

Technische Chemie 2002

Der ökonomische und ökologische Druck auf Entwicklungsarbeiten in der Technischen Chemie steigt. Ansätze zur Kostensenkung und zu umweltfreundlicheren Verfahren finden sich daher immer häufiger, z. B. als Maßnahmen der Prozessintensivierung und als Innovationen in der Katalyse. Die Bioverfahrenstechnik gewinnt gegenüber klassischen chemischen Prozessen an Stellenwert.

◆ Es mag als grundsätzlicher Trend nicht nur für weite Bereiche der Technischen Chemie gelten, dass sich der Fortschritt häufig eher in Form inkrementeller Verbesserungen als in sprunghaften Innovationen vollzieht. Vor diesem Hintergrund stand das Autorenteam unter der diesjährigen Maßgabe einer pointierten Darstellung mit Fokus auf wenige Highlights vor einer besonderen Herausforderung. Das Ergebnis ist die Beschränkung auf die in Abbildung 1 aufgeführten Bereiche. Einerseits wird über Themen berichtet, die auch in der Vergangenheit Gegenstand von Trendberichten waren, wenn sich wie z. B. in der Mikroverfahrenstechnik eine Trendwende abzeichnet. Andererseits wird den zunehmend wichtiger werdenden Themen der Bioverfahrenstechnik mehr Raum gewidmet als in früheren Trendberichten.

Abb. 1.
Die Themen des
Trendberichts im
Überblick.

Chemische Verfahrenstechnik

◆ Aufgrund des schwierigen wirtschaftlichen Umfeldes in der chemischen Industrie haben Maßnahmen zur Kostenreduzierung, insbesondere durch Optimierung der chemischen Prozesse, weiterhin erhebliche Relevanz. Dies äußert sich z. B. in der Spezialitäten- und Feinchemie, wo der Verbesserung der Technologieplattform angesichts des zunehmenden Preisdrucks und vorhandener Überkapazitäten zentrale Bedeutung zukommt. Die chemisch-verfahrenstechnischen Ansätze hierfür lassen sich unter dem Begriff Prozessintensivierung zusammenfassen. Durch den Einsatz multifunktionaler Reaktionstechniken oder spezieller Mehrphasenapparate wird versucht, Preisführerschaft durch Investitions-

und Betriebskostenvorteile anzustreben oder durch technische Alleinstellungsmerkmale zum Exklusivanbieter zu werden. Stellvertretend seien hier der Einsatz der Mikroverfahrenstechnik, strukturierter Katalysatoreinbauten und die Membrantechnik genannt. Ein Beispiel für die Aktualität dieses Themas verdeutlicht der Zusammenschluss verschiedener Industrievertreter (Avecia, GlaxoSmithKline, Degussa Fine Chemicals und andere) mit Hochschulgruppen zur Industriepattform BRITEST (Best Route Innovative Technology Evaluation and Selection Techniques). BRITEST hat sich die Entwicklung einer Art Toolbox für die Produktion im Tonnen-Maßstab, beispielsweise durch Einsatz flexibler Strömungsreaktoren, zum Ziel gesetzt. Erwähnenswert sind ferner die positiven Effekte der Prozessintensivierung auf Ressourcennutzung, Sicherheit und Umweltfreundlichkeit.¹⁾

| Chemische Verfahrenstechnik | Katalyse | Bio Verfahrenstechnik |
|--|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Mikroverfahrenstechnik • Strukturierte Katalysatoreinbauten • Membranreaktoren | <ul style="list-style-type: none"> • Katalysatormodelle • Neue Materialien • Neues zu bekannten Materialien / Reaktionen • Anwendungen | <ul style="list-style-type: none"> • virtuelle Zelle • Nachweis rekombinanter Proteine/Organismen • Produktaufarbeitung • Biokatalyse • Screeningsysteme, gerichtete Evolution |

Mikroverfahrenstechnik

◆ In der Feinchemieproduktion wird intensiver denn je die Frage gestellt, ob es eine Welt jenseits des klassischen Satzreaktors gibt. Zwar handelt es sich bei diesem um das „Arbeitstier“ der chemisch-pharmazeutischen Industrie, insbesondere bei Mehrzweckanlagen. Es zeigt sich aber, dass bei der Übertragung von Laborentwicklungen in den tech-

nischen Maßstab häufig Einbußen bei Selektivität und Ausbeute aufgrund schlechter Mischleistung oder Wärmeabfuhr auftreten. Das ist ein Problem, welches besonders bei den in der Feinchemie vielfach vorkommenden Mehrphasenreaktionen²⁾ auftritt und dessen Lösung in der kontinuierlichen Reaktionsführung in mikrostrukturierten Bauteilen liegen kann. Aufgrund des geringen Hold-ups in solchen Bauteilen lässt sich ferner das Gefahrenpotential von kritisch exothermen Reaktionen reduzieren. Aus diesem Grund war im vergangenen Jahr, wie auch in den Jahren zuvor, die Anwendung von Mikroreaktoren zur Optimierung von Vermischung und Wärmeabfuhr ein viel diskutierter Ansatz. Diesen Trend greift das strategische Forschungsvorhaben „Modulare Mikroverfahrenstechnik“ im Rahmen des BMBF-Förderkonzeptes Mikrosystemtechnik 2000+ auf, das die Entwicklung eines Baukastens kompatibler mikroverfahrenstechnischer Module zum Ziel hat. Mikroreaktoren bewährten sich besonders beim pragmatischen Einsatz als hocheffiziente Werkzeuge zur Untersuchung von Reaktionen im Labor, z. B. als Optimierungs- und Screeningtool in Forschung und Entwicklung.³⁾ Die Anwendung von Mikroreaktoren im technischen Maßstab blieb aber auch 2002 auf wenige Beispiele beschränkt.⁴⁾ Hintergrund ist die mangelnde Standzeit dieser Reaktoren, die oft auf Verstopfungen durch verunreinigte Prozessströme zurückzuführen ist. Daher zeichnet sich eine Trendwende vom technisch Machbaren hin zum technisch Notwendigen ab. Grund ist, dass sich die Eigenschaften von Mikrobauteilen (hohe Wärmeabfuhr, definierte Vermischung, geringes Hold-up) in vielen chemischen Prozessen auch mit Bauteilen erreichen lassen, deren Abmessungen im Millimeter-Bereich liegen – ohne deren Verstopfungsanfälligkeit aufzuweisen.²⁾ Ein Ansatz für die Realisierung dieses Konzeptes ist der in Abbildung 2 gezeigte kompakte modulare Strömungsrohrreaktor von Bayer.

Dieser zeichnet sich durch einen optimierten Stoff- und Wärmeübergang einerseits und die Anwendbarkeit im technischen Maßstab andererseits aus. Mit Reaktoren dieser Art lassen sich kleine Produktionskampagnen bis zu mehreren 100 kg durchführen, wie sie beispielsweise für Bemusterungszwecke im Life-Science-Sektor benötigt werden. Der Einsatzbereich solcher Anlagen erstreckt sich über eine Vielzahl organischer Reaktionen mit hohen Ansprüchen an Mischgüte und Wärmeabfuhr bis in den Tieftemperaturbereich.

Reaktoren mit strukturierten Katalysatoreinbauten

◆ Der Einsatz oberflächenmodifizierter, monolithischer Wabenkörper, wie sie aus der Abgastechnik seit Jahrzehnten bekannt sind, wird als Erweiterung des Einsatzgebiets für katalytische Gas/flüssig-Reaktionen zunehmend diskutiert. Diese Katalysatorträger weisen aufgrund dünner Katalysatorschichten kurze Diffusionswege auf. Nachteile von Rieselbettverfahren, wie Totzonen, unzureichende Benetzung und eine schlechte Ausnutzung der Katalysatorformkörper, können vermieden werden. So ist bei der Hydrierung von 1-Octen und Toluol die Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit nicht nur auf die Erhöhung der geometrischen Oberfläche, sondern auch auf die signifikante Verbesserung des Gas/flüssig/fest-Stofftransportes zurückzuführen.⁵⁾ Es resultiert eine deutliche Erhöhung der Katalysatorausnutzung gegenüber der klassischen Rieselbettverfahren. Die Kernhydrierung von Aromaten kann ebenfalls an katalytisch beschichteten Monolithkatalysatoren durchgeführt werden, wobei Gas und Flüssigkeit im Gegenstrom geführt werden.⁶⁾ Die Reaktion lässt sich im Vergleich zu klassischen Reaktorkonzepten bei niedrigeren Betriebsdrücken und -temperaturen ohne Einbußen in der Raum-Zeit-Ausbeute durchführen. Durch den Einsatz monolithischer Wabenkörper lassen sich ferner neue Reaktorkonzepte, z. B. bei Veresterungen von Carbonsäuren mit Alko-



Abb. 2. Kompakter modularer Strömungsrohrreaktor der Bayer Technology Services, Leverkusen.

holen, realisieren. Durch Einsatz einer „Reaktiven Strippung“ kann das entstehende Reaktionswasser, das häufig zu einer Inhibierung heterogener Säurekatalysatoren und gleichgewichtsbedingten Umsatzlimitierungen führt, entfernt werden. Zu diesem Zweck wurde in einem Zeolithbeschichteten Monolithen bei der Veresterung von Hexansäure mit 1-Octanol ein Stripgas im Gegenstrom geführt.⁷⁾ Abbildung 3 stellt schematisch den Reaktoraufbau dar.

Durch den verbesserten Wasserausstrom konnte die Reaktionsgeschwindigkeit deutlich erhöht sowie der Umsatz der Gleichgewichtsreaktion vervollständigt werden. Hergestellt werden die beschichteten Monolithe durch Tauchung der Wabenkörper in Suspensionen (Dipcoating) mit anschließender Trocknung oder Calcinierung sowie ggf. Tränkung der so erzeugten Beschichtung (Washcoats).

Membranreaktoren

◆ Membranreaktoren sind multifunktionelle Reaktionsapparate, in denen chemische Reaktion sowie

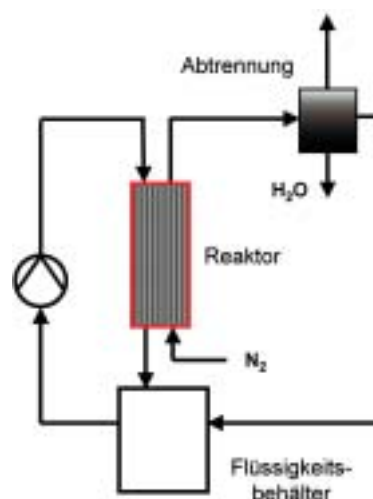


Abb. 3. Prinzipskizze eines Reaktors zur Reaktiven Strippung (nach Lit.⁷⁾).

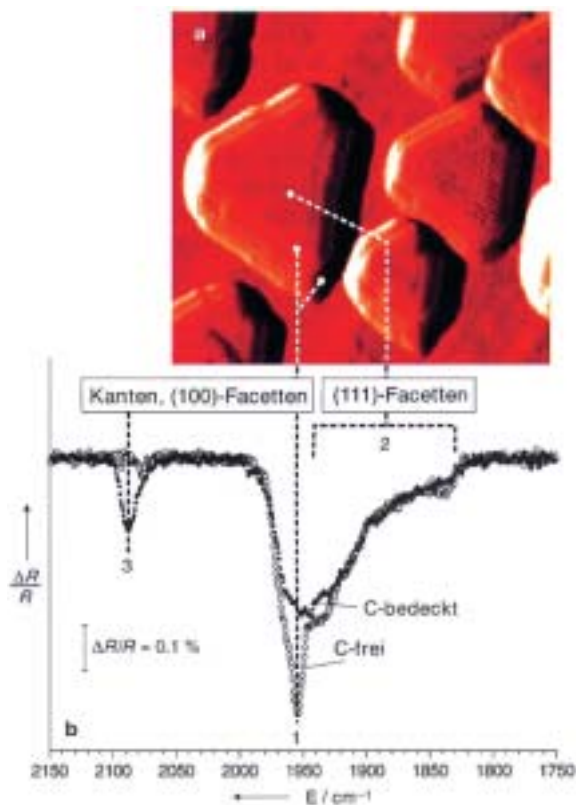


Abb. 4. a) STM-Bild nanokristalliner Pd-Partikeln auf $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni-Al}(110)$, sowie b) RAIR-Spektren von an diesen Partikeln adsorbiertem CO. Peak 1 wird von CO verursacht, das an Ecken und Kanten auf einzelnen Pd-Atomen adsorbiert ist. Nach Zudosieren von CH_3OH setzt sich C bevorzugt an diesen Ecken und Kanten ab und verdrängt das CO von den Pd-Atomen, so dass Peak 1 verschwindet. In geringem Ausmaß findet noch CO-Adsorption auf Pd-Atome verbrückenden Plätzen statt (Peak 3). Der Bereich 2 stammt von auf (111)-Facetten adsorbiertem CO und bleibt unverändert.¹⁴⁾

umsatz- oder selektivitätssteigernde Trennoperationen integriert sind. Als Forschungsschwerpunkte des letzten Jahres lassen sich Aktivitäten in der Petrochemie, insbesondere bei der direkten Funktionalisierung von reaktionsträgen Alkanen oder Aromaten zu Produkten mit höherer Wertschöpfung identifizieren. Beispielsweise kann die klassisch zweistufige Synthese von Acrolein, ausgehend von Propan, im Membranreaktor einstufig an einem $\text{Ag}_{0,01}\text{Bi}_{0,85}\text{V}_{0,54}\text{Mo}_{0,45}\text{O}_4$ -Katalysator mit einer um den Faktor fünf erhöhten Selektivität durchgeführt werden.⁸⁾ Ein weiteres Beispiel ist die direkte Phenolsynthese aus Benzol mit Sauerstoff und Wasserstoff in einem Pd-Membranreaktor als eine Alternative zum zweistufigen Hock-Prozess. Es werden Selektivitäten von

80 bis 97% bei Umsätzen von 2 bis 16% mit Produktivitäten von $1,5 \text{ kg}_{\text{Phenol}} \cdot \text{kg}_{\text{Kat}}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ erreicht.⁹⁾

Bei Flüssigphasenreaktionen, z. B. Veresterungen,¹⁰⁾ werden Membranreaktoren in der Pervaporation bereits großtechnisch eingesetzt (Vorreiter ist die Firma Mitsui).¹¹⁾

Katalyse

◆ Dieser Überblick setzt Schwerpunkte auf dem Gebiet der heterogenen Katalyse, insbesondere der erkenntnisorientierten Katalysatorentwicklung. Interessenten am dynamischen Gebiet des High-Throughput-Screenings seien auf Berichte über den 1. Workshop on Automated Synthesis and High-Throughput Screening in Polymer and Materials Research¹²⁾ verwiesen. Eine äußerst interessante Entwicklung auf dem Gebiet der homogenen Katalyse soll nicht ungenannt bleiben: Die katalytische Olefinpolymerisation in wässrigen Systemen,¹³⁾ die zu weiterem Wandel in der Polymerisationstechnologie führen könnte (siehe dazu auch den Trendbericht „Makromolekulare Chemie“, diese Nachrichten, S. 340).

Katalysatormodelle

◆ Seit langem leistet die Surface Science bedeutende Beiträge zum grundlegenden Verständnis der heterogenen Katalyse (z. B. Band 45 (2000) von *Advances in Catalysis*). Realen Katalysatoren besonders nahe kommen die in der Gruppe von Freund (Berlin) entwickelten Modell-Metall-Träger-Katalysatoren, beispielsweise Pd-Teilchen auf geordneten metallgetragenen Al_2O_3 -Filmen. An ihnen ist nun für die Methanolzersetzung der erste direkte Beweis für die Koexistenz aktiver Zentren verschiedener Reaktivität auf kleinen Metallpartikeln geführt worden.¹⁴⁾ Abbildung 4 zeigt ein rasterstunnelmikroskopisches (STM-) Bild solcher Partikeln: Man sieht überwiegend (111)-Facetten, begrenzt

durch Kantenatome, dazu wenige (100)-Facetten.

Die Zentren werden nach CO-Adsorption IR-spektroskopisch differenziert (Abbildung 4, unten). Die kinetische Analyse (Molekularstrahllexperimente) zeigt, dass die Dehydrierung von Methanol zu CO schnell auf den (111)-Facetten abläuft, während die Kantenatome einen langsameren C-O-Bindungsbruch katalysieren und sich durch Adsorption von C- und CH_x -Spezies selbst vergiften.

Besondere Fortschritte sind beim Studium theoretischer Modelle für heterogene Katalysatoren zu verzeichnen (siehe z. B. Lit.¹⁵⁾). Eine Reihe von Arbeitskreisen (z. B. Sauer, Berlin, van Santen, Eindhoven, NL, Nørskov, Lyngby, DK) arbeitet an der Vorhersage von Intermediaten, Übergangszuständen und Reaktionsgeschwindigkeiten. Nørskov et al. greifen alte heuristische Konzepte der Katalyse neu auf und quantifizieren diese geradezu, so das Konzept der Liganden-/Ensembleeffekte in der Legierungskatalyse, Vulkankurven und elektronische Faktoren der Promotierung (Beispiel Ammoniaksynthese¹⁶⁾). In Lit.¹⁶⁾ wird auch ein auf DFT-Rechnungen beruhendes mikrokinetisches Modell der NH_3 -Synthese an Ruthenium mit realistischen Reaktionsgeschwindigkeiten vorgestellt.

Neue Materialien

◆ Reguläre mesoporöse Festkörper werden heute in vielen Varianten synthetisiert und zu Katalysatoren modifiziert.¹⁷⁾ Die neueste Entwicklung hat eine Reihe für katalytische Anwendungen sehr interessanter Festkörper hervorgebracht, so z. B. reguläre aluminosilikatische Mesophasen mit mikroporösen Wänden. Pinnavaia et al. (East Lansing, USA) und Xiao et al. (Changchun, China) berichteten über lineare Porensysteme, deren Wände mit Y-, ZSM-5- oder Beta-Struktur die Stabilität und Acidität der Zeolithe aufweisen.¹⁷⁾ Kaliaguine et al. (Quebec, Kanada) präparierten „zeolite-coated mesoporous aluminosilicates“: Mesopha-

sen (SBA-15), deren Wände durch sekundäre Kristallisation partiell in Zeolithkristalle umgewandelt sind.¹⁸⁾

Hinsichtlich weiterer neuer katalytischer Materialien sei auf zwiebel-förmigen Kohlenstoff, mit dem hohe Umsätze und Selektivitäten in der oxidativen Dehydrierung von Ethylbenzol erreicht wurden¹⁹⁾ sowie auf mikroporöse Nickel(II)-phosphate hingewiesen, die milde Hydrieraktivität (Selektivhydrierung von Butadien) mit basischen Eigenschaften verbinden.²⁰⁾

Neues zu bekannten Materialien/Reaktionen

◆ Ein experimenteller Befund aus dem vergangenen Jahr dürfte die Diskussionen um Katalyse mit Au-Trägerkatalysatoren stark beeinflussen: Goldaggregate mit der magischen Zahl von 55 Atomen sind in oxidierender Atmosphäre (konkret: O₂-Plasma) besonders stabil.²¹⁾ Eine Röntgen-Photoelektronenspektroskopie(XPS)-Studie (Abbildung 5) untermauert diese Beobachtung.

Während hier offenbar kein Trägereffekt vorliegt, wird die Wechselwirkung zwischen Metallpartikeln und Träger in vielen Systemen weiter intensiv untersucht. Hinsichtlich des Methanolsynthese-Katalysators (Cu/ZnO) gibt es einen interessanten Neuanatz zur Erklärung der promotierenden Wirkung von ZnO. Sie wird auf intrakristalline Spannung in den Kupferteilchen zurückgeführt, die möglicherweise durch Einschluss von Zn-Atomen während der Reduktion der Precursorphase entsteht.²²⁾

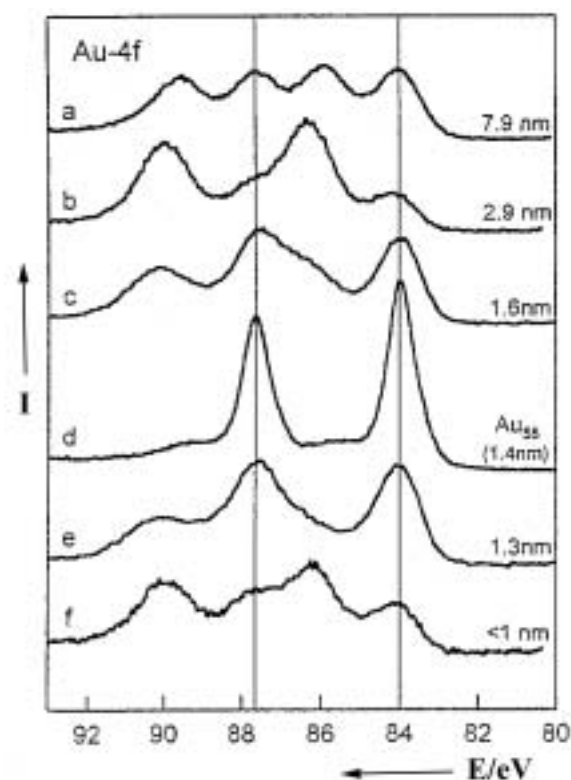
Fe-modifizierte Zeolithe erfreuen sich großer Aufmerksamkeit, da sie viele wichtige Reaktionen katalysieren: Neben der dem „ α -Sauerstoff“ (Panov, Novosibirsk, RU) zugeordneten Chemie sind dies unter anderem die selektive katalytische Reduktion (SCR) von NO mit Kohlenwasserstoffen (HC-SCR) oder Ammoniak (NH₃-SCR), die selektive Reduktion oder direkte Zersetzung von N₂O (untersucht z.B. von der Gruppe um Kapteijn, Delft, NL) sowie die selektive Oxidation von NH₃ zu N₂. Die unerwartete strukturelle Variabilität der

Fe-Spezies erschwert die eindeutige Identifizierung aktiver Zentren. Überraschend war unter anderem eine sehr hohe Aktivität (HC-SCR) speziell präparierter Fe-ZSM-5-Katalysatoren mit einem Zehntel des empfohlenen Eisengehalts²³⁾ sowie das Auftreten einer hyperaktiven O-Spezies nach Einwirkung von N₂O auf reduziertes Fe-ZSM-5-Material hohen Eisengehalts.²⁴⁾ Im Zusammenhang mit dieser Spezies, deren Verhältnis zum „ α -Sauerstoff“ Panovs noch zu klären bleibt, wird die Bildung von Fe⁴⁺ diskutiert.

Anwendungen

◆ Einen sehr guten Überblick über Tendenzen in ausgewählten Bereichen der technischen Katalyse geben die Konferenzen der Deutschen Gesellschaft für Mineralöl und Kohle (DGMK).²⁵⁾ Aktuell besteht z.B. ein starkes Interesse an der selektiven Ringöffnung von Aromaten, begründet in zukünftigen gesetzlichen Begrenzungen des Aromatengehalts im Fahrbenzin und des ungünstigen Einflusses von Aromaten auf die Dieselqualität. Wurde zunächst versucht, Aromaten des Benzinsiedebereichs zu Isoalkanen umzusetzen, entwickelten Weitkamp et al. (Stuttgart) die Ringöffnung zu kurzkettigen n-Alkanen. Somit kann die aromatenreiche Benzinfraktion des Steamcrackers ins Einsatzprodukt zurückgeführt werden – ein Prinzip, an dessen technischer Umsetzung gearbeitet wird.²⁵⁾ Verbindungen mit Naphthalingerüsten können nach vorheriger Hydrierung mit guter Selektivität zu offenkettigen Alkanen, d.h. wertvollen Dieselkomponenten, gespalten werden.

Vor der Markteinführung steht auch, von Fortschritten in der Katalysatorentwicklung und einem wahrscheinlichen Sinken der Methanolpreise begünstigt, die seit langem bekannte Umsetzung von Methanol zu Olefinen oder Propylen (MTO bzw. MTP). Wegen der anstehenden Verschärfung der Kfz-Abgasnormen werden auch Technologien der Abgaskatalyse demnächst kommerzialisiert,²⁶⁾ z.B. die NO_x-Speicherreduktionstechnik für Diesel- und Benzin-



Direkteinspritzmotoren. Dabei werden die Stickstoffoxide während Magerphasen durch eine Speicherkomponente (Ba-Verbindung) am (Edelmetall)Katalysator festgehalten, um während kurzer Fettphasen reduziert zu werden. Die Technologie, deren Umsetzung durch Schwefel im Kraftstoff beeinträchtigt wird (unter anderem Bildung von BaSO₄), ist für Magermix-Ottomotoren bereits eingeführt (VW-Lupo), für Dieselmotoren besteht noch Entwicklungsbedarf. Bei der Partikelbehandlung konkurriert die selbstregenerierende Partikelfalle, in der NO₂ (zuvor katalytisch aus NO_x gebildet) als Sauerstoffüberträger für die Partikeloxidation dient, mit einem Ansatz, bei dem der Oxidationskatalysator (Ce-Verbindungen) im Kraftstoff gelöst ist und somit in die Partikeln eingebaut wird. Für schwere Diesel wird auch die Harnstoff-SCR entwickelt. Herzstück ist hier eine SCR mit NH₃, der zuvor durch katalytische Harnstoffspaltung gebildet wird. Um hohe NO-Umsätze auch bei niedrigen Temperaturen zu erreichen, muss NO partiell zu NO₂ oxidiert werden; das System wird durch einen Oxidationskatalysator komplettiert, der durchgebrochenes NH₃ zu N₂ umsetzt.

Abb. 5. XPS-Spektren von Goldpartikeln enger Größenverteilung (auf Si) nach Behandlung im Sauerstoffplasma.²¹⁾ Das Dublett der oxidierten Au-Spezies (86/89,5 eV) fehlt beim Au₅₅-Cluster und ist im benachbarten Größenbereich schwach; die durch senkrechte Linien markierten Energiepositionen gehören zu elementarem Gold. I = Intensität (willk. Einheiten).

Bioverfahrenstechnik

◆ Vor fast genau 100 Jahren, im Mai 1902, hat Max Delbrück auf der Hauptversammlung des Vereins Deutscher Chemiker mit seinem Vortrag über Mikroorganismen in ihrer Anwendung auf chemische Umsetzungen einen der ersten Trendberichte der Bioverfahrenstechnik gegeben.²⁷⁾

In seinem Vortrag hob er hervor, wie wichtig es ist, die Arbeit der Mikroorganismen steuern zu können. Im Jahr 2002 wurde hierfür ein neuer Name geprägt: Systembiologie.

Virtuelle Zelle

◆ In der Systembiologie wird mit einer ganzheitlichen Sichtweise versucht, virtuelle Zellen²⁸⁾ zu erschaffen, um das Verhalten ihrer realen Pendanten zu verstehen und im Sinne von Max Delbrück für eine chemische Umsetzung zu beherrschen. Hierbei kommt auch im Jahre 2002 den Methoden der Metabolic Network Analysis sowie dem Metabolic Engineering große Bedeutung zu.²⁹⁾ Insgesamt wird dies auch für die nächsten Jahre eine große Herausforderung sein.

Der Computer spielt aber nicht nur beim Modellieren von Zellen oder zellulären Vorgängen eine wesentliche Rolle. Auch aufgrund der multivariaten, statistischen Analyse und Beschreibung von (industriellen) bioverfahrenstechnischen Prozessen, die mit ihm so effizient möglich sind,³⁰⁾ ist er ein unentbehrliches Instrument der Bioverfahrenstechnik. Für die Automatisierung und Überwachung dieser Prozesse erschließen sich hierdurch immer mehr auch unspezifische Messsignale.

Nachweis rekombinanter Proteine/Organismen

◆ Zeitintensive Immunoassays für die Bestimmung von rekombinanten Proteinen in einer komplexen Matrix wurden in den letzten Jahren durch alternative Techniken (z. B. Elektrochemilumineszenz, optische Biosensoren, Chromatographie, Nephelometrie) abgelöst, die die Messinformation

schneller zur Verfügung stellen.³¹⁾ Die Menge an Produkten, die mit gentechnisch modifizierten Organismen hergestellt wurden, steigt rapide an. Aufgrund der Vorbehalte in der Bevölkerung gegenüber diesen Produkten sowie gesetzlicher Bestimmungen hat der Nachweis von genetisch veränderten Organismen in Lebensmitteln erheblich an Bedeutung gewonnen.³²⁾

Produktaufarbeitung

◆ Ein Thema, das seit den Tagen von Max Delbrück seine Bedeutung auch nicht verloren hat, ist die Produktaufarbeitung. Etablierten Verfahren erwächst Konkurrenz in Methoden, die auf magnetischen, elektrischen oder akustischen Feldern basieren.³³⁾

Biokatalyse

◆ In der chemischen Industrie wird die Biokatalyse immer wichtiger. Ihr Potential nicht nur als ökologisch vorteilhafte, sondern durchaus auch ökonomisch erfolgversprechende Technologie steht in vielen Bereichen außer Frage. Der in der Industrie früher häufig zu erkennende Konflikt „Biologie gegen Chemie“ scheint von vielen überwunden und der Paradigmenwechsel weg von der Chemie hin zur Biologie ist deutlich zu erkennen. So ist der Anteil an internationalen Patentanmeldungen im Pharmasektor mit Bezug zur Biotechnologie in den letzten zehn Jahren von 31 auf 41 % gestiegen und die Biokatalysatoren sind vor allem in der enantioselektiven Synthese aus der chemischen Industrie nicht mehr wegzudenken. Thomas et al.³⁴⁾ beschreiben z. B. Verfahren zur Biotransformation von Cycloalkanonen, alkylierten Aromaten und Nitrilen.

Der Trend hin zur Biokatalyse wird in der industriellen Praxis mit der Möglichkeit begründet, die zur Verfügung stehende Anzahl von Biokatalysatoren durch die modernen Methoden der Gentechnik kontinuierlich auszubauen. Auch ausgehend von den Arbeiten des leider im Jahre 2001 verstorbenen Bailey³⁵⁾ sind hier weitere wichtige Impulse gesetzt worden. So hat beispielsweise die BASF

in Zusammenarbeit mit Integrated Genomics das Genom von *Corynebacterium glutamicum* entschlüsselt. Die gewonnenen Informationen über den Stoffwechsel und die darin involvierten Enzymsysteme sollen zur Optimierung der biotechnologischen Lysin-Produktion genutzt werden („Pathway-Design“). Integrated Genomics hat weiterführende Kooperationen mit den Unternehmen Roche, DowChemical, Genencor, Maxygen, Cargill und Archer Daniels Midland aufgenommen. In allen Kooperationen sollen neue enzymatische Industrieprozesse aufgebaut werden (z. B. die Biokonversion von Methan zu Methanol als Baustein in der Petrochemie). Neue Verfahrenskonzepte ermöglichen es, auch toxische Substrate umzusetzen oder toxische Produkte durch Ganzzellbiotransformationen zu erzeugen. Ein Beispiel hierfür ist die Produktion von (S)-Styrol-oxid aus Styrol mit gentechnisch veränderten *E. coli*-Bakterien.³⁶⁾

Screeningsysteme, gerichtete Evolution

◆ Ebenfalls wichtige Bestandteile der Bioverfahrenstechnik sind Screeningsysteme, die in der Lage sind, schnell und effizient interessante Verbindungen oder Biokatalysatoren zu identifizieren. Hier ist die Entwicklung ausgehend von der 96er Mikrotiterplatte weit vorangeschritten. Es stehen mittlerweile 3456er Platten zur Verfügung; eine 20000er Platte ist angekündigt.³⁷⁾ Solche Systeme sollen in der Lage sein, pro Woche bis zu 1,5 Millionen Proben zu untersuchen und sind auch die Grundlage dafür, dass die „Evolution im Reagenzglas“ zur Erzeugung neuer und vor allem enantioselektiver Biokatalysatoren vorangetrieben werden kann.³⁸⁾ Mit der gerichteten Evolution kann die Enantiospezifität eines Enzyms oftmals erheblich verbessert werden, was ökonomisch sinnvolle Synthesewege eröffnet. In Bereichen, in dem die reine enzymatische Katalyse aufgrund ihrer Reaktionslimitierungen nicht mehr eingesetzt werden, finden zunehmend hybride Katalysatoren Anwendung.³⁸⁾ Bei diesen Verfahren wird ein Enzym über Mutagenese

nese und chemische Modifizierung so verändert, dass sich völlig neue Reaktionswege wie die Hydroformylierung oder allylische Substitutionen erschließen.

Die vor 100 Jahren von Max Delbrück gestellte Frage nach den Gewinnchancen der chemischen Industrie durch die Anwendung biotechnischer Verfahren ist somit zweifelsfrei mit Ja zu beantworten.

Das Autorenteam dankt Kolleginnen und Kollegen für ihre zahlreichen Beiträge.

Steffen Kühling, Stephan Laue,
Bayer AG, Leverkusen
steffen.kuehling.sk@
bayertechnology.com

Wolfgang Grünert
Lehrstuhl für Technische Chemie
Universität Bochum,
w.gruenert@techem.ruhr-
uni-bochum.de

Bernd Hitzmann, Roland Ulber,
Institut für Technische Chemie
Universität Hannover
hitzmann@iftc.uni-hannover.de
ulber@iftc.uni-hannover.de

- 1) J. Roshan, *Process intensification for green chemistry in Handbook of Green Chemistry and Technology*, Blackwell Science, Oxford, 2002, S. 366.
- 2) E. H. Stitt, *Chem. Eng. J.* 2002, 4025, 1.
- 3) C. A. Nielsen, R. W. Chrisman, R. E. LaPointe, T. E. Miller, Jr., *Analytical Chemistry* 2002, 74, 3112.
- 4) K. H. Saitmacher, L. Unverdorben, C. Wille, *Macromol. Symp.* 2002, 187, 631.
- 5) W. Liu, *AIChE J.* 2002 48, 1519.
- 6) A. Böttcher, J. Henkelmann, M. Haake, G. Kaibel, *DE 100 50 709 2002*.
- 7) T. A. Nijhuis, A. E. W. Beers, F. Kapteijn, J. A. Moulijn, *Chem. Eng. Sci.* 2002, 57, 1627.
- 8) P. Kölsch, M. Noack, R. Schäfer, G. Georgi, R. Omorjan, J. Caro, *J. Membr. Sci.* 2002, 198, 119.
- 9) S.-I. Niwa, M. Eswaramoorthy, J. Nair, A. Raj, N. Itoh, H. Shoji, T. Namba, F. Mizukami, *Science* 2002, 295, 105.
- 10) J. J. Jafar, P. M. Budd, R. Hughes, *J. Membr. Sci.* 2002, 199, 117.
- 11) E. Maus, H. E. A. Brüschke, *Desalination* 2002, 148, 315.
- 12) C. S. Kniep, *Macromol. Rapid. Commun.* 2002, 23, 643.
- 13) S. Mecking, A. Held, F. M. Bauers, *Angew. Chem.* 2002, 114, 564.
- 14) S. Schauerermann, J. Hoffmann, V. Jahanek, J. Hartmann, J. Libuda, H.-J. Freund, *Angew. Chem.* 2002, 114, 2643.
- 15) J. Greeley, J. K. Nørskov, M. Mavrikakis, *Annu. Rev. Phys. Chem.* 2002, 53, 319.
- 16) S. Dahl, A. Logadottir, C. J. H. Jacobsen, J. K. Nørskov, *Appl. Catal. A* 2001, 222, 19.
- 17) D. Trong On, D. Desplandier-Giscard, C. Danumah, S. Kaliaguine, *Appl. Catal. A* 2001, 222, 299.
- 18) D. Trong On, S. Kaliaguine, *Angew. Chem.* 2002, 114, 1078.
- 19) N. Keller, N. I. Maksimova, V. V. Roddatis, M. Schur, G. Mestl, Y. I. Butenko, V. L. Kuznetsov, R. Schlögl, *Angew. Chem.* 2002, 114, 1962.
- 20) N. Guillou, Q. Gao, P. M. Forster, J.-S. Chang, M. Nogues, S.-E. Park, G. Ferey, A. K. Cheetham, *Angew. Chem.*, 2001, 113, 2913.
- 21) H.-G. Boyen, G. Kästle, F. Weigl, B. Koslowski, C. Dietrich, P. Ziemann, J. P. Spatz, S. Riethmüller, C. Hartmann, M. Möller, G. Schmid, M. G. Garnier, P. Oelhafen, *Science* 2002, 297, 1533.
- 22) M. M. Gunter, T. Ressler, B. Berns, C. Büscher, T. Genger, O. Hinrichsen, M. Muhler, R. Schlögl, *Catal. Lett.* 2001, 71, 37.
- 23) F. Heinrich, C. Schmidt, E. Löffler, W. Grünert, *Catal. Comm.* 2001, 2, 317.
- 24) J. Jia, B. Wen, W. M. H. Sachtler, *J. Catal.* 2002, 210, 453.
- 25) *DGMK-Bericht* 2002, 4, ISBN 3-931850-98-6, *DGMK-Bericht* 2001, 4, ISBN 3-931850-84-6.
- 26) A. König, G. Herding, B. Hupfeld, T. Richter, K. Weidmann, *Top. Catal.* 2001, 16/17, 23.
- 27) M. Delbrück, *Angew. Chem.* 1902, 28, 693.
- 28) L. M. Loew, J. C. Schaff, *Trends Biotechnol.* 2001, 19, 401.
- 29) G. Stephanopoulos, *AIChE J.* 2002, 48, 920.
- 30) S. Albert, R. D. Kinley, *Trends Biotechnol.* 2001, 19, 53.
- 31) K. N. Baker, M. H. Rendall, A. Patel, P. Boyd, M. Hoare, R. B. Freedman, D. C. James, *Trends Biotechnol.* 2002, 20, 149.
- 32) F. E. Ahmed, *Trends Biotechnol.* 2002, 20, 215.
- 33) R. S. M. S. Karumanchi, S. N. Doddamane, C. Sampangi, P. W. Todd, *Trends Biotechnol.* 2002, 20, 72.
- 34) S. M. Thomas, R. DiCosimo, V. Nagarajan, *Trends Biotechnol.* 2002, 20/6, 238.
- 35) J. S. Dordick, C. Khosla, *Biotechnol. Bioeng.* 2002, 79, 490.
- 36) S. Panke, M. Held, M. G. Wubboldts, B. Wittholt, A. Schmid, *Biotechnol. Bioeng.* 2002, 80/1, 33.
- 37) B. J. Battersby, M. Traz, *Trends Biotechnol.* 2002, 20/4, 167.
- 38) M. T. Reetz, *Tetrahedron* 2002, 58/32, 6595.



Stephan Laue (Jahrgang 1971) studierte Chemie in Bonn und promovierte 2002 in technischer Chemie am Forschungszentrum Jülich. Für seine Arbeit erhielt er den Günther-Leibfried-Preis des Forschungszentrums Jülich. Seit 2001 arbeitet er bei der Bayer Technology Services im Competence Center Reaction Engineering & Catalysis mit dem Arbeitsschwerpunkt Prozessintensivierung.



Steffen Kühling, geb. 1963, studierte Chemie in Aachen, wo er 1989 am Lehrstuhl für Textil- und Makromolekulare Chemie promovierte. Seit 1990 ist er bei Bayer beschäftigt. Er hat auf dem Polymersektor (Schwerpunkt Polycarbonat) produkt- und verfahrenstechnische Entwicklungsthemen bearbeitet und war als Betriebsleiter im In- und Ausland tätig. Seit 2001 leitet er das Department Reaction & Polymer Technology innerhalb der Bayer Technology Services.



Wolfgang Grünert (Jahrgang 1949) studierte Verfahrenstechnik an der TH Leuna-Merseburg, wo er 1975 promovierte. Bis 1991 war er in einem Institut der Akademie der Wissenschaften in Leipzig tätig. Nach der Wiedervereinigung absolvierte er Forschungsaufenthalte in Berlin und Liverpool und habilitierte sich an der TH Leuna-Merseburg. Seit 1994 arbeitet er an der Ruhr-Universität Bochum, seit 1997 ist er dort Professor für Technische Chemie. Seine Forschungsinteressen sind heterogene Katalyse und Oberflächenanalytik.



Bernd Hitzmann (Jahrgang 1957) studierte Physik an der Universität Hannover, wo er 1988 promovierte. Nach einem Forschungsaufenthalt am Caltech, Kalifornien, ging er 1991 als Postdoc nach Heidelberg. Seit 1993 ist er Akademischer Rat am Institut für Technische Chemie der Universität Hannover. 1995 habilitierte er sich im gleichen Fachgebiet. Seine Forschungsinteressen sind Bioprozessmonitoring und -automation.



Roland Ulber (Jahrgang 1968) studierte Chemie an der Universität Hannover. Von 1994 bis 1996 promovierte er am Institut für Biochemie der Universität Münster und am Institut für Technische Chemie der Universität Hannover; 2002 habilitierte er sich an der Universität Hannover. Er ist nebenberuflich geschäftsführender Gesellschafter des Biotechnologie-Unternehmens TEXYS. Zu seinen Arbeitsgebieten gehören Biotransformation und Enzymscreening.