

Technische Chemie 2000

Die technische Chemie spielt im Nahtbereich Naturwissenschaft und Ingenieurtechnik bei der Beurteilung und Überführung von Prozessen in die Anwendung eine wichtige Rolle. Sie besitzt integrativen und grenzüberschreitenden Charakter. Wichtigste Themen des vergangenen Jahres waren wieder Katalyse und (Mikro-)Reaktoren. Neu sind Brennstoffzellen, ionische Flüssigkeiten und nichtklassische Energieformen.

Langjährige Trendsetter wie Mikroreaktionstechnik und multifunktionale Reaktoren sind in diesem Bericht wieder dabei. Auch gewann in diesem Zusammenhang die Prozessintensivierung an Bedeutung. In der Katalyse werden heterogene Katalysatoren verstärkt bei der umweltbewussten Entwicklung alternativer Verfahren eingesetzt, und ionische Flüssigkeiten finden als neuartiges Reaktionsmedium großes Interesse. In der Biotechnologie werden ständig neue Prozesse zur Synthese von Pharmaka und Feinchemikalien entwickelt, auch in Europa und nicht nur in den USA oder Japan! Diese erfreuliche Entwicklung ist ein Indiz für die aufstrebende Biotechnologiebranche in Deutschland. Hier geht der Trend zu maßgeschneiderten Biokatalysatoren (Enzyme oder ganze Zellen). Im Bereich Energie und Umwelt wird die Brennstoffzelle kontinuierlich weiterentwickelt, und eine marktdurchdringende Serienreife ist absehbar. Die Möglichkeiten der Informationsverarbeitung und Modellierung haben sich signifikant verbessert, so dass auf Grundlage zunehmender Modelltiefen in Verbindung mit Experimenten einzelne Verfahrensschritte, Katalysatoren und insbesondere Gesamtprozesse optimiert werden können. Einen weiteren Schwerpunkt in diesem Jahr stellte der Einsatz von Ultraschall und Mikrowellen dar.

Chemische Verfahrenstechnik – kleiner, schneller, mehr!

Die chemische Verfahrenstechnik sucht weiter Wege zur optimalen Reaktionsführung, die unter vorgegebenen Randbedingungen zum gewünschten Produkt führen. Mikroreaktionstechnik, Membranverfahren – teilweise in multifunktionalen Reaktoren – und verbesserte Methoden der Modellierung sind wichtige Werkzeuge, um dieses Ziel zu erreichen.

Mikroreaktionstechnik

Die Miniaturisierung von kontinuierlich betriebenen Reaktoren und deren Einsatz in Forschung und Kleinproduktion werden weiterhin intensiv bearbeitet.^{1,2)} Bei der Mikroreaktionstechnik erhofft man sich Vorteile vorrangig durch das Beherrschen von Exothermien, durch höhere Selektivitäten auf Grund verbesserter Mischung und effizienterer Wärmeabfuhr sowie durch die Verkürzung der Entwicklungszeiten durch paralleles Verschalten mehrerer Reaktoren.³⁾ Symex Technologies hat mit der Mikroreaktionstechnik einen neuen Oxidations-Feststoffkatalysator entwickelt, der bereits unter 300 °C selektiv Ethan in Ethylen überführt.⁴⁾ Die BASF setzt ein Mikroreaktionssystem zur Synthese einer Vitaminvorstufe erfolgreich ein.⁵⁾ Flux-response-Experimente erlauben es, kinetische Parameter von Mikroreaktoren zu ermitteln. Ein Beispiel ist die heterogen katalysierte Zersetzung von Methanol an einem Pt/Al₂O₃-Katalysator für einen Temperaturbereich von 260 – 400 °C.⁶⁾ Allerdings sind miniaturisierte Anlagen nur selten reif für eine großtechnische Produktion, aber modular aufgebaut können sie komplette Produktionsprozesse vereinfacht abbilden⁷⁾ sowie einen Beitrag zur Erhöhung der Anlagensicherheit leisten.^{8,9)}

Hier sei auch ein neues Verfahren für die Herstellung von „Mesotubes“ – Mesoröhrchen mit einem Durchmesser von 50 bis 2000 nm aus Polymeren, Glas oder Metallen – erwähnt.¹⁰⁾

Membranverfahren

Die Stofftrennung mit Membranen überstieg im Jahr 2000 ein Marktvolumen von 5 Mrd. US-\$ bei jährlichen Zuwachsraten von 8 – 12 %. Membranverfahren werden in Grundoperationen zur Eliminierung von Schadstoffen, zur Rückgewinnung von Wertstoffen oder zur Aufarbeitung genutzt.¹¹⁾ Membranreaktoren können entweder den Katalysator zurück gewinnen,^{12,13)} Edukte selektiv dosieren^{14–26)} oder (Neben-) Produkte selektiv austragen.^{27–32)} Das Konzept eines

integrierten Membranreaktors vereinigt die Vorzüge dieser beiden Reaktionsführungen: Der bei der katalytischen Dehydrierung von Ethylbenzol über eine Membran entfernte Wasserstoff wird zur Hydrierung von Benzol eingesetzt.³³⁾ Ein weiteres integriertes Reaktorkonzept³⁴⁾ vereinigt die Vorteile eines Membranreaktors (getrennte Reaktandenzugabe) mit denen eines Gegenstromreaktors (vorteilhafter Wärmeaustausch).

Die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten bestätigen, dass Membranreaktoren in Zukunft verstärkt als multifunktionale Reaktoren im Mittelpunkt der Forschung stehen werden. Membranreaktoren arbeiten in homogen katalysierten Reaktionen hauptsächlich als Phasenvermittler. Beispiele sind die Oxidation von n-Hexan,³⁵⁾ Cyclohexan und n-Dodecan.³⁶⁾ Modellierung und Auslegung von Membranreaktoren sowie Fortschritte bei deren Miniaturisierung beschreiben Lit.³⁷⁻³⁹⁾ Durch Hybridverfahren aus Trennverfahren und Membranprozessen lässt sich die energetische Bilanz der Stofftrennung deutlich verbessern.⁴⁰⁾

Multifunktionale Reaktoren

Die intensiven Untersuchungen der Reaktivrektifikation richten sich vermehrt auf Auslegung und Optimierung von Reaktivkolonnen.⁴¹⁾ Die freien Parameter bei der Reaktivrektifikation (Anzahl der Trennstufen, Anzahl der reaktiven Stufen, Einspeisestellen und Betriebsparameter) optimiert Minlp, (Mixed Integer Non Linear Programming), ein neuartiges Rechenverfahren. Das Modell basiert auf dem Konzept der Gleichgewichtsstufen und optimiert entweder nach minimalem Energiebedarf oder nach minimalen jährlichen Gesamtkosten.⁴²⁻⁴⁴⁾ Auch Zyklone werden als neue multifunktionale Reaktoren zur schnellen Pyrolyse von Biomasse eingesetzt: In weniger als einer Sekunde geschehen Aufheizen, Pyrolyse, sowie Quenchen und Trennung der Produkte.⁴⁵⁾

Modellierung

Mit der Leistungsfähigkeit moderner Rechner steigen die Möglichkeiten der numerischen Simulation von chemischen Reaktoren. So sind von chemischen Reaktoren raum aufgelöste Simulationen möglich, bei denen der Stofftransport geschwindigkeitsbestimmend ist und die Reaktionsmasse als nicht mehr homogen betrachtet werden muss.^{46,47)} Der Stand der Technik auf dem Gebiet der Modellierung von Festbettreaktoren ist in Lit.⁴⁸⁻⁵¹⁾ beschrieben, und über die Fortschritte bei der Modellierung von monolithischen Reaktoren zur Partialoxidation von Methan wird in Lit.⁵²⁾ berichtet.

Verbesserte Messtechniken⁵³⁾ und CFD-Modellierung (CFD = Computational Fluid Dynamics) von Poolflammen minimieren die oft nicht zuletzt aus Sicherheitsgründen durchgeführten Brandversuche.⁵⁴⁾ Dazu werden vorhandene Modelle weiter verfeinert und abgesichert.⁵⁴⁾

Katalyse – neue Reaktionsmedien, Katalysatoren und Prozesse

Bei der Entwicklung alternativer chemischer Verfahren spielen Umweltverträglichkeit und verantwortungsbewusster Einsatz von Rohstoffressourcen eine wichtige Rolle. Aus diesem Grund wurden in den letzten Jahren verschiedene Verfahren unter umwelttechnischen Aspekten überarbeitet. Dabei zeigt sich erneut, wie wichtig katalytische – insbesondere heterogen-katalytische – Verfahren sind. Eine hervorragende Übersicht zum Entwicklungsstand und Fortschritten der aktuellen Katalysatorforschung gibt Lit.⁵⁵⁾

Das Problem des Durchmusterens von Katalysatorbibliotheken haben verschiedene Autoren behandelt, von denen hier nur einige^{56,57)} stellvertretend genannt seien.

Heterogene Katalyse

Bei der Friedel-Crafts-Acylierung sollen heterogene Katalysatoren den Katalysator Aluminiumtrichlorid ersetzen. Die einfache Abtrennung des Produkts vom Katalysator, der deutlich unterstöchiometrische Bedarf an festem Katalysator und dessen mögliche Regenerierung machen eine heterogen-katalytische Acylierungsvariante sehr attraktiv. In dieser Hinsicht viel versprechend erwiesen sich die Zeolithe Beta in der H-Form, mit Übergangsmetallen ausgetauschte Montmorillonite sowie geträgerte Metalloxide.^{58,59)}

Auch heterogen-katalytische Nitrierungen an festen Säure-Katalysatoren bieten eine Alternative zur konventionellen Herstellung von Nitroaromaten durch das Mischsäureverfahren. Feste Katalysatoren können korrosive Säuren ersetzen, und bestimmte feste Säuren, beispielsweise Zeolithe, erlauben eine bessere Steuerung der Isomerenverteilung. Letzterer Aspekt steht im Fokus von Lit.⁶⁰⁻⁶²⁾, die über die regioselektive Flüssigphasennitrierung von Aromaten wie Chlorbenzol, Toluol und anderen Alkylbenzolen in Gegenwart verschiedener Katalysatoren wie Zeolith H-ZSM-5, Zeolith H-Beta und K-10-Montmorillonit berichten. In einer alternativen Synthese der industriell relevanten Produkte Nitrotoluol (NT) und Dinitrotoluol (DNT) wurde geträgerte Schwefelsäure als fester Katalysator für die Nitrierungen von Toluol und Nitrotoluol

erfolgreich eingesetzt.⁶³⁾ Als weiteres wichtiges Resultat stellten die Autoren fest, dass die heterogen-katalytische Herstellung von DNT nur in einem zweistufigen Prozess oder einem Verfahren mit zusätzlichem unpolarem Lösemittel möglich ist. Die enantioselektive Transferhydrierung von 3-Trifluormethyl-acetophenon hat Mitsubishi Chemical pilotiert.⁶⁴⁾ Das Hydrierprodukt liefert durch weitere Umsetzung das chirale Zentrum des Agrofungizids (S)-MA20565.⁶⁵⁾ Im Allgemeinen stellt die Transferhydrierung eine leistungsfähige Methode dar.⁶⁶⁻⁶⁹⁾

Petrochemie

Die Herausforderungen des 21. Jahrhunderts in der Petrochemie bestehen auf Grund des begrenzten Erdölvorkommens im stofflichen und energetischen Verwerten des reichlich vorhandenen Erdgasvorkommens. Der katalytischen Umsetzung von Methan zu Chemikalien und Treibstoffen wird dementsprechend für die Zukunft eine sehr große Bedeutung beigemessen.⁷⁰⁾ Die bislang entwickelten Strategien reichen vom wissenschaftlich-exploratorischen Zustand bis zur reifen Technik.⁷⁰⁻⁷²⁾ Dazu gehören

- Dampf- und CO₂-Reformierung oder die partielle Oxidation mit anschließender Fischer-Tropsch-Synthese,
- die direkte Oxidation zu Methanol und Formaldehyd,
- die oxidative Kopplung zu Ethylen und
- die direkte Umsetzung zu Aromaten und Wasserstoff in Abwesenheit von Sauerstoff.

Insbesondere die CO₂-Reformierung ist eine sehr umweltfreundliche Technik, da hier zwei Treibhausgase zur Herstellung von Chemikalien verwendet werden. Ein für den industriellen Einsatz geeigneter NiO-MgO-Katalysator erreicht Umsätze von 91 % und 98 % an CH₄ bzw. CO.⁷³⁾ Parallel dazu fanden verstärkte Forschungsaktivitäten zur Fischer-Tropsch-Synthese statt. Es wurden neue⁷⁴⁻⁷⁷⁾ und/oder abriebfeste^{78,79)} Fischer-Tropsch-Katalysatoren entwickelt und sowohl Kinetik und mechanistische Aspekte⁸⁰⁻⁸²⁾ als auch die Auslegung und Modellierung von Fischer - Tropsch - Reaktoren^{83,84)} erforscht.

Moderne Crackanlagen (Abbildung 3) haben derzeit Produktionskapazitäten von bis zu 1 Mio. t·a⁻¹ (Investition: > 2 Mrd. DM). Es gibt aber seit langem zunehmend Bemühungen der Industrie, den kapitalintensiven Weg über die durch den Crackprozess (Pyrolyse) hergestellten Olefine zu vermeiden. So werden seit kurzem erfreulicherweise wertvollere Folgeprodukte aus den preiswerteren C₂-C₄-Alkanen hergestellt,^{85,86)} und es wird intensiv versucht, aus Ethan auf direktem Wege Ethylen oder Essigsäure (Union Carbide, Aventis), aus Propan Propylen oder Acrylsäure (Rohm & Haas, Mitsubishi, BP Amoco Chemicals) sowie aus Isobutan Methacrylsäure (Asahi, Mitsubishi, Sumitomo) nachhaltig zu produzieren.

Die Vorteile der angestrebten Direktprozesse liegen vor allem in einer Verringerung der Prozesskosten, einer rationalisierten Wärme- und Wärmeabfuhr, einer veränderten Transportlogistik sowie einer eingeschränkten Abhängigkeit von kapitalintensiven Vorstufen. Ein besonders erwähnenswerter Trend ist die Umstellung vorhandener Anlagen vom FCC-Verfahren (fluid catalytic cracking) auf DCC-Verfahren (deep catalytic cracking) beim katalytischen Cracken von Vakuumdestillaten, da sich hierbei mit speziellen Katalysatoren die Ausbeute an niederen Olefinen von 18 auf 42 Massen-% erhöhen lässt.^{85,87)}

Netzwerk ConNeCat

Um die vielfältigen Katalysetätigkeiten national zu koordinieren, wurde in diesem Jahr das Kompetenznetzwerk Katalyse (ConNeCat) ins Leben gerufen.⁸⁸⁾ Ziel von ConNeCat ist es, die anwendungsorientierte Katalyseforschung in Deutschland zu koordinieren und zu optimieren. Projekte mit Leuchtturmcharakter sind die Themen „Innovative Methoden zur Charakterisierung von Katalysatoren“, „Katalyse in Brennstoffzellen“, „Membranen/ Membranreaktoren“ und „Selektive Oxidation (KW-Funktionalisierung)“.⁸⁸⁾

Feinchemie

Feinchemikalien haben sich in den vergangenen Jahren als eigenständiges Segment der industriellen Chemie etabliert und werden von Forschung und Wirtschaft als solches wahrgenommen.^{89,90)} Bei Feinchemikalien handelt es sich um hochpreisige Zwischenprodukte, die meist auf Kundennachfrage in kleinen Tonnagen in Mehrzweckanlagen hergestellt und vorrangig von Agrochemie und Pharma weiterverarbeitet werden. Dabei zieht man katalytische Umsetzungen den nicht-katalysierten vor, um Abfallmengen zu reduzieren und Materialkosten zu senken. So sind vor allem asymmetrische Katalyse,⁹¹⁾ Oxidationskatalyse,⁹²⁻⁹⁴⁾ katalytische C-C-⁹⁵⁾ und C-Heteroatom-Verknüpfungen⁹⁶⁾ sowie Biotransformationen⁹⁷⁾ von vorrangigem Interesse.

Biotechnologie

Die Anzahl der industriell durchgeführten Biotransformationen nimmt rapide zu. Dies geschieht insbesondere vor dem Hintergrund, dass die jetzige Chemie hauptsächlich auf Erdöl basiert und die Erdölpreise in den letzten Jahren nicht nur stark schwanken, sondern auch kontinuierlich anstiegen.⁹⁸⁾ DuPont baut zurzeit eine Pilotanlage zur biotechnischen Herstellung von 1,3-Propanediol.^{98,99)} Das Jointventure Cargill Dow Polymers soll ab 2001 den Kunststoff Polylactid auf pflanzlicher Basis produzieren.¹⁰⁰⁾ In zunehmenden Maße ersetzen biotechnische Prozesse sowohl mit isolierten Enzymen als auch mit ganzen Zellen als Katalysator selbst etablierte chemische Verfahren.⁹⁷⁾ Die Gründe dafür sind bessere Regio-, Stereo- und Chemoselektivität oder Produktreinheit (z. B. keine Schwermetallrückstände) oder eine vereinfachte Aufarbeitung. Aber auch der Umweltschutz spielt eine wichtige Rolle, insbesondere weil sich die Abfallmenge verringert oder weil sich toxische Abfälle vermeiden lassen.¹⁰¹⁾

Lit.⁹⁷⁾ dokumentiert zahlreiche Biotransformationen sowohl mit Enzymen als auch mit ganzen Zellen. Die Spanne reicht dabei von Bulk- und Feinchemikalien über Pharmabau- bis hin zu Lebensmittelzusatzstoffen. Neue Entwicklungen sind vor allem durch die gerichtete Evolution der Biokatalysatoren zu erwarten.¹⁰²⁻¹⁰⁹⁾ Die Erzeugung einer großen Anzahl von Klonen ist heutzutage kein Problem mehr. Aber Voraussetzung für einen schnellen Erfolg sind geeignete Screeningmethoden, die das Durchsuchen einer großen Probenzahl mit einfachen Analysemethoden erlauben.^{105, 110, 111)} Eine wichtige Entwicklung der letzten Jahre ist die Analyse metabolischer Netzwerke und ihre gezielte Veränderung („metabolic engineering“), um Engpässe im Stoffwechsel zu eliminieren oder um neue Katalysatoren, die im Falle von Mikroorganismen als „designer bugs“ bezeichnet werden, zu erhalten.¹¹²⁻¹¹⁸⁾ Anwendungsbeispiele sind die Produktion von Penicillin G¹¹⁴⁾ oder die Herstellung aktivierter Zucker.^{119,120)} Lit.¹²¹⁾ gibt einen Überblick über die mikrobielle Produktion von Aminosäuren. Erwähnenswert ist hier noch der kürzlich kommerzialisierte Prozess für die Herstellung von L-Dopa.¹²²⁾ Aminosäurederivate lassen sich auch durch Lipase katalysierte dynamische Racematspaltung erzeugen, wobei die In-situ-Racemisierung durch NEt_3 erfolgt.¹²³⁾

Ionische Flüssigkeiten und überkritische Lösemittel

Eine interessante Klasse neuartiger Lösemittel stellen die ionischen Flüssigkeiten (ionic liquids) dar. Dabei handelt es sich um Salze, deren Schmelzpunkte unterhalb von 100 °C liegen. Die niedrigen Schmelzpunkte entstehen durch die Kombination anorganischer Anionen (z. B. AlCl_4^- , PF_6^-) und organischer Kationen (z. B. Imidazoliumkationen). Da die ionischen Flüssigkeiten metallorganische Komplexverbindungen oft gut lösen, mit vielen organischen Produktgemischen aber zwei Phasen bilden, bieten sie sich als Katalysatorlösemittel für die Zweiphasen-Katalyse an.^{124,125)} Auch für die Aufarbeitung u. a. biotechnisch entstandener Produktlösungen können sie eingesetzt werden.¹²⁶⁾ Zur Katalysatorabtrennung homogen löslicher Phosphinliganden werden auch temperaturschaltbare Zweiphasensysteme eingesetzt.^{127,128)}

Auch überkritische Lösemittel werden weiter untersucht. Überkritisches CO_2 dient als Lösemittel sowohl für Umsetzungen mit Homogen-¹²⁹⁾ als auch mit Heterogenkatalysatoren zur Partialoxidation von Propan,¹³⁰⁾ Dehydrierung von Ethylbenzol¹³¹⁾ oder zur Herstellung von Wasserstoffperoxid.¹³²⁾ Neben überkritischem Methanol¹³³⁾ richtet sich das Interesse vor allem auf Oxidationen in überkritischem Wasser bis hin zu Anlagen im Pilotmaßstab.¹³⁴⁻¹³⁸⁾

Energie und Umwelt

Auch für 2000 gilt: Ökologie und wirtschaftliche Leistung sind eng miteinander verbunden.^{101,139)} Im Sinne von „Sustainable Development“ bemühen sich die Unternehmen vermehrt um die Umsetzung der Richtlinien des World Business Council for Sustainable Development.^{101,139,140)}

Brennstoffzellen werden bedarfsgerecht dezentral erzeugten Strom und dezentral erzeugte Wärme anbieten. Ebenfalls eine Alternative für den Energieeintrag im Labor bieten nichtklassische Energieformen wie Ultraschall und Mikrowellen.

Brennstoffzellen

Der mobile und stationäre Einsatz von Brennstoffzellen (Abbildung 4) stand auch in diesem Jahr im Mittelpunkt der Forschung im Bereich alternativer Energien.¹⁴¹⁾ So gibt es inzwischen für die reaktionstechnischen Aspekte der Wasserstoffherzeugung tragfähige Reaktorkonzepte, die auch Problemen im Detail, wie den dynamischen Anforderungen oder der Aufrechterhaltung der Wasserbilanz, Rechnung tragen.^{141,142)} Mit Brennstoffzellen lässt sich in Zukunft ein bedarfsgerechter Zuschnitt von dezentral erzeugtem Strom und erzeugter Wärme in sehr unterschiedlichen Anwendungen alternativ und attraktiv anbieten. Dabei kann Erdgas anstelle herkömmlicher fossiler Energieträger die Staub-, Stick- und Schwefeloxid-Emissionen auf nahezu Null reduzieren. Auch sind die Kohlendioxid-Emissionen wesentlich geringer. Vor diesem Hintergrund plant RWE gemeinsam mit Siemens eine SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)-Anlage mit einer Leistung von

100 kW, um eine dezentrale druckaufgeladene Hochtemperatur-Brennstoffzelle gekoppelt mit einer Gasturbine mit Netzanbindung zu erproben. Mit dieser Kombination wird ein Wirkungsgrad von 55 % und bei gleichzeitiger Nutzung der entstehenden Wärme bis zu 85 % erwartet.¹⁴³⁾

Nichtklassische Energieformen

Ultraschall- und Mikrowellen bieten alternative Wege zum Eintrag von Energie. Lit.^{144-146,154,155)} geben einen Überblick über mögliche Anwendungen und Problemfelder. Im chemisch-industriellen Bereich wird Ultraschall (Sonochemie) vor allem zum Desintegrieren von Mikroorganismen, Dispergieren, Emulgieren und Homogenisieren, sowie zum Auslösen und Beschleunigen chemischer Prozesse eingesetzt.¹⁴⁷⁾

Mikrowellen nutzen dagegen für die Stoffumwandlung trotz Fortschritten bei Anwendungen in der Reaktionstechnik^{148,149)} und der Synthesechemie¹⁵⁰⁾ bislang hauptsächlich nur Laboratorien.¹⁵¹⁾ Relativ erfolgreich könnte Mikrowellenstrahlung kombinatorische oder parallelisierte Reaktionsansätze vervollkommen.¹⁵⁰⁾ Mikrowellenunterstützte Synthesen unter Dry-media-Versuchsbedingungen sind offenbar nicht nur im Pilotmaßstab möglich, sondern die Ableitungen zu Ausbeute, Selektivität, Reaktionszeit und weitere Bedingungen behalten ihre Gültigkeit.^{152,153)}

Umweltschutz

Bayer setzt unter dem Stichwort „Ökoperspektive“ einen „Excellence-Check“ neuer Produkte und Verfahren ein, um sechs relevante Problemfelder (Mensch & Gesundheit, Ökologie, Ökonomie, Produktlebensweg, Technologie und „public value“, Abbildung 5) zu analysieren und zu bewerten.¹³⁹⁾ Ähnliches tun die BASF (Abbildung 5) mit der „Ökoeffizienz-Analyse“ und Dow mit dem „Eco-Compass“.¹⁴⁰⁾

Konrad Fischer, Leverkusen; Udo Kragl, Rostock; Bernd Ondruschka, Jena ; E-Mail udo.kragl@chemie.uni-rostock.de

Die Liste der Literaturzitate finden Sie im Internet (www.gdch.de/nch/index.htm). Sie ist in gedruckter Form auch über die Redaktion der Nachrichten aus der Chemie erhältlich.

- Abb. 1. **Übersicht über die Themen des Trendberichts.** Das Autorenteam dankt den Kolleginnen und Kollegen für ihre zahlreichen Beiträge.
- Abb. 2. **Mikromischer-Wärmeübertrager-Einheit für schnelle, exotherme Reaktionen. Durchsätze bis zu mehreren 100 L·h⁻¹, Wärmeleistungen bis zu 20 kW, Scale-up um den Faktor 10 – das kann in einem Bauteil realisiert werden.** (Bildnachweis: Forschungszentrums Karlsruhe)
- Abb. 3. **Trotz neuer Ansätze, den Crackprozess zu vermeiden, wird auch im BASF-Verbundstandort Nanjing/China ein Steamcracker mit einer Jahreskapazität von 600 000 Tonnen Ethylen zehn World-scale-Anlagen mit Ausgangsstoffen versorgen.** (Bild: BASF)
- Abb. 4. **Bei den alternativen Energien liefern die Brennstoffzellen dezentral Strom und Wärme.** (Bildnachweis: Daimler Crysler)
- Abb. 5. **Öko-Check (Bayer, unten) und Ökoeffizienzanalyse (BASF, oben) zeigen Chancen für nachhaltiges Wirtschaften.**