalyse im Laufe der letzten fünfzig Jahre zu dem dominierenden Syntheseprinzip entwickelt. Neun von zehn chemischen Produkten werden zumindest in einer Stufe mit Hilfe eines Katalysators hergestellt. Mit optimierten katalytischen Verfahren können ökologische und ökonomische Zielvorstellungen der industriellen chemischen Produktion in idealer Weise zusammengeführt werden. Deshalb sind sie die entscheidende Zukunftstechnologie. Für die Lehre bedeutet das, dass sich Aspekte der Katalyse in allen Fachgebieten der Chemie wiederfinden. Ein moderner Chemiker erhält deshalb bereits im Bachelor-Studium eine grundlegende Ausbildung auf dem Gebiet der Katalyse.

In der Masterausbildung wird die Katalyse an Universitäten als Schwerpunktrichtung oder Vertiefungsfach in den Studiengängen Chemie oder Chemieingenieurwesen stärker akzentuiert angeboten. Weiterhin wurden neben Graduierten-Schulen an einzelnen Universitäten flächendeckend Lehrverbände (Informationen unter [www.connecat.de](http://www.connecat.de)) eingerichtet, die Studierenden höherer Semester, Promovierenden und Nachwuchswissenschaftlern die vielfältigen Aspekte der Katalyse näherbringen. Diese Kurse sind hochschulübergreifend und interdisziplinär konzipiert und vermitteln die gemeinsamen Grundlagen der Katalyse unabhängig von Barrieren zwischen den traditionellen akademischen Fächern. Kompetente Referenten aus den verschiedenen Spezialgebieten gewährleisten den aktuellsten Wissensstand. Die ausgezeichnete Anbindung der Ausbildung durch enge Kooperationen zwischen Universitäten und Industrie erleichtern den Einstieg der Absolventen ins Berufsleben.



# GESCHICHTE DER KATALYSE

## Wichtige Meilensteine der Katalyse

- Henry Davy beobachtet, dass ein Platindraht Reaktionen mit Sauerstoff erleichtert
- Johann Wolfgang Döbereiner entzündet Wasserstoffgas an Platin
- Jöns Jacob Berzelius formuliert die erste Definition von Katalyse
- Wilhelm Ostwald definiert Katalyse als „die Beschleunigung eines langsam verlaufenden chemischen Vorgangs durch die Gegenwart eines fremden Stoffes“
- „Kontaktverfahren“ zur Herstellung von Schwefelsäure bei der BASF
- Oxidation von Ammoniak zu Salpetersäure durch Wilhelm Ostwald
- Ammoniak-Herstellung aus den Elementen durch Fritz Haber und Carl Bosch
- Erste systematische Durchmusterung mehrerer tausend Katalysatoren durch Alwin Mittasch
- Herstellung flüssiger Kohlenwasserstoffe aus Synthesegas durch Franz Fischer und Hans Tropsch
- Niederdruck-Polymerisation von Olefinen zu Kunststoffen durch Karl Ziegler und Giulio Natta
- Anfänge der asymmetrischen Katalyse durch Arbeiten von William S. Knowles
- Dreiwege-Katalysator zur Reinigung von Ottomotor-Abgasen durch General Motors und Ford
- Neue Polymere durch den Einsatz von Metallocen-Katalysatoren
- Gezielte Optimierung von Biokatalysatoren mit Methoden der Gentechnik
- Entstickung von Dieselmotor-Abgasen

## Chemie-Nobelpreise für Katalyse- und Enzymforscher

- 1816**
- 1823**
- 1835**
- 1894**
- 1900**
- 1906**
- 1908**
- 1909** Wilhelm Ostwald: prägte den Begriff Katalyse
- 1910**
- 1918** Fritz Haber: Katalysatoren für die Ammoniaksynthese
- 1920**
- 1929** Arthur Harden, Hans von Euler-Chelpin: Enzyme zur Zuckervergärung
- 1931** Carl Bosch, Friedrich Bergius: Katalytische Hochdruck-Reaktionen
- 1953**
- 1963** Karl Ziegler, Giulio Natta: Polymersynthese
- 1968**
- 1972** Christian Anfinsen, Stanford Moore, William H. Stein: katalytische Aktivität des Enzyms Ribonuklease
- 1974**
- 1991**
- 1997** Paul D. Boyer, John E. Walker, Jens C. Skou: Enzyme in der ATP-Synthese
- 2001** William S. Knowles, Ryoji Noyori, K. Barry Sharpless: Katalyse mit asymmetrischen Molekülen
- 2005** Yves Chauvin, Robert S. Grubbs, Richard R. Schrock: Katalyse in der Metathese-Reaktion
- 2007** Gerhard Ertl: chemische Vorgänge auf der Oberfläche von Katalysatoren

## **Herausgeber**

Kompetenznetzwerk Katalyse ConNeCat  
c/o DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik  
und Biotechnologie e.V.  
Frankfurt am Main

## **Bestellungen**

Schriftlich an den Herausgeber:  
DECHEMA e.V.  
ConNeCat-Sekretariat  
Theodor-Heuss-Allee 25  
60486 Frankfurt am Main  
oder per  
Tel.: 069 7564-452  
Fax: 069 7564-117  
E-Mail: [connecat@dechema.de](mailto:connecat@dechema.de)

## **Koordination**

DECHEMA e.V., Frankfurt am Main  
Dr. Dana Demtröder

## **Autoren**

Dr. Hellmuth Nordwig, Fürstenfeldbruck  
ConNeCat-Vorstand (S. 16/17)

## **Gestaltung und Satz**

Peter Mück, Wächtersbach  
[www.pm-grafikdesign.de](http://www.pm-grafikdesign.de)

## **Druck**

Seltersdruck GmbH, Selters/Ts.

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung, Verbreitung und öffentlichen Wiedergabe in jeder Form, einschließlich einer Verwertung in elektronischen Medien, der reprografischen Vervielfältigung und einer digitalen Verbreitung, ausdrücklich vorbehalten. Bilder und Abbildungen wurden zur Verfügung gestellt mit freundlicher Genehmigung der im Bildnachweis aufgeführten Quellen.

Frankfurt 2007, 1. Auflage

## **BILDNACHWEIS**

AB Typoform, BASF SE, Wolfram Däumel am Fritz-Haber-Institut der MPG,  
Evonik Industries AG, hte AG, LIKAT



**DECHEMA**

Gesellschaft für  
Chemische Technik und  
Biotechnologie e.V.

ConNeCat-Sekretariat bei der DECHEMA  
Gesellschaft für Chemische Technik  
und Biotechnologie e.V.  
Theodor-Heuss Allee 25  
60486 Frankfurt am Main

Telefon: 069 7564-452

Telefax: 069 7564-117

E-Mail: [connecat@dechema.de](mailto:connecat@dechema.de)

Internet: [www.connecat.de](http://www.connecat.de)