

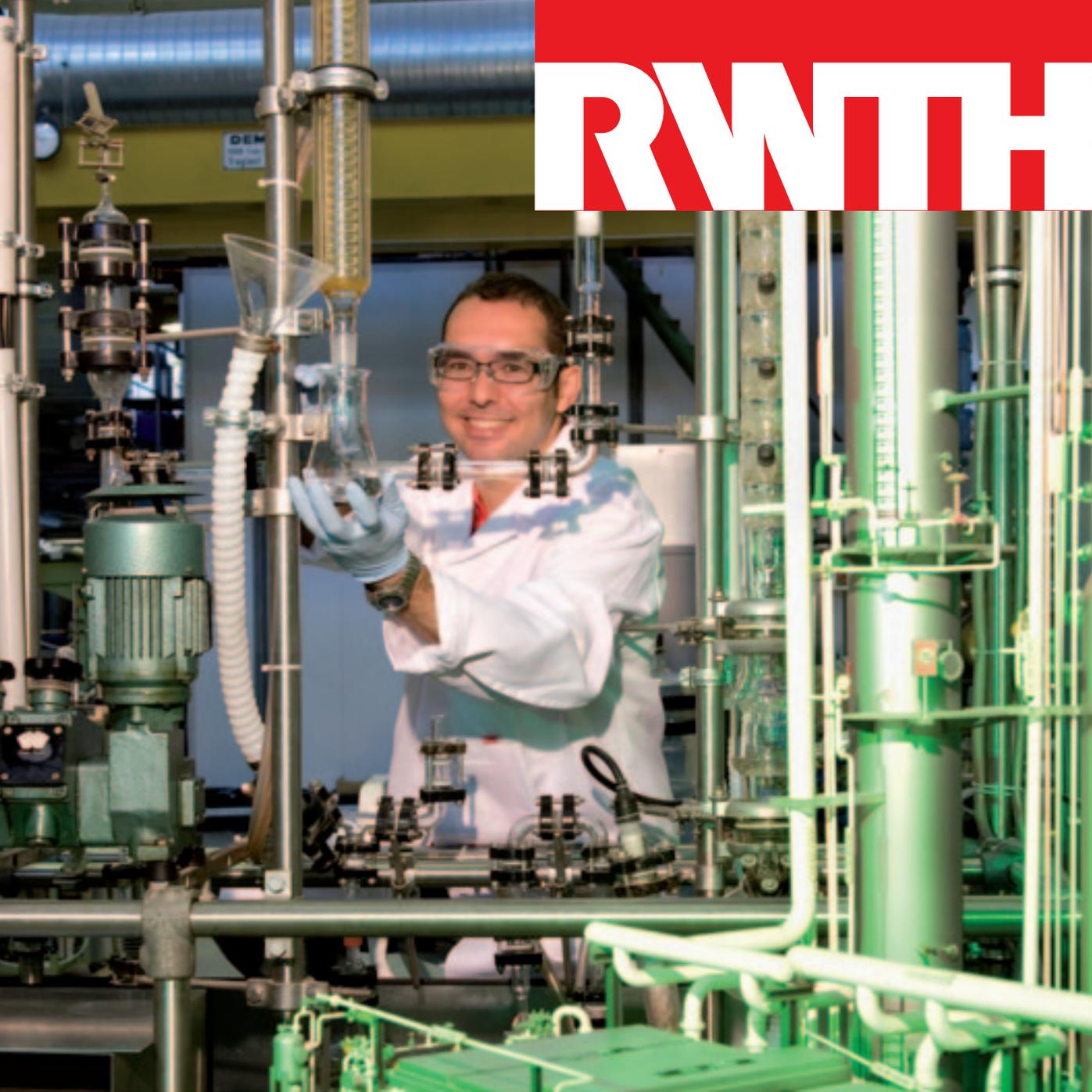
RWTH

RE WE MEN

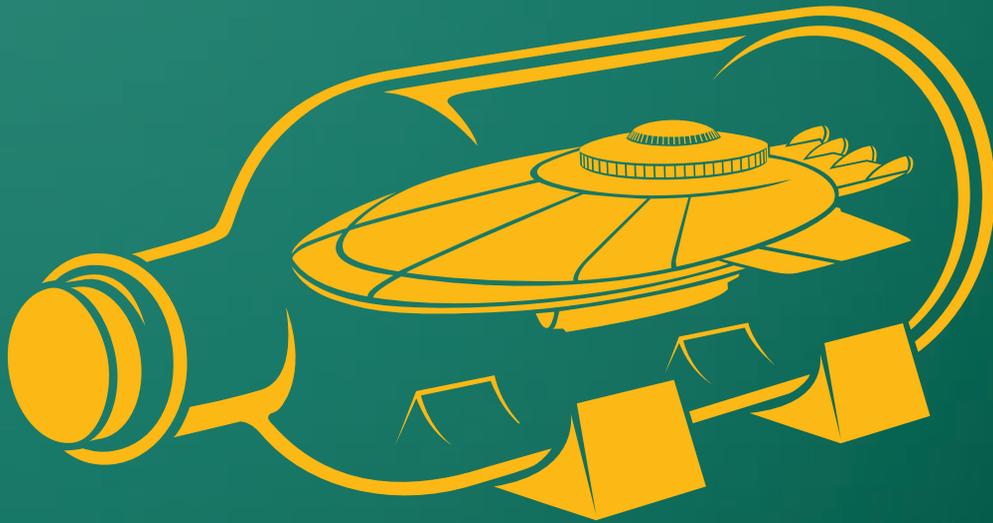
BERICHTE
AUS DER
RHEINISCH-
WESTFÄLISCHEN
TECHNISCHEN
HOCHSCHULE
AACHEN

AUSGABE 2/2009

ISSN-NR.
0179-079X



VERFAHRENS- TECHNIK – KREATIVE LÖSUNGEN FÜR MORGEN



Grow Further.

ENTWERFEN SIE DIE ZUKUNFT.

Als Ingenieur haben Sie nicht nur brillante Ideen, sondern wollen diese auch Wirklichkeit werden lassen? Dann bringen Sie Ihren Erfindergeist bei der weltweit führenden Strategieberatung ein. Und setzen Sie mit Ihrem technischen Know-how zukunftsweisende Lösungen für unsere Kunden um. Wir suchen herausragende Studentinnen und Studenten, Doktoranden und Professionals der Ingenieurwissenschaften. Mehr Informationen erhalten Sie von Ingrid Samuel, Telefon: (02 11) 30 11-32 00, Ortrud Görne, Telefon: (0 89) 23 17-43 61, oder unter www.bcg.de/ingenieure

BCG

THE BOSTON CONSULTING GROUP

Impressum
Herausgegeben
im Auftrag
des Rektors:
Dezernat Presse- und
Öffentlichkeitsarbeit
der RWTH Aachen
Templergraben 55
52056 Aachen
Telefon 0241/80-94327
Telefax 0241/80-92324
Pressestelle@zhv.rwth-aachen.de
www.rwth-aachen.de

Verantwortlich:
Toni Wimmer

Redaktion:
Sabine Busse
Angelika Hamacher



Foto: Peter Winandy

AUS DEM INHALT

Fotos:
Peter Winandy

Titel:
Probenahme an einer
Rektifikationsanlage
im Technikum
der AVT-Thermischen
Verfahrenstechnik.
Foto: Peter Winandy

Rücktitel:
Wissenschaftler
des Exzellenzclusters
„Maßgeschneiderte Kraftstoffe
aus Biomasse“ entwickeln
Prozesse zur nachhaltigen
Herstellung von Biokraftstoffen.
Die großen Herausforderungen
sind die verfahrenstechnischen
Schnittstellen, damit hinterher
alles – wie im anschaulichen
Lego-Modell – zusammenpasst.
Foto: Peter Winandy

Anzeigen:
print'n'press, Aachen
jh@p-n-p.de

Anzeigenberatung:
Elisabeth Mörs
Telefon 06131/58 04 96
e.moers@gzm-mainz.de

Art direction:
Klaus Endrikat

DTP:
ZAHRENDesign,
Aachen

Druck:
Emhart
Druck und Medien GmbH
Aachen

Gedruckt auf
chlorfrei gebleichtem Papier

Das Wissenschaftsmagazin
„RWTH-Themen“
erscheint einmal pro Semester.
Nachdruck einzelner Artikel,
auch auszugsweise,
nur mit Genehmigung der Redaktion.
Für den Inhalt der Beiträge
sind die Autoren verantwortlich.

Wintersemester 2009/2010

VERFAHRENS- TECHNIK – KREATIVE LÖSUNGEN FÜR MORGEN

| | |
|---|----|
| Globale Herausforderungen meistern | 6 |
| Wir gehen ´s an – Die Aachener Verfahrenstechnik | 8 |
| Vom Mikroliter zum Kubikmeter | 10 |
| Membranen als Schlüsseltechnologie von morgen | 14 |
| Öfen, Kohle und Bakterien – Energieverfahrenstechnik für die Zukunft | 18 |
| Verfahrenstechnik mit System | 22 |
| Flüssig-Flüssig-Extraktion | 26 |
| Kraftstoffe der Zukunft | 30 |
| Blut ist dicker als Wasser | 34 |
| Vom Labor- zum Produktionsmaßstab mit Blick aufs Detail | 38 |
| Biokatalyse in unkonventionellen Medien | 42 |
| Zeit für den Rohstoffwandel | 44 |
| Der „sPRINTER“ will den Titel | 48 |
| Namen und Nachrichten | 50 |

VERFAHRENS- TECHNIK – KREATIVE LÖSUNGEN FÜR MORGEN

Vorwort

Die RWTH befindet sich derzeit in einer Phase großer Veränderungen. Der Erfolg in der Exzellenzinitiative und die Entwicklung des RWTH Aachen Campus sind zwei wesentliche Motoren einer gewaltigen Wachstumsdynamik, die in der Hochschule überall spürbar ist.

Sichtbar wird diese Wachstumsdynamik vor allem an den zahlreichen Baumaßnahmen. An der RWTH herrscht gerade ein großer Bauboom: Bis 2015 sollen 33 größere Baumaßnahmen mit einem Gesamtvolumen von 300 Millionen Euro verwirklicht werden. Etwa 200 Millionen Euro davon dienen allein der Sanierung bestehender Gebäude. Das von der Landesregierung angestoßene Hochschulmodernisierungsprogramm HMOP erlaubt endlich, den auf insgesamt 1,2 Milliarden Euro geschätzten Modernisierungstau der RWTH offensiv anzugehen. Obwohl die HMOP-Mittel nicht so hoch ausfallen wie erwünscht, können doch endlich substanzielle Verbesserungen an den Gebäuden eingeleitet werden. Daneben ist die RWTH auch immer wieder erfolgreich bei der Einwerbung neuer Forschungsbauten aus der „Bund-Länder-Kofinanzierung“. So wird sich das Gesicht der Hochschule in den nächsten Jahren nachhaltig verändern: Die neuen Hörsaalkomplexe, die Sammelbauten für Physik, Elektrotechnik und Maschinenwesen, die Institutsgebäude für Energieforschung, Textiltechnik, Motorentwicklung werden die Qualität in Lehre und Forschung weiter steigern helfen.

Im Rahmen von städtebaulichen Wettbewerben achten der Bau- und Liegenschaftsbetrieb (BLB) als Bauherr und das Dezernat für Bau und Betriebstechnik der Hochschule darüber hinaus auch auf die Steigerung der Verweilqualität in öffentlichen Bereichen. Der Campus Templergraben wird als shared space – verkehrsberuhigte Zone bei Gleichberechtigung aller Verkehrsteilnehmer – den Anfang machen. Der RWTH Aachen Campus in Melaten und der Campus West auf dem Bahngelände am Westbahnhof werden ebenfalls unter diesen Ansprüchen geplant und verwirklicht werden. Und schließlich achten wir als RWTH darauf, in vorbildlicher Weise nach den modernsten Standards zu bauen: nachhaltig, umweltgerecht und reell, auch was die Baukosten angeht. So werden wir einen Beitrag dazu liefern, die Städte-Region Aachen als einen Ort der Wissenschaft weiter zu profilieren. ■



Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Ernst Schmachtenberg
Rektor

Feel the difference



Ford,
seit über
80 Jahren

in Deutschland.

Es macht einen

Unterschied, was man im Leben erfährt

und erreicht. Das ist bei Menschen nicht anders als bei

Unternehmen und ihren Marken. Besonders intensiv berühren sich die

Welten von Mensch und Marke beim Automobil: Stellen Sie sich vor,

dass **Ford in Deutschland** schon rund **40.000.000**

Fahrzeuge gebaut hat. Nehmen Sie jetzt Ihr eigenes automobiles

Erleben und multiplizieren Sie es mit 40 Millionen. Eine Zahl wird zum Ereignis,

wenn sie mit den **Menschen** verknüpft ist, **die dahinter-**

stehen. So wie die rund **25.000 Mitarbeiter** aus über 50

Nationen, die Ford in Deutschland beschäftigt und die uns auch global vorantreiben:

In Köln-Merkenich gestalten mehr als **2.000 Ingenieure** und **Techniker** die

Zukunft des Automobils. Und weil diese Zukunft nicht umsonst zu haben ist, hat Ford

seit 2004 **über 3 Milliarden Euro** in **Entwicklung** und **innovative**

Technologien investiert. Im gleichen Zeitraum flossen **1,38 Milliarden**

Euro in die deutschen **Produktionsstandorte**, davon 933 Millionen

allein in den letzten zwei Jahren. So hat unsere Vision von morgen bereits heute

eine wettbewerbsfähige Heimat. Von diesem **Unternehmer-**

geist profitieren alle: die Mitarbeiter und Ihre Familien, das

Gewerbe und die Infrastruktur, die Zulieferer und unsere Umwelt.

Denn Ford bietet in Deutschland das breiteste Angebot an Fahr-

zeugen mit **grünen Antriebstechnologien**

an. Insgesamt verlassen fast **800.000** hochwertige **Fahr-**

zeuge pro Jahr die deutschen Werke, von denen **80%** in den

Export gehen. Warum wir das alles in eine Anzeige

schreiben? Weil es nicht in der Bedienungsanleitung steht,

aber spürbar wird, wenn Sie einen Ford fahren. In Deutschland

haben Sie an den mehr als **1.800 Standorten**

unserer Vertriebs- und Servicepartner die Möglichkeit,

diesen Unterschied zu erleben.

Ford - in Deutschland zu Hause.

Globale Herausforderungen meistern

Beiträge der Verfahrenstechnik zur Sicherung nachhaltigen Wohlergehens

Verfahreningenieure gestalten und betreiben Prozesse, in denen gezielte stoffliche Veränderungen stattfinden. Damit tragen sie ganz wesentlich zur Lösung der großen globalen Herausforderungen der Zukunft bei.

Die Weltbevölkerung wird in den kommenden Jahrzehnten weiter wachsen und voraussichtlich bis 2050 um etwa die Hälfte zugenommen haben. Gleichzeitig wird der Lebensstandard in großen Teilen der Welt – insbesondere in so bevölkerungsreichen Nationen wie China und Indien – deutlich steigen. Der Bedarf an Energie, Nahrung, Wasser und sonstigen Produkten des täglichen Lebens wird entsprechend nachdrücklich zunehmen. Der Pro-Kopf-Primärenergieverbrauch in China steigt beispielsweise um 8 bis 10 Prozent jedes Jahr. Global wird mit einer jährlichen Zunahme des Primärenergieverbrauchs um 1,6 Prozent gerechnet. Die Menschheit verbraucht in den kommenden Jahren die globalen Ressourcen also immer schneller.

Aufgrund der Begrenztheit der Ressourcen stehen wir vor einem Rohstoffwandel in unterschiedlichsten Bereichen, der innerhalb weniger Jahrzehnte abgeschlossen sein muss, um den Menschen akzeptable Lebensgrundlagen nachhaltig sicherzustellen. Da der größte Anteil der Rohstoffe durch verfahrenstechnische Prozesse stofflich in die genutzten Endprodukte umgewandelt wird, kommt der Verfahrenstechnik eine zentrale Rolle bei diesem Rohstoffwandel zu. Dieser Herausforderung stellt sich die Aachener Verfahrenstechnik, kurz AVT, in grundlagenorientierter Forschung und industrienahe Entwicklung, um von einer neuen Rohstoffbasis ausgehend effiziente Prozesse zu schaffen, die es erlauben, nicht nur die bisherigen Produkte sondern auch Stoffe und Materialien mit neuen und besseren Eigenschaften herzustellen. In dieser Ausgabe der „RWTH-Themen“ werden einige der AVT-Forschungsprojekte vorgestellt, die Basis für die erfolgreiche Meisterung dieser Herausforderungen sind.

Energieträger und -speicherung

Für die Primärenergieträger lassen sich mit den verfügbaren Angaben zu heutigen Reserven, dem aktuellem Verbrauch sowie den Prognosen zu Bevölkerungszunahme und Steigerung des Lebensstandards die verbleibenden Reserven für die nächsten Jahre mit guter Sicherheit vorhersagen. Es ist absehbar, dass gerade Erdöl, das heute den größten Anteil zur globalen Energieversorgung beiträgt, in nur wenigen Jahrzehnten aufgebraucht wird. Erdöl muss dann insbesondere für den mobilen Einsatz wie in Verbrennungsmotoren oder Flugzeugtriebwerken vorrangig durch Produkte aus Kohle und gegebenenfalls Biomasse substituiert werden.

Für die Energiebereitstellung werden zunehmend nachhaltige Quellen Bedeutung gewinnen. Es lässt sich anhand von Lernkurven vorhersagen, dass aufgrund der starken Preissteigerung der fossilen Energieträger selbst die Fotovoltaik bis etwa 2020 rentabel wird. Für die konventionellen Silizium-Solarzellen muss die Verfahrenstechnik entsprechend effizientere Prozesse zur Herstellung von Reinst-Silizium weiterentwickeln und insbesondere dazu beitragen die Produktionskapazitäten wesentlich zu steigern. Für die flexiblen und universeller einsetzbaren Polymer-Solarzellen der neuen Generation, die durch den Einsatz von Nanopartikeln prinzipiell einen höheren Wirkungsgrad aufweisen können als die konventionellen Zellen, muss die Verfahrenstechnik die Technologie zur Herstellung der Nanopartikel und der dotierten Polymerfilme bereitstellen.

Da sowohl Sonnenenergie als auch Windenergie, die ebenfalls einen wesentlichen Beitrag für die zukünftige Energieversorgung leisten werden, volatil sind, das heißt tagszeitlich beziehungsweise wetterbedingt stark schwanken, sind effiziente Speichertechnologien zu entwickeln. Zwei Möglichkeiten, die heute verfolgt werden, sind die Wasserstofftechnologie und die Speicherung in Batterien. Die Verfahrenstechnik muss bei der

Wasserstofftechnologie die gesamten stofflichen Wandlungs- und Reinigungsschritte effizient bereitstellen. Dies schließt die Entwicklung geeigneter Membranen und deren Herstellprozesse für Brennstoffzellen mit ein. Batterien mit besonders guten Eigenschaften bezüglich Kapazität und Schnellladefähigkeit können durch den Einsatz von kleinsten Partikeln geeigneter Materialien gebaut werden. Auch hier ist HighTech-Verfahrenstechnik zur Herstellung dieser Partikel gefragt.

Es lässt sich zusammenfassen, dass es eine herausragende Aufgabe der Verfahrenstechnik in der allernächsten Zukunft ist, effiziente Prozesse zu entwickeln, welche die stoffliche Voraussetzung für eine optimale Energiewirtschaft schaffen. So werden die großen Prozesse, die heute zur Wandlung der Primärenergieträger in die vom Endnutzer eingesetzten Sekundärenergieträger betrieben werden – zum Beispiel zur Herstellung von Benzin, Kerosin, und so weiter – durch völlig andere Prozesse ersetzt, wie sie beispielsweise für eine Wasserstoffwirtschaft nötig sind sowie zur Produktion von Fotovoltaikmodulen unterschiedlicher Bauart und von Batterien.

Produkte der chemischen Industrie

Gleichzeitig werden die Produkte der chemischen Industrie der Sparten Polymere, Pharmazeutika, Fein- und Spezialchemikalien, Petrochemikalien sowie Wasch- und Körperpflegemittel zu etwa 90 Prozent aus den Rohstoffen Erdöl und Erdgas gewonnen. Der stofflich genutzte Anteil des gesamten geförderten Erdöls liegt bei unter 10 Prozent, der Rest wird energetisch eingesetzt, das heißt letztendlich verbrannt. Wenn die Reserven für Erdöl und Erdgas zunehmend aufgebraucht werden, muss damit auch die chemische Industrie dies einerseits durch Kohle, andererseits durch Biomasse ersetzen. In jüngster Vergangenheit wurden bei vielen Firmen umfangreiche Forschungsprogramme zur Entwicklung entsprechender Prozesse angestoßen.

Beispielhaft sei hier das Science-to-Business-Center Bio der Evonik-Degussa genannt, mit dem bereits einige AVT-Kooperationen erfolgreich abgeschlossen wurden.

Eine besondere Herausforderung und Chance ist es, die Syntheseleistung der Natur in der Biomasse gezielt zu nutzen, um neue Stoffe und Materialien herzustellen. Während bei Erdöl als Ausgangsstoff jede Funktionalität der Zielmoleküle durch entsprechende Reaktionsschritte aufwändig eingebracht werden muss, zeichnet sich Biomasse durch eine Vielzahl funktioneller Gruppen aus, deren Zahl eher zu verringern ist. Für diese Reaktionsschritte, die sich grundlegend von den bei Erdöl relevanten unterscheiden, werden besonders von der Bioverfahrenstechnik wertvolle Beiträge erwartet, da mit Hilfe von Mikroorganismen und Enzymen sehr gezielte Reaktionen möglich sind. Heute wird davon ausgegangen, dass effiziente Prozesse der Zukunft klassisch-katalytische und bioverfahrenstechnische Reaktionsschritte in geeigneter Kombination so enthalten, dass der Gesamtprozess optimal abläuft. Hier ist also eine enge interdisziplinäre Kooperation zwischen Chemie, Biotechnologie und Verfahrenstechnik wesentlich.

Wird Biomasse als Rohstoff so effizient eingesetzt, bedingt dies, dass eine Vielzahl der Prozessschritte anders als bisher in Flüssigkeiten ablaufen muss, die sich zudem tendenziell durch vergleichsweise hohe Viskosität auszeichnen. Grund sind eben die funktionellen Gruppen der Biomoleküle, die auch zu sehr geringen Dampfdrücken führen. Häufig liegen die Reaktionsmedien als möglicherweise ebenfalls höherviskose wässrige Lösungen vor. Trennverfahren und Reaktionsschritte für solche Medien sind heute bei Weitem nicht ausreichend entwickelt.

Als Trennschritte kommen hierfür Flüssig-Flüssig-Extraktion und Membranverfahren besonders in Betracht; für beide besteht die AVT international anerkannte Expertise. Die AVT be-



forscht genau diese Fragestellungen in der Kopplung mit den (bio-)chemischen Reaktionen zum Beispiel auch im Exzellenzcluster „Maßgeschneiderte Kraftstoffe aus Biomasse“.

Dieser Rohstoffwandel sowohl in der chemischen Industrie als auch für die stofflichen Aspekte der Energiewirtschaft muss in wenigen Jahrzehnten abgeschlossen sein. Diese Entwicklung wird damit wesentlich schneller vorantreiben als beispielsweise beim letzten Rohstoffwandel von Kohle hin zum Erdöl, der etwa Anfang des letzten Jahrhunderts eingeläutet wurde. Um die Basis für die neuartigen effizienten Prozesse für Biomassenutzung zu schaffen, sind einerseits Grundlagenuntersuchungen zu den einzelnen Prozessschritten erforderlich, welche die besonderen Bedingungen zum Beispiel aufgrund der Eigenschaften von Biomasse explizit berücksichtigen. Andererseits gelingt eine so zügige Entwicklung neuer Prozesse nur, wenn auch solide Expertise zur Optimierung der Auswahl und Verschaltung der Prozessschritte zu einem Gesamtprozess verfügbar ist, wie sie in der Prozesstechnik in der AVT vorhanden ist.

Wasser und Ernährung

Aufgrund des Bevölkerungswachstums wird es zunehmend schwieriger, eine ausreichende Versorgung mit Trinkwasser und Nahrungsmitteln sicherzustellen. Zur Nahrungsmittelsituation sei vergegenwärtigt, dass heute jedem Menschen global gemittelt eine nutzbare Bodenfläche von 15.500 m² zur Verfügung steht, von der ebenfalls im globalen

Mittel 7.650 m² für die landwirtschaftliche Erzeugung von Nahrungsmitteln eingesetzt werden. Alleine aufgrund des Bevölkerungswachstums wird die 2050 jedem Menschen zur Verfügung stehende nutzbare Landfläche auf 11.000 m² zurückgehen. Dies bedeutet, dass die Landwirtschaft entweder neue Regionen landwirtschaftlich nutzbar machen oder deutlich flächeneffizienter werden muss, wenn nachhaltig eine ausreichende Ernährung der Menschheit sichergestellt werden soll. Beide Ziele sind nur erreichbar, wenn genügend Wasser für landwirtschaftliche Zwecke zur Verfügung steht. Die weitest große Wassermenge wird dabei landwirtschaftlich eingesetzt; industriell und im Haushalt benötigtes Wasser macht nur etwa 30 Prozent des gesamten Wasserkonsums aus. Landwirtschaftlich genutztes Wasser muss aber auch hier besonderen Reinheitsanforderungen genügen, um einer Versalzung der Böden entgegenzuwirken. Auch hier stellt die AVT zum Beispiel mit der Membrantechnik Methoden bereit, die zukünftig insbesondere für den Einsatz klein- und mittelskaliger Anlagen in Entwicklungs- und Schwellenländern weiterentwickelt werden müssen.

Schließlich muss Nahrungsmittelpflanzen eine ausreichende Nährstoffzufuhr bereitgestellt werden. Aufgrund der absehbar intensiveren Nutzung der Biomasse zur Ernährung, aber auch für energetische und stoffliche Verwendung wird bedingt, dass die dem Boden mit dem Aberten der Biomasse entzogenen Nährstoffe diesem wieder zuge-

führt werden müssen. Da auch die fossilen Düngemittelvorräte begrenzt sind, beispielsweise beträgt bei Phosphor die statistische Reichweite lediglich noch 30 bis 100 Jahre, müssen hier die Nährstoffe aus den Abfallströmen, zum Beispiel dem Abwasser effizient zurückgewonnen werden. Auch hier leistet die AVT den wesentlichen Beitrag dazu, die stofflichen Kreisläufe zu schließen, indem Prozesse beforscht werden, in denen Klärschlammasche in wenigen Schritten zu Dünger umgewandelt wird.

Autor:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Pfennig ist Inhaber des Lehrstuhls AVT-Thermische Verfahrenstechnik.

Foto: Peter Winandy

Unter dem Begriff Verfahrenstechnik können sich viele wenig vorstellen, obwohl fast alle Verbrauchsgüter wie Lebensmittel, Kraftstoffe, Kunststoffe und Zement durch verfahrenstechnische Prozesse hergestellt werden. Verfahrenstechnik ist eine Produktionstechnik. Sie wird allgemein als die ingenieurwissenschaftliche Disziplin beschrieben, die sich mit der technisch-wirtschaftlichen Durchführung von Prozessen befasst, in denen Stoffe nach Art, Eigenschaft oder Zusammensetzung verändert werden. Auch diese wenig anschauliche Definition lässt sich schnell mit Leben füllen. Die „Umwandlung der Stoffart“ beinhaltet unter anderem jegliche Reaktion, so werden zum Beispiel Trauben durch Gärung zu Wein umgesetzt. Eine typische Stoffeigenschaft bei Feststoffen ist die Korngröße und das Zerkleinern somit ein typischer verfahrenstechnischer Prozess. Auch jeder Wechsel des Aggregatzustandes wie Schmelzen und Erstarren oder Verdampfen und Kondensieren bedeutet eine Änderung der Stoffeigenschaften. Die Zusammensetzung eines Stoffgemisches ändert sich beispielsweise bei der Destillation: die leichter flüchtige Komponente wird verdampft, während sich der Schwereanteil in der Flüssigphase anreichert. Dieses Beispiel macht deutlich, dass die verschiedenen Umwandlungsarten oft eng zusammenhängen und eine eindeutige Zuordnung nicht immer möglich ist. Um auch komplexe Herstellungsprozesse beschreiben zu können, werden diese in wiederkehrende Aufgaben – so genannte Grundoperationen – zerlegt. Grundoperationen umfassen etwa Misch- und Zerkleinerungsvorgänge, Erhitzen und Kühlen oder auch Fördern, Trennen und Lagern. In den letzten Jahren haben neben Entwicklung, Betrieb und Optimierung von verfahrenstechnischen Herstellungsprozessen auch Aspekte der Produktentwicklung an Bedeutung gewonnen, weil sich die Produkteigenschaften direkt aus der Gestaltung und der Betriebsweise des Prozesses ergeben.

Verfahrenstechnik an der RWTH Aachen

Die Geschichte der Verfahrenstechnik in Aachen beginnt in den 1950er Jahren. Zur Verbesserung von Forschung und Ausbildung wurde 1952 die „Gesellschaft für Verfahrenstechnik“ als Zusammenschluss von 125 Firmen gegründet, die noch im selben Jahr das „Forschungsinstitut für Verfahrenstechnik“ in Aachen ins Leben rief. Zeitgleich wurde auch die Studienrichtung Verfahrenstechnik im Rahmen des Maschinenbaustudiums an der RWTH eingeführt. Fachliche Ergänzungen und die Veränderung der verfahrenstechnischen Forschungsbereiche führten in den kommenden Jahrzehnten zu Umstrukturierungen innerhalb des Fächerkanons der Verfahrenstechnik. Dies mündete 1992 in fünf Forschungsbereiche:

■ Die Bioverfahrenstechnik (Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Büchs) beschäftigt sich mit der Auslegung von Bioreaktionsprozessen und hier insbesondere mit dem Scale-Up.

■ Die Chemische Verfahrenstechnik (Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Melin) forscht schwerpunktmäßig im Bereich der Membranprozesse mit Anwendungen in der Wasseraufbereitung und in der Chemischen Technologie.

■ Die Mechanische Verfahrenstechnik (Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Modigell) untersucht Fragestellungen der Hochtemperatur- und Energie-Verfahrenstechnik und in der Rheologie.

■ Die Prozesstechnik (Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Marquardt) beschäftigt sich mit der Entwicklung modellbasierter Methoden zur Auslegung und Steuerung von Prozessen, der modellgestützten experimentellen Analyse und der dazu erforderlichen numerischen Lösungsverfahren.

■ Die Thermische Verfahrenstechnik (Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Pfennig) richtet ihren Fokus auf die Untersuchung von Flüssig-Flüssig-Extraktionen und auf die Thermodynamik komplexer Gemische.

Die zahlreichen Kooperationsprojekte zeigen, dass schon immer Wert auf eine enge Zusammenarbeit zwischen den Lehrstühlen gelegt wurde. Als prominente Beispiele können der Sonderforschungsbereich 540 „Modellgestützte experimentelle Analyse kinetischer Phänomene in mehrphasigen Reaktionssystemen“ und der Exzellenzcluster „Maßgeschneiderte Kraftstoffe aus Biomasse“ genannt werden. Um die Zusammenarbeit weitergehend zu stärken, wurde 2007 die Aachener Verfahrenstechnik, kurz AVT, gegründet. Auch wenn die einzelnen Lehrstühle innerhalb der AVT juristisch ihre Selbstständigkeit behalten, so werden die Aktivitäten in Forschung und Lehre koordiniert, um die Ressourcen besser zu nutzen und eine größere Schlagkraft zu erreichen. Die Ziele des AVT-Verbunds lassen sich wie folgt zusammenfassen:

■ Konsolidierung des Kompetenzportfolios und die Ausgestaltung eines gemeinsamen langfristig ausgelegten Forschungsprogramms,

■ gemeinsame Akquise und Bearbeitung von größeren Forschungsvorhaben,

■ Abstimmung und kontinuierliche Verbesserung des AVT-Lehrangebotes,

■ Abstimmung und kontinuierliche Verbesserung der Qualifizierung junger Wissenschaftler,

■ effektive Nutzung der verfügbaren technischen und personellen Ressourcen,

■ Integration mit anderen Verbänden innerhalb und außerhalb der RWTH Aachen.

Es wird deutlich, dass die Motivation für die Gründung der AVT in den neuen Herausforderungen der Universitätslandschaft liegt: durch den Zusammenschluss kann eine für die Bearbeitung von interdisziplinären Forschungsprojekten notwendige kritische Masse leichter erreicht und die Sichtbarkeit erhöht werden. Immerhin beschäftigt die AVT etwa 140 Mitarbeiter, davon 100 im wissenschaftlichen Bereich.

Die Aachener Verfahrenstechnik

Außerdem können so Kernkompetenzen durch die Nutzung von Synergien in Forschung, Lehre und Ausbildung verbessert werden.

Ein solcher Ansatz ist erforderlich, weil zukünftige Forschungsthemen im Bereich der Verfahrenstechnik vor allem durch globale Herausforderungen bestimmt werden: eine wachsende Weltbevölkerung und das steigende Konsumverhalten in Entwicklungs- und Schwellenländern werden zu einem erhöhten Bedarf an Industrie- und Verbrauchsgütern wie Nahrungsmitteln, Wasser, Rohstoffen und Energie führen. Diese Probleme können nur durch ein weitsichtiges strategisch positioniertes Vorgehen gelöst werden, wie es die Forschungsstrategie der AVT im Bereich Verfahrenstechnik vorsieht.

Viele dieser Fragestellungen können auf verschiedenen Zeit- und Größenskalen betrachtet werden. In der AVT wird ein Multiskalenansatz verfolgt: die klassischen Konzepte der Verfahrenstechnik – Messen, Modellieren, Auslegen, Betreiben und Regeln – werden sowohl auf den verschiedenen Zeit- als auch Größenskalen eingesetzt. Der Betrachtungshorizont reicht von Sekundenbruchteilen bis zu Jahren und von Molekülen bis

zu ganzen Produktionsstraßen. Diese methodenorientierte Forschung beinhaltet die Entwicklung hochauflösender Messtechnik und Methoden für die Auswertung von experimentellen Messdaten zur Charakterisierung von Transport- und Reaktionskinetiken. Außerdem werden ausgewählte Grundoperationen wie Membran- und Extraktionsprozesse, sowie die Vorgänge in Bioreaktoren und Suspensionen untersucht.

Die entwickelten Methoden und Techniken werden dann in einer Vielzahl von Anwendungsgebieten eingesetzt. Besonderer Fokus liegt auf Prozessen zur Verarbeitung nachwachsender Rohstoffe zu Kraftstoffen oder anderen Chemikalien. Außerdem spielen Aufbereitungstechniken für Frisch- und Abwasser eine große Rolle. Neue verfahrenstechnische Fragestellungen treten in der Energietechnik auf, wo die Stoffwandlung immer enger mit der Energiewandlung verknüpft wird, sei es zur Aufbereitung von Energierohstoffen und Abgasen oder auch in den energiewandelnden Prozessen selbst. Neben der fast klassischen Aufgabenstellung der energiesparenden Produktionsprozesse gewinnen neue Fragen der Speicherung insbesondere von erneuerbaren Energien künftig an Bedeutung.

Die RWTH Aachen hat sich mit Ihrem Zukunftskonzept „RWTH Aachen 2020: Meeting Global Challenges“ den globalen Herausforderung des 21. Jahrhunderts gestellt. Die Bewältigung dieser Herausforderung

erfordert eine enge Kooperation zwischen Ingenieur- und Naturwissenschaften, um im Sinne eines push-pull Verhältnisses komplementäre Forschung zu Erkenntnisgewinn einerseits und zur Umsetzung neuer naturwissenschaftliche Konzepte und Entdeckungen in Produkte und Prozesse andererseits im Verbund durchführen zu können. Unsere Partner sehen wir insbesondere in der Chemie, Biologie und Physik, aber auch in Mathematik und Informatik. Wir sind überzeugt, dass die Aachener Verfahrenstechnik als Verbund und in Kooperation mit den Naturwissenschaften nicht nur einen wichtigen Beitrag zum Zukunftskonzept der RWTH leisten kann, sondern insbesondere auch herausragende international beachtete Forschungsergebnisse hervorbringen kann.

Autoren:
Dipl.-Ing. Anna Besler und
Dipl.-Ing. Andreas Harwardt
sind Wissenschaftliche
Mitarbeiter des Lehrstuhls
AVT-Prozesstechnik.
Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Wolfgang Marquardt
ist Inhaber des Lehrstuhls
AVT-Prozesstechnik.

Vom Mikroliter zum Kubikmeter

In der Industrie werden nicht mehr nur chemische Reaktionen, sondern vermehrt Mikroorganismen oder höhere Zellen zur Produktsynthese eingesetzt. Ein Grund liegt im Wandel der Ausgangsstoffe: Hier ersetzen in Zukunft nachwachsende Rohstoffe mehr und mehr das fossile Erdöl. Ein zweiter Grund sind die Produkte: Die enormen Fortschritte gentechnischer und molekularbiologischer Forschung machen die Herstellung komplexer Moleküle möglich, die für Pharma- und chemische Industrie völlig neue Möglichkeiten eröffnen. Einige der ältesten

Anwendungen bio(techno)logischer Synthesen sind zum Beispiel die Umwandlung von Zucker in Alkohol und von Alkohol in Essig, die Menschen schon seit tausenden von Jahren bekannt sind. Heute erstreckt sich das Spektrum biologisch herstellbarer Stoffe von Massenchemikalien wie Zitronensäure über Enzyme für Waschmittel bis hin zu Pharmazeutika wie Impfstoffen oder Antibiotika.

Auch wenn die Produktion in Größenordnungen von einigen dutzend Kubikmetern ablaufen kann, findet doch ein wesentlicher Teil der Forschung

und Entwicklung in kleinen und kleinsten Maßstäben statt. Ziel des so genannten Screenings ist es, den geeignetsten Organismus und die besten Bedingungen für die Produktion zu identifizieren und diese dann in den größeren Maßstab zu übertragen. Zwei Anforderungen werden hier gestellt: Einerseits sollten die besten Organismen und Bedingungen gewählt werden. Fehler in dieser frühen Phase der Prozessentwicklung kosten eine Menge Geld und können den Erfolg des gesamten Prozesses gefährden. Zum anderen muss gewährleistet sein, dass die Bedingungen zwischen Screening und Produktion vergleichbar sind. Ansonsten kann diese Maßstabsübertragung, auch Scale-Up genannt, zu einer großen Hürde werden, über die

nicht wenige Unternehmen stolpern.

Probleme bei Maßstabsübertragungen sind nichts Neues in der Geschichte. Einer Anekdote zufolge nutzten dies die Einwohner der Insel Rhodos aus, als sie mit dem Koloss von Rhodos eines der Sieben Weltwunder errichteten. Dazu ließen sie den Architekten, einen gewissen Chares von Lindos, zuerst ein kleineres Standbild errichten. Für das doppelt so große Original veranschlagte der antike Baumeister dann schlicht den doppelten Preis, dabei betrug die Kosten natürlich das Achtfache, da sich das Volumen für die benötigte Bronze nun einmal als dritte Potenz der Größe ergibt. Sollte diese Geschichte wahr sein, hatte Chares von Lindos offen-

Bild 1: In der Aachener Verfahrenstechnik wird die Größenverteilung einer mikrobiellen Kultur vermessen, um so früh-

zeitig geeignete Bedingungen für den späteren Prozess identifizieren zu können. Foto: Peter Winandy



Der Aachener Weg zum intelligenten Screening in der Bioprozessentwicklung

bar ein Scale-Up-Problem! Die Geschichte ging für den antiken Baumeister nicht gut aus, auf einem Großteil der Kosten sitzen geblieben, nahm er sich das Leben. Über das „Doppelte-Größe-achtfacher-Preis“-Problem können Verfahrenstechniker heute nur müde lächeln: Moderne Bioprozesse überbrücken in ihrer Entwicklung Volumina von Mikroliter zum Kubikmetermaßstab, also von neun Zehnerpotenzen!

Das Ziel einer Bioprozessentwicklung, im Regelfall ein großer Rührkesselreaktor, ist vergleichsweise gut erforscht

und beschrieben. Mess- und Regeltechnik erlauben dort, die gewünschten Bedingungen von Temperatur, pH-Wert und Sauerstoffversorgung optimal einzustellen und zu kontrollieren. Die Vorversuche und das Screening allerdings werden aus Kostengründen meist in geschüttelten Erlenmeyerkolben mit Volumina von 100 Milliliter bis 1 Liter durchgeführt. Wie leicht zu erkennen ist, besitzt ein Erlenmeyerkolben nicht die beste Geometrie, komplizierte Mess- und Regeltechnik zu befestigen. Daher überlassen viele Firmen die Kulturen dort sich selbst und ziehen allenfalls gelegentlich eine Probe. Was tatsächlich dort passiert? Ob in den Kolben letztlich doch etwas anderes als im Bioreaktor abläuft? Häufig bleiben diese

wichtigen Fragen unbeantwortet.

Mit innovativen Messtechniken ist es heute möglich, die Aktivität und das Wachstum von mikrobiellen Kulturen auch im Erlenmeyerkolben zu verfolgen. Zur Online-Überwachung ist in der Aachener Verfahrenstechnik dazu die RAMOS-Anlage entwickelt worden, RAMOS steht für Respiration Activity Monitoring System. Es ist in der Lage, bei einer mikrobiellen Kultur die Atmungsaktivität zu messen. Am Sauerstoffverbrauch und der CO₂-Produktion kann man den aktuellen Zustand der Kultur ablesen. Neben der ausreichenden Sauerstoffversorgung wirkt sich insbesondere die Prozessführung entscheidend auf die Vergleichbarkeit zum späteren Produktionsreaktor aus. So

werden Industrieprozesse häufig im Fed-Batch gefahren, dem Organismus wird also sein Substrat – zum Beispiel Zucker – im Laufe der Zeit erst nach und nach zugefüttert. So soll verhindert werden, dass sich die Organismen aus dem Überangebot an Zucker zu Beginn der Kultivierung „überfressen“, unerwünschte Nebenprodukte herstellen und sich so selbst schädigen. Um dies im kleinen Maßstab abzubilden, ist diese Fed-Batch-Betriebsweise auch für den Schüttelkolben realisiert worden. Dazu werden ins Medium so genannte Feed-Beads gegeben. In ihnen ist der Zucker in eine Silikonmatrix eingebettet, die ihn nach und nach ins Medium freisetzt. Eine ähnliche Technik kann auch genutzt werden, um den pH-Wert

Bild 2: Mikroliterplatte als Miniaturreaktor für das Screening.

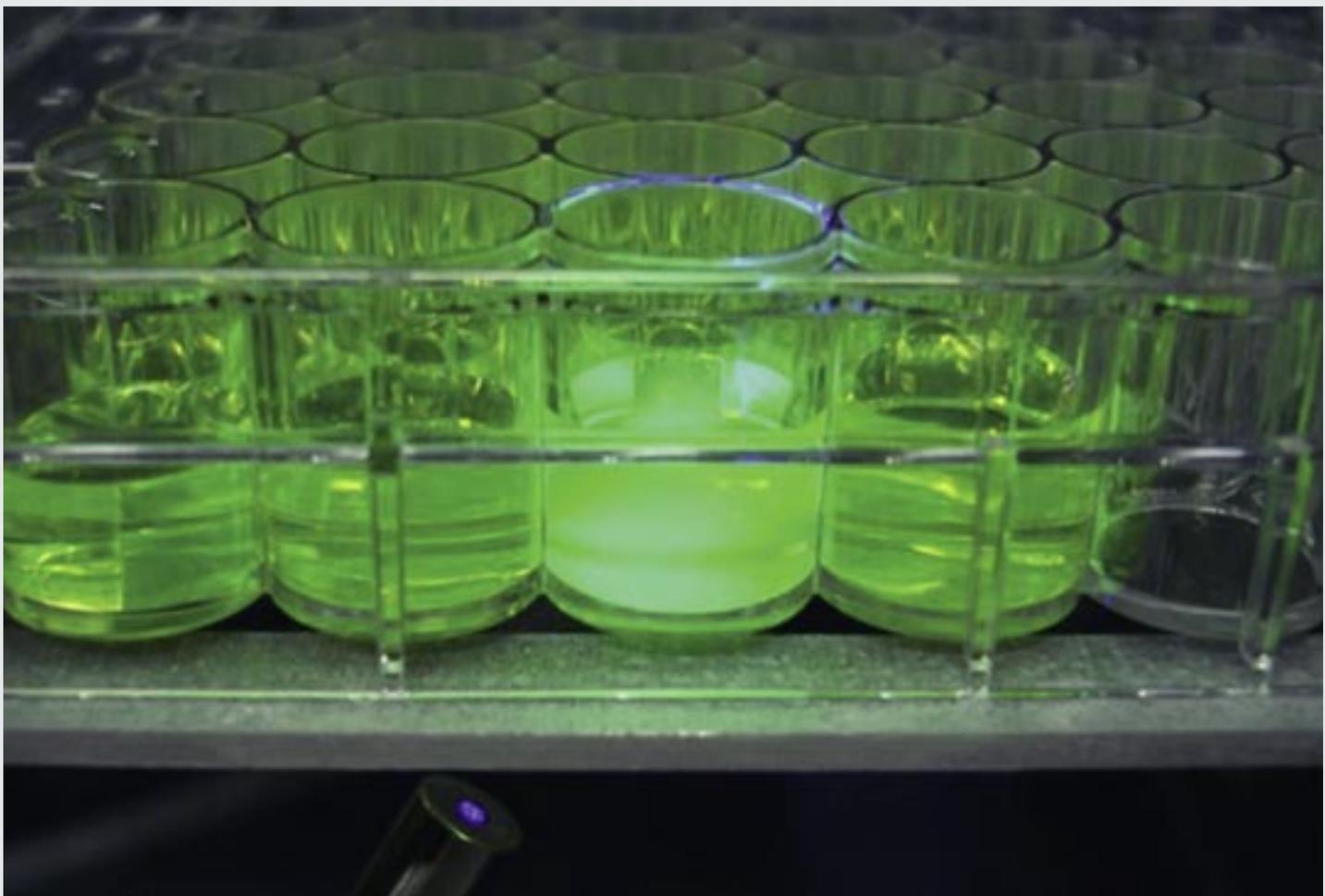


Bild 3: 50 Liter-Druckreaktor der Aachener Verfahrenstechnik für den Labormaßstab, der im wesentlichen dem späteren großtechnischen Produktionsreaktor entspricht.

in den Kolben konstant zu halten, hier wird statt des Zuckers Natriumcarbonat (Soda) in die Matrix eingebracht.

Eine Randbemerkung: Während der Koloss von Rhodos schon nach 66 Jahren durch ein Erdbeben umstürzte, wird der Erlenmeyerkolben schon seit mehr als 100 Jahren im Labor eingesetzt. Aber durch den Trend zur Automatisierung und Miniaturisierung findet auch hier ein Wandel statt. Nutzte man früher noch einen ganzen Schrank mit dutzenden oder hunderten von Schüttelkolben, ist heute die Mikrotiterplatte das Mittel der Wahl. Auf der rechteckigen Grundfläche ist dabei eine Vielzahl von Vertiefungen – auch Kavitäten genannt – untergebracht, die als Kultivierungsgefäße dienen. Mikrotiterplatten mit 48 oder 96 Vertiefungen und entsprechenden Arbeitsvolumina von etwa 100 bis 600 Mikrolitern werden zur Kultivierung von Organismen eingesetzt. Vereinfacht gesagt: Man bringt einen Schrank voll miniaturisierter Schüttelkolben auf einer Fläche eines DIN A6 – Blattes unter.

Ein Orakel soll den Bewohnern von Rhodos von der Restaurierung des gestürzten Kolosses abgeraten haben: „Was gut liegt, soll man nicht von der Stelle bewegen.“ Für die Kultivierung von Mikroorganismen sollte man diesem Orakelspruch allerdings nicht vertrauen. Hier gilt: Bewegung ist zwingend notwendig! Genau wie Erlenmeyerkolben müssen auch Mikrotiterplatten ständig geschüttelt werden. Hauptgrund ist die erforderliche Durchmischung und die kontinuierliche Versorgung der Organismen mit Sauerstoff. Um diese Anforderungen zu erfüllen, war eine genaue Charakterisierung der Flüssigkeitsbewegung der erste Schritt. Hierdurch wurde es möglich, Probleme und Hürden bei der späteren Übertragung der Kultivierung in den Maßstab eines Rührkessels zu erkennen und auch zu beheben. Ergebnis dieser Verbesserung ist die „Flowerplate“ mit einem völlig neuartigen, rationalen Design



für die Kavitäten einer Mikrotiterplatte. Die neue Form, deren Querschnittsfläche an eine Blume erinnert, sieht allerdings nicht nur gut aus, sie bietet den entscheidenden Vorteil, dass die Blütenblätter als Stromstörer wirken und durch die erhöhte Turbulenz der Sauerstofftransfer zu den Mikroorganismen deutlich verbessert wird.

Der Ehrgeiz der Aachener Verfahrenstechniker war es nun, auch für den Maßstab der Mikrotiterplatte Online-Messtechniken zu entwickeln. Die Herausforderung waren hierbei die hohe Parallelität der Kultivierungen und das Flüssigkeitsvolumen von wenigen 100 Mikrolitern. Zudem war eine wiederwertbare und nicht invasive Messtechnik nötig. Die Lösung heißt heute „BioLector“ und steht seit 2006 durch ein Spin-Off-Unternehmen Kunden in aller Welt zur Verfügung, siehe auch www.m2p-labs.com.

Das Medium zur einfachen und störungsfreien Messung im BioLector heißt Licht. Im einfachsten Fall wird Licht an Teilchen gestreut. Die Intensität des zurückgestreuten Lichtes dient dabei als Maß für die An-

zahl der Organismen in der Kultur. Zusätzlich kann die Messung der Fluoreszenzeigenschaften einer Kultur Auskunft geben über die Produktion von Eiweißen oder den physiologischen Zustand der Mikroben. Durch die Zugabe spezieller Fluorophore ist außerdem die Erfassung des pH-Wertes oder des gelösten Sauerstoffgehaltes der Kulturflüssigkeit möglich.

Der technische Clou des BioLector-Systems liegt in zwei wesentlichen Neuerungen: Eine Verfahrenheit bewegt den mit einem Spektrometer verbundenen Lichtleiter unterhalb der Mikrotiterplatte nacheinander zu jeder einzelnen Kavität. So ist die automatisierte Analyse aller Kulturen möglich. Die zweite Neuerung ist die Messung während des laufenden Schüttelvorganges. Eine Unterbrechung der Bewegung und damit der Sauerstoffversorgung werden vermieden und eine Beeinflussung der Mikroorganismen ist so praktisch nicht vorhanden. Jede einzelne Kavität einer handelsüblichen Mikrotiterplatte – oder besser noch der neue Flowerplate – kann mit diesem System eine

große Menge Online-Informationen liefern.

Was noch fehlt, um in der Mikrotiterplatte einen industriellen Bioprozess nachzubilden, ist eine Prozessregulierung. Im Rührkessel kommen routinemäßig pH-Regulation und Zufütterung von Nährstoffen zum Einsatz. Um dies auch in Mikrotiterplatten umzusetzen, arbeiten die RWTH-Verfahrenstechniker neben der gezielten Freisetzung von pH-Stellmitteln und Nährstoffen aus Polymeren – analog dem beschriebenen System für Schüttelkolben – aktuell an mikrofluidischen Bauteilen für Mikrotiterplatten. Diese werden am Boden der Mikrotiterplatte angebracht und sorgen mit ihren Kanälen von nur 100 bis 200 Mikrometern Breite für eine Verbindung zwischen den Kavitäten. Durch Ventile und einfache Pumpen wird die Dosierung von wenigen Nanolitern von einer Kavität zur anderen möglich.

Die Rhodier vertrauten damals dem Orakel – was natürlich auch eine Menge Kosten und einen neuen Baumeister ersparte – und stellten die Trümmer des gestürzten Kolos-

Bild 4: Die Aachener Bioverfahrenstechniker haben es sich zur Aufgabe gemacht, den Schüttelkolben detailliert zu charakterisieren. Hierdurch werden Schüttelkolben-Experimente im Milliliter-Maßstab auf den späteren

Produktionsprozess im Kubikmeter-Maßstab übertragbar. Auf diese Weise können die Entwicklungskosten für biotechnologische Prozesse deutlich reduziert werden. Foto: Peter Winandy



ses neun Jahrhunderte aus, bevor die Araber sie als Altmetall abtransportierten. So lange möchte heute natürlich niemand mehr warten. Die neuen Mess- und Regeltechniken für Kleinkultursysteme versetzen Verfahrenstechniker daher in die Lage, schon von Beginn an ein intelligentes Screeningkonzept zu verfolgen, dessen Ergebnisse sich auf den Produktionsmaßstab übertragen lassen. Der Vergleich von Daten aus RAMOS und BioLector mit Rührkesselfermentern zeigt, dass in Screening und Scale-Up beträchtliche Verbesserungen erzielt worden sind und dass dafür nur ein wenig Köpfchen und kein achtetes Weltwunder nötig ist.

Autoren:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Büchs leitet den Lehrstuhl AVT-Bioverfahrenstechnik.
Dipl.-Biotechnol. Matthias Funke und M.Sc. Tobias Klement sind Wissenschaftliche Mitarbeiter am Lehrstuhl AVT-Bioverfahrenstechnik.

Membranen als Schlüsseltechnologie von morgen



Membranen trennen Räume und lassen bevorzugt bestimmte Komponenten passieren. Mit dieser Eigenschaft stellen Zellmembranen einen der wichtigsten Bestandteile jeder Zelle: sie ermöglichen Konzentrationsunterschiede zwischen innen und außen, lassen benötigte Stoffe selektiv hindurch und befördern Schadstoffe nach außen. Für die technischen Membranen sind die biologischen Membranen ein in vielen Punkten unerreichtes Vorbild. Aber auch technische Membranen lassen selektiv bestimmte Stoffe hindurch und halten andere zurück. Sie werden zunehmend zur Reinigung und zur Konzentrierung von Stoffströmen verwendet.

Die Forschungsgruppe „Molekulare Membrantrennverfahren und Reaktionstechnik“ beschäftigt sich mit der Trennung von Stoffgemischen mittels Membranen, basierend auf den unterschiedlichen Diffusions- und Löslichkeitskoeffizienten der zu trennenden Stoffe. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Entwicklung neuer Geräte und Methoden, die Ressourcenverbrauch senken, damit Kosten sparen und die Umwelt entlasten. Wichtige Aufgaben sind neben der experimentellen Charakterisierung der Membranmaterialien auch die Simulation und Konstruktion innovativer Membranmodule für etablierte und neue Trennanwendungen. Darüber hinaus werden Anlagen für membran-gestützte Verfahren ausgelegt und im Pilotmaßstab erprobt oder eigens entwickelte Membranmodule eingesetzt.

Die Wissenschaftler der AVT arbeiten an Einsatzgebieten in der Energietechnik, dem prozessintegrierten Umweltschutz und Anwendungen außerhalb der klassischen Verfahrenstechnik.

Energietechnik

Brennstoffzellen:

Was Membranen mit Energietechnik zu tun haben, lässt sich an der Brennstoffzelle verdeutlichen. Im Gegensatz zur Wärmekraftmaschine, deren Wirkungsgrad grundsätzlich thermisch limitiert ist, können Brennstoffzellen theoretisch die gesamte chemisch gebundene Energie nutzen. Nur Wenige wissen aber, dass das Herzstück der Brennstoffzelle – zumindest bei dem gängigsten Typ PEM – eine Membran ist. Zur Bereitstellung von elektrischem Strom trennt die Membran selektiv zwei Räume: Kathode und Anode. Nur Ionen wandern durch die Membran, die Elektronen werden über einen externen Stromkreis geführt und speisen den Elektromotor. Membranen können auch in der Peripherie von Brennstoffzellen zum Einsatz kommen, beispielsweise in Membrankontaktoren zur Befuchtung der Zuströme. Membranen können aber auch in Kombination mit konventioneller Energieerzeugung nützliche Dienste leisten: Bestimmte keramische Membranen werden bei Temperaturen über 800°C für Sauerstoff permeabel und ermöglichen so die Abtrennung des für Verbrennungsprozesse benötigten Sauerstoffs aus Luft. Bei der Verbrennung von Kohlenstoff oder Kohlenwasserstoffen fällt dann nur Wasserdampf und Kohlendioxid an, das Treibhausgas CO₂ kann ohne die Anwesenheit von störendem Luftstickstoff effektiver abgetrennt und gelagert werden.

In Brennstoffzellen und keramischen Membranen zur Luftzerlegung findet jeweils eine ideale Trennung statt, die Membran lässt also nur eine Komponente hindurch, die anderen überhaupt nicht. In den meisten Fällen ist dies jedoch nicht so, Membranen lassen vielmehr alle Stoffe eines Gemisches passieren, einige jedoch besser als andere. Wenn es den Materialwissenschaftlern nicht gelingt, für eine Trennaufgabe ausreichend selektive Membranen zu entwickeln, besteht grundsätzlich die Möglichkeit

einer mehrstufigen Anlage. Im Falle der direkten CO₂-Abscheidung aus Rauchgas wären die Kosten dafür aber zu hoch.

Biogas, Erdgas, Synthesegas:

Methanhaltige Gase sind wichtige Energieträger. Methan verbrennt schadstoffarm und rückstandsfrei, jedoch sind seine fossilen Bestände begrenzt. Eine Alternative für die Zukunft stellen Biogase wie Klär- oder Deponiegas dar, die jedoch vor der energetischen Verwendung von unerwünschten Begleitstoffen befreit werden müssen. Oft ist eine Methananreicherung sinnvoll, um das Biogas in Gasversorgungsnetze einspeisen zu können. Das Rohgas enthält neben dem Zielprodukt Methan vor allem Kohlendioxid, Luftbestandteile, Schwefelwasserstoff, Wasserdampf und häufig Spurenschadgase wie Siloxane. Diese Stoffe müssen abgetrennt werden, einerseits um einen ausreichenden Heizwert zu gewährleisten, andererseits, um Korrosion in den Rohrleitungen zu verhindern und Sicherheitsaspekten zu genügen. Da man nicht für jeden abzutrennenden Stoff eine eigene Anlage bauen kann, ist es wichtig, Membranen zu entwickeln, die möglichst viele der störenden Komponenten möglichst komplett durchlassen und nur das wertvolle Methan ebenso komplett zurückhalten. Durch neue Materialien und Fertigungsmethoden konnten die Flüsse in den letzten zehn Jahren um den Faktor 10 gesteigert werden, was entsprechend geringere Membranflächen und niedrigere Investkosten bedeutet. Da gleichzeitig der Methanverlust durch verbesserte CO₂/CH₄-Selektivität sank, konkurriert die Membrantechnik heute er-

folgreich mit etablierten Techniken.

Auch die Nutzung von Abfällen wie Altreifen als Energiequelle kann mittels der Membrantechnik effektiver gestaltet werden. Zum einen können die in Altreifen gebundenen hochwertigen Ressourcen genutzt, zum anderen aber auch das Deponievolumen reduziert werden. Die Altreifen werden durch Vergasung unter anderem in Synthesegas umgewandelt, welches hauptsächlich aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Methan und Kohlendioxid besteht. Durch den Einsatz von Membranen kann das Gasgemisch gemäß den Anforderungen nachgeschalteter Energiewandlungsprozesse dann aufbereitet werden.

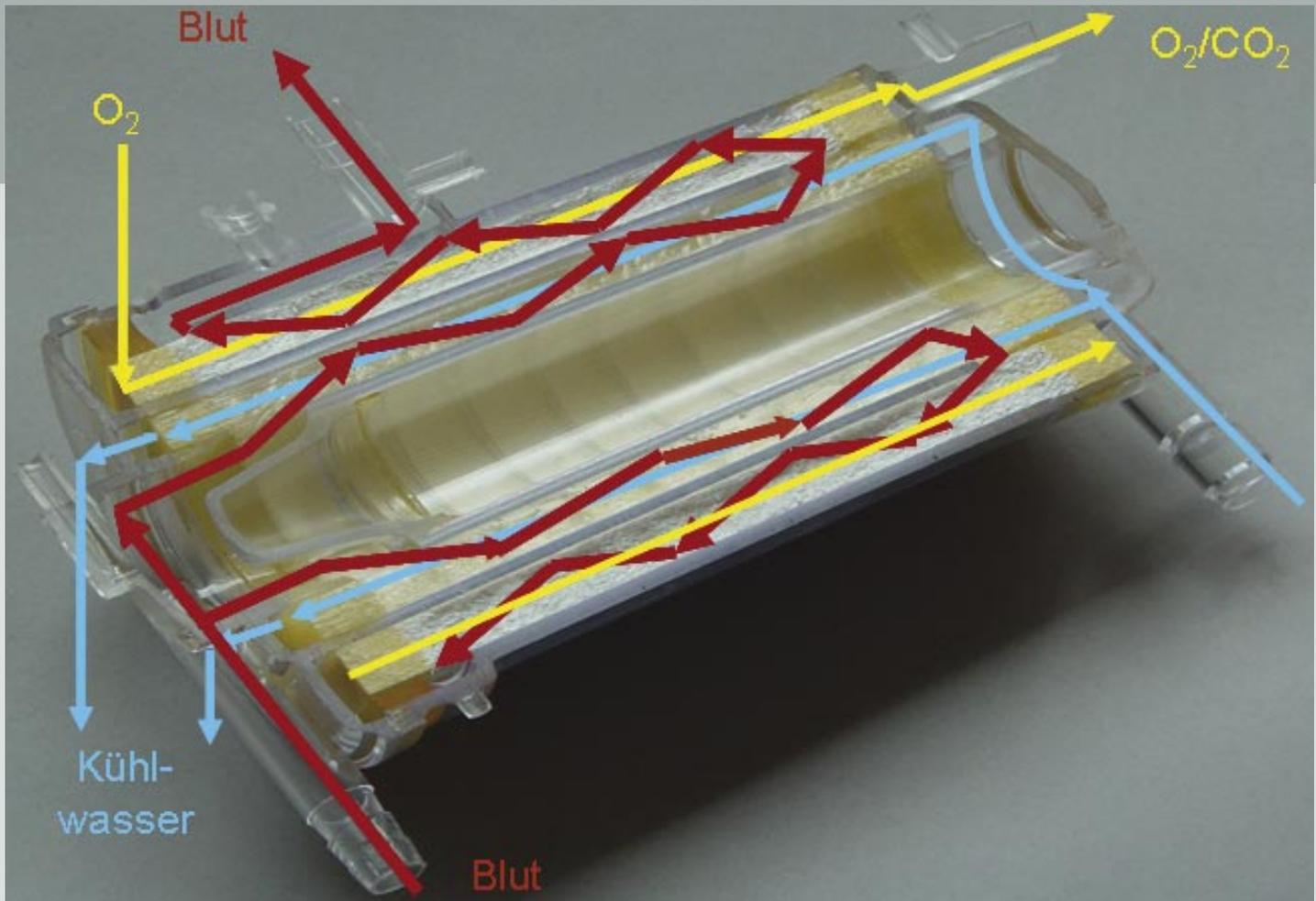
Prozessintegrierter Umweltschutz

Unter prozessintegriertem Umweltschutz versteht man den Einsatz von Verfahren, die Emissionen in Abwasser, Abgasen oder Abfall vermeiden oder vermindern, etwa indem Prozessströme zurückgeführt oder zu Wertstoffen aufgearbeitet oder Reaktion und Trennung so geführt werden, dass Nebenreaktionen ausbleiben oder die Verwendung problematischer Hilfsstoffe entfällt. Als rein physikalisch wirkende, bei moderaten Bedingungen betriebene Verfahren sind Membranprozesse hierzu besonders geeignet. Elektrodialyse und Reaktivextraktion mit einem Membrankontaktor werden als Beispiele vorgestellt.

Elektrodialyse

Die Elektrodialyse ist eines der ältesten technisch eingesetzten Membranverfahren. Hierbei wird ausgenutzt, dass bestimmte Membranmaterialien nur Anionen, andere nur Kationen transportieren. Durch Anlegen eines elektrischen Feldes und geeignete Anordnung der Membranen lassen sich vollentsalztes Wasser und konzentrierte Salzströme, aber auch konzentrierte Säuren und Laugen herstellen. Die Eigenschaften der Elektrodialyse sichern ihr einen Platz in Zukunftsmärkten wie der Gewinnung von Trink-

Neue Entwicklungen kommen im Umweltschutz und in der Medizintechnik zum Einsatz



wasser aus Brackwasser, der Produktion von organischen Säuren aus nachwachsenden Rohstoffen und im prozessintegrierten Umweltschutz. Hierzu gehören die Rückführung von Säuren und Laugen oder von Schwermetallsalzen aus verdünnten Prozesswässern und die Entsalzung von Produkten. Bei herkömmlichen Umsalzungen oder Fällungsprozessen fallen große Mengen an Schlämmen und Abwässern an, bei der Elektrodialyse nicht.

Die AVT forscht auf drei Ebenen an Elektrodialyseprozessen: der Ebene der physikalischen Grundlagen, an Anwendungen für reale Stoffsysteme und an der optimalen Einbindung der Elektrodialyse in Gesamtprozesse.

Auf der Grundlagenebene werden mit internationalen Partnern neuartige, bipolare Elektrodialysmembrane mit verbesserten Eigenschaften entwickelt und untersucht. In der Anwendungsforschung werden die realen Trenneigen-

schaften am Beispiel der Abtrennung von Itakonsäure im Rahmen des Exzellenzclusters „Maßgeschneiderte Kraftstoffe aus Biomasse“ ermittelt. Neben den Trenneigenschaften werden auch Störeffekte wie das Ausfallen von Salzen (Scaling), die Deckschichtbildung (Fouling) oder die Membranvergiftung (Poisoning), die durch Verunreinigungen ausgelöst werden, untersucht. Entsprechend der Ergebnisse wird dann die gegebenenfalls nötige Vorbehandlung und die beste Stelle und Fahrweise der Elektrodialyseanlage im Gesamtprozess festgelegt. Die dritte Ebene, die technische und wirtschaftliche Optimierung des Gesamtprozesses, erfolgt lehrstuhlübergreifend und erfordert Modelle des Trennprozesses unter Einbezug von Vorbehandlung und Folgeschritten.

Reaktivextraktion mit Membrankontaktoren

In einem Membrankontaktor findet ein Stoffaustausch zwischen Fluidströmen statt, die durch eine Membran getrennt sind. Aus Sicht des über die Membran transportierten Stoffes spricht man von Abgeber- und Aufnehmerphase. Man unterscheidet Fälle, in denen die Membran nur der Einstellung des Phasengleichgewichts zwischen den Strömen dient, und solche, in denen sie selektiv wirkt. Durch Verwendung einer dichten, selektiven Membran ist auch eine Extraktion zwischen zwei ineinander löslichen Flüssigkeiten, etwa zwei wässrigen Lösungen möglich. Zur Erzeugung der Triebkraft für den Transport wird dann eine chemische Reaktion in der Aufnehmerphase eingesetzt, zum Beispiel eine Neutralisation mit deren Hilfe Stoffe in der Aufnehmerphase stark angereichert werden können. Entscheidend für die Einsetzbarkeit des Verfahrens sind einerseits die

Bild 1: Blutoxygenator: Ein sehr kompaktes künstliches Organ.

Quelle: Kashfi-Khorasani, A. (2005): Untersuchungen zu Stofftransport und Fluid-dynamik bei extrakorporalen Membranoxygenatoren. RWTH Aachen, Dissertation, ISBN: 3-86130-764-2

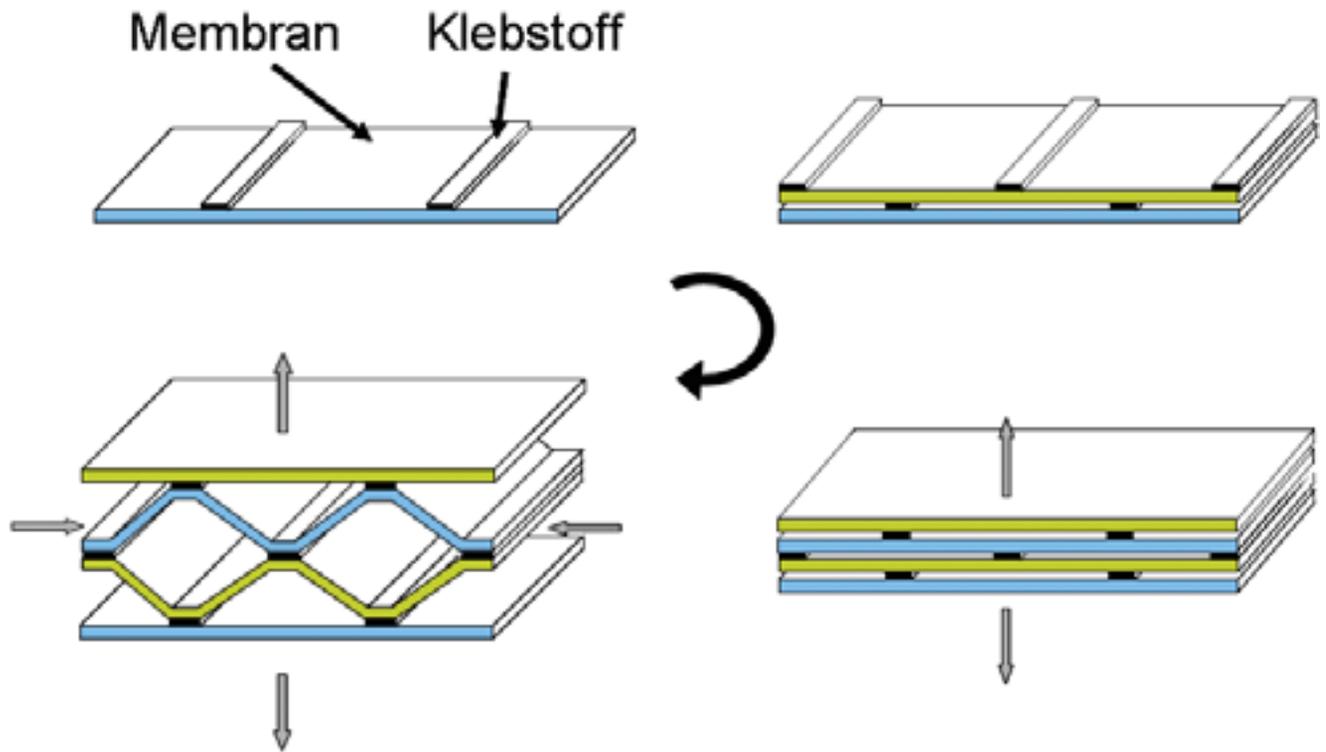


Bild 2: Das Prinzip der Modulfertigung.

Permeabilität der Membran für die zu transportierende Komponente und die Sperrwirkung für die anderen Reaktionsteilnehmer und die Reaktionsprodukte. In dem neuen Verfahren wird eine Silikonmembran als Transportmedium für toxische Phenole verwendet, welche aus verdünnten wässrigen Lösungen in Natronlauge extrahiert werden. Dort reagieren die Phenole mit Hydroxylionen zu Phenolaten, für welche die Membran ebenso wie für die Hydroxylionen undurchlässig ist. Es findet keine Kontamination des zu reinigenden Stoffstroms mit Lösemitteln statt. Aus den Prozessabwässern entstehen Produktströme: das von Phenolen befreite Wasser lässt sich zurückführen, die in hoher Konzentration abgetrennten Phenolate können aufgearbeitet und wieder verwendet werden.

Anwendungen außerhalb der klassischen Verfahrenstechnik

Medizintechnik:

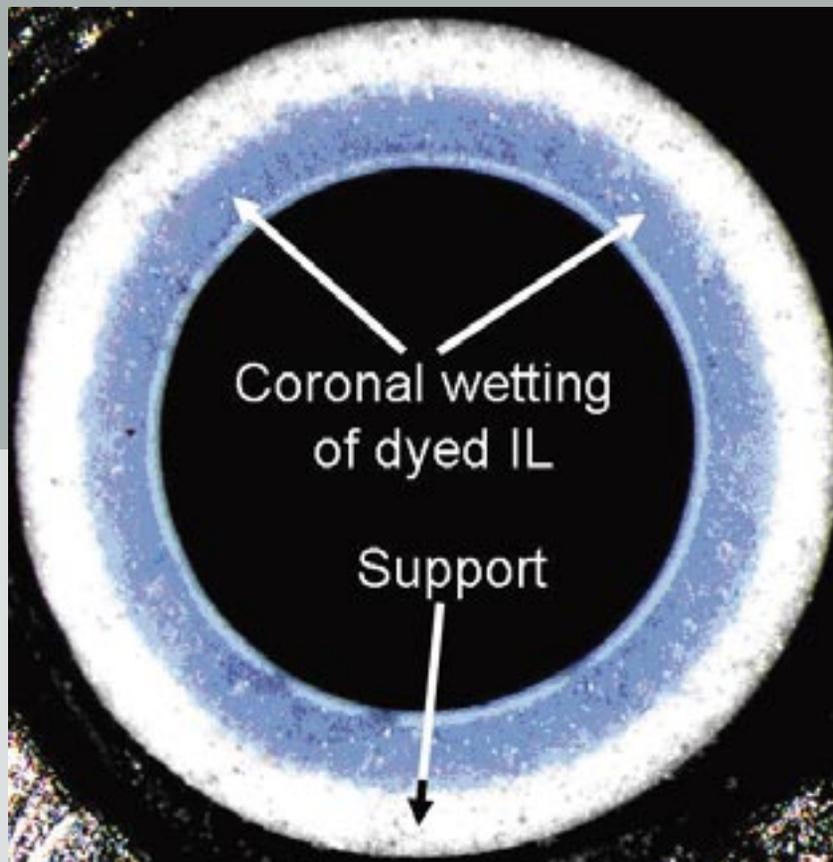
Als künstliche Niere (Dialysator) und künstliche Lunge (Blutoxygenator) haben sich die Membrankontakoren in der Medizintechnik als Stand der Technik etabliert. Mehr als 10.000 Hohlfasern pro Dialysator mit Innendurchmessern von 0,2 mm realisieren eine Membranfläche von 1 bis 2 m². Lediglich 60 bis 100 ml Blut sind nötig, um den Dialysator zu füllen. Die offenporigen Fasern werden vom Blut durchströmt, während eine isotonische Salzlösung im Modulumantelraum geführt wird. Die Porengröße ist so eingestellt, dass höhermolekulare Bestandteile wie Eiweiße im Blut verbleiben und nur die kleinen Moleküle, darunter auch toxische Stoffwechselprodukte wie Harnstoff, ausgeschleust werden.

Blutoxygenatoren werden zur Sauerstoffversorgung des Blutes bei Herzoperationen benötigt, bei denen die normale Lungenfunktion des Patienten aussetzt. Der erstmals 1980 eingesetzte Membranoxygenator eroberte schnell den Markt und stellt heute den einzigen als künstliche Lunge verwendeten Apparatetyp dar. Bild 1 zeigt die Strömungswege innerhalb eines aufgeschnittenen Blutoxygenators. Das Modul fungiert gleichzeitig als Wärmetauscher, um während der Operation die Körpertemperatur des Patienten zu senken.

Klimatechnik: Entwicklung eines simultanen Wärme- und Feuchtetauschers

Die Klimatisierung von Gebäuden ist in zahlreichen Bereichen unerlässlich und in anderen zur Verbesserung der Arbeits- und Wohnbedingungen erwünscht. Mit wachsendem Bedarf steigen die Anforderungen an die eingesetzte Technik. In Reinstäumen, Museen und Krankenhäusern sind strenge Auflagen bei Belüftungsraten und Raumfeuchte einzuhalten. Dies erfordert große Mengen Primärenergie zur Konditionierung der Luft hinsichtlich Temperatur und Feuchte. Gelingt es im Winter, die Wärme und Feuchte möglichst verlustfrei aus der Abluft an den kalten, trockenen Frischluftstrom zu übertragen, so lässt sich die Klimatisierung wesentlich energieeffizienter gestalten. Hierzu entwickelt die AVT in Kooperation mit dem DWI sowie zahlreichen Industriepartnern einen so genannten Enthalpietauscher.

Die Idee des Enthalpietauschers ist nicht neu. Bisherige Technologien sind jedoch entweder hygienisch bedenklich oder zu teuer um eine breite Akzeptanz zu erfahren. Das neue Konzept sieht den Einsatz eines Membranmoduls vor, in



dem Zu- und Fortluftströme durch eine weniger als 50 µm dicke, symmetrische, porenfreie Membran getrennt sind. Die Membran als selektive Barriere überträgt Wasserdampf und Wärme, während Staub, Bakterien und flüchtige organische Verbindungen nicht in das Gebäude zurückgeführt werden. Zur wirtschaftlichen Realisierung ist ein innovatives Modul-Design notwendig. Eine patentierte und im Labormaßstab erprobte selbsttragende Membranstruktur basiert auf einem Leichtbauprinzip, welches in der Luft- und Raumfahrt für tragende Bauteile bereits angewandt wird. Flachmembranen werden hierbei mit Hilfe eines alternierenden Klebemusters derart verbunden, dass sich nach dem Entfalten des Membranstapels die charakteristische hexagonale Modulstruktur einstellt, siehe Bild 2.

Der Fokus aktueller Forschungsarbeiten liegt auf der Optimierung der Modulgeometrie hinsichtlich des Wärme- und Stofftransportes sowie des Druckverlustes. Hierzu werden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, welche im Anschluss mit Hilfe von Simulationen überprüft werden sollen. Parallel dazu wird nach neuartigen Membranmaterialien gesucht, welche über ausreichende mechanische Stabilität verfügen, leicht zu verkleben sind und zugleich eine hohe Permeabilität für Wasserdampf aufweisen.

Flüssigmembranen

Membranen müssen nicht immer aus festen Materialien wie Polymer-Verbindungen oder keramischen Bestandteilen bestehen. Auch Flüssigkeiten können als Membran eingesetzt werden, wobei es verschiedene Möglichkeiten gibt, diese so zu stabilisieren, dass sie dauerhaft eine definierte, dichte Trennschicht ausbilden. Eine Methode zur Stabilisierung ist das Aufbringen der Flüssigkeit auf eine poröse Trägerschicht, wobei sie entweder auf der Oberfläche haften bleibt (Supported Liquid Membrane - SLM) oder in deren Poren immobilisiert wird (Immobilized Liquid Membrane - ILM). Ein Nachteil bei der Anwendung von Flüssigmembranen bestand bisher im Verdunsten der Flüssigkeit in die Atmosphäre: die Membran löste sich im Laufe der Zeit im wahrsten Sinne des Wortes in Luft auf.

In Zusammenarbeit mit der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg haben die Wissenschaftler der AVT ein Konzept entwickelt, dieses Problem zu beheben: Der Einsatz einer neuen Klasse von Lösungsmitteln, den so genannten ionischen Flüssigkeiten, verspricht die Langzeitstabilität von Flüssigmembranen entscheidend zu verbessern. Ionische Flüssigkeiten weisen einen so niedrigen Dampfdruck auf, dass die Verdampfungsraten kaum noch messbar sind. In Bild 3 ist eine an der AVT hergestellte Flüssigmembran ge-

zeigt, in welcher eine blau eingefärbte ionische Flüssigkeit verwendet wird. Der Träger, hier eine keramische Membran, wird so lange mit der ionischen Flüssigkeit benetzt, bis sie durch Kapillarkräfte bedingt eine definierte Schicht der Poren des Materials ausfüllt. Dieses Benetzungsverfahren erlaubt eine reproduzierbare Membranherstellung über die Steuerung der Benetzungszeit. Einsatz findet die Membran in der Auftrennung eines Alken-Alkan-Gemisches, wie es beispielsweise in der Petrochemie vorkommt. Dabei ist die unterschiedliche Absorption der beiden Gase in der ionischen Flüssigkeit ein maßgebender Faktor für die Selektivität dieser Membran.

Fazit

Die Membrantechnik bietet unzählige aussichtsreiche Lösungen für die Zukunft. Membranen überzeugen als Schlüsseltechnologie von morgen durch ihr hohes Potenzial, gleichzeitig Ökobilanzen zu verbessern und ökonomische Ziele zu erreichen. Die rapide Entwicklung der Membrantechnik und vielversprechende Forschungsergebnisse lassen spannende Forschung und lohnenswerte Ergebnisse erwarten.

Bild 3: In einem porösen keramischen Träger immobilisierte ionische Flüssigkeit (blau).

Autor:
Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Thomas Melin
ist Inhaber des Lehrstuhls
AVT-Chemische
Verfahrenstechnik.

Sie liegen den lieben langen Tag in der Sonne und sind dabei doch höchst produktiv! Die Rede ist von Purpurbakterien, die den Sommer in speziellen Versuchsreaktoren auf dem Dach der Aachener Verfahrenstechnik, kurz AVT, verbringen. Sie erzeugen Wasserstoff aus den Nebenprodukten anderer Bioprozesse und brauchen dazu Sonnenlicht. Und sie beantworten vielleicht die eine oder andere der wichtigen Fragen, an denen die Energieverfahrenstechniker in dem Gebäude unter ihnen arbeiten: Woher kommen in Zukunft Brennstoffe und chemische Rohmaterialien, wenn die fossilen Ressourcen Kohle, Erdöl und Erdgas nicht mehr im heutigen Umfang verfügbar sind? Kann man CO₂-Emissionen von Kohlekraftwerken mittelfristig wirksam reduzieren? Wie können fossile Rohstoffe heute schon effizient genutzt werden?

Im Bereich der effizienten Rohstoffnutzung werden vor allem industrielle Ofenanlagen betrachtet, in denen energieintensive Prozesse bei hohen Temperaturen durchgeführt werden. Diese existierenden Prozesse werden mathematisch beschrieben und anhand von Modellrechnungen optimiert. Zur Reduktion von CO₂-Emissionen bei der Stromerzeugung wird im Rahmen des Verbundprojektes OXYCOAL-AC ein Kraftwerksprozess in Teilen neu entwickelt. Hierbei wird Kohle mit reinem Sauerstoff verbrannt. Dabei entsteht reines CO₂, das unterirdisch eingelagert wird. Der Sauerstoff wird mit Hilfe keramischer Membranen aus der Luft abgetrennt. Die eingangs erwähnte Herstellung von Wasserstoff aus Biomasse mit Hilfe von Bakterien und Sonnenlicht ist ein neuartiger Ansatz, der im EU-Projekt HYVOLUTION erstmals technisch umgesetzt werden soll.



Bild 1: Innenansicht eines Drehrohrrofens im Betrieb.

Energieintensive Prozesse effizient gestalten

In der chemischen und der Grundstoffindustrie werden Feststoffreaktionen bei hohen Temperaturen oft in so genannten Drehrohröfen durchgeführt. Zement und Kalk werden beispielsweise in solchen Anlagen hergestellt. Ein Drehrohrofen besteht aus einem Stahlrohr, das innen feuerfest ausgemauert und leicht gegen die Horizontale geneigt ist. Das Rohr rotiert um seine eigene Achse. Die festen Rohstoffe werden am oberen Ende aufgegeben und fließen durch Neigung und Rotation langsam abwärts. Am unteren Ofenende wird Wärme durch einen Kohle-, Öl- oder Erdgasbrenner zur Verfügung gestellt.

In Drehrohröfen läuft eine Vielzahl unterschiedlicher chemischer und physikalischer Vorgänge ab. Ausgangsstoffe werden getrocknet, Phasenumwandlungen treten auf, es bilden sich Schmelzen oder neue Kristalle. Alle diese Prozesse beeinflussen sich gegenseitig und bestimmen die Produktqualität. Gegenüber der Komplexität dieser Vorgänge erfolgt die Anlagensteuerung auf sehr einfache Weise, nämlich meist manuell. Vollautomatische Systeme zum sicheren und effizienten Betrieb existieren nicht. Erschwerend kommt hinzu, dass

dem Betriebspersonal nur sehr wenige Messdaten zur Verfügung stehen, um den aktuellen Anlagenzustand zu beurteilen. Temperaturen und Mengen von Stoffströmen werden zwar in Echtzeit erfasst, aber schon die Produktqualität kann in langwierigen Analyseverfahren nur etwa im Stundenabstand bestimmt werden. Die Verhältnisse im Ofeninnenraum jedoch, die die Produktqualität ja eigentlich bestimmen, können aufgrund der hohen Temperaturen praktisch gar nicht vermessen werden. Ungünstige Betriebszustände werden also erst erkannt, wenn minderwertiges Produkt den Ofen verlassen hat und analysiert wurde. Durch diese lange Totzeit wird es quasi unmöglich, die Anlage dauerhaft stabil im Bereich der höchsten Leistung zu betreiben. Stattdessen wird in der Praxis ein gewisser „Sicherheitsabstand“ zur optimalen Fahrweise eingehalten, um ungünstige Betriebszustände von vornherein zu vermeiden. Die damit verbundenen Einbußen wurden in der Vergangenheit in Kauf genommen. Heutzutage steigt jedoch die Nachfrage nach Werkzeugen, mit deren Hilfe die Ofenbetriebsweise effizienter gestaltet werden kann.

Solche Werkzeuge werden bei der AVT entwickelt. Dabei wird das Ziel verfolgt, die nicht

messbaren Temperaturen und Zusammensetzungen im Ofeninnenraum zu berechnen. Hierzu werden mathematische Modelle erstellt, die das dynamische Verhalten der Ofenanlagen zuverlässig abbilden. Ein solches Modell soll gleichzeitig mit dem Ofen betrieben werden und dem Betriebspersonal einen Einblick in die Vorgänge im Ofeninnenraum ermöglichen. Dadurch können ungünstige Betriebszustände früher erkannt und der „Sicherheitsabstand“ zur energieoptimalen Fahrweise verringert werden.

CO₂-Emissionsarme Kohlekraftwerke

Bei der Stromerzeugung kommt zur optimalen Brennstoffnutzung noch eine weitere Herausforderung hinzu: Fossil befeuerte Kraftwerke, mit denen auch noch in der weiteren Zukunft ein Großteil unseres Strombedarfs gedeckt wird, verursachen zwei Drittel aller anthropogenen CO₂-Emissionen. Diese Kraftwerke wurden bisher vor allem auf hohe Wirkungsgrade hin optimiert, wodurch nebenbei auch der CO₂-Ausstoß vermindert wurde. Um diesen jedoch mittelfristig noch erheblich weiter zu reduzieren, müssen vollkommen neue Kraftwerksprozesse entwickelt werden. Mit deren Hilfe muss es möglich sein, das bei der Ver-

Öfen, Kohle und Bakterien – Energieverfahrenstechnik für die Zukunft

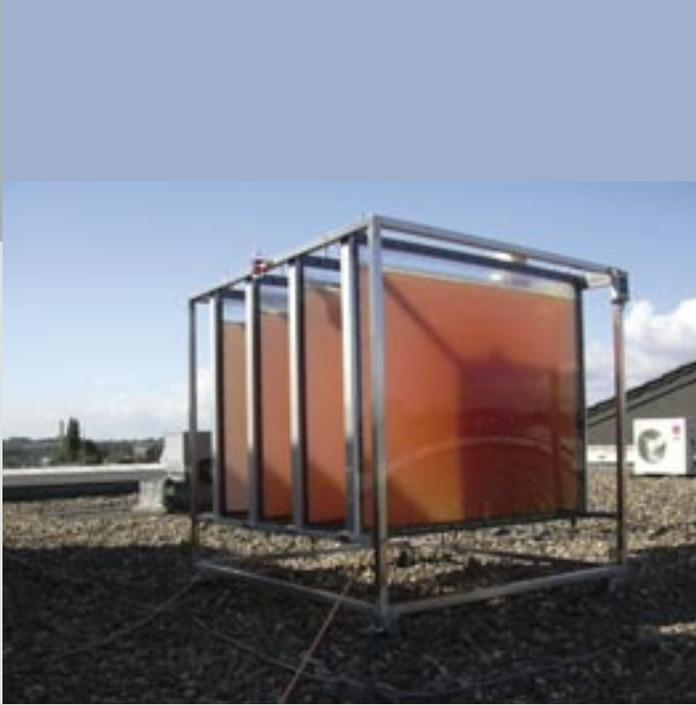


Bild 2: Fotobioreaktor im Freilandversuch auf dem Dach des AVT-Gebäudes.

brennung unweigerlich entstehende CO_2 aus dem Abgas abzutrennen und nicht in die Atmosphäre abzugeben. Dies ist umso einfacher zu realisieren, je höher der CO_2 -Gehalt im Abgas ist. Im einfachsten Fall besteht das Abgas aus reinem CO_2 . Dieser Fall tritt dann ein, wenn der Brennstoff nicht mit Luft, sondern mit reinem Sauerstoff umgesetzt wird. Die dabei entstehenden hohen Temperaturen können kontrolliert werden, indem ein Teil des Rauchgases zur Kühlung wieder in die Brennkammer zurückgeführt wird.

Reiner Sauerstoff kann auf zwei verschiedene Arten hergestellt werden. Im Oxyfuel-Verfahren wird dem Kraftwerk eine kryogene Luftzerlegungsanlage vorgeschaltet, die den Sauerstoff mittels Tieftemperaturdestillation aus der Luft abtrennt. Dieses Verfahren ist großtechnisch verfügbar, aber mit hohem Energieaufwand verbunden. Eine innovative, energieeffizientere Alternative ist das OXYCOAL-AC-Verfahren, das bei der AVT mit entwickelt wird. Dabei erfolgt die Sauerstoffabtrennung mit Hilfe von Membranen, die aus gemischtleitenden oxidkeramischen Werkstoffen bestehen. Diese Materialien sind zwischen 800 und 900 °C für Sauerstoff in Form von Oxid-Ionen durchlässig,

während andere Gase vollständig zurückgehalten werden. Zur Beheizung der Membranen wird das heiße Verbrennungsgas benutzt. Um zuverlässig einen hohen Sauerstofffluss zu erzielen, müssen die Membranen sehr dünn und dabei mechanisch so stabil sein, dass sie den hohen Temperaturen und Druckunterschieden von bis zu 20 bar über lange Zeit standhalten. Außerdem dürfen die Membranen nicht durch Schadstoffe im Verbrennungsgas zerstört werden.

Bei der AVT werden daher Membranwerkstoffe unter Kraftwerksbedingungen getestet. Dabei werden in Langzeitversuchen Temperaturen von bis zu 1000°C und Druckunterschiede von bis zu 20 bar realisiert. Gleichzeitig werden die Membranen mit typischen Schadgasen wie SO_2 , CO , NO_x beaufschlagt. Bei den Experimenten werden vor allem die Sauerstoff-Permeabilität sowie die chemische Beständigkeit der Werkstoffe untersucht. Anhand der Messergebnisse werden die Werkstoffeigenschaften mathematisch modelliert. Mit Hilfe von Strömungssimulationen werden dann Membranmodule für den Einsatz im Kraftwerk entwickelt und optimiert. Diese Module sollen im Jahr 2010 in einer Demonstrationsanlage zum Einsatz

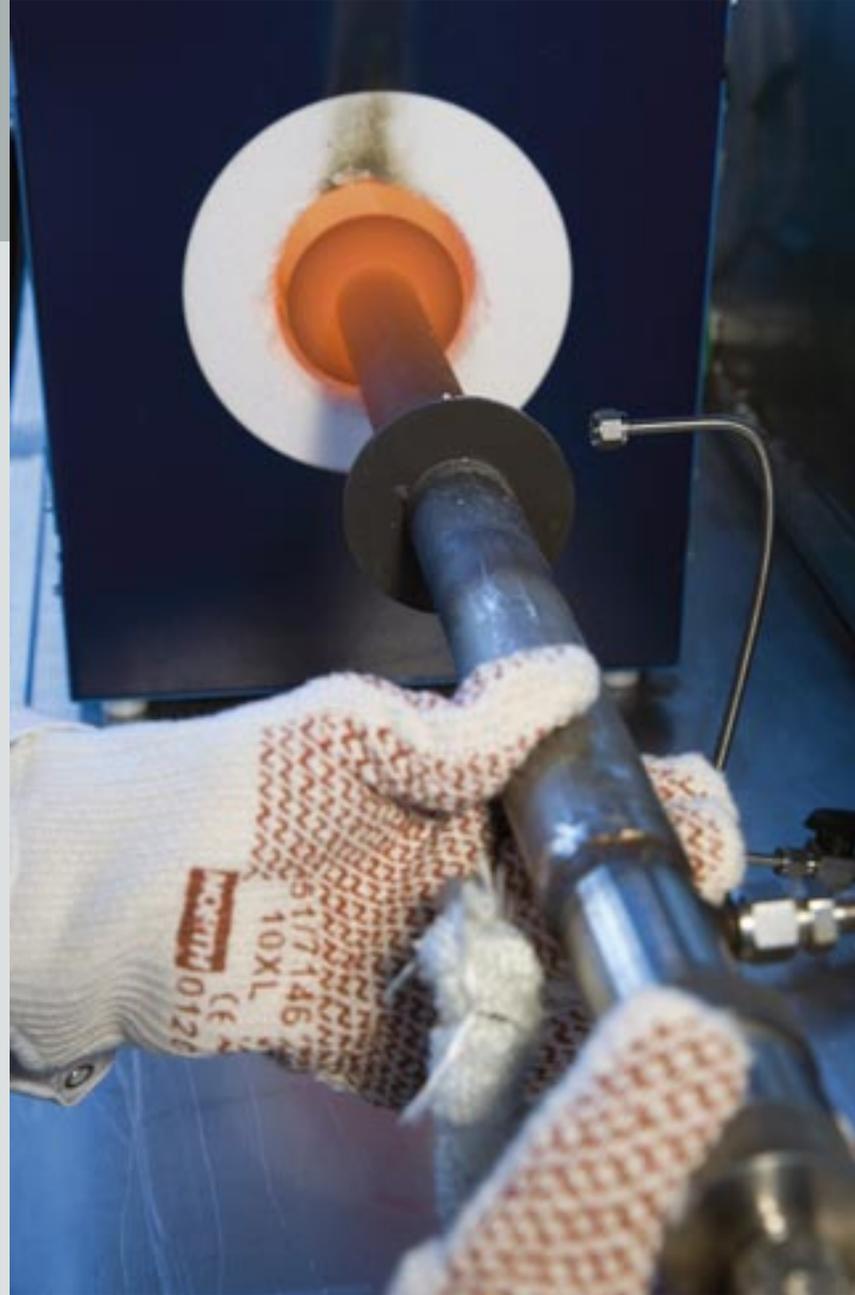


Bild 3: Untersuchung von Membranwerkstoffen am AVT-Teststand.



20 **Bild 4:** Dipl.-Ing. Jakub Gebicki untersucht die fotobiologische Wasserstoffproduktion von Purpurbakterien. Foto: Peter Winandy

kommen, die zurzeit unter Federführung des Lehrstuhls für Wärme- und Stoffübertragung entsteht. Anhand dieser Anlage soll die Machbarkeit des OXY-COAL-AC-Prozesses im Pilotmaßstab gezeigt werden.

Wasserstoff aus Biomasse und Sonnenlicht

Um auf lange Sicht unabhängig von fossilen Brennstoffen zu werden, sind in den vergangenen Jahren Verfahren entwickelt worden, in denen der Energieträger Wasserstoff aus erneuerbaren Ressourcen hergestellt wird. Hierbei hat sich gezeigt, dass extrem wasserhaltige Biomasse, für die eine thermische Behandlung nicht in Frage kommt, in biologischen Prozessen verwertet werden kann. Diese Verfahren sind kosten- und energie günstig, da

keine aufwändigen Anlagen nötig sind. In biologischen Prozessen werden Mikroorganismen genutzt, die Biomasse unter anaeroben Bedingungen in Essigsäure und Wasserstoff zerlegen. Bestimmte Purpurbakterien sind darüber hinaus in der Lage, mit Hilfe von Sonnenlicht auch den Wasserstoff in der Essigsäure noch durch Photosynthese freizusetzen. Im Projekt HYVOLUTION arbeiten daher seit Januar 2006 22 internationale Partner daran, diese beiden mikrobiologischen Prozesse miteinander zu koppeln. In diesem zweistufigen Verfahren wird der Wasserstoff in der Biomasse vollständig freigesetzt und damit technisch nutzbar.

Damit eine Demonstrationsanlage in Betrieb gehen kann, müssen die im Labor gewonnenen Kenntnisse über die Biolo-

gie der Wasserstoffgärung vertieft und diejenigen Parameter ermittelt werden, die die Wasserstoffproduktionsrate maßgeblich beeinflussen. Während diese Aufgabe von Mikrobiologen übernommen wird, arbeiten gleichzeitig Verfahrenstechniker daran, den Schritt vom Reagenzglas zur technischen Anlage zu ermöglichen. Dazu werden bei der AVT Reaktoren im vergrößerten Maßstab entwickelt und getestet. Diese Reaktoren müssen einerseits den Anforderungen der Mikroorganismen zum Beispiel bezüglich der Lichtversorgung Rechnung tragen und andererseits so konzipiert sein, dass sie auch von Laien bedient werden können. Eine weitere Aufgabe besteht darin, das überschüssige und unvermeidlich freigesetzte Kohlendioxid effizient aus dem Produktgasstrom abzutrennen. Daher wird gemeinsam mit Chemikern ein Verfahren entwickelt, das wenig energieaufwändig und unempfindlich gegen die starken Schwankungen in der Menge und Zusammensetzung des Gases ist. Parallel zu den genannten Arbeiten werden Prozessmodelle der zukünftigen Anlage erstellt und Simulationen durchgeführt, um erstens ökonomisch oder ökologisch nicht sinnvolle Konzepte frühzeitig ausschließen zu können und zweitens kritische Parameter zu identifizieren, die dann entsprechend verbessert werden können. Es sieht also danach aus, dass in der näheren Zukunft Wasserstoff auch umweltfreundlich gewonnen werden kann.

Autoren:

Dipl.-Ing. Franz Beggel, Dipl.-Ing. Stefan Engels, Dipl.-Ing. Jakub Gebicki, Dipl.-Ing. Tobias Ginsberg und Dipl.-Ing. Isabella Nowik sind Wissenschaftliche Mitarbeiter des Lehr- und Forschungsgebiets AVT-Mechanische Verfahrenstechnik. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Modigell leitet das Lehr- und Forschungsgebiet AVT-Mechanische Verfahrenstechnik.



KOLLEGEN GESUCHT!

Rheinmetall Defence zählt seit Jahren zu den namhaften Systemhäusern in der internationalen Verteidigungs- und Sicherheitsindustrie. Mit rund 9.200 Mitarbeitern erwirtschaftet die Unternehmensgruppe einen Jahresumsatz von 1,8 MrdEUR. Ganz gleich, ob Sie kaufmännisch oder technisch orientiert sind: Bei uns warten Aufgaben auf Sie, die vielseitig sind, die Ideen und Innovationen verlangen und die täglich Ihre Kompetenz fordern. Wenn Sie am Erfolg eines zukunftsorientierten Technologiekonzerns mitwirken wollen, dann bewerben Sie sich bei uns.

Weitere Informationen unter: www.rheinmetall-defence.com

Verfahrenstechnik mit System

P

Produktionsprozesse bestehen aus so genannten Grundoperationen. Bei der Herstellung eines Medikaments, dessen Wirkstoff aus einer Pflanze gewonnen wird, könnte ein stark vereinfachter Herstellungsprozess aus den folgenden Grundoperationen bestehen:

1. Mechanisches Zerkleinern des Pflanzenmaterials;
2. Extrahieren des Wirkstoffs mit einem flüssigen Extraktionsmittel, genau wie das Extrahieren der Geschmacks- und Duftstoffe aus dem Tee mit dem Extraktionsmittel Wasser;
3. Aufkonzentrieren des Wirkstoffs, ähnlich dem Aufkonzentrieren von Alkohol beim Destillieren von Schnaps;
4. Vermischen mit weiteren Wirkstoffen;
5. Kristallisieren der Wirkstoffe, ähnlich der Salzgewinnung durch Verdunstung von Meerwasser sowie
6. Pressen des Wirkstoffpulvers in Tablettenform.

Die Aufgabe der Verfahrenstechnik besteht im Wesentlichen darin, die Abfolge der Grundoperationen festzulegen und diese anschließend im Detail auszulegen, um so zu einem betriebswirtschaftlich wie ökologisch hocheffizienten Herstellungsprozess zu gelangen. Bei der Medikamentenherstellung könnte also die Frage zu klären sein, ob die mechanische Zerkleinerung notwendig ist und ob die Beimischung weiterer Wirkstoffe vor oder nach der Aufkonzentrierung erfolgen soll. Bei realen Prozessen mit einer Vielzahl von Prozessschritten und oftmals gänzlich unterschiedlichen Herstellungsoptionen, entstehen so schnell viele tausend alternative Kombinationen von Grundoperationen, die zum gewünschten Produkt führen.

Steht die Folge von Grundoperationen fest, müssen diese im Detail ausgelegt werden. So wäre im Beispiel unter anderem zu klären, welches Extraktionsmittel, bei welcher Temperatur und welchem Druck im zweiten Prozessschritt zum Einsatz kommen soll. Die Komplexität der Frage „Was ist der optimale Prozess“ ist dabei so hoch, dass

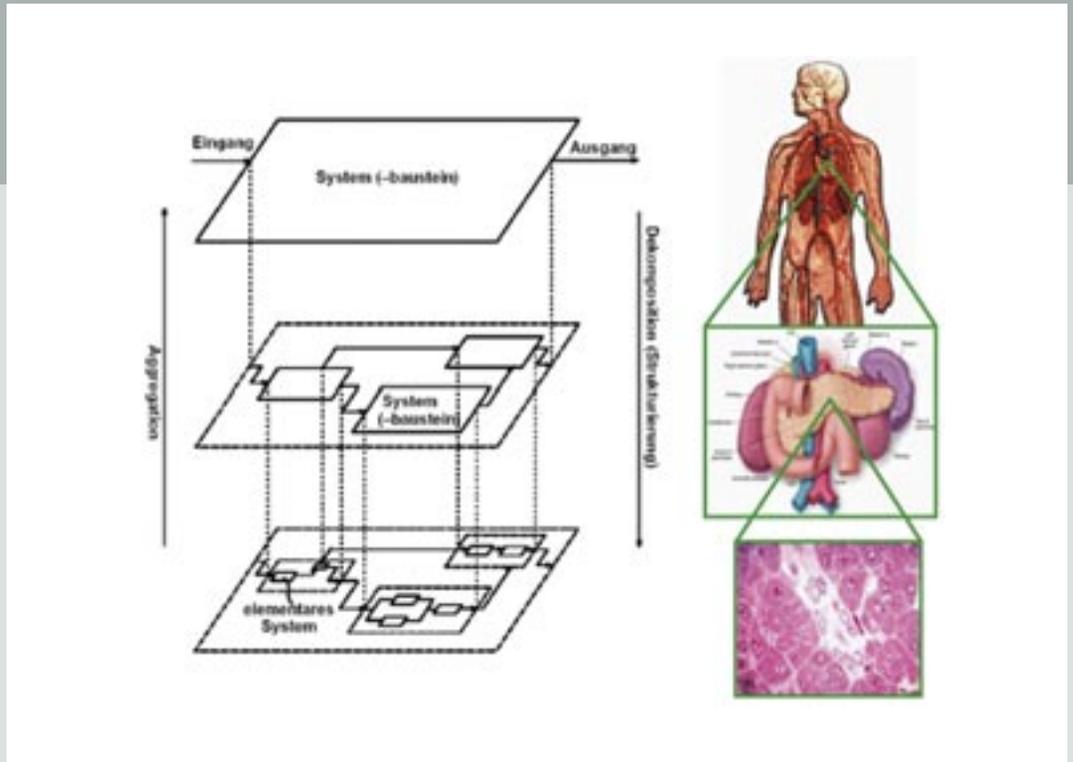


Bild 1: Aufbau eines Systems aus Teilsystemen, links allgemein und rechts am Beispiel des Menschen.

bei den meisten Prozessen eine rigorose Beantwortung nicht möglich ist. Daher hat sich in der Verfahrenstechnik ein Mix aus Heuristiken und einfachen – beispielsweise grafischen – Auslegungsmethoden etabliert, um effizient gute Prozessalternativen zu finden und die notwendigen Grundoperationen auszu-legen.

Was unterscheidet nun die Systemverfahrenstechnik von der klassischen Verfahrenstechnik, deren Betätigungsfelder gerade beschrieben wurden? Um diese Frage beantworten zu können muss man sich die Wurzeln der Systemverfahrenstechnik angucken, die mehr in der System- als in der Verfahrenstechnik liegen. Es ist also zunächst wichtig, die Systemtechnik und deren Wurzeln zu erläutern und zu verstehen. Grundlage der Systemtechnik ist die Allgemein Systemtheorie, die in den 1930er Jahren von Ludwig von Bertalanffy, einem Biologen, erfunden und in ihren Grundzügen formuliert wurde. Sie stellt eine über alle Wissenschaftsbereiche hinweg gleichermaßen verwendbare Methodik zur Analyse und Synthe-

se komplexer Systeme bereit. Komplexe Systeme bestehen aus einer großen Zahl von miteinander wechselwirkenden Teilsystemen, die über eine Reihe von Detaillierungs- oder Abstraktionsebenen nach Bedarf verfeinert oder vergrößert werden können. Bild 1 zeigt den Aufbau eines Systems, links abstrakt und schematisiert, rechts am Beispiel eines Menschen, der – unter anderem – aus unterschiedlichen Organen besteht, welche wiederum aus unterschiedlichen Zellen aufgebaut sind, die selbst wieder aus Organellen bestehen.

Die Allgemeine Systemtheorie beschäftigt sich dabei mit der Systemanalyse, also dem Beschreiben und Verstehen von Aufbau, Verhalten und Funktion – künstlicher und natürlicher – Systeme, der Synthese zur Entwicklung und Umsetzung künstlicher Systeme, die vorgegebenen Anforderungen genügen, und der Repräsentation von Systemen mit Hilfe von (semi-)formalen und mathematischen Modellen.

Offensichtlich muss ein solches Modell die Effekte auf allen betrachteten Skalen berücksichtigen, wenn man zufriedenstellende Lösungen erarbeiten will. Bei dieser Mehrskalen-Modellierung werden nicht nur die bestimmenden Effekte auf einer

Systemebene – und damit auf einer bestimmten Größen- oder Zeitskala – modelltechnisch erfasst. Vielmehr ist es auch erforderlich, die direkte Kopplung zwischen den Phänomenen auf den unterschiedlichen Skalen zu berücksichtigen. Dies lässt sich gut an dem schon kurz angeschnittenen Beispiel „Mensch“ diskutieren. Ein verabreichtes Medikament gelangt über den Darm in die Blutbahn und von dort in einzelne Zellen, wo es den Stoffwechsel der Zelle beeinflusst. Die Veränderungen, die es dort bewirkt, beeinflussen wiederum den gesamten Organismus, so dass zum Beispiel die Körpertemperatur abnimmt. Es ist direkt klar, dass ein Modell, das zur Optimierung eines Medikamentes genutzt werden soll, Effekte auf Ebene der in den Zellen ablaufenden biochemischen Stoffwechsel-Reaktionen genauso berücksichtigen muss wie Effekte auf Ebene ganzer Organe oder des gesamten Menschen.

Diese Mehrskaligkeit zeigt ganz deutlich, dass der Systembegriff sehr weit gefasst sein muss. Wie auch Bild 1 zeigt, kann ein System ein einzelnes Molekül, eine einzelne Zelle, ein Organ, ein Mensch, eine Gruppe von Menschen oder die gesamte Menschheit sein. Die Fokussierung auf eine bestimmte

Ganzheitlich und modellgestützt die Realität verbessern

Betrachtungstiefe folgt aus dem Ziel, das mit der Systembeschreibung verfolgt wird. So interessieren sich Molekularbiologen für die Zelle und ihre Bestandteile, Mediziner für die Organe und ihr Zusammenspiel und Soziologen für eine Gruppe von Menschen und ihr Verhalten in einem gesellschaftlichen Umfeld. Der Charme der Allgemeinen Systemtheorie ist, dass ihr Instrumentarium unabhängig vom Wissenschaftsgebiet und von der konkret verfolgten Fragestellung generelle Gültigkeit hat. Diese Allgemeingültigkeit geht zu Lasten der Leistungsfähigkeit für die Lösung einer konkreten Aufgabenstellung. Das Rahmenwerk der Allgemeinen Systemtheorie muss daher für konkret betrachtete Systeme ausgestaltet und verfeinert werden.

Eine spezielle Klasse von Aufgabenstellungen wird in diesem Sinne in der Systemtechnik betrachtet: ein künstliches System optimal zu planen, zu gestalten, zu betreiben und schließlich auch wieder stillzulegen. Ein künstliches System ist dabei nicht – wie man schlechthin meinen könnte – auf eine technische Einrichtung, eine Maschine, ein Fahrzeug oder eine Produktionsanlage beschränkt. Das System kann sowohl die Auslieferung eines Paketes wie auch eine Raffinerie zur Herstellung von Super-Benzin sein.

Das letzte Beispiel ist speziell aus dem Aufgabengebiet der Systemverfahrenstechnik, denn diese ist wiederum nichts anderes als Systemtechnik, angewandt auf Fragestellungen aus dem Gebiet der Verfahrenstechnik.

Der Schritt, verfahrenstechnische Fragestellungen systemtechnisch anzugehen liegt dabei sehr nahe, da jeder verfahrenstechnische Prozess direkt

als ein System betrachtet werden kann. Das eingangs erwähnte Beispiel des Medikamentenherstellungsprozesses zeigt zum Beispiel deutlich den systematischen Aufbau eines Herstellungsprozesses aus Grundoperationen.

Die Aufgabe der Systemverfahrenstechnik besteht nun darin, einen verfahrenstechnischen Prozess während seiner ganzen Lebensdauer auf unterschiedlichen Längen- und Zeitskalen zu betrachten. Dabei sind im Wesentlichen folgende Aufgaben zu lösen und Anforderungen zu erfüllen, die im Verlauf im Detail erklärt werden:

- die Planung eines Prozesses;
- der Entwurf eines Prozesses;
- die Regelung eines Prozesses;
- der Betrieb einer Anlage.

Die Frage ist nun, wie sich Planung, Entwurf, Regelung und Betrieb optimal gestalten lassen. Die Beantwortung dieser Frage ist schwierig, denn der Methodenkasten der Systemverfahrenstechnik ist umfangreich und je nach Problemstellung sind unterschiedliche Lösungsansätze sinnvoll. In jedem Fall wird die Lösungssuche aber durch gezielte Anwendung mathematischer Modelle des Prozesses zur Vorhersage ihres Verhaltens unterstützt, die abhängig von der Aufgabenstellung mit verschiedenen Details ausgestattet entwickelt und mit der Realität abgeglichen werden müssen.

Systemverfahrenstechnik: Ganzheitlich zum optimalen Produktionsprozess

Seit der Einführung der Computertechnik in den 1950er Jahren besteht zunehmend die

Möglichkeit, immer komplexere Systeme im Computer nachzubilden. Gelingt eine realitätsnahe Abbildung eines Prozessschrittes oder ganzen Prozesses im Computer, so kann dieses Prozessmodell genutzt werden, um die oben genannten Aufgaben systematisch und unter Abwägung aller Einflussgrößen wie Produktqualität, Ressourcenverbrauch, Wirtschaftlichkeit, Sicherheit oder Umweltverträglichkeit zu lösen. Ein solcher ganzheitlicher, durch mathematische Modellierung, numerische Simulation und Optimierung unterstützter Lösungsansatz macht den Kern der Systemverfahrenstechnik aus.

Die erste Aufgabe, Prozessplanung oder Prozesssynthese, ist im Fall des Beispielprozesses Medikamentenherstellung also die Bestimmung der optimalen Abfolge von Grundoperationen, um zum gewünschten Produkt zu kommen. Es ist dabei unmittelbar klar, dass bei genauer Betrachtung und bei komplexen, aus vielen Grundoperationen bestehenden Prozessen schnell eine sehr hohe Anzahl von alternativen Prozessdenkbar ist. Die systematische Analyse und Bewertung dieser Alternativen ist nur mit mäßig detaillierten mathematischen Modellen und mit effizienten numerischen Verfahren möglich.

Steht die Abfolge der Grundoperationen fest, so ist dies erst der Startpunkt für den Prozessentwurf. Jede einzelne Grundoperation muss im Detail ausgelegt werden.

Eine Aufgabe in Prozessentwurf und -optimierung wäre etwa die Auslegung der Extraktion. Hier müssen zahlreiche Fragen beantwortet werden. Zum einen muss ein geeignetes Extraktionsmittel bestimmt werden. Ist dieses gefunden, müs-

sen Temperatur und Druck, oder genauer, die Verläufe von Temperatur und Druck bestimmt werden, die eine optimale Extraktion des gewünschten Wirkstoffs erlauben.

Gelingt es, den Vorgang der Extraktion mit Hilfe eines mathematischen Modells detailgenau nachzubilden, so lassen sich diese Fragen prinzipiell mit dessen Hilfe, mit einem Experiment im Rechner also, beantworten. Sind beispielsweise die Wechselwirkungen zwischen Extraktionsmittel, Druck, Temperatur und dem Extraktionsprozess hinreichend genau verstanden und in einem Modell implementiert, so lassen sich das optimale Extraktionsmittel samt optimalem Temperatur- und Druckverlauf rigoros vorausberechnen.

Bei beiden bisher betrachteten Aufgaben handelt es sich mathematisch betrachtet um Optimierungsprobleme, die mit Hilfe von Prozessmodellen gelöst werden. Das Ergebnis einer solchen rigorosen Optimierung bestimmt die Abfolge und die Ausgestaltung der Grundoperationen und ist damit gewissermaßen der Bauplan für die Anlage. Ein Fehler in dieser Phase wirkt sich also auf die gesamte Betriebsdauer der Anlage aus und hat hohe Kosten zur Folge. Dementsprechend müssen die verwendeten Modelle ausreichend genau sein und alle für die Bearbeitung der Aufgabenstellung wesentlichen Phänomene berücksichtigen. Leider sind gerade in dieser Phase auch die Unsicherheiten oft sehr hoch, so dass es besonders schwierig ist, aussagekräftige Prozessmodelle zu entwickeln. Doch auch dieses Problem kann systematisch betrachtet und gelöst werden, dazu muss die Unsicherheit einfach im Modell berücksichtigt

werden. So einfach dieser Ansatz auch klingt, er führt zu sehr komplexen Optimierungsproblemen deren Lösung Gegenstand der aktuellen Forschung ist.

Ist die Anlage fertig geplant und gebaut, warten weitere systemverfahrenstechnische Fragestellungen. Die erste Aufgabe, die es dabei zu lösen gilt, ist die so genannte Echtzeit-Optimierung. Auch hierbei handelt es sich um ein Optimierungsproblem, das jedoch nicht nur einmal zu Planungszwecken, sondern immer wieder während des Betriebs in Echtzeit gelöst werden muss. Ziel ist es beispielsweise, den optimalen Verlauf von Druck und Temperatur während der Extraktion zu bestimmen. Hier ändern sich die optimalen Werte laufend, zum Beispiel auf Grund einer sich ändernden Rohstoffqualität, etwa je nach Anbaugesicht, Lagerung und Jahrgang. Das Optimierungsproblem muss also immer wieder neu gelöst werden, wobei die Frequenz von der Geschwindigkeit der relevanten Änderungen im Prozess bestimmt wird. Hier muss also eine optimale Lösung innerhalb eines vom Prozess vorgegebenen Zeitfensters gefunden werden.

Gelingt dies, ist der optimale Betrieb noch immer nicht sichergestellt. Dazu bedarf es noch einer funktionierenden Prozessregelung, die garantiert, dass die optimalen Betriebsbedingungen auch eingehalten werden. Hierfür haben sich wiederum Modelle als hilfreich erwiesen, da sie es erlauben, das Prozessverhalten vorausszusagen. Diese Vorhersage kann nun genutzt werden, um Änderungen an den so genannten Regelgrößen, beispielsweise ein Kühlmittelstrom, gezielt so vorzunehmen, dass der Prozess zu

jedem Zeitpunkt optimal betrieben wird. Diese Art der Regelung bezeichnet man auch als modellprädiktive Regelung. Wird der Prozess geregelt, ohne ein Modell zur Verfügung zu haben, so kann die Regelung immer nur reagieren, mit Hilfe der Modellvorhersage allerdings können störende Einflüsse schon erkannt und eliminiert werden, bevor sie sich auf den Prozess auswirken. Offensichtlich ist hier eine besonders schnelle Berechnung erforderlich, da das Modell in Echtzeit eine zuverlässige Vorhersage des erwarteten Prozesszustands liefern muss, bevor sich dieser in der Realität einstellt.

Systemverfahrenstechnik

In der AVT-Prozesstechnik wird insbesondere auf den Gebieten Prozesssynthese, Echtzeitoptimierung, Regelung und Modellidentifikation geforscht.

In der Prozesssynthese werden unter anderem so genannte Short-Cut-Methoden zur Berechnung von Trennsequenzen entwickelt. Als Short-Cut-Methoden bezeichnet man dabei Berechnungsmethoden, die effizient die Abschätzung relevanter Prozessgrößen erlauben. Eine Trennsequenz ist eine Abfolge von Trennschritten, die es ermöglicht, auch aus Vielstoffgemischen einzelne Reinstoffe zu separieren. In jedem Trennschritt wird dabei der Gesamtstrom in zwei Teilströme aufgeteilt. Sollen so aus einem flüssigen Gemisch aus neun Stoffen, alle Reinstoffe gewonnen werden, sind Trennaufgaben zu berechnen. Mit in der AVT-Prozesstechnik entwickelten Methoden ist es möglich, dies auf 120 Berechnungen zu reduzieren, ohne dabei Informationen zu verlieren. Mit einer solchen umfassenden Betrachtung lassen sich deutlich energiesparen-

dere Anlagen bei reduziertem Investitionsbedarf bestimmen.

Auch auf dem Gebiet der Echtzeitoptimierung sind die Aachener Wissenschaftler aktiv. Den Schwerpunkt bildet hier das Softwarepaket „DyOS“. Dieses ermöglicht es komplexe, so genannte Optimalsteuerungsprobleme effizient und robust zu lösen. Neben der Anwendung von Modellen, spielt auch deren Entwicklung eine wichtige Rolle in der Forschung. Schließlich können die oben beschriebenen Methoden nur angewandt werden, wenn ein valides Prozessmodell vorliegt.

Mit nachwachsenden Rohstoffen vom Produkt zum Prozess

Als interdisziplinäre Wissenschaft an der Schnittstelle zwischen Biologie, Chemie, Physik, angewandter Mathematik und Informatik muss die Systemverfahrenstechnik auch in Zukunft darauf achten, zum einen die Schnittstelle zu diesen Professionen zu pflegen und weiterzuentwickeln, zum anderen aber auch die eigene Identität zu wahren, weiterzuentwickeln und zu schärfen. Die Kernkompetenz der Systemverfahrenstechnik muss dabei ihre Funktion als Methodenintegrator sein und bleiben. Gleichzeitig müssen eben diese Methoden auf neue Aufgabenstellungen angewandt werden um sie so zu verbessern und weiterzuentwickeln.

Neue Aufgaben werden dabei in naher und mittelfristiger Zukunft vor allem durch den bevorstehenden Rohstoffwandel generiert. Die chemische Industrie basiert heutzutage im Wesentlichen auf Grundchemikalien, die aus Erdöl gewonnen werden. Mit sinkender Verfügbarkeit des Erdöls und den damit verbundenen steigenden

Preisen, wird sich ein Wandel vollziehen hin zu der Herstellung von Grundchemikalien aus nachwachsenden Rohstoffen. Hierfür müssen in kurzer Zeit völlig neue Prozesse erdacht und umgesetzt werden, die neuartige und vielfältig gestaltbare biogene Rohstoffe zu neuen, an die molekulare Struktur der Rohstoffe angepasste Produkte umsetzen.

Die Bewertung und Auslegung dieser Prozesse muss dabei großteils von der Systemverfahrenstechnik geleistet werden, so dass hier auf die kommende Generation von Wissenschaftlern spannende und vielfältige Fragestellungen warten, deren Lösung einen wesentlichen Einfluss auf die zukünftige Lebens- und Wohlstandssituation haben wird. Die Aachener Verfahrenstechnik beschäftigt sich mit diesen Problemen beispielsweise im Exzellenzcluster „Maßgeschneiderte Kraftstoffe aus Biomasse“.

Autoren:

Dipl.-Ing. Claas Michalik ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl AVT- Prozesstechnik. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Marquardt ist Inhaber des Lehrstuhls für AVT-Prozesstechnik.



Hier erfahren Sie mehr – www.porsche.de oder Telefon 01805 356 - 911, Fax - 912 (EUR 0,14/min).

**Träumer, Idealisten, Umweltaktivisten.
Natürlich sind wir stolz auf unsere Ingenieure.**

Der neue 911 Turbo.

Deren ganzer Stolz: 368 kW (500 PS), 11,4 Liter Verbrauch auf 100 km. Benzindirekteinspritzung (DFI), variable Turbinengeometrie (VTG) und VarioCam Plus erzeugen enorme Kraft – mit enormer Effizienz. Mit dem optionalen Porsche Doppelkupplungsgetriebe (PDK) sinkt der Verbrauch um bis zu 16%, die CO₂-Emissionen um bis zu 18%. Das optionale Sport Chrono Paket Turbo inkl. dynamischer Motorlager und Overboost erhöht die Performance nochmals.



PORSCHE

Flüssig-Flüssig-Extraktion

Eine effiziente Trenntechnik für kostengünstige nachhaltige Prozesse

D

Die Herstellung von Produkten der chemischen Industrie, wie Kunst- und Farbstoffen sowie pharmazeutischen Wirkstoffen, erfolgt heute größtenteils auf der Basis von Rohöl. Es ist jedoch absehbar, dass schon in naher Zukunft die vorhandenen Rohölquellen nicht mehr ausreichen werden, um den steigenden Bedarf der Menschheit zu decken. Biobasierte Rohstoffe sind eine mögliche nachhaltige Alternative. Eine Herausforderung bei biobasierten Rohstoffen ist allerdings die Trennung der resultierenden komplexen Gemische. So sind Vielstoffgemische aus Komponenten mit verschiedenen chemisch aktiven Gruppen in biologischen Systemen eher Regel als Ausnahme und zudem fallen die Produkte häufig nur in kleinen Konzentrationen in Lösung an. Die Produktaufbereitung spielt somit eine entscheidende Rolle für den ökonomischen Erfolg eines biobasierten Verfahrens. Hier bietet die Flüssig-Flüssig-Extraktion eine gute Möglichkeit, um eine effiziente Trennung von Biokomponenten für die chemische Industrie durchzuführen. Diese Trenntechnik bietet nicht nur optimale Möglichkeiten, gezielt Komponenten aus Gemischen abzutrennen, sondern kann normalerweise auch unter vergleichsweise milden Bedingungen bei Raumtemperatur durchgeführt werden. Deshalb ist sie im Vergleich mit anderen Verfahren potenziell kostengünstiger. Die Extraktion ist dabei ein etabliertes Trennverfahren, das sich aus den genannten Gründen für die Verarbeitung von nachwachsenden Rohstoffen anbietet. Das Grundprinzip ist in Bild 1 dargestellt. Das flüssige Ausgangsgemisch besteht hier aus einem Lösungsmittel (A) und einer Übergangskomponente (B), welche abgetrennt werden soll. Die Übergangskomponente kann dabei zum Beispiel der gewünschte Wertstoff sein. Nun wird dieser Phase eine weitere Flüssigkeit (C), das Extraktionsmittel, hinzugefügt, welche nicht löslich im Lösungsmittel (A) ist. Die beiden Phasen werden vermischt

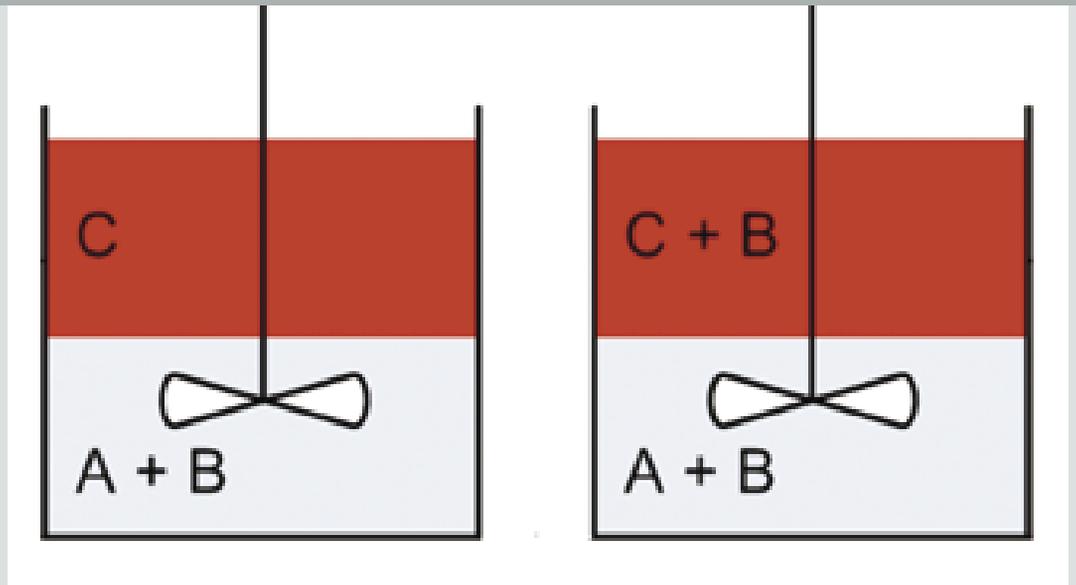


Bild 1: Prinzip der Flüssig-Flüssig-Extraktion (links: vor dem Rühren, rechts: nach dem Rühren).

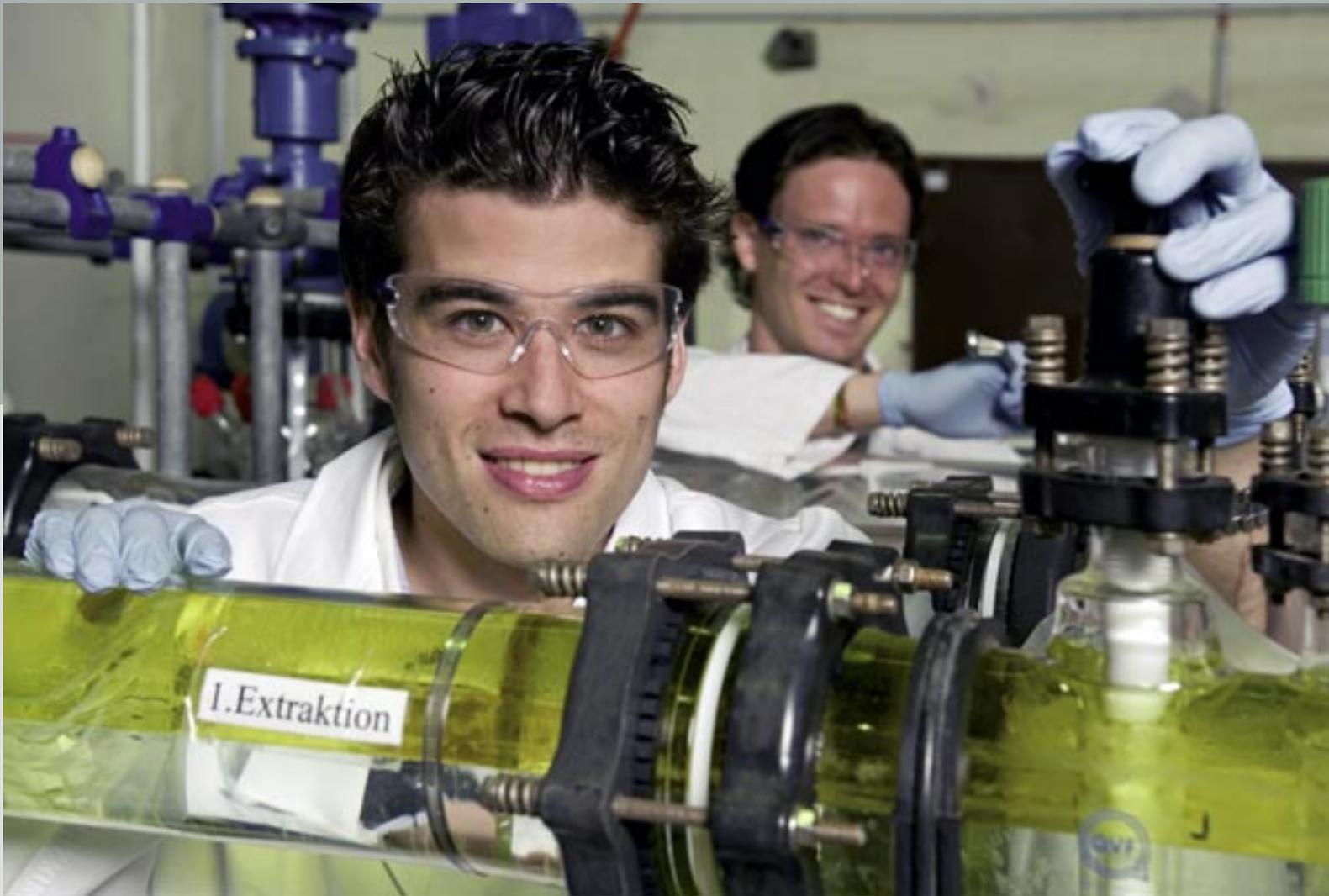
und dabei geht ein – möglichst großer – Teil der Wertkomponente (B) in das zweite Lösungsmittel (C) über. Wird dieses Verfahren mit einer überlagerten Reaktion noch effizienter gestaltet, so spricht man von einer Reaktivextraktion. Dadurch gelingt es, die Trenneffizienz sogar bei sehr niedrig konzentrierten Komponenten noch deutlich zu erhöhen. Dies wurde in der Vergangenheit auch dazu genutzt, aus Reaktionslösungen in der Biotechnologie, wo Mikroorganismen für die Produktion von Verbindungen genutzt werden, so genannten Fermentationsbrühen, eine sofortige Abtrennung der Produkte zu erreichen. Dies ist besonders wichtig, weil häufig die Anwesenheit des Produktes die Reaktion verzögert oder behindert. Deshalb wird die Triebkraft der Reaktion durch die sofortige Entfernung der Produkte erhöht und die Reaktion be-

schleunigt. Die Herstellung der Produkte kann somit effizienter und damit kostengünstiger erfolgen.

Ziel bei der Reaktivextraktion kann es aber auch nicht nur sein, chemische Komponenten effizient herzustellen. Mit Reaktivextraktion gelingt es auch, manche Gesamtprozesse erst nachhaltig zu gestalten. Wird in größerem Maßstab Biomasse als Rohstoff verwendet, werden mit den Pflanzen auch die mineralischen Komponenten dem Naturraum entnommen. Diese müssen dem Boden in Form von Dünger wieder zugeführt werden. Um diese stofflichen Kreisläufe zu schließen, müssen die Mineralien aus den Abfallströmen der Biomasse also zu Dünger aufgearbeitet werden, der den Feldern wieder zugeführt werden kann.

Ein Anwendungsbeispiel hierfür ist die Gewinnung von Phosphat als Dünger. Dieser

kann durch ein spezielles Verfahren beispielsweise aus Klärschlamm hergestellt werden, der einen sehr hohen Anteil an Phosphat und anderen Mineralstoffen enthält. Klärschlamm wird deutschlandweit bisher zu 30 Prozent direkt als Dünger auf die Felder aufgetragen. Dieses Vorgehen ist umstritten, da im Klärschlamm nicht nur Phosphorverbindungen vorliegen, sondern auch diverse anorganische und organische Schadstoffe, die in den Boden gelangen und sich dort gegebenenfalls sogar anreichern. Durch Verbrennung des Klärschlammes erzeugt Klärschlammmasche enthält etwa 7 bis 10 Massenprozent Phosphor, gleichzeitig jedoch auch diverse Metalle und Schwermetalle, unter anderem Eisen, Aluminium, Cadmium und Blei. Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Verbundprojektes des



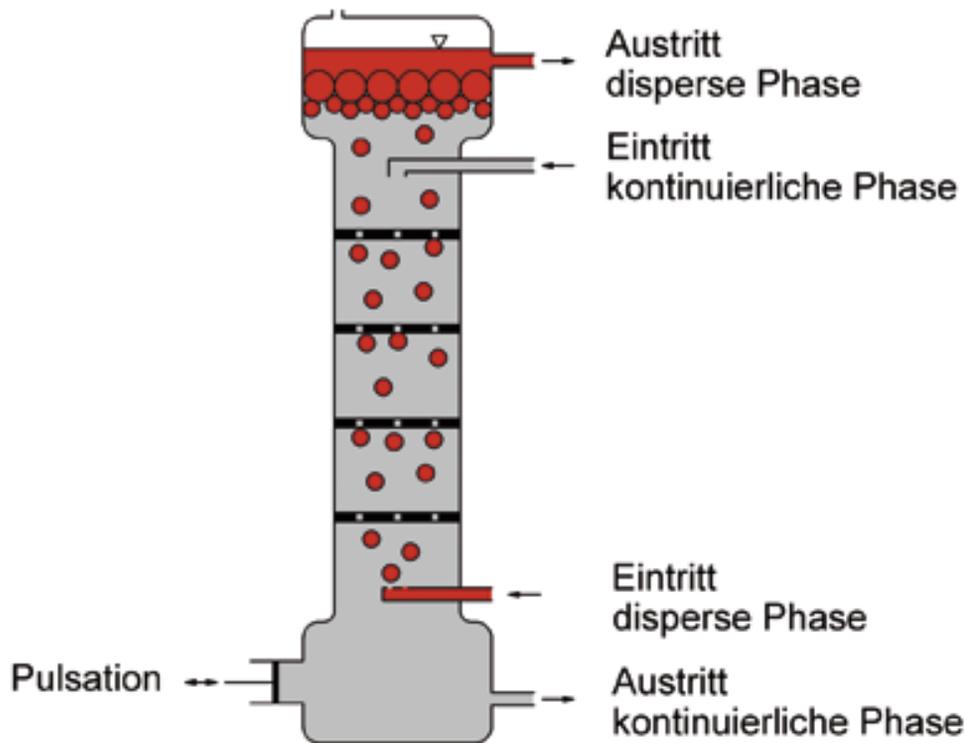
*Bild 2: Halbtechnische Mixer-Settler-Anlage mit vier Stufen im Technikum der AVT-TVT.
Foto: Peter Winandy*

Umwelt-Forums der RWTH Aachen zur „Rückgewinnung von Pflanzennährstoffen, insbesondere Phosphor aus der Asche von Klärschlamm“ wird am AVT-Thermische Verfahrenstechnik ein Prozess im Technikum realisiert, bei dem durch Reaktivextraktion als zentralem Prozessschritt ein pflanzenverfügbares, von Schadstoffen abgereichertes Phosphorprodukt als Dünger hergestellt wird. Die Flüssig-Flüssig-Extraktion kann sowohl in so genannten Mixer-Settler-Batterien, siehe Bild 2, durchgeführt werden als auch in Kolonnen. Hier soll auf das Verhalten von Kolonnen näher eingegangen werden. Eine Skizze einer solchen Kolonne ist in Bild 3 gezeigt. In Extraktionskolonnen wird eine der beiden Phasen dispergiert, das heißt in Tropfen zerteilt zugeführt. In dem gezeigten Fall wird die disperse Phase am unteren Ende der Kolonne aufge-

geben und steigt aufgrund ihrer geringeren Dichte in der kontinuierlichen Phase auf. Während ihrer Verweilzeit in der Kolonne können die Tropfen aus der kontinuierlichen Phase die Wertkomponente(n) extrahieren. In der Kolonne befinden sich zusätzlich Einbauten, hier so genannte Siebböden, die den Aufstieg der Tropfen in der Kolonne verzögern und größere Tropfen zerteilen und dadurch verlangsamen. Die Auslegung solcher Kolonnen erfolgt heute durch Experimente im kleineren Technikumsmaßstab. Durch Simulationen lässt sich die Anzahl der notwendigen Experimente drastisch reduzieren oder sogar ganz ersetzen und somit auch die Zeit von der Idee bis zum Bau einer Extraktionskolonne wesentlich verkürzen.

Die komplexen Vorgänge und die zahlreichen Wechselwirkungen - beispielsweise Tropfen mit Tropfen, Tropfen mit Einbauten - in einer Extraktionskolonne sind jedoch schwer zu erfassen. Einfacher wird es, wenn einzelne Tropfen näher betrachtet werden. So werden bei uns physikalisch fundierte Modelle entwickelt und auf die realen Verhältnisse in Kolonnen übertragen. In Kooperation mit der Technischen Universität München und der Technischen Universität Kaiserslautern wurde erfolgreich gezeigt, dass ausgehend von Experimenten an einzelnen Tropfen, die einfach im Labor durchgeführt werden können, das Verhalten einer Extraktionskolonne sehr genau simuliert werden kann. Der in den Einzeltropfenexperimenten zu erbringende Aufwand ist im

Bild 3: Skizze einer Extraktionskolonne.



Vergleich zu Technikumsexperimenten deutlich geringer. Die Experimente führen zu Modellinformationen, die als Input in Simulationsprogramme einfließen, wie das am AVT-Thermische Verfahrenstechnik entwickelte Programm ReDrop. ReDrop kann nicht nur für universitäre, also „saubere“ Stoffsysteme Extraktionskolonnen simulieren, es wurde sogar erfolgreich auf industrielle Stoffsysteme angewandt. Grundlage der Simulation mit ReDrop sind Modelle, die physikalisch sinnvoll sind. So werden beispielsweise durch den Stofftransport Grenzflächeninstabilitäten, die die Extraktion beschleunigen, in den Modellen berücksichtigt. Diese Grenzflächeninstabilitäten entstehen durch den Stofftransport der Übergangskomponente und führen zu sehr abrupten Strömungen an den Tropfen. Der Stofftransport kann durch diese Strömungen um ein Vielfaches beschleunigt werden.

Dieses Phänomen der Grenzflächen-Instabilitäten lässt sich dabei sogar an einem einfachen täglichen Beispiel demonstrieren: einer Tasse frisch gebrühten schwarzen Kaffees bei kühler Umgebung, etwa in kühleren Jahreszeiten im Freien oder im Kühlschrank. In Bild 4 ist links eine Tasse heißen Kaffees dargestellt. Auf der Oberfläche des Kaffees ist eine dünne Schicht weißer Dampf zu sehen, die sich sehr nah an der Oberfläche befindet. Aufgrund äußerer Einflüsse befinden sich in dieser Schicht langsam bewegende Wirbel. Beobachtet man diese weiße Schicht für eine Weile, so erkennt man, dass sich in ihr abrupt „Straßen“ bilden in denen die Schicht offensichtlich spontan verschwindet. Sie sehen wie Risse in der Dampfschicht aus. Dies ist in Bild 4 rechts gezeigt, wo die gleiche Tasse Kaffee nur wenige Bruchteile von Sekunden später dargestellt ist. Der rote Pfeil zeigt an den Ort, an dem die „Straßen“ zu erken-

nen sind. Diese Grenzflächeninstabilitäten bilden sich aufgrund der Temperaturunterschiede an der Oberfläche des Kaffees.

Bei der Extraktion ist die treibende Kraft dagegen der Konzentrationsunterschied der Komponente, die extrahiert werden soll. Da bei der Flüssig-Flüssig-Extraktion beide Phasen flüssig sind, sind die Phänomene noch wesentlich ausgeprägter, die beim Kaffee aufgrund der geringeren Dampfdichte nur moderat auftreten. Der Effekt dieser Grenzflächen-Instabilitäten wird nun genau in unseren Modellen zur Beschreibung des Tropfenverhaltens berücksichtigt. Nur so gelingt es, auch für technische Aufgabenstellungen mit den Simulationswerkzeugen hochgenaue Vorhersagen durchzuführen, die eine solide Basis für das zuverlässige Design technischer Extraktions-Apparate bietet.

Autoren:
Dipl.-Ing. Murat Kalem,
Dr.rer.nat. Jan Kröckel und
Dipl.-Ing. Evangelos Bertakis
sind Wissenschaftliche Mitarbeiter am Lehrstuhl AVT-Thermische Verfahrenstechnik.
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Pfennig ist Inhaber des Lehrstuhls AVT-Thermische Verfahrenstechnik.

Bild 4: Ein tägliches Beispiel:
Grenzflächen-Instabilitäten
an Kaffee.



Anzeige

SEW-EURODRIVE—Driving the world



Wir suchen technikbegeisterte Mitarbeiter mit Drive



Mit über 13.000 Mitarbeitern weltweit bringen wir Bewegung in fast alle Branchen. Das Erfolgsrezept: Getriebemotoren und Antriebselektronik vom Feinsten. Und jede Menge Drive in allem was wir tun.

Sie wollen mehr bewegen als andere und was Sie antreibt ist der Spaß an einer Aufgabe die Sie wirklich fordert. Dann starten Sie jetzt durch bei SEW-EURODRIVE – dem erfolgreichen Familienunternehmen und Global Player.

Sie haben Ihr Studium der Fachrichtung Elektrotechnik, Wirtschaftsingenieurwesen, Maschinenbau, Mechatronik, Informatik oder Wirtschaftswissenschaften erfolgreich abgeschlossen? Und Sie wollen mit uns in einem internationalen Umfeld etwas bewegen? Interessante Herausforderungen in den Bereichen Engineering, Entwicklung, Vertrieb und Services warten auf Sie.

Kommen Sie zu uns!



SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG
Personalreferat Bruchsal
Postfach 30 23, 76642 Bruchsal
— www.sew-eurodrive.de

Kraftstoffe der Zukunft

Der Exzellenzcluster „Maßgeschneiderte Kraftstoffe aus Biomasse“

Zukünftige Mobilitätssicherung mit dem Schwerpunkt ökologische Verträglichkeit erfordert neben der Entwicklung von batteriebetriebenen Elektroautos, Hybridantrieben und gasbetriebenen Motoren die Nutzung neuer umweltschonender flüssiger Kraftstoffe. Diese bieten, da sie als chemische Energieträger eine sehr viel höhere Energiedichte als Batterien aufweisen, weiterhin eine wichtige Basis zur Mobilitätssicherung. Die entscheidenden Fragen sind daher: Wie sieht der Kraftstoff der Zukunft aus? Wie kann seine Effizienz durch eine neue Motorenteknologie weiter gesteigert werden? Wie kann er aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden? Mit diesen und ähnlichen Fragestellungen beschäftigt sich die Aachener Verfahrenstechnik, kurz AVT, im Exzellenzcluster „Maßgeschneiderte Kraftstoffe aus Biomasse“ („Tailor-Made Fuels from Biomass - TMFB“) gemeinsam mit Partnern aus den Naturwissenschaften und der Verbrennungstechnik.

Der Begriff „Maßgeschneiderte Kraftstoffe“ bezieht sich darauf, dass sie speziell für den Einsatz in zukünftigen Motoren mit Niedertemperatur verbrennung zugeschnitten werden. Es wird also nicht versucht, die heute verbreiteten Kraftstoffe auf Grundlage biogener Rohstoffe herzustellen, sondern gänzlich neue Kraftstoffkomponenten zu entwickeln. Durch eine genaue Abstimmung zwischen Kraftstoff und Motor lassen sich Schadstoffemissionen verringern und der Wirkungsgrad steigern. Dass diese Herangehensweise erfolversprechend ist, konnten bereits umfangreiche Versuche am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen zeigen: Es wurde eine Kraftstoffmischung identifiziert, die zu signifikant niedrigeren Schadstoffemissionen führt. Um die Anzahl der teuren und zeitaufwändigen Versuche zu verringern, entwickelt die AVT modellgestützte Berechnungsverfahren zur Identifizierung von geeigneten Kraftstoffkomponenten.

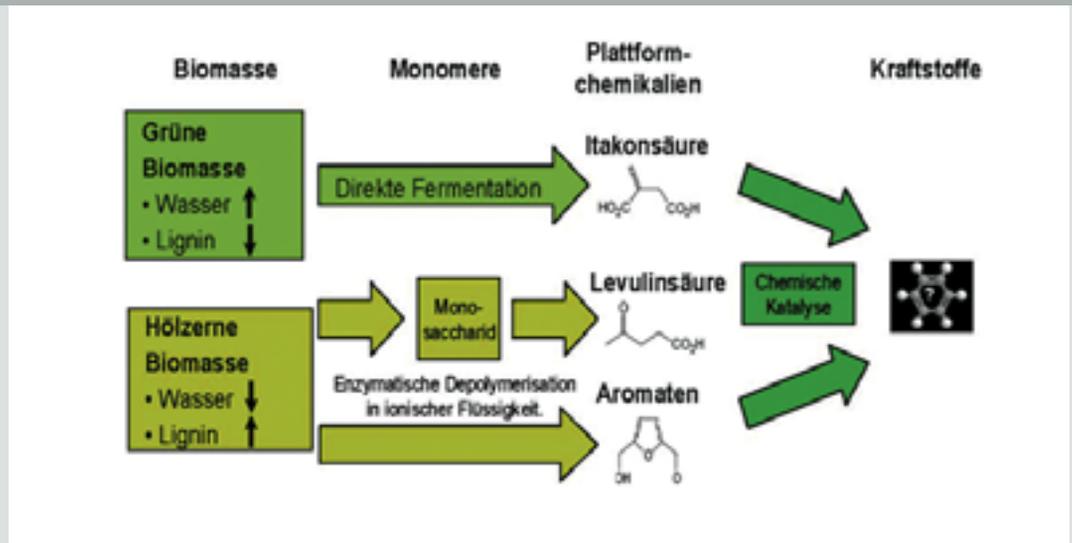


Bild 1: Verfahrensschema des „Tailor-Made Fuels from Biomass“-Prozesses zur Herstellung von Kraftstoffen aus Biomasse.

Auch für die chemische Industrie bedeutet die Umstellung auf den Rohstoff Biomasse erhebliche Veränderungen. Anstatt, wie in der Petrochemie üblich, komplexe Moleküle aus kleinen Bausteinen aufzubauen, wird die vorhandene Komplexität der Biopolymere in der Kraftstoffherstellung genutzt. Das bedeutet, dass komplett neue Synthesewege entwickelt werden müssen.

Die Hauptaufgabe der AVT ist es, die Entwicklung dieser Synthesewege unter verfahrenstechnischen Gesichtspunkten zu begleiten und großtechnische Prozesse zur effizienten und ressourcenschonenden Herstellung der zukünftigen Biokraftstoffe zu entwerfen. Dies umfasst nicht nur die eigentliche Reaktion vom Rohstoff zum Kraftstoffmolekül,

sondern auch alle Vorbehandlungs- und Aufreinigungsschritte.

Die Konkurrenz zur Nahrungsmittelerzeugung durch die Nutzung von Biomasse als Kraftstoff soll ausgeschlossen werden, indem auf Lignocellulose als Ausgangsmaterial zurückgegriffen wird. Lignocellulose ist als strukturbeständiger Baustein in allen höheren Pflanzen, wie beispielsweise Holz oder Gras, enthalten und besteht aus Cellulose, Hemicellulose und Lignin. Obwohl das Verhältnis dieser Bestandteile von Pflanze zu Pflanze schwankt, lassen sich zwei Klassen unterscheiden: „Grüne“ Biomasse mit einem niedrigen Ligninanteil und „Holzartige“ Biomasse mit einem hohen Ligninanteil. Im Exzellenzcluster werden für beide Rohstoffarten angepasste Produktionsverfahren

erforscht. Wie in Bild 1 zu sehen ist, erfolgt die Kraftstoffherstellung aus Biomasse stets über den Zwischenschritt von Plattformchemikalien. Als Plattformchemikalien werden chemische Verbindungen ausgewählt, aus denen eine Vielzahl von Zielprodukten hergestellt werden kann – neben Kraftstoffen auch Massenchemikalien wie Kunststoffe. Die im Exzellenzcluster erzielten Ergebnisse können also in der chemischen Industrie vielseitig eingesetzt werden, denn auch dort ist der Rohstoffwandel ein aktuelles Thema.

Aus grüner Biomasse soll die Plattformchemikalie Itakonsäure mit Hilfe des Pilzes *Ustilago maydis* fermentativ hergestellt werden. Obwohl dieser Pilz eigentlich ein Schädling für Maispflanzen ist, kann



*Bild 2: Auflösung von Holz
in Ionischer Flüssigkeit.
Foto: Peter Winandy*

er in Flüssigkulturen unter anderem Itakonsäure bilden. Eine besondere Herausforderung liegt in der Bestimmung idealer Fermentationsbedingungen: Die Wissenschaftler der AVT ermitteln deshalb in systematischen Versuchen optimale Werte für Temperatur, pH-Wert, Nährstoffkonzentrationen und Sauerstoffzufuhr.

Neben der effizienten Produktion von Itakonsäure ist deren Abtrennung aus der Fermentationsbrühe, die viele weitere Komponenten enthält, ein entscheidender Schritt. Alle großen Bestandteile wie Zellen werden durch eine Filtration im Fermenter gehalten. Anschließend wird aus den gelösten Itakonsäuresalzen durch Elektrodialyse mit bipolaren Membranen eine konzentrierte Itakonsäurelösung hergestellt. Die

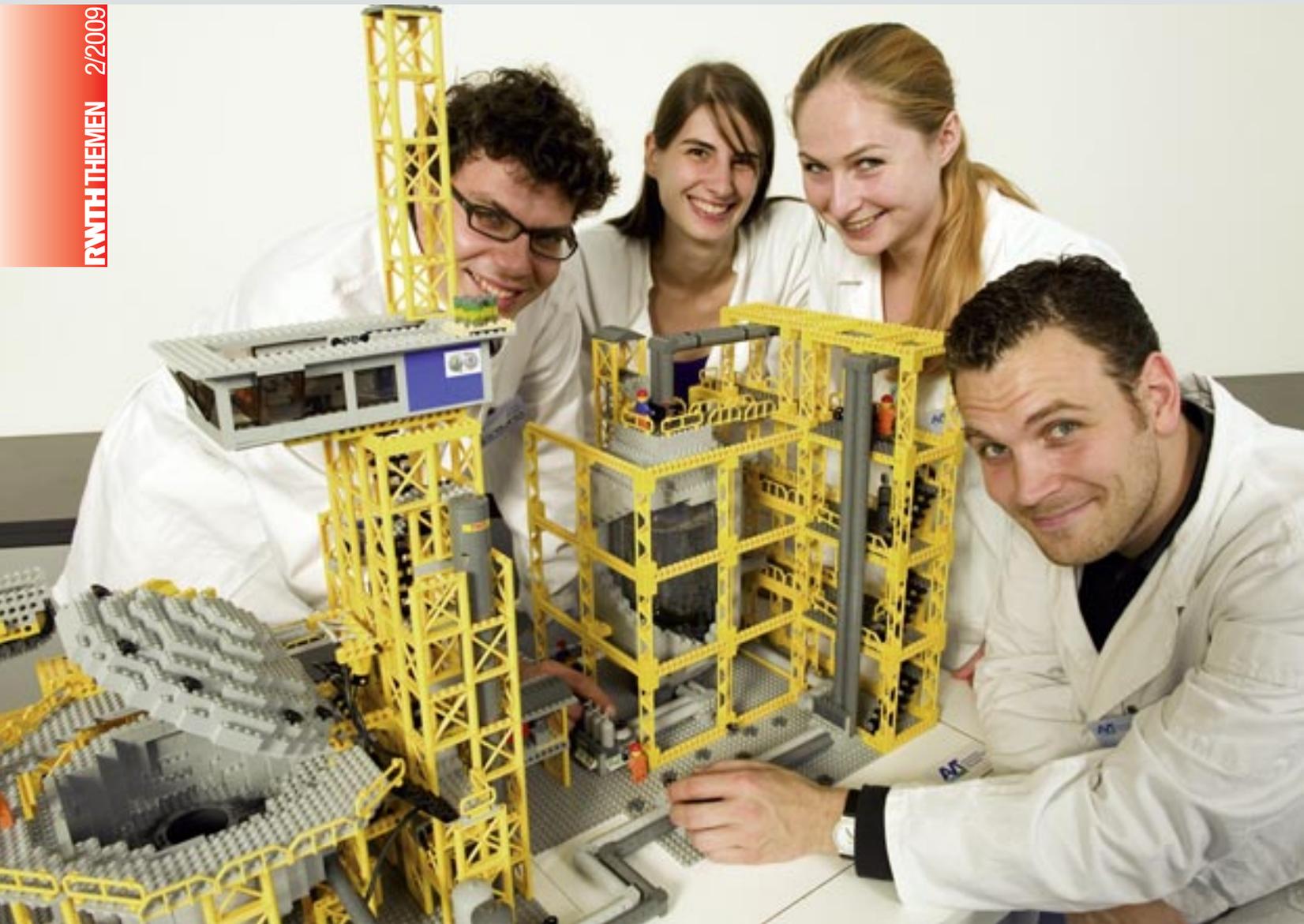
Elektrodialyse ermöglicht durch ladungsselektive Membranen die Trennung geladener Teilchen im elektrischen Feld. Bipolare Membranen werden zusätzlich zur Wasserspaltung eingesetzt, um die für die Säurebildung erforderlichen H^+ -Ionen bereitzustellen. Die stetige Produktabtrennung und Aufbereitung der Fermentationsbrühe durch die Elektrodialyse ermöglicht eine kontinuierliche Fermentation und verbessert die Effizienz des späteren Prozesses entscheidend.

Für holzartige Biomasse ist der Schritt zur Plattformchemikalie bereits deutlich aufwändiger. Der hohe Ligninanteil dient in der Natur als Abwehrmechanismus, um Holz witterungsbeständig und schädlingsresistent zu machen. Leider erschwert dies auch die für die stoffliche

Verwendung grundlegende Auftrennung von Holz in seine Bestandteile.

Zwar ist nachgewiesen, dass ionische Flüssigkeiten einzelne Holzbestandteile, nämlich Cellulose-Fasern, auflösen, siehe Bild 2, ihre genaue Funktionsweise ist jedoch längst nicht geklärt. Ionische Flüssigkeiten sind neuartige Salzschnmelzen, die bereits unter 100°C flüssig werden, aber anders als organische Lösungsmittel einen vernachlässigbaren Dampfdruck aufweisen und damit bei diesen Temperaturen nicht verdunsten. Die AVT untersucht den Auflösungsmechanismus von Holz in verschiedenen ionischen Flüssigkeiten. Da diese wie ein Salz aus verschiedenen Kationen und Anionen zusammengesetzt sein können, gibt es nahezu unendlich viele Kombinations-

möglichkeiten mit immer anderen Eigenschaften. Im Exzellenzcluster wird daher eine Kombination mit optimalen Auflöseseigenschaften gesucht. Liegen die Holzkomponenten einmal in Lösung vor, können Sie in der ionischen Flüssigkeit zu Plattformchemikalien umgesetzt werden. Natürlich enthält die Biomasse neben den Hauptbestandteilen weitere organische und anorganische Stoffe. Diese verunreinigen das Lösungsmittel, was aufgrund seiner hohen Kosten möglichst lange genutzt werden soll. Die Aufreinigung der ionischen Flüssigkeit ist daher ein zentraler Forschungsschwerpunkt. Hier bieten sich Membran- oder Extraktionsverfahren an, weil diese optimal auf die Eigenschaften ionischer Flüssigkeiten angepasst werden können.



32

Die Umwandlung von Lignocellulose zu Plattformchemikalien kann sowohl nach chemischen als auch nach biochemischen Verfahren erfolgen. In der biokatalytischen Umsetzung werden hierbei Enzyme eingesetzt. Dies sind Proteine, die als Biokatalysatoren Reaktionen hoch selektiv steuern, aber normalerweise an wässrige Bedingungen angepasst sind. In der AVT wird nun der Einsatz von besonders robusten Enzymen in ionischen Flüssigkeiten zur Umwandlung von Lignocellulose erforscht.

Die vorgestellten Forschungsbeispiele zeigen, dass momentan an den unterschiedlichsten Prozessschritten gearbeitet wird. Ein effizienter Gesamtprozess kann allerdings nur durch die optimale Abstimmung der einzelnen Schritte erreicht

werden. Hierfür werden einfache Modelle entwickelt, mit deren Hilfe schon in dieser frühen Phase Aussagen über Kosten und (Energie-) Effizienz des Gesamtprozesses gemacht werden können. Mit den Methoden der mathematischen Optimierung wird zudem aus vielen verschiedenen Prozessvarianten die optimale identifiziert.

Im gesamten Exzellenzcluster ist eine enge Vernetzung der unterschiedlichen Disziplinen – das heißt der Chemie, der Verfahrenstechnik und der Verbrennungstechnik – Voraussetzung für den Erfolg. Denn nur zusammen lassen sich die vielfältigen Fragestellungen rund um das Ziel, „Maßgeschneiderte Kraftstoffe aus Biomasse“ zu entwickeln, beantworten.

Autoren:
Dipl.-Ing. Anna Besler,
Dipl.-Ing. Andreas Harwardt
und Dipl.-Ing. Sven Kossack
sind Wissenschaftliche
Mitarbeiter des Lehrstuhls
AVT-Prozesstechnik.
Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Wolfgang Marquardt
ist Inhaber des Lehrstuhls
AVT-Prozesstechnik.

Bild 3: Wissenschaftler des Exzellenzclusters „Maßgeschneiderte Kraftstoffe aus Biomasse“ entwickeln Prozesse zur nachhaltigen Herstellung von Biokraftstoffen. Die große Herausforderung sind die verfahrenstechnischen Schnittstellen, damit hinterher alles – wie im anschaulichen Lego-Modell – zusammenpasst. Foto: Peter Winandy

Theorie ist grau. Sagt man. Praxis ist bunt. Sagen wir.

Das Studium Universale ist eine schöne Vision: Alles kennen lernen, viele Einblicke gewinnen und das Wissen ganz verschiedener Disziplinen sammeln. Unser Angebot für Studenten (w/m) orientiert sich an diesem Gedanken. Als Konzern, der ein riesiges Spektrum rund um Energie und energienahe Dienstleistungen abdeckt, können wir diese Vielfalt auch bieten. Ob in einem Praktikum, einer Werkstudententätigkeit oder mit der Möglichkeit, die Abschlussarbeit des Studiums bei uns anzufertigen. Wir sind sicher, Ihnen die passende Chance bieten zu können.

Mehr Informationen unter:

www.enbw.com/karriere



EnBW

Energie
braucht Impulse

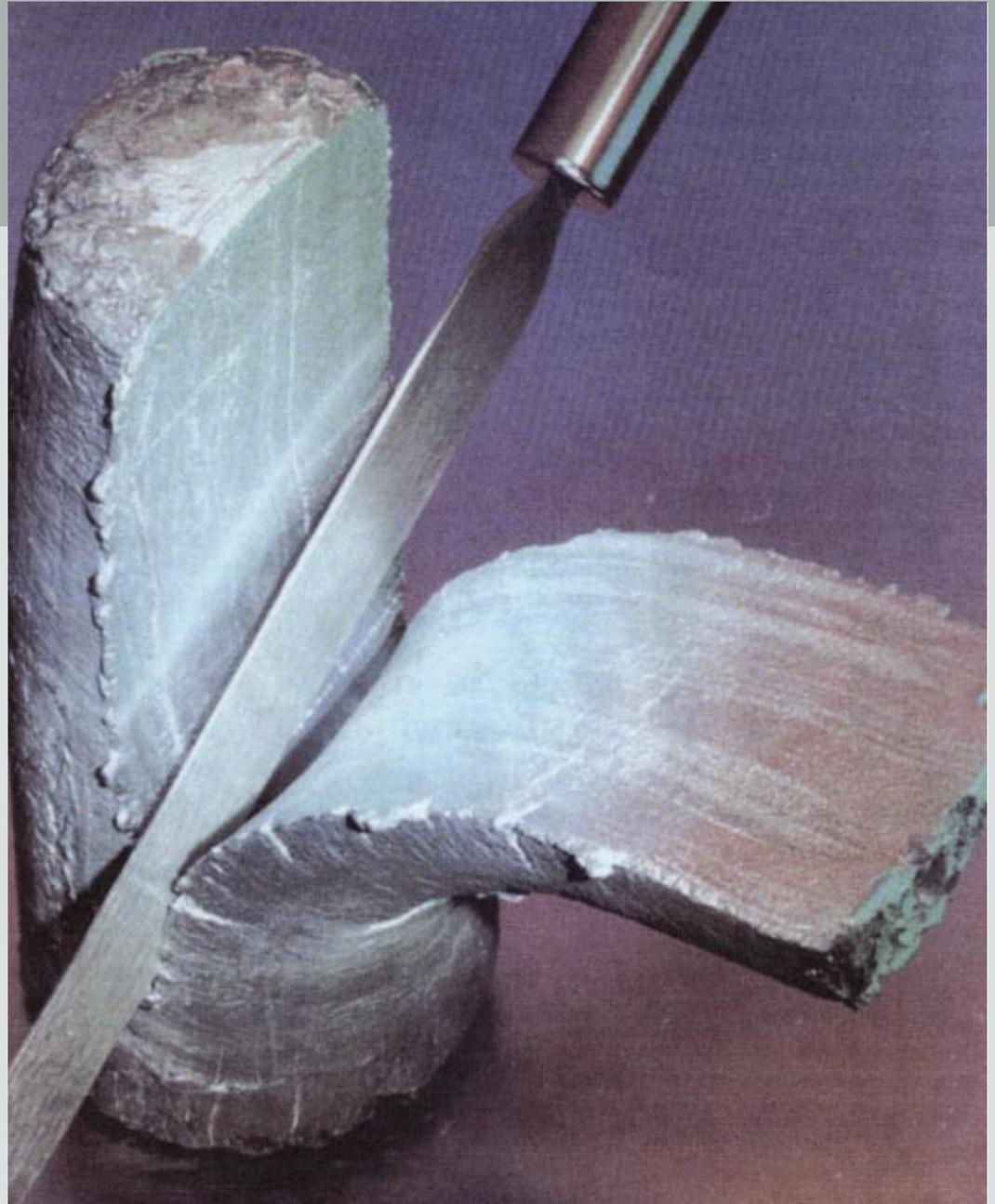
Blut ist dicker als Wasser

Viele Beziehungen sind nur dann stark oder in unserem Falle zäh, wenn die Belastung klein ist. Treten große Spannungen auf, verschwindet diese Zähigkeit sehr rasch. Vergleichbar verhält sich Blut: Ist die Belastung, die auf das Blut wirkt, klein und fließt es sehr langsam, ist es so zäh wie Honig. Bei großer Belastung wird das Blut so dünnflüssig wie Wasser.

Die Eigenschaft, die dafür verantwortlich ist, dass die Zähigkeit eines Stoffes mit Zunahme der Belastung sinkt, nennt man Strukturviskosität oder auch Scherverdünnung. Nicht nur Blut verhält sich so. Viele Stoffe, mit denen wir täglich umgehen, haben diese Eigenschaft und das ist gut so, weil sie den Gebrauchswert der Stoffe erhöht. Dank des strukturviskosen Verhaltens moderner Lacke können beispielsweise auch handwerkliche Laien glatt lackierte Oberflächen ohne Nasen und Tropfen herstellen: Beim Aufnehmen des Lacks auf den Pinsel ist er sehr zäh und fließt nicht vom Pinsel ab. Sobald jedoch das Werkzeug über die zu lackierende Fläche streicht, wird der Lack mechanisch belastet und dünnflüssig, wodurch er sich gleichmäßig verteilt. Hinter dem Pinsel wird der Lack wieder zäh; das verhindert das Abfließen des Lacks in Form von Nasen.

34

Die Wissenschaft, die sich mit diesen Phänomenen beschäftigt, ist die Rheologie. Der Name stammt vom griechischen Verb „ $\rho\epsilon\iota\nu$ “ – „fließen“; er wurde in den zwanziger Jahren des letzten Jahrhunderts von Eugene Bingham eingeführt, der sich intensiv mit den Fließeigenschaften von Kunststoffen beschäftigt hat. In diesem Sinn meint Rheologie die Untersuchung, Beschreibung und Deutung von Materialeigenschaften, die Fließen und Verformen betreffen. Die rheologische Gruppe der Aachener Verfahrenstechnik, kurz AVT, befasst sich im Wesentlichen mit den Eigenschaften einer besonderen Stoffklasse: den Suspensionen und Emulsionen, zu denen man auch das Blut zählen kann.



Eine Suspension ist die Mischung von festen Partikeln und einer Flüssigkeit. Eine Emulsion ist die Mischung von zwei Flüssigkeiten, die nicht untereinander mischbar sind und bei der eine der beiden als Tröpfchen vorliegt. Höher konzentrierte Suspensionen und Emulsionen zeigen eine besondere Eigenschaft, die man Viskoplastizität nennt: Das Material kann sich wie ein fester Körper verhalten. Ein typisches Beispiel dafür ist Butter, die eine hochkonzentrierte Emulsion ist. Wenn keine Kraft auf einen Butterklotz wirkt, ist er formstabil wie ein fester Körper. Wenn

man ihn aber mit einem Messer belastet, beginnt er zu fließen und lässt sich auf einer Brotscheibe verstreichen.

Die AVT gehört zu den wenigen rheologischen Arbeitsgruppen in der Welt, die sich mit ganz speziellen Suspensionen befasst, den halbflüssigen Metalllegierungen. Diese haben im Unterschied zu reinen Stoffen keine einheitliche Schmelz- oder Erstarrungstemperatur, sondern weisen ein Temperaturintervall auf, in dem flüssige und feste Metallphasen nebeneinander vorliegen. In diesem Zustand ist die Legierung also eine Suspension. Vollständig flüssige Metalle verhalten sich

rheologisch gesehen wie Wasser. Die metallischen Suspensionen sind aber nicht nur viskoplastisch, sondern auch noch thixotrop. Thixotropie ist eine besondere Form der Strukturviskosität: Das Material ändert bei einer neuen Belastung nicht sofort seine Fließeigenschaften, sondern nimmt sich dafür Zeit. Bild 1 zeigt den Block einer industriellen Aluminiumlegierung, die bei einer Temperatur von 630 °C mit einem einfachen Messer geschnitten wird. Die Ähnlichkeit im Verhalten zu Butter ist offensichtlich – einerseits formstabil, andererseits fließfähig. Ausgehend von den besonderen Fließeigenschaften

Suspensionsrheologie bei der Aachener Verfahrenstechnik

*Bild 1:
Viskoplastischer
Aluminiumbolzen
bei 630° C.*



*Bild 2:
Dieses Hochtemperaturrheometer erlaubt die Untersuchung flüssiger Metalllegierungen bis 1000° C.*

des Materials wird weltweit an der Realisierung eines Formgebungsverfahrens gearbeitet, das sich „Thixoforming“ nennt. Gegenüber klassischem Schmieden oder Gießen weist dieses Verfahren einige technologische Vorteile auf. Unter anderem lassen sich damit sehr filigrane aber mechanisch hochstabile Bauteile herstellen, was zum Beispiel für Produkte in der Automobilindustrie vorteilhaft ist. Zum Thema „Thixoforming“ gab es bis vor kurzem an der RWTH einen Sonderforschungsbereich, der über 12 Jahre von der DFG gefördert wurde und an dem die AVT beteiligt war. Die Aufgaben, mit denen

sich ein Rheologe auf diesem Gebiet beschäftigt, sind die experimentelle Untersuchung der Fließeigenschaften der Stoffe, die Formulierung von mathematischen Beziehungen, mit denen sich diese rheologischen Eigenschaften berechnen lassen und, falls es möglich ist, die Deutung der Eigenschaften durch Analyse der inneren Struktur des Stoffes. Dabei ist der Rheologe außerordentlich stark auf Zusammenarbeit mit den Wissenschaftlern und Ingenieuren der anderen beteiligten Disziplinen angewiesen. Dazu gehören Materialwissenschaftler, Metallurgen und Prozesstechniker. Andererseits sind die

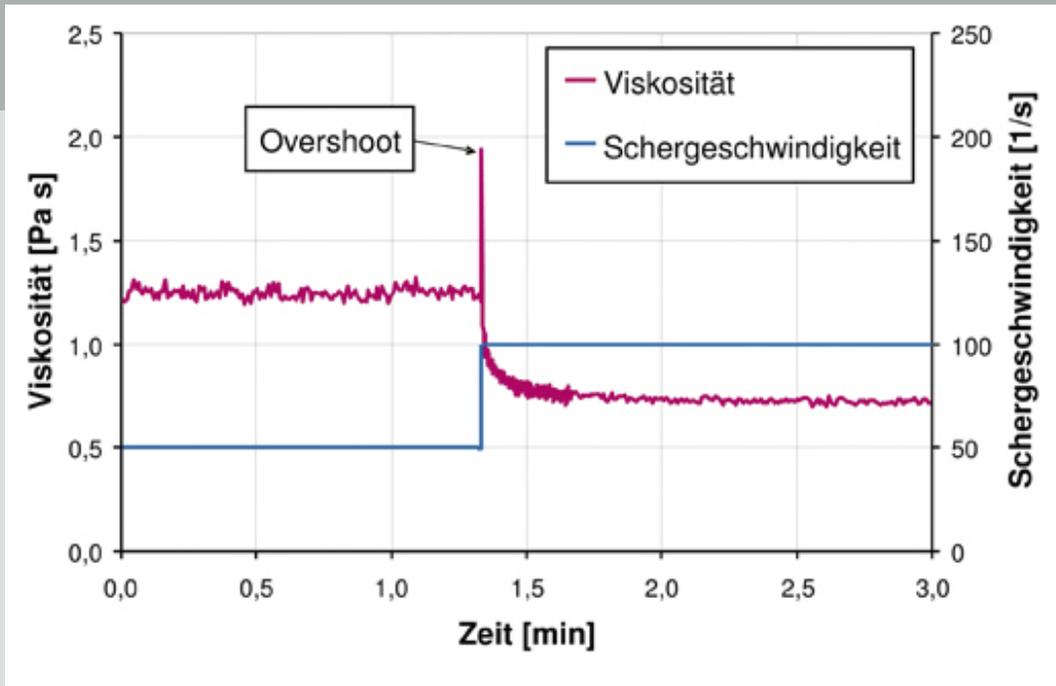
Ergebnisse, die der Rheologe bereitstellt, lebenswichtige Grundlagen für die Entwicklung sowohl von Thixolegierungen als auch des Formgebungsprozesses selbst, der sich von den klassischen Prozessen stark unterscheidet. Dies zeigt, dass die Rheologie eine interdisziplinäre Wissenschaft ist.

Die AVT hat zusätzlich einen weiteren Aspekt in Kooperation mit einem befreundeten Wissenschaftler der Technischen Universität Lodz, Polen, bearbeitet, der über das ursprüngliche Feld der Rheologie hinausgeht: Die numerische Berechnung der Füllung einer Form im Thixoprozess. Bei die-

ser anspruchsvollen Aufgabenstellung müssen nicht nur die komplexen rheologischen Eigenschaften des Metalls, sondern auch die sehr diffizilen Randbedingungen des Prozesses berücksichtigt werden.

Die experimentelle Untersuchung der rheologischen Eigenschaften erfolgt in besonderen Messinstrumenten, den Rheometern. Das Grundprinzip aller Rheometer ist, die Kraft zu messen, die erforderlich ist, um eine bestimmte Verformung oder Verformungsgeschwindigkeit zu erreichen. Weit verbreitet sind die Rotationsrheometer. In einem zylindrischen Becher befindet sich die Probe,

*Bild 5:
Dipl.-Phys. Axel Moll
überprüft vor der Messung
mit einer Lupe eine Probe
von einer Aluminiumlegierung,
die unter anderem in
der Automobilfertigung
verwendet wird. Anschließend
wird diese Probe in einem
Hochtemperaturrheometer bei
Temperaturen von 600°C
teilflüssig gemacht und in der
Anlage vermessen.
Foto: Peter Winandy*



*Bild 3:
Viskositätsverlauf einer
Aluminiumlegierung
bei 590° C während
eines Schersprungsversuchs.*

36

die untersucht werden soll. In den Becher taucht ein zylindrischer Rotationskörper ein, der sich mit einer einstellbaren Geschwindigkeit in dem Material dreht. Die von dem Rotationskörper über das Material auf den Becher übertragene Kraft wird gemessen. Da diese Kräfte sehr klein sind, müssen Rheometer hochpräzise konstruiert und gebaut werden.

Von großer Bedeutung für technische Anwendungen sind zum Beispiel Aluminiumlegierungen mit typischen Verarbeitungstemperaturen von 600 bis 700 °C und Stahl mit einer Prozess Temperatur bis zu 1400 °C. In diesem Temperaturbereich sind Metalllegierungen außerdem chemisch aggressiv. Das Material, aus dem das Rheometer gebaut ist, muss darauf angepasst werden wie auch die Zusammensetzung der Gasatmosphäre, die im Kontakt mit der Probe ist. Rheometer, die diesen Bedingungen gerecht werden, sind bei der AVT entwickelt und gebaut worden, beziehungsweise basierend auf den Erfahrungen bei der AVT

von Geräteherstellern kommerziell umgesetzt worden, siehe Bild 2. Zwei typische Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den Bildern 3 und 4 dargestellt. Bild 3 zeigt den Viskositätsverlauf einer Al-Legierung bei einer Temperatur von 590 °C während eines so genannten Schersprungexperiments. Zunächst wird dem Probenmaterial eine konstante Verformungsgeschwindigkeit aufgeprägt, bei der sich ein konstanter, zu dieser Verformungsgeschwindigkeit gehörender Viskositätswert einstellt.

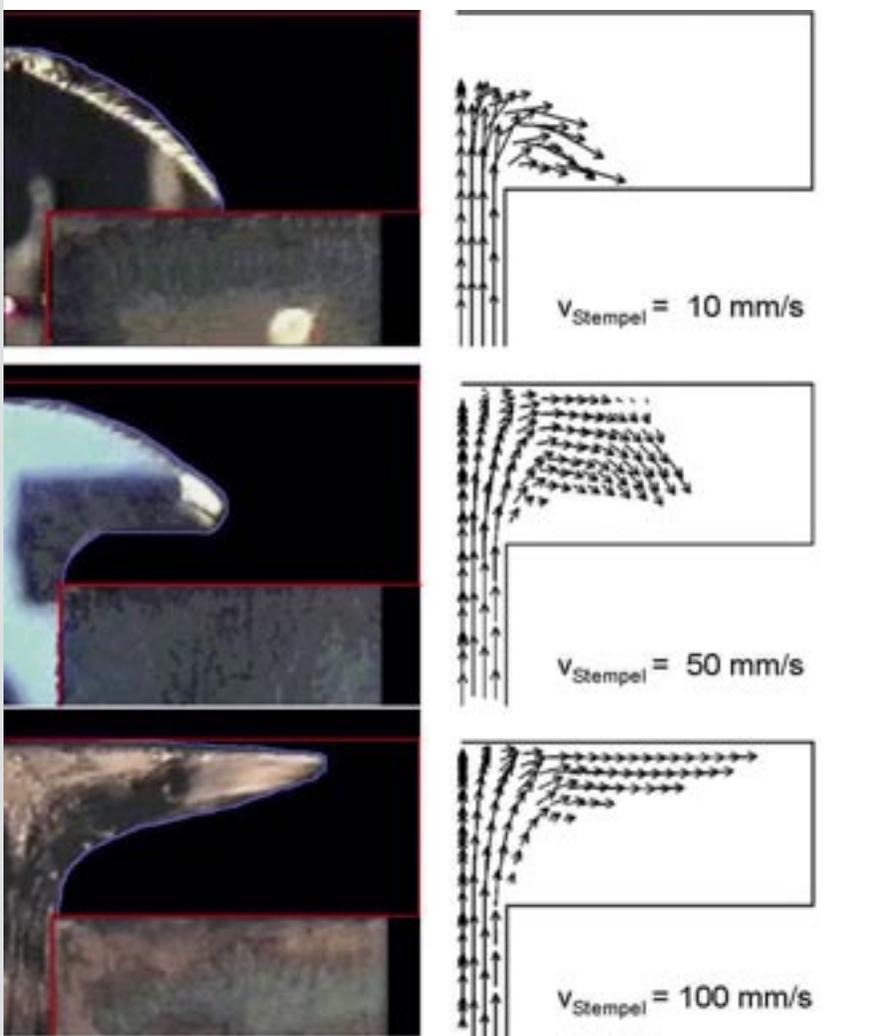
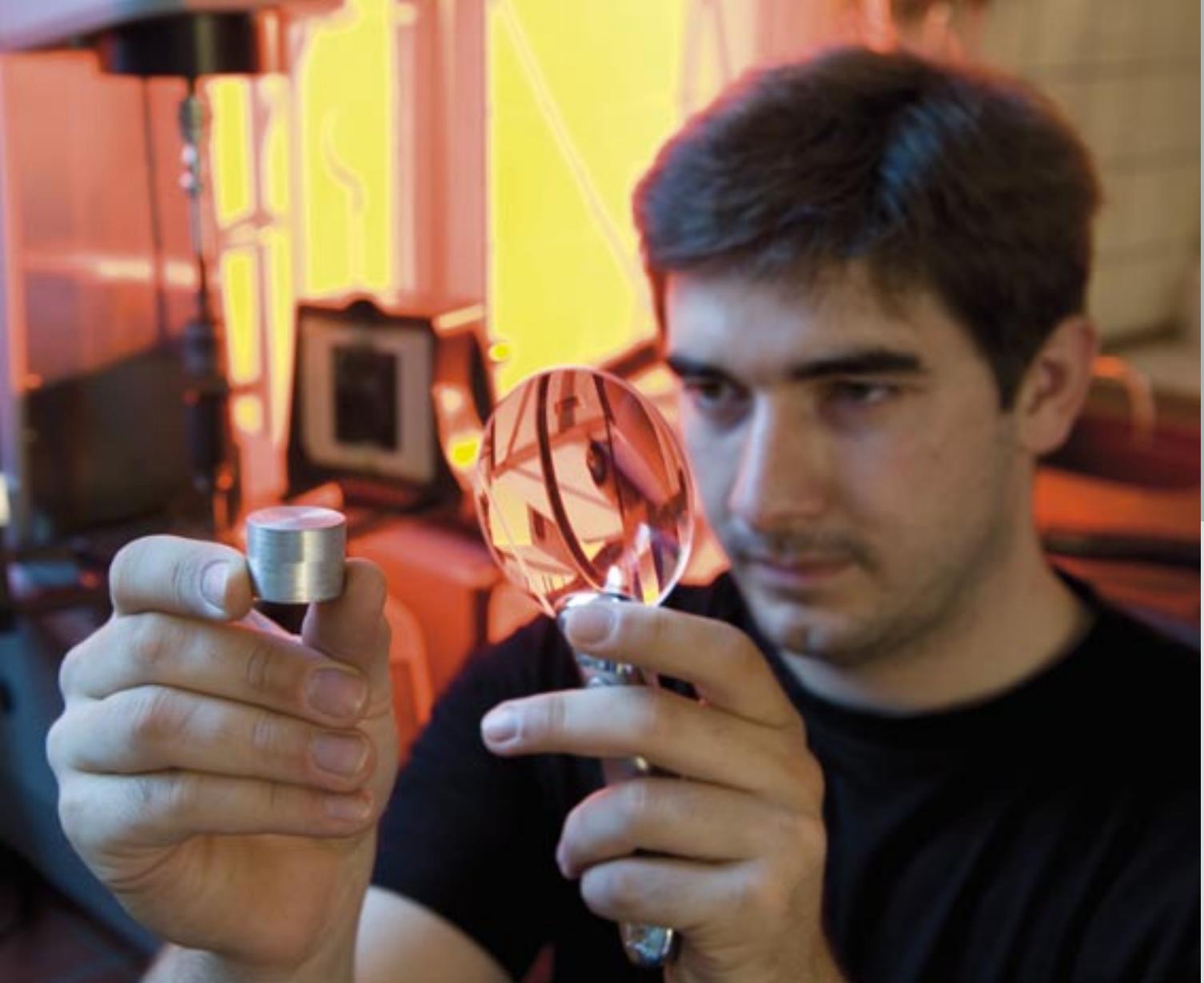
Dann wird die Verformungsgeschwindigkeit sprunghaft erhöht und wieder konstant gehalten. Das Metall reagiert dabei anfänglich mit einer unmittelbaren Erhöhung der Viskosität. Dieses Phänomen nennt man „Overshoot“. Danach fällt die Viskosität allmählich auf einen niedrigeren, zur neuen Verformungsgeschwindigkeit gehörenden, Wert. Dies entspricht dem thixotropen Verhalten des Materials. Bild 4 zeigt das Ergebnis einer Simulation der Formfüllung im Vergleich zum

Experiment. Der Moment, der hier beobachtet wurde, ist der Übergang zwischen einer senkrecht aufsteigenden Strömung und einer horizontal verlaufenden. Rechts ist die Simulation, links das Experiment dargestellt. Die gute Übereinstimmung zwischen beiden ist offensichtlich. Im linken Bildteil sind die Fließfronten durch blaue und die Formgrenzen mit roten Linien hervorgehoben.

Nun stellt sich die Frage: Was haben die Metalle mit Blut gemein? Blut ist zwar „ein besonderer Saft“, aber rheologisch gesehen nichts anderes als eine Suspension oder Emulsion. Blut besteht aus dem Plasma als Trägerflüssigkeit und zu etwa 45 Prozent aus den Blutkörperchen. Das heißt, viele Phänomene, die man bei den metallischen Suspensionen beobachtet, treten auch bei Strömungen des Blutes auf. Die Verfahrenstechniker interessiert dabei besonders die Schädigung, die im Blut auftritt, wenn es beispielsweise mit künstlichen Pumpen gefördert wird. Das menschliche Herz geht sehr

schonend mit dem Blut um. Künstliche Pumpen dagegen führen bei dauerndem Einsatz zu einer Schädigung der Blutkörperchen, wodurch das Blut seine Funktion einbüßt. In Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Hannover arbeitet die AVT daher an der Entwicklung eines „Schädigungsmodells“, das es erlauben wird, zusammen mit der Strömung in einer Blutpumpe auch deren Schädigungspotenzial zu berechnen.

Autoren:
Dipl.-Phys. Nils Oliver Kuhlmann und Dipl.-Phys. Axel Moll sind Wissenschaftliche Mitarbeiter des Lehr- und Forschungsgebiets AVT-Mechanische Verfahrenstechnik. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Modigell leitet das Lehr- und Forschungsgebiet AVT-Mechanische Verfahrenstechnik.



*Bild 4:
Füllung einer T-förmigen
Gießform mit einer Thixole-
gierung bei unterschiedlichen
Füllgeschwindigkeiten.
Vergleich der experimentell
beobachteten Fließfront
(links) und berechneten
Geschwindigkeitsvektoren
(rechts).*

Vom Labor- zum Produktionsmaßstab mit Blick aufs Detail Wie exakte Modelle neue Produktionsanlagen ermöglichen

RWTH THEMEN 2/2009

Die chemische Industrie erwirtschaftete im Jahr 2006 weltweit einen Umsatz von gut 150 Milliarden Euro und zählt damit zu den wichtigsten und umsatzstärksten Wirtschaftszweigen. Es ist offensichtlich, dass ein solcher Umsatz im Wesentlichen in großtechnischen Anlagen erzielt wird, die mehrere Hundert Tonnen chemische Produkte, wie Kraftstoffe, Kunststoffe oder Medikamente am Tag herstellen. Doch bevor eine Produktionsanlage in Betrieb gehen kann, fangen die Untersuchungen der neuen Verfahren im deutlich kleineren Labormaßstab an.

Die hier erlangten Erkenntnisse dienen in der Regel als Grundlage für die Auslegung und das Design des gesamten Produktionsprozesses. Falsche oder ungenaue Schlüsse können teuer werden, wenn die fertige Anlage nicht wie geplant funktioniert und Nachbesserungen vorgenommen werden müssen. Für den wirt-

schaftlichen Erfolg eines Prozesses und damit eventuell eines ganzen Unternehmens ist es also essenziell, dass die Auslegung der Produktionsanlage auf der Grundlage von Untersuchungen im deutlich kleineren Maßstab sicher und erfolgreich gelingt.

Um Anlagen anhand von Untersuchungen im Labormaßstab exakt planen zu können, werden mathematische Modelle angewendet, die die ablaufenden physikalischen Phänomene in Gleichungsform repräsentieren. Die entscheidende Frage ist also: Welche Eigenschaften muss ein Modell aufweisen, damit es zur Prozessauslegung verwendet werden kann?

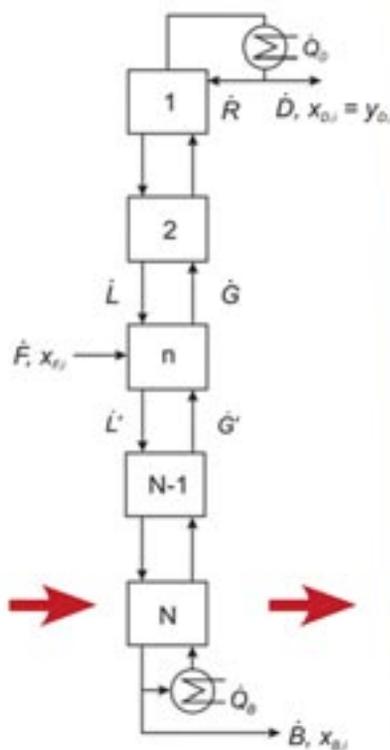
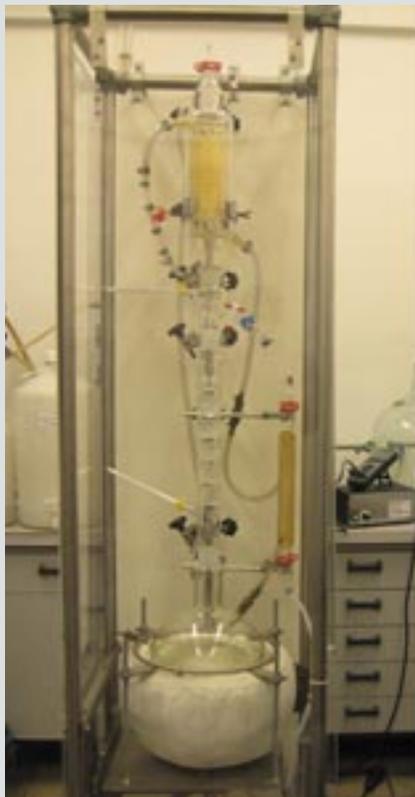
Die zentrale Anforderung für den Einsatz eines Modells für den so genannten Scale-up, bei dem Phänomene vom Labormaßstab auf den Produktionsmaßstab übertragen werden, ist eine mechanistisch korrekte Beschreibung des Prozesses.

Potenzielle Probleme beim Scale-up lassen sich leicht am Beispiel von Spielzeugautos erklären. Die kleinen, ungefähr 5 bis 10 cm großen Modelle sind unverwundbar, selbst wenn sie mit voller Wucht vor die Wand fahren. Würde man nun Erkenntnisse aus diesen kleinen Modellen direkt als Grundlage für ein Scale-up verwenden, so wären die Rückschlüsse womöglich falsch. Betrachtet man die Geschwindigkeit relativ zur Größe also beispielsweise in der Form Wagenlängen pro Sekunde statt Kilometer pro Stunde, wäre die Schlussfolgerung, dass auch ein normaler PKW einen Frontalcrash mit Maximalgeschwindigkeit völlig unbeschadet übersteht. Dieser falsche Rückschluss liegt daran, dass viele Phänomene sich nicht im gleichen Maße ändern, wie die Abmessungen eines Autos oder auch die einer Anlage der chemischen Industrie.

Für die Prozessauslegung bedeutet dies, dass das Modell

nicht nur die im Labor gemessenen Werte korrekt wiedergeben muss, sondern alle relevanten, im Prozess ablaufenden Phänomene richtig beschreiben und mechanistisch korrekt sein muss. In Bild 1 wird das Konzept des Scale-up Verfahrens für das Beispiel der Destillation dargestellt. Dabei werden Modelle angewandt, um die industrielle Anlage basierend auf Laborversuchen auszulegen. Eine Auslegung kann aber nur dann erfolgreich und ökonomisch sinnvoll durchgeführt werden, wenn die Voruntersuchungen optimal verlaufen. Die Untersuchungen im Labormaßstab müssen aussagekräftige Ergebnisse liefern und zwar bei möglichst geringem Aufwand. Nur so ist es möglich, ein Modell zu finden (man spricht hier

*Bild 1:
Vom Laborgerät zur
Produktionsanlage mit Hilfe
von Modellen.*



(c) Lurgi GmbH



*Bild 2:
Probenahme an einer
Rektifikationsanlage im
Technikum der
AVT-Thermischen
Verfahrenstechnik.
Foto: Peter Winandy*

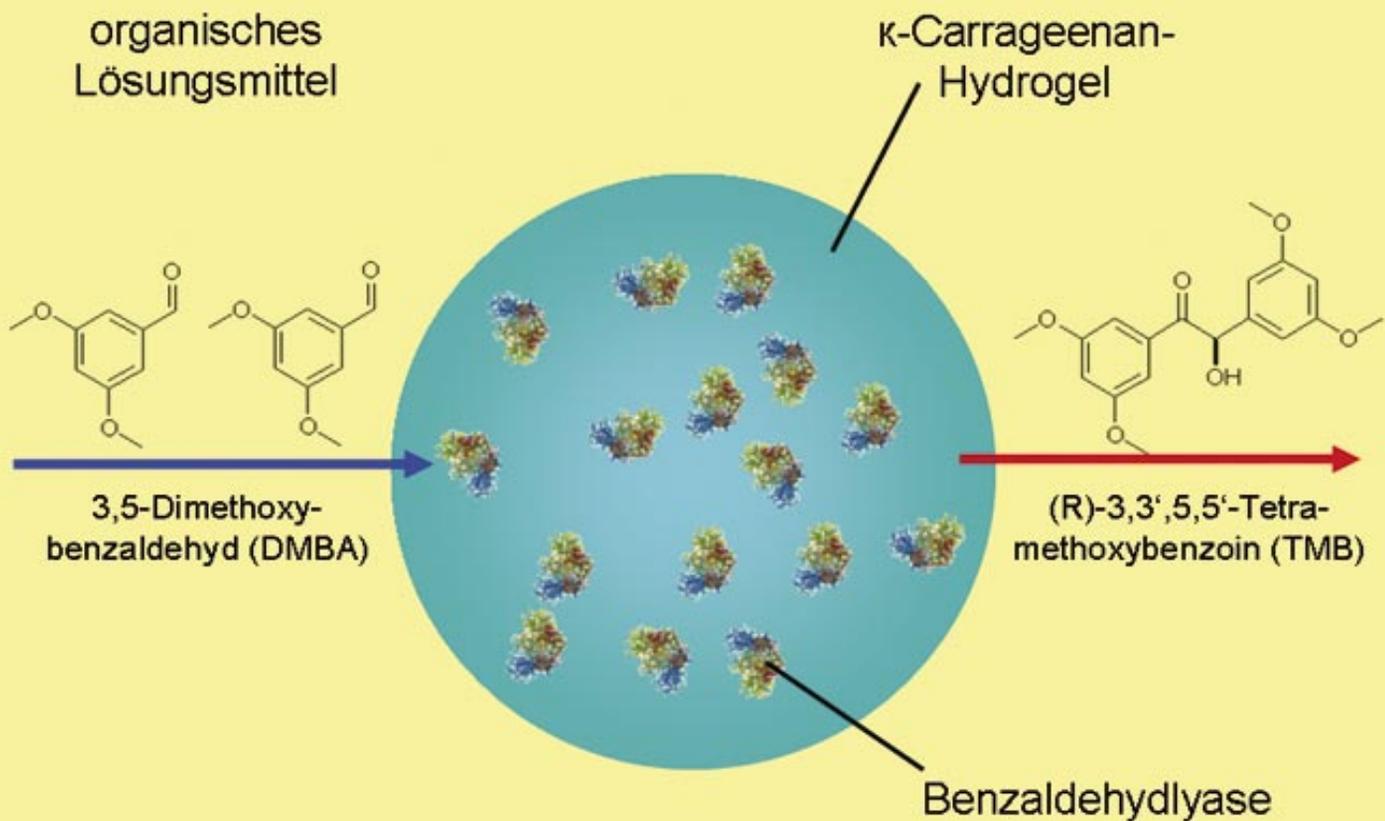


Bild 3: System aus im Hydrogel immobilisierten Enzymen und organischem Lösungsmittel.

von der Modellidentifizierung), das zum Scale-up eingesetzt werden kann.

Ein neuer Ansatz zur effizienten Modellidentifikation wird im Sonderforschungsbereich 540 „Modellgestützte Experimentelle Analyse kinetischer Phänomene in mehrphasigen fluiden Reaktionssystemen, kurz MEXA, seit 1998 verfolgt und weiterentwickelt. In diesem Sonderforschungsbereich (SFB) ist, neben anderen RWTH-Lehrstühlen, die Aachener Verfahrenstechnik (AVT) stark vertreten und auch die Leitung liegt hier. Der MEXA-Ansatz beinhaltet unter anderem die optimale Durchführung von Experimenten. Ziel ist es, das jeweils optimale Experiment mit mathematischen Methoden zu bestimmen. Was das optimale Experiment ist, hängt dabei von der Aufgabenstellung ab. Existieren mehrere Modellkandidaten, so muss der beste ausgewählt werden; hier spricht man von Modelldiskriminierung. Ist das richtige Modell gefunden, so bleibt noch das Ziel, die Parameterwerte des Modells möglichst genau zu bestimmen.

Es ist dabei wichtig zu erwähnen, dass ein Modell nicht dann als gut bewertet wird, wenn es die Messdaten gut beschreibt, sondern wenn es den Prozess mechanistisch korrekt abbildet. Hier unterscheidet sich der MEXA-Ansatz von der klassischen Modellidentifikation, bei der in der Regel lediglich überprüft wird, ob das Modell die Messdaten gut wiedergibt. Ein solches Modell führt dann beim Scale-up häufig zu falschen Rückschlüssen. Neben der engen Verzahnung von Experiment und Modell unterscheidet sich vor allem die Zielsetzung des MEXA-Ansatzes von der klassischen Methodik, wie sie heute noch in weiten Teilen der Biologie, Chemie und Verfahrenstechnik üblich ist. Bisher wurde das Wissen nur in eine Richtung transferiert: Das durch die Interpretation der Messergebnisse gewonnene Wissen wird in Form eines mathematischen Modells repräsentiert. Die Untersuchungen im SFB 540 haben aber gezeigt, dass der Wissensgewinn und der Modellierungsfortschritt eng miteinander verbunden sind. Durch die systematische Interpretation der Messergebnisse kann ein detailliertes Modell erstellt werden, welches wiederum neue Einblicke in das Pro-

zessverhalten erlaubt. Mithilfe dieser Methode wird das erlangte Wissen durch die Modelle also nicht nur konserviert und repräsentiert, sondern auch erweitert.

Bevor diese Punkte an einem Beispiel demonstriert werden, folgt zunächst eine grobe Definition der MEXA-Methodik zur Modellidentifikation. Im ersten Schritt ist dabei stets die so genannte Identifizierbarkeit zu prüfen, die aussagt, ob das Modell mit den messtechnisch erfassbaren Größen prinzipiell identifiziert werden kann. Ist dies nicht gewährleistet, muss entweder weitere Messtechnik zum Einsatz kommen, und gegebenenfalls neu entwickelt werden, oder das Modell modifiziert werden. Ist die prinzipielle Eignung der Messtechnik sichergestellt, werden so genannte optimale Versuchsplanungsmethoden eingesetzt, um genau die experimentellen Bedingungen zu bestimmen, die eine effiziente Modellidentifikation erlauben. Hier wird in einem ersten Schritt – wie oben beschrieben – eine geeignete Modellstruktur gesucht und in einem zweiten werden die Parameter dieses Modells möglichst exakt bestimmt. Es kann dabei durchaus vorkommen, dass eine passende Modellstruktur nicht unmittelbar gefunden wird, sondern

mehrere Durchläufe der Modellanpassung, Versuchsplanung und -durchführung erforderlich sind.

Identifikation der Reaktionskinetik immobilisierter Enzyme

Eines der Themengebiete, denen sich der SFB 540 widmet, ist die Identifikation von mehrphasigen Reaktionssystemen. In diesem Rahmen werden auch die Reaktionskinetiken von immobilisierten Enzymen untersucht. Im menschlichen Körper – wie in allen Organismen – spielen Enzyme eine zentrale Rolle beim Stoffwechsel, ohne sie wäre beispielsweise keine Verdauung möglich. Chemisch betrachtet sind Enzyme sehr große Moleküle, in der Regel aus mehr als 10.000 Atomen bestehend, die eine spezifische und hocheffiziente Beschleunigung (Katalyse) bestimmter biochemischer Reaktionen erlauben. Diese Eigenschaft macht Enzyme auch für die chemische und pharmazeutische Industrie interessant. Den guten Eigenschaften als Katalysator stehen aber die hohen Kosten und die hohe Empfindlichkeit gegenüber anderen, aus Prozesssicht oft besser geeigneten Lösungsmitteln als Wasser entgegen. Eine Möglichkeit, diese Probleme zu umgehen ist es,

Exzellenz braucht exzellente Partner!

Fünf gute Gründe für eine exzellente Partnerschaft:

- SAR – seit 5 Jahren Sun Campus Reseller der RWTH Aachen
- SAR – seit 15 Jahren glücklich verheiratet mit Sun
- SAR – zum Sun Service Partner 2008 deutschlandweit gekürt
- **S**tanford **U**niversity **N**etwork – ein Hersteller, der Sie versteht
- Sun's Software-Landeslizenz und F&L-Hardware-Konditionen



Systemhaus SAR GmbH · Arnold-Sommerfeld-Ring 27 · 52499 Baesweiler

Tel: 0 24 01-9 19 50 · Fax: 0 24 01-91 95 66 · E-Mail: sar@sar.de · www.sar.de · akademie.sar.de

Enzyme in so genannten Hydrogelen einzuschließen. Auf diese Weise sind die Enzyme immer in einer wässrigen Umgebung und gehen im Verlauf des Prozesses nicht verloren, was wegen der hohen Kosten vorteilhaft ist.

Für die Modellidentifikation wird dabei das in Bild 3 gezeigte System verwendet, bestehend aus einer Hydrogel-Kugel (mit eingeschlossenem Enzym) und einem umgebenden, organischen Lösungsmittel, das gut geeignet ist, die Ausgangsstoffe (Substrate) der Reaktion zu lösen. Die bei einer solchen Reaktion ablaufenden Prozesse sind sehr komplex, da viele sich überlagernde Effekte auftreten. Zunächst müssen die Substrate von der organischen Phase in die Hydrogel-Kugel übergehen, man spricht hier vom Stofftransport über die Phasengrenze. Sind die Substrate im Hydrogel, so bleiben sie dort nicht an einer festen Position, da sich sonst alle Substrate am Kugelrand ansammeln würden, sondern bewegen sich innerhalb des Hydrogels. Man spricht hier von Diffusion. Treffen so mehrere Substrate auf ein Enzym, erfolgt in einer Reihe von Teilschritten die Reaktion, die das Produkt bildet. Das Produkt bewegt sich dann ebenso wie die

Substrate durch das Hydrogel und geht schließlich in die organische Phase über.

Es ist offensichtlich, dass die Vielzahl von parallel ablaufenden und sich überlagernden Phänomenen eine detaillierte Modellierung des Prozesses stark erschwert. Umso erstaunlicher ist es, dass die Modellidentifikationen dieser Prozesse bisher in der Literatur fast ausschließlich auf Messungen in der organischen Phase beruhen. Die komplexen Vorgänge im Inneren der Hydrogel-Kugel sollen dabei anhand von Messungen in der homogenen, organischen Phase identifiziert werden. Mit dem oben beschriebenen MEXA-Ansatz konnte in einem ersten Schritt gezeigt werden, dass eine solche Modellidentifikation prinzipiell nicht möglich ist, die Messungen in der organischen Phase also für eine Modellidentifikation nicht ausreichend sind. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass Konzentrationsmessungen innerhalb der Hydrogel-Kugel erforderlich sind, am besten entlang des Radius der Hydrogel-Kugel. Diese Messungen wurden mittels einer neu entwickelten Lasermesstechnik ermöglicht und durchgeführt. Anhand der Daten konnte ein exaktes Modell der

im Hydrogel ablaufenden Reaktion identifiziert werden. Dieses Modell berücksichtigt dabei alle Teilschritte der Reaktion, die wie folgt abläuft:

Im ersten Teilschritt bindet das erste Substrat an das so genannte aktive Zentrum des Enzyms. Im zweiten Teilschritt bindet das zweite Substrat an das aktive Zentrum. Sind beide Substrate an das Enzym gebunden, findet die Reaktion statt und aus den zwei Substraten wird ein Produktmolekül gebildet. Im letzten Teilschritt verlässt dieses Produktmolekül das aktive Zentrum.

Aufgrund der detaillierten Modellierung kann nun allen Teilschritten eine Geschwindigkeit zugeordnet werden. Dabei hat sich gezeigt, dass die Produktfreisetzung, also der Schritt, bei dem das Produkt das aktive Zentrum des Enzyms verlässt, der mit Abstand langsamste ist. Eine insgesamt höhere Reaktionsgeschwindigkeit, die aus wirtschaftlicher Sicht hochinteressant ist, ließe sich also in erster Linie durch eine Beschleunigung der Produktfreisetzung erreichen. Weitere Analysen haben gezeigt, dass das Enzym einen sehr engen „Gang“ hin zum aktiven Zentrum besitzt. Das relativ große Produktmolekül kommt nur langsam durch diesen engen Gang. Eine verbesserte Variante

des Enzyms müsste also einen breiteren Gang zum aktiven Zentrum besitzen. In diesem Fall hat das durch die detaillierte Modellierung gesteigerte Prozessverständnis demnach direkt den Weg zu einer wirtschaftlichen Optimierung geebnet. Eine Enzymvariante, die den identifizierten Flaschenhals nicht aufweist, wird bereits entwickelt. Mit dieser Enzymvariante und dem detaillierten Prozessmodell steht dann auch der Entwicklung einer hochwirtschaftlichen Produktionsanlage nichts mehr im Weg.

Autoren:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Marquardt ist Inhaber des Lehrstuhls AVT-Prozesstechnik.
Dipl.-Ing. Claas Michalik ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl AVT-Prozesstechnik.
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Pfennig ist Inhaber des Lehrstuhls AVT-Thermische Verfahrenstechnik.
Dipl.-Ing. Evangelos Bertakis ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl AVT-Thermische Verfahrenstechnik.

Biokatalyse in unkonventionellen Medien

B Biokatalysatoren, auch Enzyme genannt, sind Proteine, die unzählige Stoffumwandlungsprozesse beschleunigen. Enzyme steuern nicht nur den Stoffwechsel in unserem Körper, sondern stehen auch im Mittelpunkt vieler umweltfreundlicher Produktionsverfahren. Sie finden ihre Anwendung in so unterschiedlichen Industriezweigen wie der Lebensmittel-, Kosmetik-, Textil- oder Papierindustrie. Enzyme bieten ein enormes Potenzial für unsere industrielle Gesellschaft und sind aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken. Ob Joghurt, effektive Waschmittel, Gesichtscreme oder lebenswichtige schmerzlindernde Medikamente, alle diese Produkte werden mit Hilfe von Enzymen hergestellt. Die Anzahl der industriell nutzbaren Biokatalysatoren steigt von Jahr zu Jahr.

Viele der enzymatischen Reaktionen finden in wässriger Lösung statt, da das Wasser eine essenzielle Komponente für Enzymreaktionen ist. Schwieriger wird es, wenn das Substrat eine niedrige Wasserlöslichkeit besitzt, wie zum Beispiel bei der Hydrolyse von Cellulose zur Biokraftstoffsynthese. Um die Löslichkeit der Substrate zu erhöhen, werden organische Lösungsmittel, ionische Flüssigkeiten, überkritische Fluide und Gase als Reaktionsmedien eingesetzt. Die enzymatische Reaktion kann sowohl in einem Ein- als auch im Zwei-Phasen-System stattfinden. Das ist abhängig von der Mischbarkeit des Lösungsmittels mit Wasser. Oft führt der Einsatz dieser so genannten unkonventionellen Reaktionsmedien jedoch zu einer erheblichen Verringerung der Effizienz der Enzyme. Damit die Enzyme auch in den unkonventionellen Reaktionsmedien mit einer vergleichbaren Aktivität und Selektivität funktionieren, ist es notwendig, die geeigneten maßgeschneiderten Biokatalysatoren sowie die geeigneten neuen Lösungsmittel zu finden.

Um für die schnell steigende Zahl der Enzymanwendungen in unkonventionellen Medien optimale Lösungen zu fin-

Ionische Flüssigkeiten, organische Lösungsmittel, überkritische Fluide und Gase als Reaktionsphasen für biokatalysierte Synthesen

den, wird bei der AVT im Zuge des Exzellenzclusters „Maßgeschneiderte Kraftstoffe aus Biomasse“ als auch dem Graduiertenkolleg „Biokatalyse in unkonventionellen Medien“ (BioNoCo) daran geforscht. Das Graduiertenkolleg wurde 2005 gegründet. Es ist eine interdisziplinäre Gruppe aus hochqualifizierten Akademikern unterschiedlicher Fachrichtungen. Biologen, Chemiker und Bioverfahrenstechniker forschen gemeinsam auf dem Gebiet der Biokatalyse in unkonventionellen Reaktionsmedien. Das wissenschaftliche Team arbeitet an der Schnittstelle von Natur- und Ingenieurwissenschaften und demonstriert so die erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen RWTH Aachen und Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf sowie dem Forschungszentrum Jülich.

Einer der Forschungsschwerpunkte sind ionische Flüssigkeiten als neuartiges Lösungsmittel. Die ionischen Flüssigkeiten sind organische Salze mit einem Schmelzpunkt unter 100 °C. Eigenschaften wie Mischbarkeit mit Lösungsmitteln,

Hydrophobizität und Polarität können durch den Ionen-aufbau beeinflusst werden. Die meisten ionischen Flüssigkeiten besitzen einen sehr geringen Dampfdruck, leiten den elektrischen Strom, sind schwer entzündlich und haben selektive Löseeigenschaften. Dieses macht ionische Flüssigkeiten zu einer viel versprechenden Alternative zu den herkömmlichen organischen Lösungsmitteln. Kern des Projektes ist es, die enzymatische Hydrolyse von Cellulose mechanistisch zu charakterisieren. Damit kann ein entscheidender Beitrag für neue Produktionsverfahren zur Herstellung von Biokraftstoffen geleistet werden. Dabei werden ionische Flüssigkeiten als neuartige Lösungsmittel zum Auflösen der Cellulose und Hemicellulose eingesetzt. Durch die ionische Flüssigkeit wird die Cellulose, die in Wasser und den meisten organischen Lösungsmitteln unlöslich ist, gelöst und kann mit Wasser wieder ausgefällt werden. Dadurch wird die hochorganisierte Struktur der Cellulose aufgebrochen und das Biopoly-

mer für die Angriffe der Enzyme zugänglich gemacht. Auch eine direkte Hydrolyse der in ionischen Flüssigkeiten gelösten Cellulose mit Enzymen wird untersucht. Dies erfordert die Optimierung der Enzyme für diese neuen Reaktionsbedingungen und wird in enger Kooperation mit dem RWTH-Lehrstuhl für molekulare Biotechnologie durchgeführt. Allerdings waren bis zuletzt keine zeitlich hoch aufgelösten Messverfahren vorhanden. Mit Hilfe der am Lehrstuhl AVT-Bioverfahrenstechnik entwickelten BioLector-Technik kann nun die Celluloseauflösung in ionischen Flüssigkeiten und ihr Abbau durch hydrolytische Enzyme online verfolgt werden. Dieses Gerät ermöglicht eine Messung der Lichtstreuung und Fluoreszenz im Mikrotiterplatten-Format unter geschüttelten Bedingungen und kann mit einer vollautomatischen Roboter-Pipettier-einheit kombiniert werden. Durch das online-Monitoring der Auflösungskinetik ergeben sich völlig neue Möglichkeiten für den direkten Vergleich un-



terschiedlicher ionischer Flüssigkeiten und die Identifizierung von leistungsfähigen Lösungsmitteln im Hoch-Durchsatz.

Ein anderer Aspekt für die technische Nutzung von Enzymen ist der Einsatz von organischen Lösungsmitteln. Mit den wachsenden Anforderungen an die Enzymeigenschaften für die technischen Anwendungen steigt auch die Bedeutung der Prozessoptimierung in der Biokatalyse, die eine kostengünstige und zeiteffektive Durchführung der enzymatischen Reaktionen ermöglichen.

Ein weiteres Forschungsfeld auf dem Gebiet der unkonventionellen Lösungsmittel ist die Gasphasenkatalyse. In der Gasphasenkatalyse werden gasförmige Substrate durch trockene Enzyme in gasförmige Produkte umgesetzt. Verschiedene Enzyme und Reaktionen, die durch isolierte Enzyme oder ganze Zellen katalysiert werden, sind bereits im Gasphasenreaktor untersucht. Die prominentesten untersuchten Enzymtypen in der Gasphasenkatalyse sind Alkoholdehydrogenasen und Li-

pasen. Der Vorteil der Gasphasenkatalyse ist die höhere Betriebsstabilität der Enzyme bei gleichzeitigen hohen Raum-Zeit Ausbeuten im Vergleich zu wässrigen Systemen. Die Forschungsschwerpunkte sind hier die Entwicklung und Durchführung neuer Reaktionen im kontinuierlichen Gasphasenreaktor. Die Enzyme werden auf geeigneten Trägern immobilisiert und auf ihre Aktivität untersucht. Durch Variation unterschiedlicher Prozessparameter und anschließende Produktanalyse werden die Reaktionen optimiert. So konnte für die Produktion von 1-(R)-Phenylethanol aus Acetophenon durch eine Alkoholdehydrogenase aus *Lactobacillus brevis* die Wirtschaftlichkeit erheblich erhöht werden.

Die hauptsächliche Forschung unkonventioneller Lösungsmittel erfolgt jedoch unter Verwendung von Hydrolase-Enzymen, wie zum Beispiel Cellulasen und Lipasen. Dies liegt vor allem an ihrer bekannten hohen Aktivität und Stabilität. Die gewonnenen Ergeb-

nisse können nicht ohne weiteres auf andere Enzyme übertragen werden. Um die Einsatzbereiche und -grenzen unkonventioneller Reaktionsmedien für die Biokatalyse in synthetischen Anwendungen abzuschätzen, müssen thermodynamische und kinetische Phänomene in komplexen Reaktionssystemen verstanden werden und spezifische Wechselwirkungen zwischen Biokatalysatoren, Reaktionsmedien und Reaktoren identifiziert und zu Designkriterien entwickelt werden. Daher wird auch zukünftig der Bereich der Biokatalyse in unkonventionellen Medien ein zentraler Bestandteil unserer Forschung sein und in dem Graduiertenkolleg BioNoCo und weiteren Projekten intensiv untersucht werden.

Autoren:
Dr.-Ing. Antje Spieß ist Wissenschaftliche Assistentin und Dipl.-Ing. Helene Wulfhorst arbeitet als Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl AVT-Bioverfahrenstechnik.

Bild 1: Die BioLector-Technologie ermöglicht erstmalig die online-Detektion verschiedenster Analyten im Mikrotiterplatten-Format unter geschüttelten Bedingungen. Durch eine online Verfolgung von Streulicht- und Fluorescence-Signal können verschiedene Prozessparameter wie Wachstum von (mikrobiellen) Kulturen oder Enzymkinetiken im Hochdurchsatz analysiert werden. Helene Wulfhorst bereitet ein Hochdurchsatz Experiment zur Untersuchung der Cellulosedepolymerisation im BioLector vor. Foto: Peter Winandy

Zeit für den Rohstoffwandel

Schlagwörter wie „erneuerbare Energien“, „Klimawandel“ oder „Nachhaltigkeit“ tauchen derzeit oft in den Medien auf. Die diskutierten Zahlen und Meinungen werden dabei sehr unterschiedlich dargestellt und sind für einen Laien oftmals schwer nachzuvollziehen. Daher wurden im Rahmen einer Lehrveranstaltung der Aachener Verfahrenstechnik Fakten zusammengetragen, um ein Gesamtbild über die Möglichkeiten und Potenziale verschiedener regenerativer Technologien quantitativ zu bewerten, die zur zukünftigen Energieversorgung beitragen können. Die Vorlesung wurde in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Deutsche Philologie durchgeführt, um die Kommunikation in interdisziplinären Kontexten zu untersuchen und insbesondere auch die Ingenieure darin zu unterstützen, die Sachverhalte allgemein verständlich zu formulieren. Dieser Beitrag gehört zu den Ergebnissen der Veranstaltung.

Die Notwendigkeit für den Einsatz erneuerbarer Energien ergibt sich, weil die Vorräte der fossilen Energieträger, wie in Bild 1 dargestellt, bereits in absehbarer Zukunft aufgebraucht sein werden. Aus der Prognose ergibt sich, dass die Reserven von Erdöl und Erdgas zuerst zur Neige gehen, aber auch Kohle hat nur eine vergleichsweise kurze Reichweite. Würden nun alle diese Reserven fossiler Energieträger verbrannt, so würde das zur weiteren globalen Erwärmung deutlich über das als noch unkritisch angesehene $+2^{\circ}\text{C}$ -Niveau hinaus führen. Für eine nachhaltige Entwicklung dürfen also nicht einmal alle Reserven genutzt werden. Oftmals wird die Kernenergie als mögliche Alternative angeführt; hierbei sind allerdings die Nachteile wie beispielsweise die Gefahr eines atomaren Unfalls und die sichere Entsorgung der langfristig riskanten Abfälle zu bedenken. Aufgrund dieser Risiken und da auch die Kernenergie nicht vollständig CO_2 -neutral ist, konzentrieren wir uns hier auf die erneuerbaren Energien.

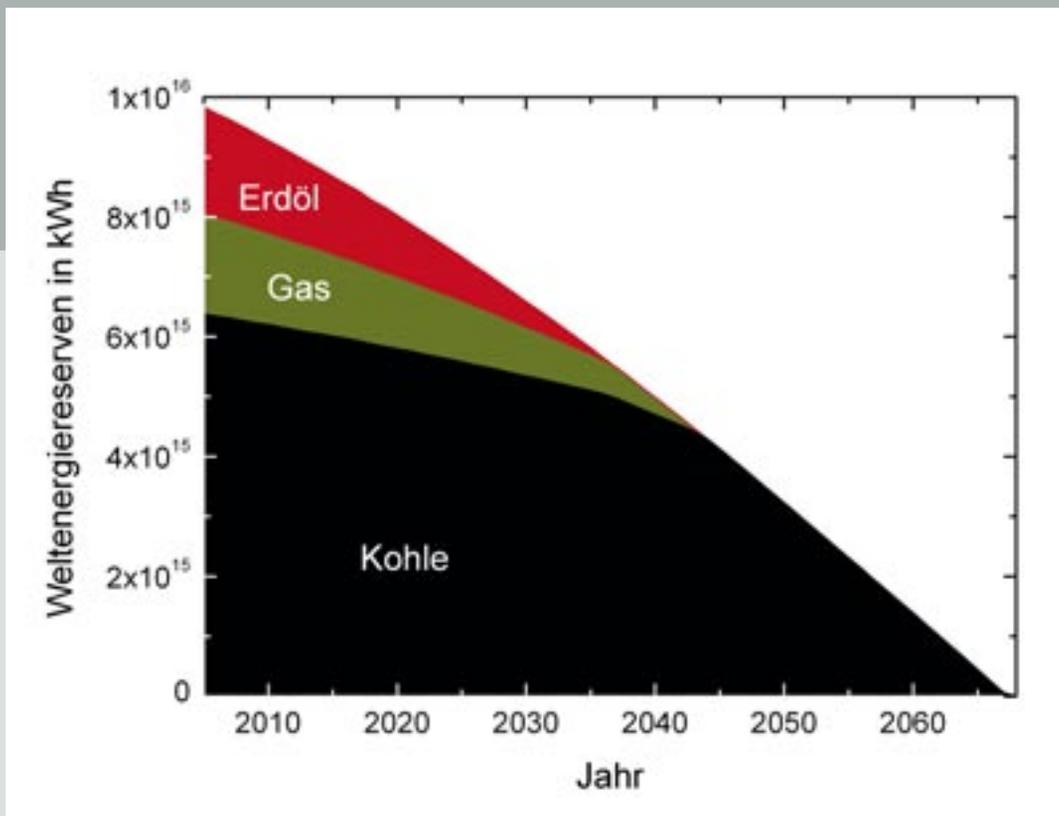


Bild 1: Reserven an fossilen Primärenergieträgern unter Berücksichtigung des Bevölkerungswachstums und eines realistischen Anstiegs des weltmittleren Lebensstandards.

Die wichtigsten regenerativen Quellen zur Energiebereitstellung sind Wasser, Wind, Sonne, Biomasse und Geothermie. Es ist sinnvoll, eine zukünftige Energieversorgung aus einem Mix dieser regenerativen Quellen zu gestalten, um Schwankungen besser ausgleichen und die Energieversorgung den regionalen Gegebenheiten anpassen zu können. Da die Technologien zur energetischen Nutzung von Wasser und Wind bereits weitgehend entwickelt sind, ist dieser Artikel auf die Energiebereitstellung aus Biomasse und Fotovoltaik sowie eine Speicherung mit Hilfe von Wasserstoff fokussiert. Für diese Technologien sollen die zukünftigen Potenziale abgeschätzt und sowohl die Chancen als auch die Risiken aufgezeigt werden.

Biomasse

Die Energieversorgung basierend auf Biomasse stellt eine vielseitige Alternative dar und weckt zudem die Hoffnung, die Abhängigkeit von den fossilen Rohstoffen zu reduzieren und den CO_2 -Ausstoß zu verringern. Biomasse kann, im Gegensatz zur Fotovoltaik, für alle Energieanwendungsgebiete wie Strom, Wärme und Kraft eingesetzt werden. Insbesondere im Verkehrssektor werden die Biokraftstoffe bereits heute als eine mögliche nachhaltige Alternative zu fossilen Kraftstoffen betrachtet. Biokraftstoffe der ersten Generation wie Biodiesel oder Bioethanol werden lediglich aus Teilen der Energiepflanze wie der Frucht oder den Samen hergestellt. Damit stehen Biokraftstoffe der ersten Generation in direkter Konkurrenz zur Nutzung der Pflanzen für die Ernährung, sie können allerdings den heutigen Kraftstoffen bis zu einem gewissen Prozentsatz problemlos beigemischt werden.

Biokraftstoffe der zweiten Generation zeichnen sich dadurch aus, dass für ihre Herstellung nahrungstechnisch irrelevante Pflanzen wie Holz, Gras oder Abfall als Rohstoffe dienen können. Durch die Nutzung der gesamten Pflanze

sind die Energieerträge pro Hektar entsprechend größer. Allerdings ist die Herstellung dieser Biokraftstoffe noch zu teuer. Die Aachener Verfahrenstechnik ist mit 14 Teilprojekten am Exzellenzcluster „Maßgeschneiderte Kraftstoffe aus Biomasse“ beteiligt, in dem Biokraftstoffe der dritten Generation entwickelt werden. Ziel ist es, aus Bioabfällen optimale Kraftstoffe herzustellen, sodass eine Konkurrenz zur Nahrungsmittelherstellung nicht gegeben ist.

Schon heute reichen die hergestellten Lebensmittel nicht aus, um die Weltbevölkerung zu sättigen. Hinzu kommt, dass die Weltbevölkerung stetig wächst; ausgehend von aktuell etwa 6,5 Milliarden Menschen wird bis 2050 mit einem Wachstum auf deutlich über 9 Milliarden gerechnet. Damit wächst der Bedarf an Lebensmitteln und Energie. Diese Trends kombiniert mit steigenden Energiepreisen haben im letzten Jahr auch zu einer Explosion der Lebensmittelpreise geführt. Die Verwendung der Biomasse zur Energiegewinnung ist zwar nicht der einzige Grund für die Preissteigerung, da temporäre Ursachen wie Missernten oder die steigende Nachfrage nach

Strategien und ethische Implikationen

höherwertiger Nahrung in den Schwellenländern auch zu dieser Entwicklung beitragen. Es kann aber nachgewiesen werden, dass die Preise der Lebensmittel proportional zur Biokraftstoff-Produktion gestiegen sind.

Wie viel Energie können wir global betrachtet aus Biomasse gewinnen? Zurzeit gibt es 15,5 Millionen km² ungenutzte Ackerfläche weltweit. Das entspricht etwa der Fläche von Südamerika. Diese Fläche verringert sich von Jahr zu Jahr, da durch Versiegelung und Umweltkatastrophen ein Teil ungenutzbar wird. Unter der Annahme einer Flächeneffizienz für Biomasse von 1,5 kWh/m² könnten mit der ungenutzten Ackerfläche etwa 55 Prozent des heutigen Erdölbedarfs beziehungsweise 20 Prozent des gesamten Primärenergiebedarfs gedeckt werden. Berücksichtigt man aber die stetig wachsende Weltbevölkerung und den Anstieg des globalen Primärenergieverbrauchs, so ist der maximale Anteil der Biomasse an der Energiebereitstellung zukünftig deutlich geringer.

Dies lässt den Schluss zu, dass die Effizienz der Bioenergie nicht besonders hoch ist. Wird die Photosynthese mitberücksichtigt, liegt der Gesamtwirkungsgrad unter einem Prozent für die Umwandlung der am Erdboden einfallenden Sonnenstrahlung in Nutzenergie. Fotovoltaik erreicht dagegen selbst unter Berücksichtigung der Verluste für die Herstellung der Solarmodule und aller Abschreibungen Wirkungsgrade von über zehn Prozent.

Trotzdem macht die energetische Nutzung von Biomasse durchaus Sinn, wenn nicht eigens Energiepflanzen angebaut werden, sondern organische Abfallprodukte für Biokraftstoffe der zweiten und dritten Generation verwendet werden. Damit können allerdings nur wenige Prozent des Energieumsatzes bereitgestellt werden. Biomasse wird zukünftig eine noch stärkere Bedeutung bei der stofflichen Nutzung haben, insbesondere als chemischer Rohstoff. Außerdem können

schon heute die biogenen Kraftstoffe bei Verknappung der Ressource Erdöl als Ersatz dienen, bis sich der Verkehrssektor zum Beispiel auf Brennstoffzellen und Elektrofahrzeuge umgestellt hat.

Bereits heute dient Biomasse also als Ergänzung zu erdölbasierten Treibstoffen. Vor Augen halten sollte man sich dabei, dass aus 100 kg Weizen 25 l Biosprit oder 100 kg Brot hergestellt werden können. Das ist etwas mehr, als jeder Bundesbürger im Durchschnitt jährlich verzehrt (etwa 87 kg) und was vom Energieinhalt für knappe 100 Tage eine ausreichende Ernährung sicherstellen kann. Es sollte sich also jeder die Frage stellen: Ist es wichtiger, dass ein Mensch für fast 100 Tage genug zu essen hat, oder dass mein Wagen einmal halb voll getankt wird? Solche und verwandte Themen werden im Programm „Ethics for Energy Technologies“ im Projekthaus HUMTEC (Human Technology Centre) beforscht, das im Rahmen der Exzellenzinitiative gefördert wird. An diesem Programm sind neben Verfahreningenieuren auch Elektrotechniker und Philosophen beteiligt. Ziel ist es dabei, einen Rahmen für ethisch vertretbare Technologiepfade modellbasiert abzuleiten.

Fotovoltaik

Das theoretische Potenzial der Fotovoltaik, die die Energie der Sonnenstrahlen effizienter als die Biomasse umsetzt, ist sehr hoch, da die Sonnenenergie, die auf die Erde trifft, den weltweiten Primärenergiebedarf um ein Vielfaches übersteigt. Zwar ist das technisch nutzbare Potenzial wesentlich geringer, aber für die Deckung des globalen Energiebedarfs wird nur ein noch kleinerer Teil benötigt. Gerade die Wüstenregionen und Gebiete in Äquatornähe sind prädestiniert für den Einsatz der Fotovoltaik. Durch die Nutzung der Wüsten wird auch die Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion ausgeschlossen. Zurzeit liegen die Kosten bei Fotovoltaik-Strom allerdings

noch bei dem Zehnfachen derer für konventionell erzeugten Strom. Um einen signifikanten Anteil an der Stromerzeugung zu erreichen, müssten also die Kosten erheblich reduziert werden. Forscher versuchen durch andere Materialien oder neue Konzepte die Wirkungsgrade von Solarzellen zu verbessern, um sie preiswerter zu machen. Lässt sich diese Preisentwicklung als Basis für Prognosen nun vorhersagen? Dazu kennt die Betriebswirtschaftslehre die empirische Methode der „Lernkurven“. Hierbei geht man davon aus, dass der Preis pro Anlage bei einer Verdopplung der produzierten Anlagen, um einen bestimmten Faktor, dem Lernfaktor, reduziert wird. Mit-



Der Veranstaltungsort der Region.

Ob Kongress, Tagung, Konzert, Ballettaufführung, Ball oder Ausstellung: hier finden Sie stets den richtigen Rahmen.

Top-Technik, variables Raumangebot, Spitzen-gastronomie, Kongress-Service etc. sind hier selbstverständlich!

Das gewisse "Mehr" bei uns: Individueller Service.

Wir informieren Sie!

Eurogress Aachen

Monheimsallee 48

52062 Aachen

Telefon 0241/9131-230

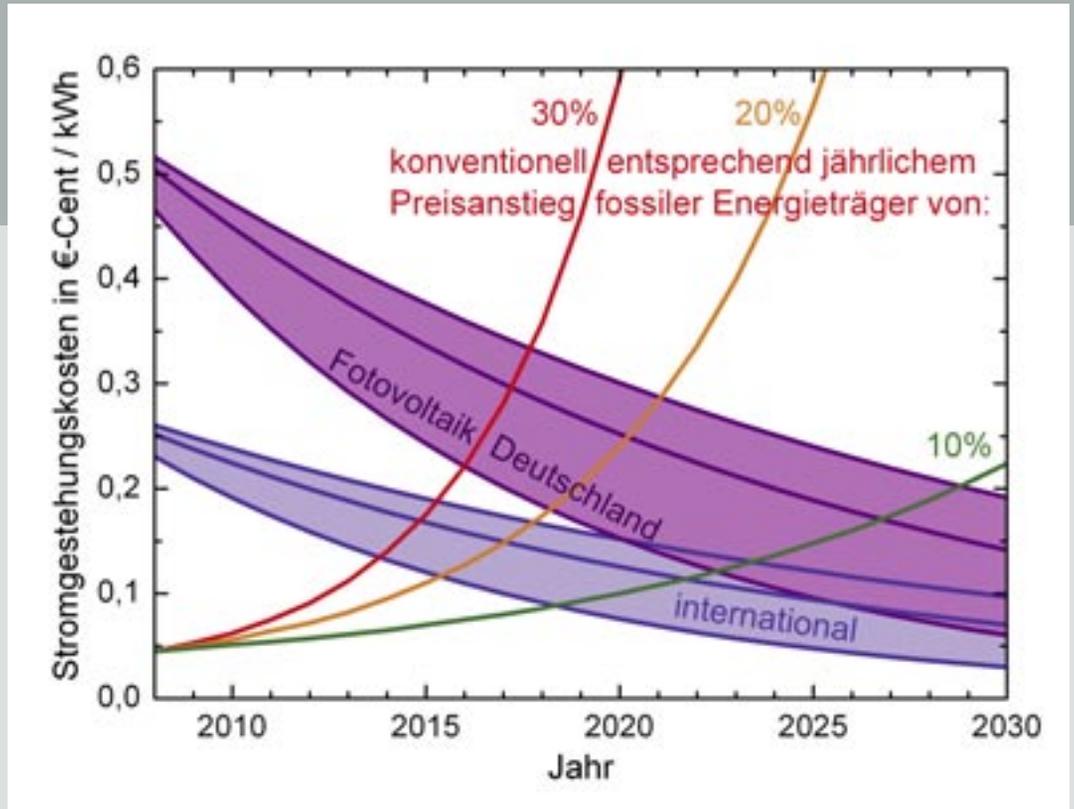
Telefax 0241/9131-200

info@Eurogress-Aachen.de

hilfe eines Modells, in dem neben dem Lernfaktor auch zusätzliche Parameter berücksichtigt werden, wurde die Preisentwicklung für verschiedene Szenarien berechnet. Bild 2 zeigt die Ergebnisse dieser prognostizierten Szenarien für die Kostenentwicklung der Fotovoltaik in Abhängigkeit von den heutigen deutschen und internationalen Stromgestehungskosten der Fotovoltaik. In Ländern wie beispielsweise Japan können heutzutage bereits Fotovoltaikzellen mit einem um die Hälfte niedrigeren Preis als in Deutschland erworben werden – ein Resultat des deutschen Energie-Einspeise-Gesetzes. Zudem sind die Stromgestehungskosten der fossilen Energieträger in der Grafik dargestellt, wobei ausgehend von den heutigen Teuerungsraten angenommen wurde, dass der jährliche Preisanstieg der fossilen Energieträger zwischen zehn und 30 Prozent betragen wird. Dieser Anstieg lag in den letzten zehn Jahren trotz aller Preisausschläge um 20 Prozent. Es wird deutlich, dass etwa um das Jahr 2020 – spätestens 2030 – photovoltaisch erzeugter Strom günstiger wird als der konventionell erzeugte.

Wasserstoff

Eine weitere Herausforderung für die Forscher stellt die Energiespeicherung dar. Konventionelle Akkus in Autos sind zurzeit groß und damit schwer. Ihre langen Ladezeiten sind zudem für den Verbraucher lästig und die Materialien sind teuer und meist selten. In moderneren Lithium-Ionen-Akkus kann zwar pro Kilogramm Akku viel Energie gespeichert werden, allerdings gibt es auf der Erde nicht ausreichend Lithium, um alle Autos damit auszustatten. Eine weitere Möglichkeit Strom zu speichern bietet Wasserstoff. Dieser kann beispielsweise mit photovoltaisch erzeugtem Strom aus Wasser hergestellt werden. Der Wasserstoff wird dann für stationäre Anwendungen in Metallverbindungen oder Drucktanks gespeichert oder für den mobilen Einsatz



verflüssigt. So lässt sich Wasserstoff wie Benzin einfach an der Zapfsäule tanken.

Wasserstoff kann in einer Brennstoffzelle zu Strom und Wärme umgewandelt oder in einem leicht modifizierten Verbrennungsmotor eingesetzt werden. Der Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle liegt heute bereits im Bereich von herkömmlichen Verbrennungsmotoren. Doch an der Brennstoffzelle wird erst seit Kurzem intensiv geforscht, hier ist also eine große Steigerung zu erwarten, vor allem da der theoretische Wirkungsgrad deutlich höher ist als bei Verbrennungsmotoren. Der Transport von Wasserstoff zum Verbraucher kann dabei in Tanks erfolgen oder über ein Netzwerk von Pipelines.

Wasserstoff bietet also das Potenzial, uns weiterhin mobil zu halten und die regenerativen Energien jederzeit verfügbar zu machen. Durch intensive Forschung wird es in Zukunft noch deutliche Fortschritte in allen Bereichen der Produktions- und Nutzungskette geben, sodass die heute noch vorhandenen Verluste absehbar reduziert werden können.

Konsequenzen

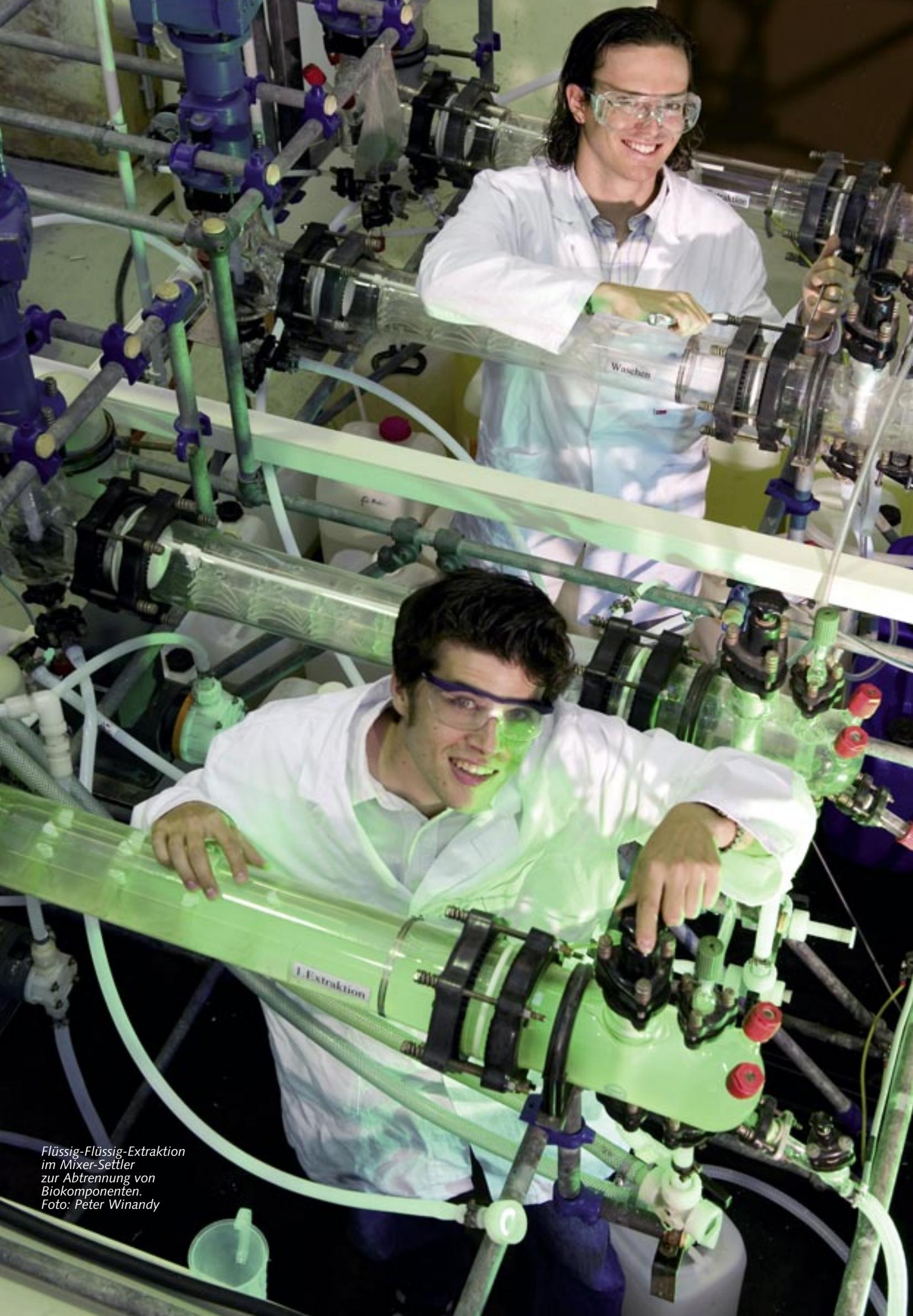
Die Bedürfnisse nach ausreichend Nahrung, Energie und Mobilität werden offensichtlich den Mix der zukünftigen Energiequellen bestimmen. Eine breite Nutzung aller zur Verfügung stehenden Möglichkeiten zur Bereitstellung von Energie ist schon allein deswegen notwendig, um nicht wieder von nur wenigen Rohstoffen und deren Verteilung auf der Welt abhängig zu sein.

Forscher und Ingenieure arbeiten an immer neuen und besseren Technologien, die Ressourcen gut auszunutzen, sparsam damit umzugehen und neue Quellen zu erschließen. Doch nicht nur Technologien sollten vorangetrieben werden. Die neuen Techniken müssen in der Bevölkerung auch akzeptiert werden und für alle Nationen wirtschaftlich und einsetzbar sein, um den steigenden Energie- und Nahrungsbedarf global nachhaltig befriedigen zu können. Auch ein Abbremsen des Bevölkerungswachstums, zum Beispiel durch Förderung der Bildung für die breite Bevölkerung, kann einer Verschärfung des Hungers nach Nahrung und Energie entgegenwirken.

Bild 2: Zukünftige Preisentwicklung von photovoltaisch und konventionell erzeugtem Strom basierend auf eigenen Berechnungen mittels Lernkurven.

Außerdem kann auch durch eine Umstellung der Ernährungsgewohnheiten der Welthunger bekämpft werden. So gäbe es weltweit genügend Nahrungsmittel, wenn weniger Fleisch gegessen würde. Insgesamt können wir die globalen Herausforderungen also meistern, wenn sowohl das Verhalten der Menschen auf mehr Nachhaltigkeit gerichtet wird, da dies einen massiven Einfluss hat, als auch durch die konsequente Nutzung der heute bereits verfügbaren Technologien.

Autoren:
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Pfennig ist Inhaber des Lehrstuhls AVT-Thermische Verfahrenstechnik. M.Sc. José Manuel Ayesterán, M.Sc. Sara Fayyaz und Dipl.-Ing. Nicole Kopriva sind Wissenschaftliche Mitarbeiter des Lehrstuhls AVT-Thermische Verfahrenstechnik. Philip Frenzel, Bettina Kollmeier, John McIntyre, Kristina Meier, Marius Müller, Patrick Schmidt, Irene Somoza und Nicolai Weber sind Studierende der AVT-Thermische Verfahrenstechnik. Martin Köster, Julia Schmidt und Till Weinert sind Studierenden am Institut für Kommunikationswissenschaften.



*Flüssig-Flüssig-Extraktion
im Mixer-Settler
zur Abtrennung von
Biotenkomponenten.
Foto: Peter Winandy*

D

Der ChemCar-Wettbewerb findet in diesem Jahr zum vierten Mal statt. Dabei messen sich acht studentische Teams sieben deutscher und einer polnischen Universität in Mannheim mit ihren Fahrzeugen. Der Wettbewerb wird im Rahmen der ProcessNet Jahrestagung ausgetragen.

Ein ChemCar ist ein selbst konstruiertes, schuhkartongroßes Fahrzeug, das mit einem (bio-)chemischen Antrieb ausgestattet ist und nicht ferngesteuert werden darf. Zum Antrieb dürfen nur ungefährliche Stoffe verwendet werden und eine kritische Prüfung muss den sicheren Betrieb des Fahrzeugs nachweisen. Auch darf das ChemCar nur geringe Mengen an Kohlenstoffdioxid, Wasserdampf, Stickstoff und Sauerstoff emittieren. Der Austritt von Flüssigkeiten ist durch das ChemCar-Regelwerk untersagt. Ziel des Wettbewerbs ist, eine am Wettkampftag ausgeloste Strecke zwischen zehn und 20 Metern mit dem ChemCar möglichst exakt zurückzulegen. Zudem muss eine Zuladung von bis zu 500 ml Wasser transportiert werden. Anders als in den Jahren zuvor, ist die Nutzung eines Elektromotors nicht gestattet, um die Entwicklung neuer Antriebskonzepte zu forcieren. Eine zusätzliche Schwierigkeit stellt das Verbot einer mechanischen Bremse sowie Zeit- und Wegmessern dar. Die Herausforderung ist somit nicht nur der Antrieb des ChemCars, sondern vielmehr das exakte Stoppen auf der Zielgeraden.

In die Bewertung durch eine Jury von Industrievertretern fließen neben der präzise erreichten Entfernung sowohl ein originelles und innovatives Konzept als auch eine hervorragende Präsentation des Projekts ein. Als Anreiz winken dem Gewinnerteam der begehrte ChemCar Pokal und 2000 Euro Preisgeld.

Nach den positiven Erfahrungen der letzten Jahre nimmt auch in diesem Jahr ein motiviertes Team der RWTH Aachen mit Namen „sPRINTER“ am Wettbewerb teil. Das Team besteht aus sechs Maschinenbau-



studenten der Fachrichtungen Energie-, Fahrzeug- und Verfahrenstechnik. Das Projekt bietet den Studenten die Möglichkeit, im Team zu arbeiten und das theoretische Wissen aus den Vorlesungen in ein Produkt zu überführen. Der Wettbewerb wird genutzt, um das eigene Können unter Beweis zu stellen und sich mit Studierenden anderer Universitäten auszutauschen. Das Konzept zum Bau des RWTH-ChemCars basiert auf dem Produktentwicklungspro-

zess. Zunächst wurden die Anforderungen an das ChemCar berücksichtigt, die durch das Regelwerk der Wettbewerbsveranstalter vorgegeben sind. Weitere Anforderungen legte das Team fest. In einem weiteren Schritt wurden Ideen gesammelt und hinsichtlich ihrer Realisierbarkeit bewertet. Nach einer anschließenden Untersuchung der verbliebenen Vorschläge, wählte das Team das im nächsten Abschnitt vorgestellte Konzept aus. Die Berech-

nung der notwendigen Antriebsleistung und die experimentelle Untersuchung der chemischen Reaktion standen hier im Vordergrund. Den letzten Schritt schließlich stellte die Konstruktion des ChemCar und der Test unter Wettkampfbedingungen dar.

Das „sPRINTER“-Fahrzeug wird angetrieben durch eine Turbine, die über ein Getriebe mit der Antriebswelle des ChemCars verbunden ist. Die Turbine wird von Wasser durch-

Neue Antriebskonzepte messen sich auf der Rennstrecke



*Bild 1:
Nils Kuhlmann (links)
und Marco Scholz (rechts)
unterstützten
in diesem Jahr
die Studierenden
Wilfried Herdin,
Florian Weber,
Timo Mittag,
Christoph Rube,
John Linkhorst und
Matthias Wengert
(von links) beim
ChemCar-Wettbewerb.
Foto: Peter Winandy*

strömt, das durch eine chemische Reaktion auf den nötigen Druck gebracht wird. Dazu wird die chemische Reaktion von Backpulver und Zitronensäure verwendet. Hierbei entsteht neben Natriumcitrat und Wasser auch Kohlenstoffdioxid. Das Gas drückt das Wasser durch die Turbine und wird anschließend in einem Auffangbehälter gespeichert. Um die zurückzulegende Strecke einzustellen, wird ein vorgegebenes Wasservolumen über der Turbine ent-

spannt. Ist das gesamte Wasser durch die Turbine geströmt, wird das Fahrzeug nicht weiter angetrieben. Das ChemCar wird somit an der vorgegebenen Stelle stoppen.

Die Karosserie des ChemCars besteht aus einer einfachen Holzplatte als Träger, die über Wälzlager mit den Achsen verbunden sind. Das Konzept überzeugte die Veranstalter des Wettbewerbs und das RWTH-Team ist für die Endausscheidung nominiert.

Nach dem Bau des ChemCars werden erste Versuche unter Wettkampfbedingungen durchgeführt. Die Versuche dienen der Ermittlung des Verhaltens des Fahrzeugs. Die so gesammelten Daten sollen dann in ein Simulationsmodell einfließen, das das Verhalten abhängig von den Parametern Strecke und Zuladung voraussagen soll. Das ChemCar-Team freut sich auf einen spannenden Wettkampf.

Autoren:
Dipl.-Phys. Nils Kuhlmann ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Lehr- und Forschungsgebiets AVT-Mechanische Verfahrenstechnik. Dipl.-Ing. Marco Scholz ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Lehrstuhls AVT-Chemische Verfahrenstechnik. Wilfried Herdin, John Linkhorst, Timo Mittag, Christoph Rube, Florian Weber und Matthias Wengert sind Studenten der AVT.

Humboldt-Professur geht an die RWTH

Als neuer Humboldt-Professur wird Matthias Wessling die Aachener Verfahrenstechnik verstärken. Der 46-jährige Ingenieurwissenschaftler von der niederländischen Universität Twente wird aktuelle Forschungsthemen der Membrantechnik einbringen, dabei liegt ein Schwerpunkt seiner Arbeit bei der Entwicklung von Membranen zur Unterstützung nachhaltiger Prozesse, wie sie beispielsweise bei der CO₂-Abscheidung oder Wasseraufbereitung zum Einsatz kommen. Wessling nutzt neue Materialien mit spezifischen Eigenschaften für seine grundlagenorientierte Forschung. Dabei hat er gleichzeitig Anwendungen aus der Chemie- und Energiewirtschaft im Blick sowie medizintechnische Lösungen. Für die RWTH stellt die Auszeichnung von Wessling und die Ansiedlung der Humboldt-Professur eine besondere Auszeichnung dar. Der mit fünf Millionen Euro dotierte Forschungspreis sichert die Finanzierung der Arbeit dieses herausragenden Wissenschaftlers für die nächsten fünf Jahre.

RWTH Aachen an der Spitze im Förder-Ranking

Mit 257 Millionen Euro nimmt die RWTH Aachen den ersten Platz beim Förder-Ranking der Deutschen Forschungsgemeinschaft ein. Damit löst die Aachener Hochschule die Ludwigs-Maximilians-Universität München ab, die 249 Millionen Euro einwerben konnte. „Wir freuen uns außerordentlich über dieses Ergebnis“, so RWTH-Rektor Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ernst Schmachtenberg. „Für uns ist das Auszeichnung und Ansporn zugleich, die Arbeit in der eingeschlagenen Richtung fortzusetzen. Mein Dank gilt allen Beschäftigten, die in den letzten Jahren mit so viel Engagement daran gearbeitet haben.“ Allein in den Ingenieurwissenschaften warb die RWTH Aachen im Zeitraum von 2005 bis 2007 insgesamt 155,7 Millionen Euro ein. Auch in der Betrachtung „DFG-Bewilligungsvolumen je Professor“ kann die RWTH in den Ingenieurwissenschaften mit über 1,2 Millionen Euro je Professor weiterhin den ersten Rang behaupten. Bei der Anzahl der Gastaufenthalte der Alexander-von-Humboldt-Stiftung zwischen 2003 bis 2007 sowie den Gastaufenthalten des Deutschen Akademischen Austauschdienstes (DAAD) zwischen 2005 und 2007 belegt die RWTH in den Ingenieurwissenschaften den dritten, beziehungsweise den zweiten Platz. In den Naturwissenschaften liegt sie dabei jeweils auf Rang 2. Dieses Ergebnis wird noch dadurch unterstrichen, dass die ABC-Region Aachen-Bonn-Köln einschließlich des Forschungszentrums Jülich mit insgesamt 550 Millionen eingeworbener DFG-Mitteln die forschungstärkste Region der Bundesrepublik Deutschland darstellt. Die Regionen Berlin und München folgen mit je 520 Millionen Euro.

75 Jahre Institut für Textiltechnik

Das Institut für Textiltechnik unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Gries feierte sein 75-jähriges Jubiläum. Schwerpunkt der Forschungstätigkeit ist die Entwicklung von Textilmaschinen und -komponenten, neuen Werkstoffen, neuen Verfahren zur Herstellung von Textilien, neuen textilen Strukturen und neuen Produkten wie zum Beispiel Faserverbundwerkstoffe und Medizintextilien. Mit den Feierlichkeiten zum Jubiläum wurde auch das neue Institutsgebäude INNOTEX eingeweiht. Das Gebäude in der Otto-Blumenthal-Straße wurde aus textilbewehrtem Beton gebaut. Zur Eröffnung konnten Rektor Schmachtenberg und Professor Gries auch Staatssekretär Dr. Thomas Rachel begrüßen.

Professor Walter Leitner erhält Forschungspreis

Für seine innovativen Forschungsarbeiten zur Entwicklung nachhaltiger chemischer Prozesse wurde Univ.-Prof. Dr. Walter Leitner vom Institut für Technische und Makromolekulare Chemie mit dem Wöhler-Preis für Ressourcenschonende Prozesse ausgezeichnet. Professor Leitner ist externes wissenschaftliches Mitglied des Max-Planck-Instituts für Kohlenforschung in Mülheim und Wissenschaftlicher Direktor des gemeinsam von der RWTH und der Bayer AG gegründeten „CAT – Catalytic Center“. Im Zentrum seiner Arbeiten steht die Katalysatorforschung von den molekularen Grundlagen bis zu reaktionstechnischen Ansätzen. Leitner erforscht neue Katalysatoren und katalytisch aktive Materialien und versucht, neue Methoden der Stoffumwandlung zu etablieren. Auf der Suche nach neuartigen Lösungsmitteln für katalytische Prozesse befasst er sich mit dem vielfältigen Potenzial von überkritischem Kohlendioxid als „Green Solvent“. Ziel dieser Forschung ist es, chemische Prozesse sicherer, sauberer, und energieeffizienter – und damit auch wirtschaftlich erfolgreicher – zu gestalten.

RWTH im Spitzentechnologie-wettbewerb erfolgreich

Gleich mit mehreren Anträgen war die RWTH im Spitzentechnologiewettbewerb „Hightech.NRW“ erfolgreich. Für den Wettbewerb wurden 149 Anträgen eingereicht, neun Vorhaben werden in den nächsten drei Jahren aus Landes- und EU-Mitteln finanziert. Erfolgreich waren die RWTH-Anträge: „Beschleunigte Umsetzung neuer Tumorbehandlungskonzepte“, „Karosseriebauteile aus CFK für die Großserienfertigung“ sowie „Entwicklung von elektroaktiven Polymeren zur Schwingungsbeeinflussung“. Darüber hinaus sind RWTH-Institute beteiligt am Projekt „Ressourceneffiziente Herstellung von Carbonfasern“ (Dralon, Dormagen) sowie „Ressourceneffizienz durch stoffliche Nutzung von CO₂ und regenerative Erzeugung von Wasserstoff“ (Evonik, Marl).

35 Millionen Euro für ein neues Forschungszentrum

Groß ist die Freude an der RWTH Aachen: Im Erweiterungsgebiet Melaten kann ein neues Forschungsgebäude errichtet werden. Die Gemeinsame Wissenschaftskonferenz genehmigte jetzt 35 Millionen Euro für den Neubau des "Zentrums für mobile Antriebe" oder auch "Center for mobile propulsion". Der Spatenstich ist bereits am 13. Oktober erfolgt. RWTH-Institute der Fakultäten für Maschinenwesen, Elektrotechnik und Naturwissenschaften wollen dort gemeinsam mit dem Forschungszentrum Jülich emissionsarme und energieeffiziente Antriebe für nachhaltige Mobilität erforschen.

NRW fördert Solarzellenprojekt mit 1,85 Millionen Euro

Dr. Jens Baganz, Staatssekretär des Ministeriums für Wirtschaft, Mittelstand und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, überreichte jetzt eine Bewilligung für das mit 1,85 Millionen Euro dotierte Projekt ADMITTER. Im Forschungsverbund ADMITTER arbeitet das Institut für Halbleitertechnik mit den Partnern Solland Solar Cells GmbH und der AMO GmbH zusammen. Die Wissenschaftler entwickeln dabei die Grundlagen und Technologien zur Herstellung eines selektiven Emitters, der bisherige Konflikte bei der Herstellung von Solarzellen aufhebt. Der Emitter bildet die lichtseitige, hochsensitive Oberfläche einer Solarzelle und bestimmt maßgeblich den Wirkungsgrad sowie ihre Wirtschaftlichkeit.

Das Konzept des selektiven Emitters umgeht das bislang bestehende grundlegende Dilemma der gegensätzlichen Anforderungen an den Emitter. Für seine hohe elektronische Qualität ist einerseits eine möglichst niedrige Zahl von Dotieratomen, welche für die Erzeugung von elektrischer Spannung bei Sonneneinstrahlung Voraussetzung sind, anzustreben. Andererseits erfordern hocheffiziente elektronische Kontakte zwischen dem Silizium der Solarzelle und den Metallfingern auf der Vorderseite der Solarzelle einen stark dotierten Emitter. Der selektive Emitter wird beiden Anforderungen gerecht, indem er zwei unterschiedlich dotierte Gebiete aufweist. Unterhalb des Kontaktfingers wird eine hohe Dotierung zur Optimierung des elektrischen Kontaktes eingestellt; in den Bereichen, die vom Sonnenlicht getroffen werden, wird die Dotierung hingegen niedrig gehalten. Diese Selektivität lässt eine weitere Effizienzsteigerung erwarten, die in der Welt der Solarzellen eine überragende Bedeutung hat.

Ehrungen für Professor Manfred Nagl

Anlässlich der Emeritierung von Prof. Dr.-Ing. Manfred Nagl lud die Fachgruppe Informatik zu einem Festakt ein. Nach seinem Studium an der Universität Erlangen und der Habilitation im Jahr 1978 ist Nagl an verschiedenen Hochschulen erfolgreich tätig gewesen. Im Jahr 1986 folgte er dem Ruf an die RWTH Aachen und war seitdem am Lehrstuhl für Informatik 3 (Softwaretechnik) der Aachener Hochschule tätig. Seit 1995 hatte er zusätzlich einen Zweitsitz an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der RWTH Aachen.

Im Rahmen der INFORMATIK 2009, der größten Fachkonferenz im deutschsprachigen Raum, hat die Gesellschaft für Informatik e.V. (GI) Professor Nagl zum GI-Fellow ernannt. GI-Fellows zeichnen sich durch herausragende Beiträge technisch-wissenschaftlicher Art zur Informatik aus. Es können aber auch Personen gewürdigt werden, die sich um die Gesellschaft für Informatik oder um die Informatik im Allgemeinen verdient gemacht haben.

Neuer Siemens-Pate der RWTH Aachen

Dr.-Ing. Siegfried Russwurm ist neuer Siemens-Pate der RWTH Aachen und tritt damit die Nachfolge von Professor Klaus Wucherer an. Institution der Patenschaft ist das Siemens Center of Knowledge Interchange (CKI) der RWTH Aachen. Im CKI führen die Siemens AG und die RWTH Aachen ihre technischen und wirtschaftswissenschaftlichen Kompetenzen zusammen. Dr. Russwurm ist seit 2008 Mitglied des Vorstands der Siemens AG und dort zuständig für Personal. Seit über 15 Jahren ist der Arbeitsdirektor in unterschiedlichen Funktionen und Sparten für die Siemens AG tätig, zuletzt unter anderem als Bereichsvorstand bei Siemens Medizintechnik. Die von Univ.-Prof.em. Dr. Dr. Walter Eversheim geleitete Kooperation zwischen Siemens und der RWTH hat zum Ziel, gemeinsame Aktivitäten in Forschung und Entwicklung zu initiieren, talentierten Nachwuchs zu fördern und auf diese Weise das Netzwerk zwischen Siemens-Bereichen und Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der RWTH zu stärken.

Das BMBF fördert drei Projekte

Thomas Rachel, Parlamentarische Staatssekretär im Bundesministerium für Bildung und Forschung, überbrachte zwei Wissenschaftlern der RWTH Aachen einen Bewilligungsbescheid für drei Forschungsprojekte im Rahmen der Innovationsallianz „Lithium Ionen Batterie LIB 2015“ über insgesamt 1,6 Millionen Euro. Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Dirk Uwe Sauer, Juniorprofessor für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik, will in seinem Projekt „Li-Five“, zusammen mit sieben Partnern aus Industrie und Forschung, neue Fünf-Volt-Lithium-Ionen-Zellen mit hoher Lebensdauer für Hybrid- und Elektrofahrzeuge entwickeln, die wesentlich dazu beitragen werden, die Reichweite von Straßenfahrzeugen zu vergrößern und Kosten zu reduzieren.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl Bernhard Friedrich, Leiter des Instituts für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling, war gleich mit zwei Anträgen erfolgreich. Sie werden gemeinsam mit dem mittelständigen Unternehmen Accurec, Mülheim, die „Rückgewinnung der Wertstoffe aus zukünftigen Li-Ion-basierten Automobil-Batterien“ zum Thema haben. Dabei geht es darum, entsprechende Prozesstechniken und wirtschaftliche Recyclingverfahren zu entwickeln, um die wertvollen Bestandteile zurückzugewinnen. Im Verbundprojekt „LiVe Lithiumbatterie-Verbundstrukturen“ wird das Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung gemeinsam mit universitären Partnern in Braunschweig, Duisburg-Essen, Erlangen, Hannover, Gießen und Münster arbeiten. Thema der Aachener Wissenschaftler dabei ist die „Performancesteigerung durch gezielte Elektrodenarchitektur mit Nanokompositen und Core-Shell-Materialien“.

Neues Studentenlabor

Das Studentenlabor „Faszination Umwelt“ des Instituts für Umweltforschung und der Fachgruppe Biologie wurde jetzt offiziell eingeweiht. Das Labor wurde von Univ.-Prof. Dr. Henner Hollert im Zuge seiner Berufung an das Lehr- und Forschungsgebiet Ökosystemanalyse der RWTH Aachen konzipiert und umgesetzt. Die Kosten lagen bei 650.000 Euro. Diese wurden teilweise aus Studiengebühren, aus Geldern der Exzellenzinitiative und aus Berufungsmitteln finanziert. Erst die großzügige Unterstützung verschiedener Industrieunternehmen machte das Labor möglich: So konnten Geräte und Ausstattung im Wert von über 500.000 Euro als Spenden eingeworben werden. Hauptsponsor ist die Firma Nikon, die im Rahmen der eigens hierfür eingerichteten Kooperation „Environmental Imaging“ eine umfangreiche moderne optische Ausstattung stellt. Besonders die Biostation, ein spezielles Mikroskop mit integriertem Zellbrutschrank, verspricht spannende Projekte für die Studierenden. Weitere Sponsoren sind Abimed (Pipetten), Agilent Technologies (HPLC), Bfi Optilas (Bildauswertesoftware), Integra Bioscience (Sterilbank), Labomedic (Kleingeräte), Mettler Toledo (Feinwaage) sowie TECAN Deutschland (Fluoreszenzphotometer).

Zwei neue Mitglieder im Hochschulrat

Der Senat der RWTH Aachen hat zwei neue Mitglieder des Hochschulrates bestätigt: Professor Dr. Gudrun Gersmann für den Bereich der Geistes- und Kulturwissenschaften sowie Dr. Fiona Williams aus dem Bereich der Industrie. Beide kennen die RWTH Aachen aus eigener Anschauung und aus Kooperationen.

Gersmann ist Direktorin des Deutschen Historischen Instituts in Paris. Von 2002 bis 2004 hatte sie die RWTH-Professur für Geschichte der Frühen Neuzeit inne. Williams ist seit 1991 bei Ericsson und am Standort Aachen im Bereich der Informationstechnologie tätig; sie ist dort Forschungsdirektorin mit einem Schwerpunkt in internationalen Projekten.

Der Hochschulrat der RWTH Aachen besteht aus zehn Mitgliedern. Gersmann und Williams übernehmen die Ämter von Professor Dr. Londa Schiebinger von der Stanford University sowie Heinrich Weiss, Vorsitzender der Geschäftsführung der SMS GmbH und Vorsitzender des Aufsichtsrats der SMS Demag AG, die aus beruflichen Gründen ausgetreten sind.

Auszeichnung für Matthias Wuttig

Die Chinese Academy of Sciences hat Univ.-Prof. Dr. Matthias Wuttig für ihr Einstein Professoren-Programm ausgewählt. Jährlich werden maximal 20 anerkannte Wissenschaftler nach China eingeladen, um dort ihre Arbeiten und aktuelle Forschungsergebnisse vorzustellen. Wuttig ist Inhaber des Lehrstuhls für Experimentalphysik I und Leiter des I. Physikalischen Instituts. 1960 in Mettmann geboren studierte Wuttig Physik an der Universität zu Köln. Anschließend arbeitete er am Forschungszentrum Jülich und promovierte an der RWTH. Zunächst war er weiter als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungszentrum Jülich tätig, bis er im Oktober 1997 den RWTH-Lehrstuhl übernahm. Wuttig war im Laufe seiner wissenschaftlichen Karriere bereits mehrfach im Ausland tätig, so als Gastwissenschaftler am Lawrence Berkeley Laboratory sowie bei den Bell Labs in den USA, an der Zhejiang University in China, der Kenyatta University in Kenia, dem Almaden Research Center von IBM in San Jose oder auch am Data Storage Institute in Singapur. Er erhielt vom Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft den Heinz-Maier-Leibnitz Preis, wurde mit dem Gaede-Preis der Deutschen Vakuum Gesellschaft und mit dem Stanford R. Ovshinsky Preis ausgezeichnet.

Festkolloquium für Professor Günther Friedrich

Anlässlich des 80. Geburtstages von Professor Dr. Günther Friedrich luden das Institut für Mineralogie und Lagerstättenlehre sowie die Klockmann-Stiftung zu einem Festkolloquium ein. Günther Friedrich war von 1975 bis 1994 Inhaber des Lehrstuhls für Mineralogie und Lagerstättenlehre. 1929 in Stuttgart geboren studierte er zunächst dort, später in Heidelberg. Nach seiner Promotion kam er als Wissenschaftlicher Assistent an die RWTH und habilitierte 1962. Anschließend folgte ein Forschungsaufenthalt in den USA und Kanada. Schließlich wurde Friedrich Leiter der Abteilung Angewandte Lagerstättenlehre und 1975 ordentlicher Professor für Mineralogie und Lagerstättenlehre. Friedrich waren die internationale Beziehungen seines Institutes besonders wichtig. Auch die Nachwuchsförderung hatte er stets im Blick, so initiierte er als Vorsitzender der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft den „Paul-Ramdohr-Preis“, der an herausragende Nachwuchswissenschaftler vergeben wird. Für sein Engagement wurde ihm 1995 die „Abraham-Gottlob-Werner-Medaille in Gold“ von der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft verliehen.

Auszeichnung für Juniorprofessorin Rafaela Hillerbrand

Dr.rer.nat. Dr.phil. Rafaela Hillerbrand, Juniorprofessorin für Angewandte Technikethik, wurde jetzt in die Junge Akademie der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften und der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina aufgenommen. In Berlin erhielt sie gemeinsam mit neun weiteren Nachwuchswissenschaftlern im Rahmen einer Festveranstaltung ihre Mitgliedsurkunde.

Hillerbrand leitet am Human Technology Center, kurz HumTec, die Forschungsgruppe „Ethics for Energy Technology“. Ziel der Forschungsgruppe ist es, eine Brücke zu schaffen zwischen dem empirischen Wissen über unterschiedliche Energietechnologien und einer wissenschaftstheoretisch reflektierten sowie ethisch fundierten Analyse der angemessenen Verwendung solcher Technologien.

Für ihre mit summa cum laude bewertete Promotion in Physik an der Universität Münster erhielt Hillerbrand 2008 den Naturwissenschaftspreis der Ingrid zu Solms-Stiftung. Auch im Fachbereich Philosophie promovierte sie an der Universität Erlangen-Nürnberg mit summa cum laude und erhielt für ihre Doktorarbeit den Lilli-Bechmann Rahn-Preis 2004. Bevor die 32-Jährige im Januar 2009 nach Aachen kam, forschte sie zuletzt an der University of Oxford über Handlungen unter Risiko und Unsicherheit.

RWTH Aachen im Wettbewerb „exzellente Lehre“ ausgezeichnet

Die RWTH Aachen wird mit ihrem Zukunftskonzept „Studierende im Fokus der Exzellenz“ im Wettbewerb „exzellente Lehre“ ausgezeichnet. Sie gehört damit zu den sechs Universitäten, deren Konzepte zur Verbesserung der grundständigen Lehre in der deutschen Hochschulentwicklung durch den Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft und die Kultusministerkonferenz der Länder mit einem Preisgeld von einer Million Euro gefördert werden. Mit diesen Mitteln soll in erster Linie für die Optimierung der studienvorbereitenden Informationen, für eine bessere Betreuung in der Studienanfängersphase und für die Entwicklung innovativer Projekte in der Lehre gesorgt werden.

Der Wettbewerb würdigt vor allem solche Konzepte als exzellent, in denen die grundständige Lehre regelmäßig Gegenstand der Entwicklungsplanung, Qualitätssicherung und strategischen Steuerung einer Hochschule ist. Die sechs Gewinner aus 108 Antragsskizzen und 24 Finalisten, die zur Abgabe eines Langantrages aufgefordert wurden, sind unter den Universitäten neben der RWTH Aachen, die Universitäten Bielefeld, Freiburg und Potsdam sowie die TUs Kaiserslautern und München.

Das Maßnahmenbündel ist durch vier strategisch breit angelegte Kernbereiche und deren Fokussierung auf die Bedürfnisse der Studierenden gekennzeichnet. So werden die Studierenden bei ihrem Start in das anspruchsvolle Studium durch bessere studienvorbereitende Informationen, verpflichtende Self Assessments und ein individuelles Mentoringssystem unterstützt. Die Qualifizierung aller Lehrenden steht im Vordergrund. Im Kernbereich Lehr- und Lernkonzepte sind neben den Vorkursen und Einführungsveranstaltungen Blended Learning Konzepte sowie verstärkte Gruppen- und Projektarbeit. Die Einrichtung eines Exploratory Teaching Space ist als Freiraum zur Entwicklung innovativer Lehrkonzepte vorgesehen. Das vierte Maßnahmenpaket sichert die Struktur und die Organisation aller Qualitätsmaßnahmen in der Lehre. Dies umfasst ein weiterentwickeltes Anreizsystem, klar umrissene Zuständigkeiten des Prorektors für Lehre beziehungsweise der Studiendekanate sowie Instrumente zur Erfassung von Lehrqualität.

Erste Ergebnisse der **Exzellenz- initiative**

H₂O

more
than just
a drop...



www.science-parliament.eu

24/03 – 25/03/2010
Aachen, Germany

GET
INVOLVED
NOW!

Office of the European Science Parliament
52058 Aachen – GERMANY
phone +49 (0)241 432-7637 mail@science-parliament.eu
www.science-parliament.eu



RWTHAACHEN
UNIVERSITY

