

BULLETIN

MAGAZIN DER EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

ENERGIETECHNIK – ENERGIEZUKUNFT

Trends und Forschung

ENERGIEVERSORGUNG DES 21. JAHRHUNDERTS

Chemische Brennstoffe aus Solarenergie

DIE KRAFT DER SONNE

Null-Emissions-Verbrennungstechnologie

DIE MACHBARE UTOPIE

Technologien im Mikro- und Nanobereich

ENERGIE FÜR KLEINSTFORMATE

ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IMPRESSUM:

HERAUSGEBERIN: Schulleitung der ETH Zürich

REDAKTION: Lic. phil. I Martina Märki-Koepp (mm), Redaktionsleitung
Vanja Lichtensteiger-Cucak (vac), En bref
Roman Klingler, Alumni Aktuell
Corporate Communications der ETH Zürich
ETH Zentrum, 8092 Zürich
Tel. 01-632 42 52 Fax 01-632 35 25

INSERATE: Go! Uni-Werbung, Rosenheimstr. 12
9008 St. Gallen, Tel. 071-244 10 10

GESTALTUNG: inform, Zürich

DRUCK: NZZ Fretz AG, Zürich

AUFLAGE: Erscheint 4-mal jährlich
Auflage dieser Ausgabe 26 000

Nachdruck mit Quellenangabe erwünscht. Die nächste Ausgabe, Nr. 288, zum Thema
«Life Sciences» erscheint im Februar 2003.
Bulletin ist auch abrufbar unter: <http://www.cc.ethz.ch/bulletin/>

INHALT

6_ Energieversorgung des 21. Jahrhunderts TRENDS UND FORSCHUNGSBEDARF

Reza S. Abhari, Hermann Knaus

12_ Energieszenarien im Vergleich SCHWEIZ UND CHINA ALS FALLBEISPIEL

Stefan Hirschberg

16_ Chemische Brennstoffe aus Solarenergie DIE KRAFT DER SONNE

Aldo Steinfeld, Anton Meier

20_ Herausforderung Mobilität ANTRIEBSSYSTEME FÜR AUTOMOBILE DER ZUKUNFT

Ch. Bach, K. Boulouchos, L. Guzzella

24_ Null-Emissions-Energiesysteme DIE MACHBARE UTOPIE

Konstantinos Boulouchos

28_ Die Brennstoffzelle METHODISCHE PRODUKTENTWICKLUNG

Daniel Schmid, Markus Meier

32_ Elektrische Energienetze der Zukunft EINE UNVERMUTETE REVOLUTION?

Klaus Fröhlich, Kurt Kaltenecker

36_ Technologien im Mikro- und Nanobereich ENERGIE FÜR KLEINSTFORMATE

Dimos Poulikakos, Arun Majumdar

42_ Energie des Lebens WIE MOLEKULARE MASCHINEN ZELLEN BEWEGEN

Peter Dimroth, Matthias Peter, Gaudenz Danuser

48_ Exergieanalyse ENERGIESYSTEME OPTIMAL KONFIGURIEREN

Adrian Bejan

51_ Roundtable HAT DIE ATOMENERGIE EINE ZUKUNFT?

Richard Brogle, Christoph Meier

55_ En bref EREIGNISSE AN DER ETH

64_ Alumni Aktuell



PIONEER CASSETTE DECK

LEVEL BALANCE RELEVEL



AM/FM AUTO CL TUNE P.P.O.N

PIONEER

MADE IN JAPAN

ENERGIETECHNIK – ENERGIEZUKUNFT

MARTINA MÄRKI-KOEPF

10 Jahre nach Rio, 5 Jahre nach Kyoto trafen sich dieses Jahr wieder tausende von Wissenschaftlern und Politikern, diesmal in Johannesburg, um über das Wohl der Umwelt zu beraten. Es war der grösste Uno-Erdgipfel bisher, und doch war hier und da Enttäuschung zu spüren. Die Zeit der grossen Visionen ist vorbei. Jetzt geht es um ihre Umsetzung – und die ist wie immer mühsam.

Kurz vor dem Grosseignis fasste ein Bericht die Erkenntnisse des dritten Klimazustandsberichts des Uno-Wissenschaftsrates IPCC mit Blick auf die Schweiz zusammen. Die Ergebnisse waren nicht ermutigend: In der Schweiz und im Alpenraum ist es im 20. Jahrhundert deutlich wärmer geworden als im globalen Durchschnitt. Die globale Erderwärmung beträgt in diesem Zeitraum 0,6 Grad, in der kontinentalen Schweiz liegen die Werte offenbar mehr als doppelt so hoch. Treibhausgase, und unter diesen wiederum zu 65% und mehr das CO_2 , sind eine der Hauptursachen für die Klimaerwärmung. Hauptquelle für den hohen CO_2 -Anteil ist das Verbrennen fossiler Brennstoffe zur Energiegewinnung und im Verkehr. Dabei ist bereits heute abzusehen, dass der Bedarf nach Mobilität in den sich entwickelnden Ländern rasant steigen wird, ebenso wie der Bedarf an Energie. Das Ziel von Kyoto, den Ausstoss von Klimagasen wie Kohlendioxid innert 10 Jahren auf 6 bis 8 Prozent unter das Niveau von 1990 zu reduzieren, liegt noch in weiter Ferne.

Grund zur Resignation? Nicht für alle. So stellten Wissenschaftler von PSI und den beiden ETH am Johannesburger Erdgipfel ein Wasserstoffauto vor, das mit 40% weniger Energie als herkömmliche Autos auskommt und das, auch ohne Schadstoffe zu produzieren. Ein kleines Vehikel für die Zukunft. Dieses und andere Beispiele zeigen, dass es technisch durchaus möglich ist, den Energieverbrauch zu senken oder zumindest zu stabilisieren – oder auf neue, umweltfreundlichere Technologien umzusteigen. Das vorliegende «Bulletin» lotet diese Möglichkeiten mit Blick auf die Zukunft aus: vom Null-Emissions-Verbrennungssystem bis zur Solarenergie, vom bekannten grossen Energiefresser Verkehr bis hin zu den eher unbekanntem, aber immer zahlreicher werdenden Energie verbrauchenden Anwendungen im Mikro- und Nanobereich, deren energetischer Wirkungsgrad heute noch denkbar schlecht ist. Know-how aus den verschiedensten Ingenieurdisziplinen hat in der Schweiz bereits dazu geführt, dass die CO_2 -Emissionen in den Privathaushalten, Dienstleistungsbetrieben und im Industriesektor gesenkt werden konnten. Doch Know-how allein verhilft neuen Technologien nicht zum Durchbruch. Immer deutlicher zeigt sich, dass dazu auch ein politischer Wille und ein entsprechender Markt vorhanden sein müssen. Erst dann kann sich das Potenzial der technologischen Lösungen voll entfalten. So gesehen ist die Energiezukunft nicht nur eine Frage des technischen Know-hows, sondern auch eine des politischen Willens.



Martina Märki-Koepf
Redaktorin ETH-Bulletin

TRENDS UND FORSCHUNGSBEDARF

REZA S. ABHARI, HERMANN KNAUS

Die Sicherstellung der Energieversorgung in der Zukunft ist eine der wichtigsten gesellschaftlichen Aufgaben. Dabei hat sich Europa die Herbeiführung einer nachhaltigen Entwicklung zum Ziel gesetzt. Welche Trends beeinflussen dieses Ziel und wo liegen Erfolg versprechende Optionen?

Die zunehmende Liberalisierung des Strommarktes, die den freien Handel mit Energie in Europa ermöglicht und dem Konsumenten die freie Wahl seines Energieversorgers gibt, wird die Entwicklung der Energiewirtschaft in Europa beeinflussen. Die Reduktion von Treibhausgasen und gesundheitsschädlichen Emissionen durch eine effizientere Nutzung aller Energieträger einschliesslich der Erneuerbaren werden die grossen Herausforderungen sein.

Der Weltenergiebedarf wird in den nächsten 25 Jahren voraussichtlich um 60% wachsen. Dabei wird der Zuwachs des Energieverbrauchs künftig von den Entwicklungsländern in Asien bestimmt. Dies ist zum einen durch die stark wachsende Bevölkerungszahl, zum anderen durch die schnelle wirtschaftliche Expansion von Entwicklungsländern bedingt (Abb.1). In der ersten Hälfte des Jahrhunderts wird die Stromerzeugung mit im Wirkungsgrad weiter gesteigerten Gasturbi-

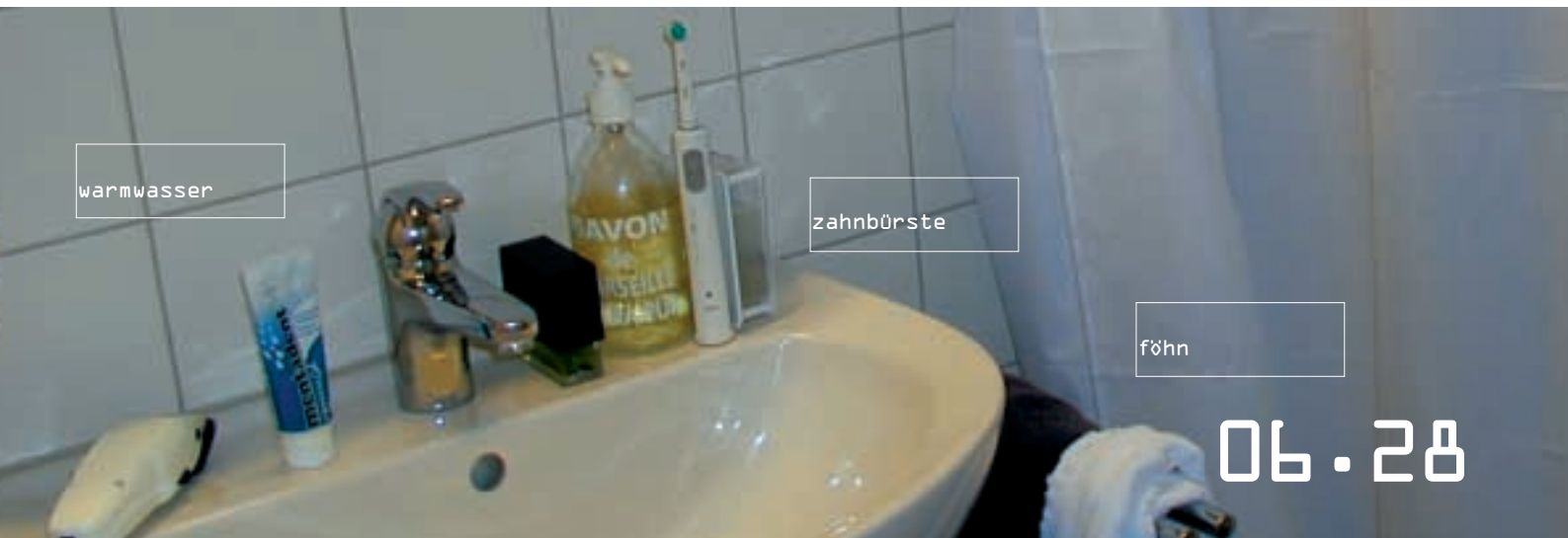
nen deshalb einen grossen Aufschwung erfahren.

Die primären Energieträger werden zum grössten Teil für die Erzeugung von Elektrizität und Wärme sowie für Transport und Verkehr benötigt. Es ergeben sich für diese Bereiche ganz unterschiedliche Anforderungen bezüglich der Verfügbarkeit und der Speicherung der Energie. Während bei Elektrizität und Wärme jederzeit die Verfügbarkeit unabhängig von dem über die Tages- und Jahreszeit stark schwankenden Gesamtbedarf gewährleistet sein muss, ist für Transport und Verkehr die Speicherung und Bereitstellung der Primärenergie und damit eine hohe Energiedichte des Brennstoffes bezogen auf sein Volumen entscheidend.

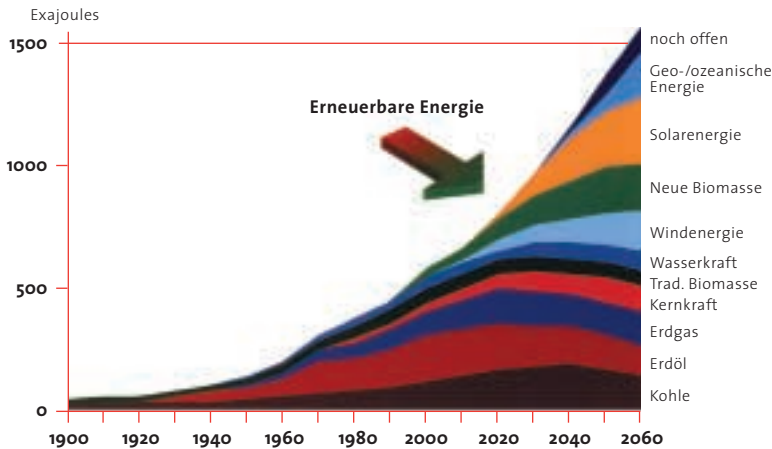
Ressourcen fossiler Brennstoffe

Die Reserven fossiler Brennstoffe sind endlich, und vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie in Deutschland 1998 veröffentlichte Zahlen sagen Reserven für Erdöl, Erdgas und Kohle für die nächsten 44, 64 bzw. 185 Jahre voraus. Die konkreten Zahlen variieren jedoch in Abhängigkeit von der Quelle stark und sind abhängig von den technologischen Fortschritten bei der Ausschöpfung und dem Verbrauch, welcher der Untersuchung zugrunde gelegt wurde.

In Anbetracht dieser Zahlen und der Tatsache, dass gegenwärtig der grösste Teil des Primärenergieverbrauchs durch fossile Brennstoffe gedeckt wird, wird die Notwendigkeit zur Nutzung erneuerbarer Energien deutlich. Dennoch wird auch im Jahre 2020 der Beitrag erneuerbarer Energien am Primärenergieverbrauch weltweit



Weltenergieverbrauch bis 2060
Szenario: nachhaltiges Wachstum



exa = 10¹⁸ Exajoule = 34,12 Mio t SKE

Abb. 1: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs im 21. Jahrhundert.

gering sein. Mit abnehmenden Ressourcen werden voraussichtlich die Preise schrittweise steigen. Diese Entwicklung wurde von Colin Campbell vorausgesagt und basiert auf der Annahme, dass zunehmend aufwändigere Abbautechniken zum Einsatz kommen werden. Erneuerbare Energien werden so langfristig konkurrenzfähig werden. Der Weltmarktpreis für Rohöl wird jedoch voraussichtlich in den nächsten 20 Jahren nur wenig steigen. Die Gaspreise werden sich weiterhin am Öl- bzw. Steinkohlepreis orientieren.

Personen- und Güterverkehr

In allen Bereichen des Verkehrs dominiert der Einsatz von Öl als Energieträger. Nur im Schienenverkehr finden elektrische Antriebe eine weite Verbreitung. Der Personen- und Güterverkehr auf der Strasse sowie Schiffe und Flugzeuge greifen fast ausschliesslich auf Öl als Primärenergieträger zurück. Während der Strassenverkehr durch hybride oder rein elektrische Antriebe, z.B. in Verbindung mit einer Brennstoffzelle, Alternativen zum Verbrennungsmotor vorstellbar sind, wird der Langstreckenverkehr mit Flugzeugen und Schiffen auf absehbare Zeit vom Öl abhängig sein. Die Abhängigkeit dieses gesamten Bereichs zeigt, dass die Entwicklung effizienterer fossil getriebener Antriebe dringend notwendig ist.

Zentrale Energieerzeugung in Grosskraftwerken

Fossil gefeuerte Anlagen:

Der grösste Anteil der Stromerzeugung erfolgt momentan aus den fossilen Brennstoffen Kohle, Gas und Erdöl in zentralen Grosskraftwerken. Diese Kraftwerke weisen einen Wirkungsgrad von 30 bis 43% auf. Die Abwärme kann in der Regel nicht zur Bereitstellung von Wärmeenergie genutzt werden, weil der weite Transport dieser Energieform nicht effektiv wäre. Neuere Anlagen basieren häufig auf kombinierten Gas- und Dampfturbinenprozessen, bei denen die Abwärme aus dem Gasturbinenprozess zur Dampferzeugung genutzt wird. Dabei kann der Dampfprozess selbst ungefeuert oder gefeuert ausgeführt sein. Diese so genannten GuDs bzw. Kombikraftwerke weisen Wirkungsgrade bis 58% auf. Auch die Kraft-Wärme-Kopplung ist mit solchen Anlagen generell denkbar. Zur weiteren Wirkungsgradsteigerung werden Verbesserungen der Gasturbinen beitragen, welche durch eine weitere Temperatursteigerung mittels besserer Materialien und effektiverer Schaufelkühlung sowie effizienteren Regelungsstrategien erreicht werden.

Kernenergie:

Die Kernenergie spielt nach wie vor in vielen Ländern eine zentrale Rolle in der Grundlastversorgung. So beträgt ihr Beitrag an der Stromerzeugung in der Schweiz 40% im Jahresmittel. Wie sich die Nutzung der Kernenergie in der Zukunft entwickeln soll, ist zurzeit Gegenstand vieler zum Teil politisch geführter Diskussionen. Jedoch ist eine Tendenz für eine einheitliche Vorgehensweise der einzelnen Länder nicht ersichtlich. Dem grossen Vorteil, dass Kernkraftwerke keine Treibhausgase emittieren,



ren, stehen die nach wie vor nicht definitiv gelösten Fragen der Endlagerung von Brennstäben und der Wiederaufbereitung sowie die Angst der Bevölkerung vor dieser Technologie gegenüber. Es werden deshalb zum Beispiel in Frankreich und den USA grosse Anstrengungen unternommen, um fortschrittliche Reaktoren zu entwickeln, welche die neuen Anforderungen bezüglich Sicherheit und Müllentsorgung berücksichtigen.

Dezentrale Energieerzeugung

Die dezentrale Energieerzeugung basiert auf Kleinkraftwerken, welche genau dort erstellt werden, wo Strom, Wärme und Kälte auch gebraucht werden. Die Grösse bzw. Leistung der Anlagen orientiert sich dabei am Bedarf des zu versorgenden Gebiets. Ein Nachteil ist, dass der elektrische Wirkungsgrad von Anlagen mit abnehmender Grösse sinkt. Ausserdem ist eine Anbindung der Anlagen an das bestehende Stromnetz im Moment in Industriestaaten nur eingeschränkt möglich. Ein wirklicher Vorteil ergibt sich jedoch für Entwicklungsländer wie China und Indien, in denen noch keine Infrastruktur existiert. Besonders umweltfreundlich ist die dezentrale Energieerzeugung in Verbindung mit dem Einsatz modernster Technologien und regenerierbarer Energien, wie Wind, Sonne, Wasserstoff oder nachwachsender Rohstoffe.

Erneuerbare Energien

Wasserkraft, Windenergie, Solarenergie, Geothermie und Biomasse sind die wichtigsten erneuerbaren Energien für die Zukunft. Generell ergibt sich durch ihre unterschiedliche Verfügbarkeit über die Tages- und Jahreszeit ein Einsatz in unterschiedlichen Lastbereichen. Grundlastfähig



Abb. 2: Nutzung der Windenergie in der Wüste.

sind Biomasse, Geothermie und Wasserkraft, während sich Biomasse und Wasserkraft auch zur Spitzenlastabdeckung eignen. Die Kombination der erneuerbaren Energieformen und die Entwicklung geeigneter Energiespeicher wird deshalb notwendig sein, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Die Anbindung aller Anlagen an das elektrische Netz und dessen stabiler Betrieb erfordert ganz erhebliche zusätzliche Anstrengungen. Im Folgenden sollen die wichtigsten erneuerbaren Energien kurz beschrieben und deren Potenzial für eine nachhaltige Energieerzeugung aufgezeigt werden.

Windenergie:

Die Energieerzeugung mit Windkraftanlagen (Abb. 2) ist schon heute neben der Wasserkraft eine der am meisten genutzten erneuerbaren Energieformen. Am rasanten Ausbau der Windenergie ist nicht zu zweifeln, nachdem sich die Kapazitäten in den letzten zehn Jahren verzehnfachten und nun weltweit 10 000 Megawatt errei-

chen. Der Ausbau ist auf Flächen zu Lande mit Windgeschwindigkeiten grösser als 8 m/s im Jahresmittel begrenzt, welche eine sinnvolle Nutzung durch Windkraft sicherstellen. Ausserdem sind der weiteren Erstellung von Windkraftanlagen zu Lande durch den Eingriff in das Landschaftsbild, den Verlust der Wohnqualität durch Lärmbelästigung, Schattenwurf und Lichteffekte der Rotoren für die Anwohner sowie Vogelschlag Grenzen gesetzt. Weitere Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zur Lärmreduzierung sind notwendig, um die Aufstellung solcher Anlagen auch in bewohnten Gebieten zu ermöglichen.

Solarenergie:

Bei der Sonnenenergie muss zwischen solarer Wärmenutzung (Solarthermie) und der Solarstromnutzung (Photovoltaik) unterschieden werden. Der Einsatz von Sonnenkollektoren ist schon heute für die Warmwasserbereitung nahe der Wirtschaftlichkeit und leistet dort einen kleinen Beitrag zur nachhaltigen Energieversorgung. Im Gegensatz zu der solaren Wärmenutzung und den anderen erneuerbaren Energien ist die solare Stromerzeugung sehr teuer. In südlichen Ländern, vor allem am Sonnengürtel der Erde, besteht jedoch die Möglichkeit, mit konzentrierenden Systemen wie Parabolrinnenkraftwerken, Solarturmkraftwerken sowie kleinen Solar- schüsselanlagen solarthermisch Strom zu erzeugen. Sonnenenergie könnte somit eine Schlüsselstellung in der Energieversorgung von Entwicklungsländern einnehmen. Bei diesen Anlagen sind jedoch noch einige technische Probleme zu überwinden. Hohe Spannungen können in Bauteilen entstehen, welche durch die schnell wechselnde Intensität der Sonnenstrahlung, bedingt durch vorbeiziehende Wolken, hervorgerufen werden. Der Einsatz von Photovoltaikanlagen zur direkten



Umwandlung von Sonnenenergie in Strom ist, bedingt durch die sehr hohen Kosten, momentan kaum wirtschaftlich.

Geothermie:

Erdwärme aus dem Erdinneren hat ein beinahe unerschöpfliches Potenzial als regenerative Energiequelle, welche sowohl zur Erzeugung von Nutzwärme als auch von Strom einsetzbar ist.

Wärme- und Stromgewinnung ist unabhängig von tages- und jahreszeitlichen Schwankungen, wodurch die Geothermie ideal zur Deckung der Grundlast geeignet ist und als Ausgleich zu der mit grossen Schwankungen behafteten Sonnen- und Windenergie dienen kann. Das Potenzial der Geothermie ist sehr gross und deren Erschliessung in kurzer Zeit möglich. Allein die Erschliessungskosten, verursacht durch Bohrtiefen zum Teil über 4000 m, schränken deren Einsatz stark ein.

Wasserstoffwirtschaft:

Wasserstoff gilt als der Energieträger der Zukunft, der jedoch kein in der Natur vorkommender Rohstoff ist. Er muss entweder über einen Reformier aus fossilen Brennstoffen oder mit Hilfe von elektrischem Strom hergestellt werden. Die Nachhaltigkeit der Wasserstoffherstellung ist nur bei der Verwendung von Elektrizität aus erneuerbaren Energien gewährleistet. Der erzeugte Wasserstoff kann in konventionellen Verbrennungsaggregaten oder Brennstoffzellen in elektrischen Strom umgewandelt werden.

Wasserstoff stellt einen Energiespeicher dar, mit welchem die zeitlichen Schwankungen in der Stromproduktion aus erneuerbaren Energieträgern ausgeglichen werden könnten. Für stationäre Anwendungen könnte die Bereitstellung über das vorhandene Erdgasnetz erfolgen. Die Spei-

cherung und der Transport bei mobilen Anwendungen von Wasserstoff muss entweder gasförmig bei Drücken über 250 bar oder in flüssiger Form bei Temperaturen unter minus 253 °C erfolgen, um die nötige Energiedichte zu erreichen. Jedoch stellen Verluste durch Abdampfen von rund 1% pro Tag bis jetzt ein noch nicht gelöstes technologisches Problem dar.

Brennstoffzelle:

Für den Einsatz der Brennstoffzelle zur Energieerzeugung eignen sich vor allem Hochtemperaturzellen, wie die Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) und Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC), welche bei Temperaturen zwischen 600 und 1000 °C arbeiten. Dank den im Vergleich mit konventionellen Anlagen vor allem im Hybridbetrieb mit einer Gasturbine sehr hohen Wirkungsgraden von zurzeit bis zu 70% stellen Brennstoffzellen eine der hoffnungsvollsten Zukunftstechnologien dar. Eine weitere Verbesserung des Wirkungsgrades wird durch Nutzung der heissen Abgase mittels Kraft-Wärme-Kopplung erreicht. Mobile Anwendungen basieren zumeist auf Niedertemperatur-Brennstoffzellen, wie Polymer Membrane Fuel Cell (PEMFC) und Direct Methanol Fuel Cell (DMFC).

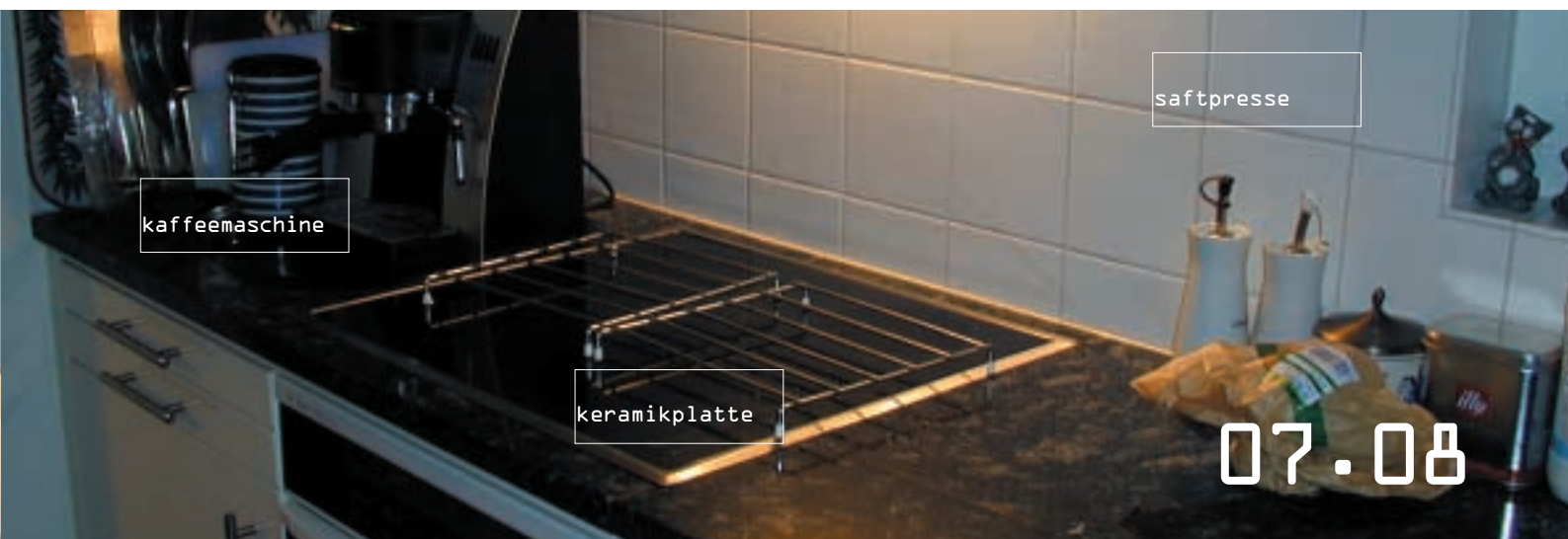
Die Brennstoffzellentechnologie unterliegt noch einer schnellen Entwicklung, und mit einer weiteren Effizienzsteigerung und einer Reduzierung der Anlagenkosten ist in den nächsten Jahren zu rechnen. Durch die hervorragende Skalierbarkeit eignen sich Brennstoffzellen sehr gut für den Einsatz im Rahmen einer dezentralen Energieerzeugung im häuslichen Bereich oder in Form von Blockheizkraftwerken oder kleineren Kraftwerken bis 100 MW. In der nahen Zukunft werden die Brennstoffzellen mit dem Kraftstoff Erdgas betrieben, weshalb in diesem Falle die Emission des Treibhausgases CO₂ nicht

vollständig vermieden werden kann. Durch den hervorragenden Wirkungsgrad und dadurch, dass praktisch keine weiteren Schadstoffe emittiert werden, ist schon jetzt eine sehr umweltfreundliche Technologie vorhanden. Aber erst durch den Betrieb der Brennstoffzelle mit Wasserstoff, der aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen wird, ist wirklich eine nachhaltige Energieerzeugung gewährleistet. Die Brennstoffzellen stellen somit eine Brückenschlagtechnologie in die Wasserstoffwirtschaft dar.

Zukünftige Entwicklungstrends für die Schweiz

Die Schweiz ist in der beneidenswerten Position, schon heute 60% ihres Strombedarfs mit erneuerbaren Energien in Form von Wasserkraft decken zu können. Dieser Bereich könnte in naher Zukunft durch die vermehrte Nutzung der Windenergie ausgebaut werden.

In allen Teilbereichen des Energieverbrauchs bestehen beachtliche Einsparpotenziale. Ein entscheidender Beitrag ist hier durch die erhebliche Steigerung der Wirkungsgrade von fossil-thermischen Energiewandlern zuhause und bei Kraftfahrzeugen zu erwarten. Aber auch für Gebäude, Dienstleistungen und Industrie besteht noch weiteres Potenzial zur Einsparung von Energie. Gas ist als bevorzugter fossiler Brennstoff anzusehen, da er kostengünstig ist und ausserdem dank einem um die Hälfte geringeren Kohlenstoffanteil Vorteile bezüglich der CO₂-Emission gegenüber Kohle und Öl hat. Die Kernenergie mit einem Anteil von rund 40% an der Stromerzeugung der Schweiz kann in der nahen Zukunft nicht durch erneuerbare Energien ersetzt werden. Der vermehrte Einsatz von fossilen Brennstoffen



würde zu erheblich höheren CO₂-Emissionen führen, was nicht mit den Beschlüssen von Kyoto in Einklang zu bringen ist.

Bei Transport und Verkehr muss das Hauptaugenmerk auf der Verbrauchsreduzierung liegen. Ein möglicher Ansatz ist die Entwicklung von hybrid getriebenen, das heisst mit Elektro- und Verbrennungsmotor ausgestatteten Fahrzeugen. Für Flugzeuge und auch Schiffe ist zurzeit kein adäquater Ersatz für fossile Brennstoffe in Sicht.

Die Liberalisierung der Energiewirtschaft wird es zunehmend auch kleineren und mittleren Unternehmen (KMU) ermöglichen, sich am Markt zu etablieren und die Forschung und Entwicklung im Energiesektor in Zusammenarbeit mit Universitäten voranzutreiben. Generell werden an dem rein an marktwirtschaftlichen Gesichtspunkten ausgerichteten liberalisierten Markt Regulierungen durch den Staat nötig sein, um eine weitere intensive Forschung und Entwicklung im Sinne der Beschlüsse von Kyoto sicherzustellen.

Die zunehmend dezentralisierte und auf erneuerbaren Energien basierende Energieerzeugung macht Investitionen in das Stromverteilungsnetz notwendig, um auch weiterhin die Stabilität des Netzes und die

Anbindung aller Anlagen zu gewährleisten. Ein ganz entscheidender Punkt wird die Entwicklung geeigneter Energiespeicherverfahren sein, welche den Ausgleich von Schwankungen über den Tages- und Jahresverlauf von erneuerbaren Energieformen sicherstellen und langfristig den Übergang in die Wasserstoffwirtschaft ermöglichen.

Die Aufgabe von Universitäten besteht darin, das grundlegende Verständnis von physikalischen Prozessen wie Wärme- und Stofftransport, Thermodynamik und chemischer Reaktionskinetik sowie von Energiewandlungssystemen mit fortschrittlichen Experimenten und Simulationen voranzutreiben.

Forschungsinformationen

Das Institut für Energietechnik (IET) der ETH als Center für Energieforschung und Ausbildung in der Schweiz beteiligt sich aktiv an der Forschung im Bereich Energie. Dies geschieht auch in intensiver Zusammenarbeit mit der Industrie, um einen Beitrag zu einer sicheren, umweltschonenden Energieversorgung der Zukunft zu leisten. Aktuelle Forschungsthemen sind:

- Kraftwerkskreislaufsimulation und Optimierung (Labor für Strömungsmaschinen)
- Optimierung von Strömung und Wärmeübergang in Strömungsmaschinen (Labor für Strömungsmaschinen)
- Entwicklung eines Hybridantriebs für Kraftfahrzeuge (Labor für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme)

- Forschung im Bereich verbrauchs- und schadstoffarmer direkteinspritzender Verbrennungsmotoren (Labor für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme)
- Erhöhung der Reaktorsicherheit (Labor für Kerntechnik und Labor für Sicherheitsanalytik)
- Speicherung und Transport von solarer Energie (Labor für erneuerbare Energieträger)
- Modellierung der Biomasseverbrennung mit dem Ziel der Stickoxidreduzierung (Institut für Thermodynamik in neuen Technologien)

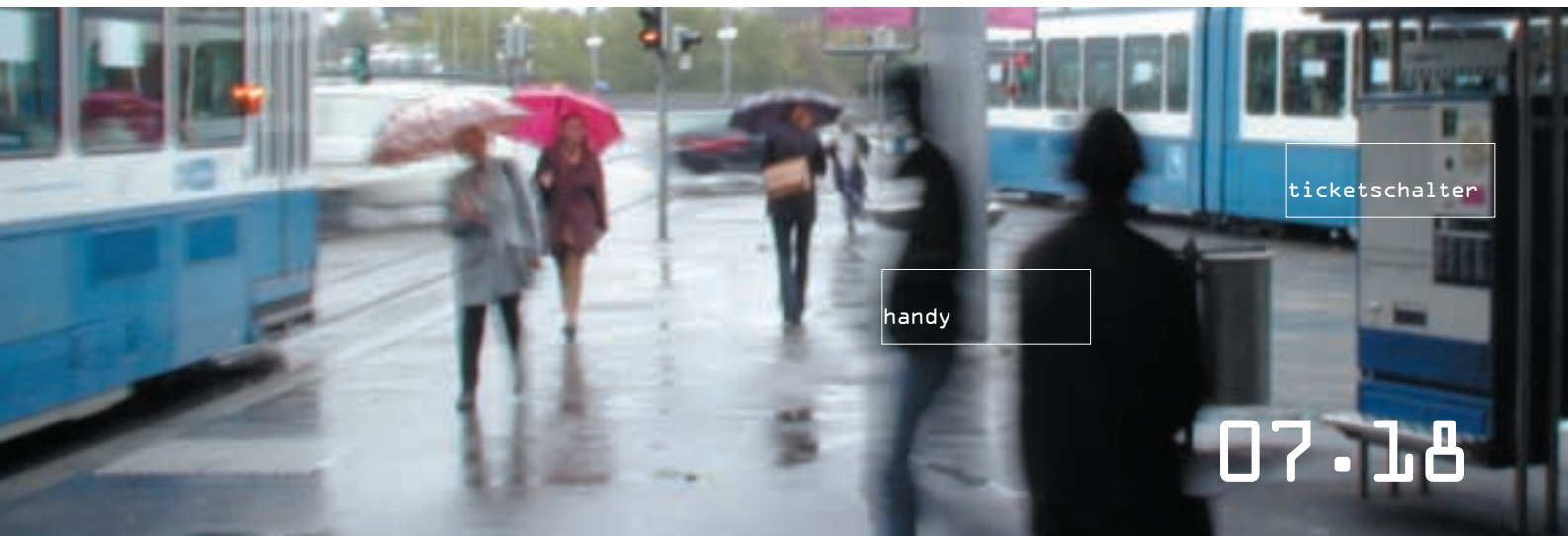
Weitere Informationen unter:
www.iet.ethz.ch
www.lsm.ethz.ch
www.mavt.ethz.ch

Prof. Reza S. Abhari

ordentlicher Professor für Aerothermodynamik und Vorsteher des Instituts für Energietechnik der ETH Zürich

Dr. Hermann Knaus

Technischer Koordinator des Center of Energy Conversion am Departement Maschinenbau der ETH Zürich



Falls Sie nach der Hochschule noch höher wollen.

Da Sie jetzt lange die Hochschule besucht haben, werden Sie Ihre beruflichen Ziele hoch stecken. Und damit Sie diese auch erreichen, helfen wir Ihnen kräftig. Ob als Hotshot oder Trainee: Steigen Sie am besten noch heute bei Swisscom ein. Bei der Nr. 1 der Telekommunikation. Sie erhalten das breiteste Angebot, wahlweise bei Swisscom Fixnet, Swisscom Mobile, Swisscom Enterprise Solutions, Swisscom Systems, Swisscom IT Services, Bluewin oder Conextrade – wir freuen uns auf Sie!

www.swisscom.com/getintouch

SCHWEIZ UND CHINA ALS FALLBEISPIEL

STEFAN HIRSCHBERG

Eine Welt – viele Energieszenarien: die eine Lösung für eine nachhaltige Energiezukunft gibt es nicht, wie ein Vergleich zwischen Modellszenarien für China und für die Schweiz zeigt. Doch trotz der extrem grossen Unterschiede zwischen China und der Schweiz gibt es auch Gemeinsamkeiten. Ein kluger Nutzen aus technologischen Entwicklungen kann helfen, die gesamte Energieversorgung nachhaltiger zu gestalten.

Basierend auf aktuellen Forschungsergebnissen, befasst sich dieser Artikel mit den Optionen der zukünftigen Energieversorgung in so verschiedenen Ländern wie der Schweiz und China, wobei schwergewichtig die Stromversorgung berücksichtigt wurde. Die Unterschiede zwischen diesen beiden Ländern sind enorm, sei es die reine Grösse, der Lebensstandard, der Energieverbrauch pro Kopf, Strukturen und Effizienz der Energiesysteme, das Ausmass der Emissionen oder das wirtschaftliche Wachstum. Darum sind die vordringlichen Aufgaben in der Energiepolitik von China und der Schweiz äusserst verschieden.

Das Fallbeispiel Schweiz

Die Schweiz hat heute eine zuverlässige und praktisch CO₂-freie Elektrizitätsversorgung. Die energiepolitische Debatte fokussiert sich auf die verfügbaren Mittel zur Reduktion der gesamten Treibhausgasemissionen, die Rolle erneuerbarer Energieträger, dezentrale Systeme und Energiesparmassnahmen, die Zukunft der Kernenergie, die «wahren» Kosten der Energieproduktion sowie die Gesamtsystemleistung unter der Bedingung einer nachhaltigen Entwicklung.

Basierend auf der erwarteten Entwicklung der Elektrizitäts- und Wärmenachfrage bis ins Jahr 2030, wurden für die Schweiz verschiedene realistische Energieversorgungsszenarien untersucht (Abb. 1). Diese Szenarien beinhalten unterschiedliche Anteile zentraler fossiler und nuklearer Kraftwerke, Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK), Wärmepumpen und konventioneller Heizungssysteme. Dabei

wurde in allen Szenarien Wasserkraft als Basis für die Elektrizitätsversorgung angenommen. Bei der Bewertung der verschiedenen Versorgungsszenarien wurden technologische Fortschritte konsequent gutgeschrieben und mittels Lebenszyklusanalyse (LCA) die Gesamtemissionen der wichtigsten Luftschadstoffe abgeschätzt. Zusätzlich wurden zukünftige Sparpotenziale und eine starke Förderung erneuerbarer Energien berücksichtigt. Neben den technologischen Fortschritten wurde auch die Dynamik der strukturellen Veränderungen miteinbezogen. Im Wärmesektor schliesst dies die Sanierung von Gebäuden, den Ersatz alter Heizungssysteme und die Akzeptanz neuer Technologien mit ein. Aus methodologischer Sicht ist eine integrierte Behandlung der Elektrizitäts- und Wärmeversorgung erforderlich, um willkürliche Allokationen bei den Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen zu vermeiden.

bremssystem

tramtüre

07.28

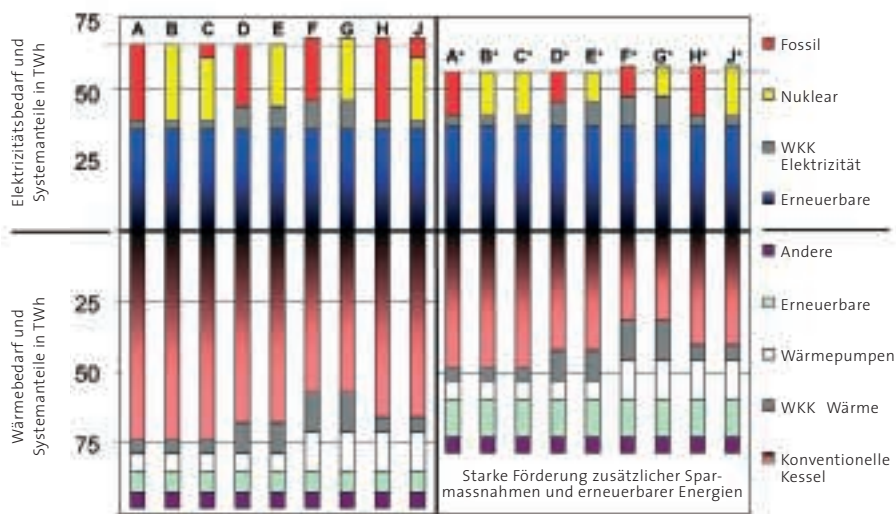


Abb. 1: Definition der Szenarien und Anteile der zukünftigen Energiesysteme für die Schweiz im Jahr 2030 (Quelle: Gantner, Jacob und Hirschberg, 2001).

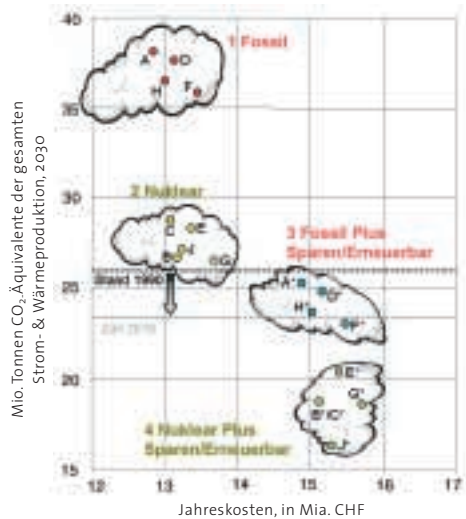


Abb. 2: Gesamte LCA-basierte Treibhausgas-Emissionen und jährliche Kosten der Elektrizitäts- und Wärmeversorgungsoptionen für die Schweiz im Jahr 2030 (Quelle: Gantner, Jacob und Hirschberg, 2001).

Die Szenarien können in vier Grundvarianten eingeteilt werden, die sich bezüglich ihrer Treibhausgasemissionen und Kosten klar unterscheiden (Abb. 1 und 2).

dank Sparmassnahmen auf dem heutigen Stand verbleibt und der Anteil der erneuerbaren Energieträger wesentlich zunimmt, können die Treibhausgasemissionen geringfügig unter den Wert von 1990 reduziert werden, trotz dem Ausstieg aus der Kernenergie. Diese Variante verursacht jedoch signifikant höhere Kosten.

sacher von gesundheitsschädigenden Wirkungen durch Partikeln, dagegen ist der entsprechende Beitrag des schweizerischen Elektrizitätssektors kaum von Bedeutung.

- Variante 1 «Fossil»: Verzicht auf Kernenergie und Ergänzung der Wasserkraft mit primär fossil erzeugter Elektrizität resultiert in geringen Kosten, aber die Treibhausgasemissionen nehmen drastisch zu.
- Variante 2 «Nuklear»: Basierend auf einer angenommenen Zunahme des Wärmebedarfs von 11% und des Elektrizitätsbedarfs von 30% werden die Treibhausgasemissionen leicht zunehmen, auch wenn der aktuelle Elektrizitätsmix aus Wasserkraft und Kernenergie beibehalten wird.
- Variante 3 «Fossil/Sparen/Erneuerbar»: Wenn der Wärmebedarf 10% unter den Wert von 1990 sinkt, der Elektrizitätsbedarf

- Variante 4 «Nuklear/Sparen/Erneuerbar»: Eine starke Reduktion der Treibhausgasemissionen weit unter die Ziele von Kyoto ist möglich, wenn die Kernenergie mit Sparmassnahmen und der Förderung erneuerbarer Energien kombiniert wird wie in Variante 3. Dabei sind etwas höhere Kosten als bei der Variante 3 zu erwarten. Die hier präsentierten Resultate schliessen den Transportsektor nicht ein, der in der Schweiz für ca. 30% der Treibhausgasemissionen verantwortlich ist. Der Transportsektor ist auch der hauptsächliche Verur-

Das Fallbeispiel China

China ist das bevölkerungsreichste Land, und sein rasches wirtschaftliches Wachstum führt zu einem stetig ansteigenden Elektrizitätsbedarf. China ist ausserdem der weltweit grösste Produzent von Kohle, die momentan auch die wichtigste Energiequelle in China darstellt. Im Rahmen des von ABB in Verbindung mit der AGS gesponserten China Energy Technology Program (CETP) untersucht das Paul Scherrer Institut (PSI) zusammen mit schweizerischen (ETHZ und EPFL), amerikanischen (MIT), japanischen (Tokyo University) und mehreren chinesischen Forschungspart-



Mortalität durch Chinas Luftemissionen, alle Sektoren
Heutige Situation

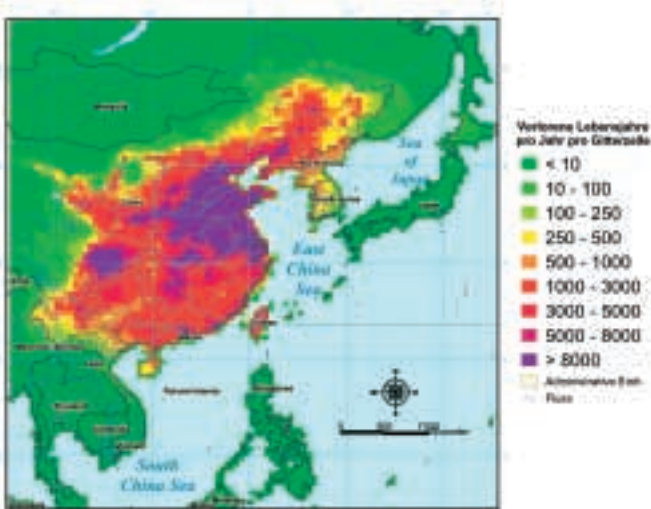


Abb. 3: Multi-source-basierte Verteilung der Mortalität aufgrund der aktuellen Emissionen von Luftschadstoffen aus allen Sektoren in China (Quelle: Hirschberg et al., 2002).

nen, wie die zukünftige Elektrizitätsversorgung in China nachhaltiger gestaltet werden könnte. Ausserdem nehmen Repräsentanten der wichtigsten chinesischen Interessengruppen (Stakeholder) am Programm teil.

Die Ausgangssituation könnte nicht verschiedener sein als im Fall der Schweiz. Momentan erfährt China ein rasches wirtschaftliches Wachstum, und es wird erwartet, dass sich dieser Trend fortsetzt. Die daraus resultierenden Umweltschäden in der Luft-, Boden- und Wasserqualität wirken sich jedoch negativ auf die Wachstumsrate aus. Denn parallel zum wirtschaftlichen Wachstum steigt der Elektrizitätsbedarf, der hauptsächlich durch Kohle gedeckt wird. Deshalb müssen neben den dominierenden gesundheitsschädigenden Auswirkungen auch die Schwefeldepositionen und die daraus resultierende Versauerung von Böden und Gewässern als primärer Umwelteffekt berücksichtigt werden. Beispiele von Schädigun-

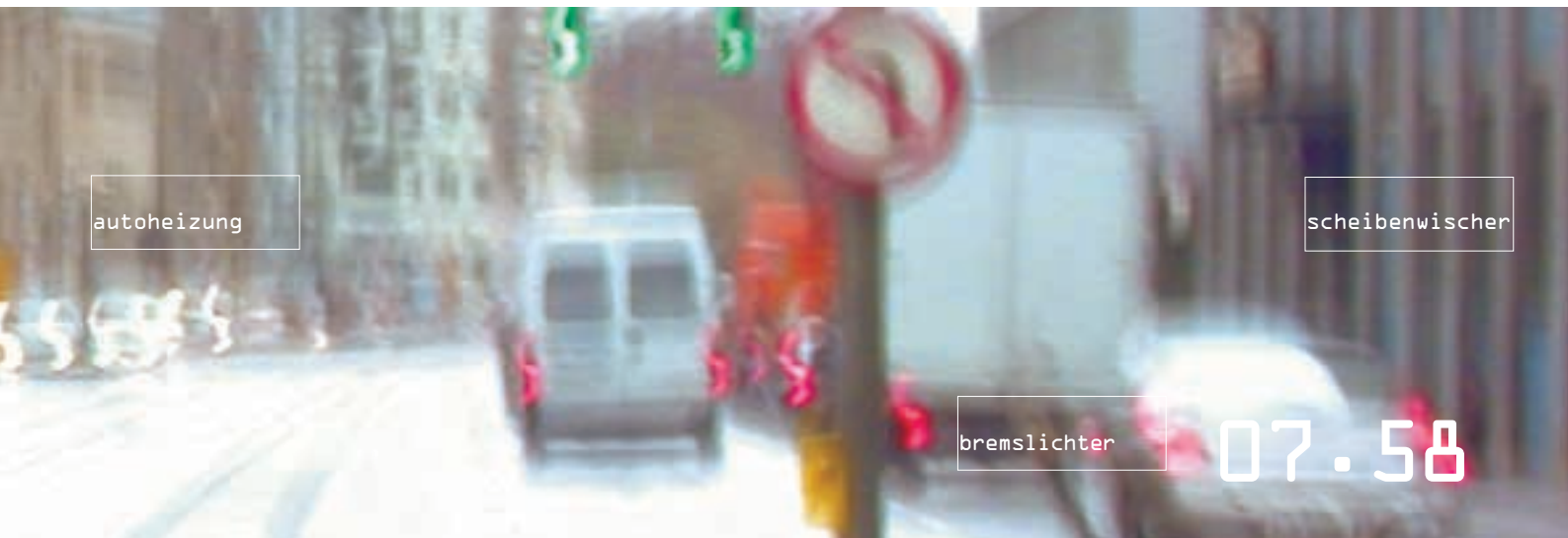
gen sind etwa Asthmaanfälle, verringerte Lebenserwartung oder nachteilige Umwelteinflüsse wie Ernteverluste. In der vorliegenden Arbeit wurden die untersuchten Effekte auch als Basis für die monetäre Bewertung verwendet, die ein Indikator für die Minderung des Wohlstandes ist.

Die durchgeführten Analysen führten zu mannigfaltigen Resultaten und Einsichten, die für China als Ganzes relevant sind. Detaillierte Modellberechnungen zukünftiger Szenarien für die Elektrizitätsversorgung beschränkten sich auf die Provinz Shandong im Osten Chinas. Mit einer Bevölkerung von ca. 90 Millionen und einer Fläche von ca. 160 000 km² ist Shandong eine der am meisten industrialisierten und energieintensivsten Regionen des Landes. Gegenwärtig wird die Elektrizität in Shandong fast ausschliesslich aus Kohle produziert.

Abbildung 3 zeigt die Verteilung der erwarteten Sterblichkeit in Millionen verlorenen Lebensjahren (years of life lost, YOLL) pro Jahr, verursacht durch die Luftverschmutzung in China. Diese Schätzungen basieren auf Simulationen der Ausbreitung der ausgestossenen Schadstoffe. Gemäss diesen Berechnungen sterben in China jedes Jahr ungefähr eine Million Personen vorzeitig als Folge der Luftverschmutzung. Der Gesamtschaden entspricht einem Wohlstandsverlust von 6 bis 7% des chinesischen Bruttosozialprodukts. Die gesundheitsschädigende Wirkung entsteht vor allem durch sogenannte sekundäre Partikeln, die bei der chemischen Umwandlung von SO₂ und NO_x in Sulfate und Nitrate entstehen. Die resultierenden Schadenskosten aus dem chinesischen Kraftwerkssektor betragen 4,3 US-Cents pro kWh, was ungefähr doppelt so hoch ist wie die gegenwärtigen Gestehungskosten. Der chinesische Kraftwerkssektor trägt ca. 25% zu den gesamten Schadenskosten bei.

Die Emissionen von SO₂, NO_x und Partikeln sorgen beim momentanen Zustand der Umwelt in China für die grösste Besorgnis, wogegen eine Reduktion der Treibhausgasemissionen gegenwärtig aus chinesischer Sicht keine hohe Priorität genießt. Aus diesem Grund ist es zweckmässig, sich auf ökonomisch sinnvolle Optionen zu konzentrieren, welche die Gesundheits- und Umweltschäden auf ein akzeptables Niveau absenken, gleichzeitig aber zu einer Verbesserung der Verhältnisse in Bezug auf die Treibhausgase führen.

Abbildung 4 zeigt die Resultate einer Kosten-Nutzen-Analyse für zwei ausgewählte Elektrizitätsversorgungsszenarien für die Provinz Shandong im Jahr 2020 im Vergleich zu einem Szenario, das weiterhin auf der Nutzung von Kohle ohne Rauchgasentschwefelungsanlagen (REA) basiert. Die



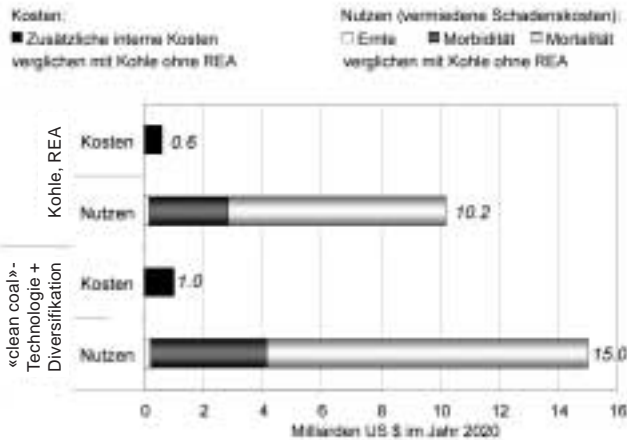


Abb. 4: Kosten-Nutzen-Analyse der «sauberen» Szenarien im Vergleich zu den «schmutzigen»; CO₂-Schadenskosten sind nicht eingeschlossen (Quelle: Hirschberg et al., 2002).

beiden saubereren Szenarien sind: (1) Konventionelle Kohle mit REA und (2) Verbesserung/Erneuerung der aktuellen Kraftwerksgeneration durch Stilllegung alter Kraftwerke und Nachrüstung (REA) zusammen mit sogenannten «clean-coal»-Technologien, Nutzung von Kernenergie und Erdgas. Da die relativen Unterschiede bei den internen Kosten gering ausfallen, sind die Gesamtkosten (interne und externe Kosten) der umweltfreundlichen Strategien deutlich tiefer als jene von anscheinend billigen, «schmutzigen» und nicht nachhaltigen Strategien. Die Vermeidungskosten für ausgewählte Szenarien sind mehr als eine Grössenordnung kleiner als die Gewinne durch verringerte externe Kosten. Die zusätzlichen internen Kosten sind sogar noch tiefer als die Schadenskosten, die aus Ernteausfällen und Morbidität entstehen.

Gemäss der CETP-Analyse ist gegenwärtig etwa ein Viertel von China erhöhten Versauerungsrisiken ausgesetzt. Eine schwache Kontrolle der Verschmutzung würde zu einer weiteren Verschlechterung führen, während stärkere SO₂-Kontrollmechanismen die Fläche der gefährdeten Gebiete auf 15% reduzieren würden, und zwar trotz dem vorausgesagten starken Nachfragewachstum.

Unterschiedliche Prioritäten

Wie am Beispiel der Schweiz und Chinas illustriert, können Energieprobleme in industrialisierten Ländern und Entwicklungsländern hinsichtlich Ausmass und Charakter ganz unterschiedlich sein. Im Fall der Schweiz würde ein Wechsel zu einer fossilbasierten Elektrizitätsversorgung zu einer drastischen Erhöhung der hausgemachten Treibhausgasemissionen führen, auch wenn

fortschrittliche Systeme und dezentrale Wärme-Kraft-Kopplungssysteme realisiert würden. Fortgesetzte Verwendung von Kernenergie, kombiniert mit starker Förderung von Sparmassnahmen und «neuen» erneuerbaren Energien, würde mittelfristig ziemlich grosse Treibhausgasreduktionen mit sich bringen. Die damit verbundenen Kosten würden zwar signifikant ansteigen, jedoch nicht in dramatischen Umfang. Das mittelfristige Potenzial «neuer» erneuerbarer Energien ist beträchtlich bei der Wärmeerzeugung, aber stark beschränkt bei der Elektrizitätsproduktion. Das ökonomische Potenzial der Sparmassnahmen im Elektrizitäts- und Wärmebereich ist grösser als das mittelfristige Potenzial der erneuerbaren Energien, erfordert aber Investitionen in der Grössenordnung von 25 bis 30 Milliarden Schweizer Franken. Es ist auch erwähnenswert, dass ein Ausbau der Nutzung von Wärmepumpen umweltschonend erfolgen kann, wenn die notwendige Elektrizität aus dem aktuellen Schweizer Strommix oder fortschrittlichen fossilen Kraftwerken stammt.

Kohle wird noch während langer Zeit der dominante Energieträger in China bleiben. Basierend auf den aktuellen Trends ist eine Reduktion der wichtigsten Luftschadstoffemissionen aus dem Elektrizitätssektor und die damit verbundenen Gesundheits- und Umweltschäden möglich sowie ökonomisch und sozial gerechtfertigt. Kosteneffiziente Strategien wurden identifiziert, die zu einer Reduktion der Emissionen der wichtigsten Luftschadstoffe und einem verminderten Anstieg der Treibhausgase führen. Die Anwendung von «clean-coal»-Technologien, Erdgas sowie der Ausbau von Wasserkraft, Windkraft und Kernenergie, kombiniert mit der Förderung von nachfrageorientierten Massnahmen, bietet Alternativen, welche kon-

tinuierliches Wachstum sowie einen akzeptablen Zustand der Umwelt ermöglichen. Das CETP stellt eine Plattform dar, um alternative Möglichkeiten zu untersuchen und Kompromisse im Sinne der Nachhaltigkeit zu finden, basierend auf den Präferenzen der verschiedenen Interessengruppen. Zu diesem Zweck entwickelt das PSI mit Unterstützung von allen CETP-Forschungspartnern ein integriertes Softwarepaket, das es interessierten Kreisen erlauben wird, sowohl das weite Spektrum an Resultaten des CETP zu erkunden als auch eigene Analysen durchzuführen.

Forschungsinformationen

Das GaBE-Projekt am Paul Scherrer Institut befasst sich mit Energiesystemanalysen. Ziel ist eine umfassende und detaillierte Beurteilung heutiger und zukünftiger Energiesysteme. Dabei kombiniert der Ansatz die Methoden der Lebenszyklusanalyse, der Einschätzung von Umweltauswirkungen, der Risikoanalyse sowie energieökonomische Modelle. Darüber hinaus werden Aggregierungsmethoden wie Gesamtkostenanalyse (interne und externe Kosten) und Multi-Kriterien-Entscheidungsanalyse (Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA) angewendet. Eine auf verschiedenen Nachhaltigkeitskriterien und den zugehörigen Indikatoren basierende MCDA ermöglicht es, die Erkenntnisse aus den detaillierten Analysen mit individuellen oder gruppenspezifischen Präferenzen zu kombinieren. Im aktuellen China Energy Technology Program (CETP), das unter der Schirmherrschaft der Alliance for Global Sustainability (AGS) steht, wurde die GaBE-Methodik ausgebaut und weiterentwickelt. Dabei wurden auch Erfahrungen aus dem vor kurzem abgeschlossenen SESAMS-Projekt der AGS miteinbezogen.

Newsletter: Energie-Spiegel; erscheint alle vier Monate.

Internet: www.psi.ch/gabe

Kontakt: Dr. Ing. Stefan Hirschberg
Leiter Ganzheitliche Systemanalysen
Paul Scherrer Institut

CH-5232 Villigen PSI, Tel. +41 56 310 2956
oder +41 56 310 2740 Fax +41 56 310 4411
E-Mail: stefan.hirschberg@psi.ch

Dr. Ing. Stefan Hirschberg

Leiter Ganzheitliche Systemanalysen
Paul Scherrer Institut PSI

DIE KRAFT DER SONNE

ALDO STEINFELD, ANTON MEIER

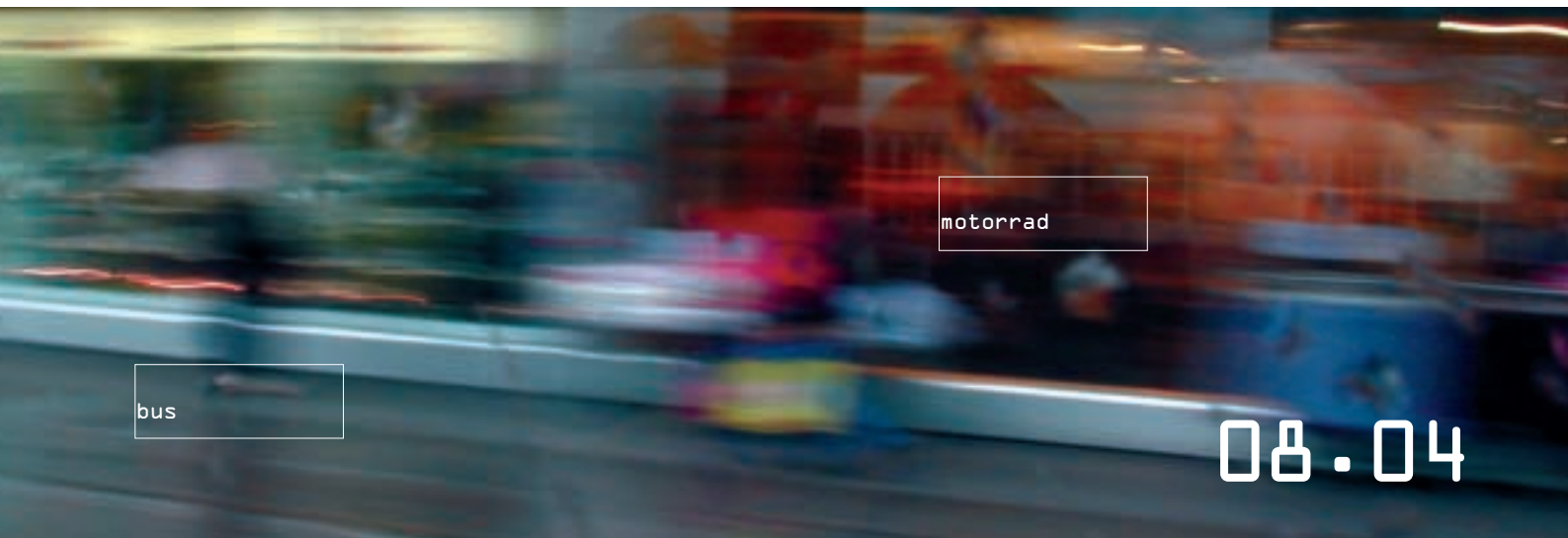
Die Sonne als umweltfreundlicher Energielieferant ist schon lange im Gespräch. Bisher beschränkten Speicher- und Transportprobleme jedoch die Nutzung dieser unerschöpflichen Energiequelle. Neuartige Methoden zur Speicherung und zum Transport der Sonnenenergie in Form von solaren Brennstoffen machen die Solarenergie zur vielseitig einsetzbaren Energieform der Zukunft.

Mittels thermochemischer Hochtemperatur-Prozesse lässt sich Sonnenenergie effizient in speicherbare und transportierbare chemische Brennstoffe wie Wasserstoff und Methanol umwandeln. Konzentrierte Solarstrahlung kann auch die Prozesswärme für die Herstellung von energieaufwändigen Materialien (zum Beispiel Metallen, Zement) sowie für die Wiederverwertung von Abfallstoffen liefern. Dadurch lässt sich der Ausstoss von Treibhausgasen und anderen Schadstoffen vermeiden, der durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen zur Wärme- und Stromproduktion verursacht wird. Solare Brennstoffe ermöglichen eine umweltfreundliche Energieversorgung bei zentralen und dezentralen Anwendungen im Elektrizitäts-, Transport- und Chemiesektor der Weltenergiewirtschaft und leisten damit einen Beitrag zur Lösung der Klimaproblematik.

Auf lediglich 0,1% des verfügbaren Landes liesse sich mittels Solaranlagen mit einem Wirkungsgrad von 20% so viel Energie gewinnen, dass der gegenwärtige Energiebedarf sämtlicher Bewohner dieses Planeten gedeckt werden könnte. Die Sonnenenergie ist im Wesentlichen uneingeschränkt vorhanden, und ihre Verwendung ist ökologisch sinnvoll. Allerdings ist die auf die Erde treffende Solarstrahlung stark verdünnt, nicht dauernd verfügbar sowie ungleichmässig über die Erdoberfläche verteilt. Diese Nachteile können überwunden werden, wenn die Solarenergie konzentriert und in chemische Energieträger umgewandelt wird, und zwar in Form von solaren Brennstoffen, die über lange Zeit gespeichert und über weite Distanzen transportiert werden können.

Die Werkzeuge, mit denen solare Brennstoffe für das 21. Jahrhundert hergestellt werden können, finden sich schon in den

Schriften zweier herausragender Gelehrter des 19. Jahrhunderts, Carnot und Gibbs. Die beiden Wissenschaftler gehörten zu den wichtigsten Begründern der Thermodynamik. In Abbildung 1 ist das thermodynamische Rezept für die Umwandlung von Solarenergie in chemische Energie dargestellt: mit Hilfe von parabolischen Spiegeln wird das einfallende Sonnenlicht konzentriert und als Hochtemperaturwärme für endotherme chemische Reaktionen benutzt. Der maximale Wirkungsgrad eines solchen Energieumwandlungsprozesses ist durch den Carnot-Wirkungsgrad einer äquivalenten Wärmekraftmaschine begrenzt: mit der Sonne als Wärmereservoir bei einer Temperatur von 5800 K, die bei maximaler solarer Konzentration erreichbar ist, und mit der Erde als Wärmesenke könnte im Prinzip 95% der Sonnenenergie in chemische Energie von Brennstoffen umgewandelt werden. Natürlich liegt es



bus

motorrad

08.04

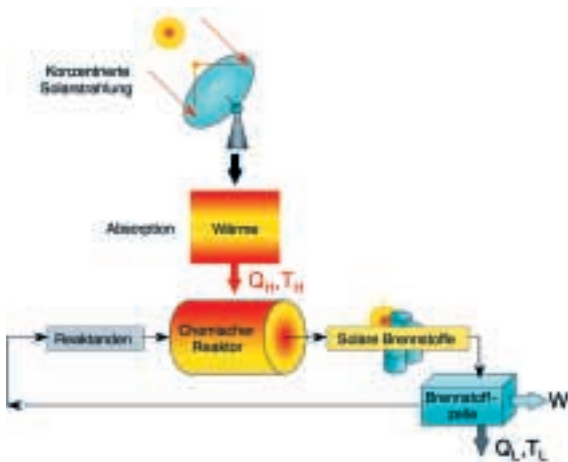


Abb. 1: Schematische Darstellung der Umwandlung von Sonnenenergie in solare Brennstoffe.

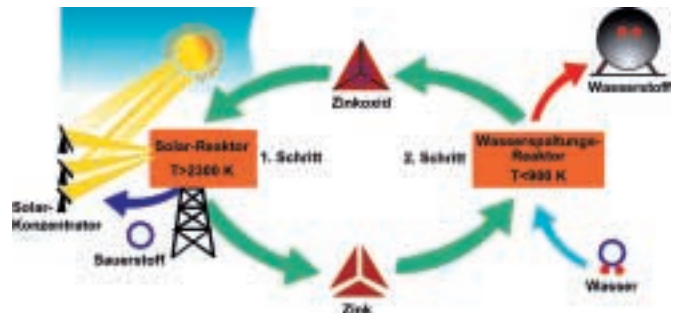
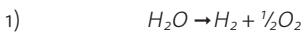


Abb. 2: Zweistufiger thermochemischer Zyklus für die solare Herstellung von Wasserstoff aus Wasser.

an uns, eine geeignete Technologie zu entwerfen und zu entwickeln, um möglichst nahe an diese Grenze heranzukommen.

Solarthermische Produktion von Wasserstoff

Ein potenziell sehr attraktiver chemischer Prozess ist die solarthermische Produktion von Wasserstoff aus Wasser. Bei hohen Temperaturen über 2500 K und abhängig vom Druck spaltet sich Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff. Dieser Prozess wird als Thermolyse von Wasser bezeichnet:

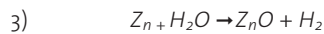


Die direkte Wasserspaltung wäre ein genial einfaches Konzept, doch fehlt bislang eine wirksame Technik zur Trennung des explosiven Gemischs aus Wasserstoff und Sauerstoff bei hohen Temperaturen. Dieses Trennungsproblem kann mittels thermochemischer Wasserspaltungs-Zyklen umgangen werden, die auf sogenannten Metalloxid-Redox-Systemen basieren. Wie

diese Idee funktioniert, zeigt Abbildung 2 schematisch am Beispiel des Zinkoxid-Redox-Systems. In einem ersten, endothermen Schritt wird Zinkoxid im Brennpunkt eines Solarkonzentratoren bei einer Temperatur von nahezu 2300 K reduziert:



In einem zweiten, exothermen Schritt lässt man Zink mit Wasser reagieren, wobei reiner Wasserstoff frei wird:



Die Nettoreaktion entspricht der Gleichung (1), wobei Wasserstoff und Sauerstoff in verschiedenen Schritten anfallen und somit nicht getrennt werden müssen. Im Gegensatz zur konventionellen Herstellung via Reformierungsprozesse ist der solare Wasserstoff nicht durch kohlenstoffhaltige Gase kontaminiert und kann direkt in PEM-Brennstoffzellen verwendet werden.

Entwicklung von Hochtemperatur-Solarreaktoren

Die Forschung auf dem Gebiet der Hochtemperatur-Solarchemie an der ETH und am PSI verbindet grundlegende physikalische und chemische Studien mit der verfahrenstechnischen Entwicklung von solarchemischen Reaktoren. Ein Solarreaktor für die Zinkoxid-Dissoziation bei 2300 K (Gleichung 2) ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Diese Reaktorkonfiguration besteht aus einem rotierenden Hohlraum-Receiver, dessen Wände infolge der Zentrifugalkraft mit einer dicken pulverförmigen Zinkoxid-Schicht bedeckt sind. Das Zinkoxid ist direkt der hochkonzentrierten Solarstrahlung ausgesetzt und dient gleichzeitig als Strahlungsabsorber, Wärmeisolator und chemischer Reaktand. Dieses Reaktorkonzept wurde mit einem 10-kW-Prototyp im Hochfluss-Solarofen des PSI demonstriert. Die weiteren Arbeiten bei der Reaktorentwicklung konzentrieren sich darauf, optimale Betriebsbedingungen zur Erreichung eines maximalen Exergie-Wirkungsgrades zu finden.



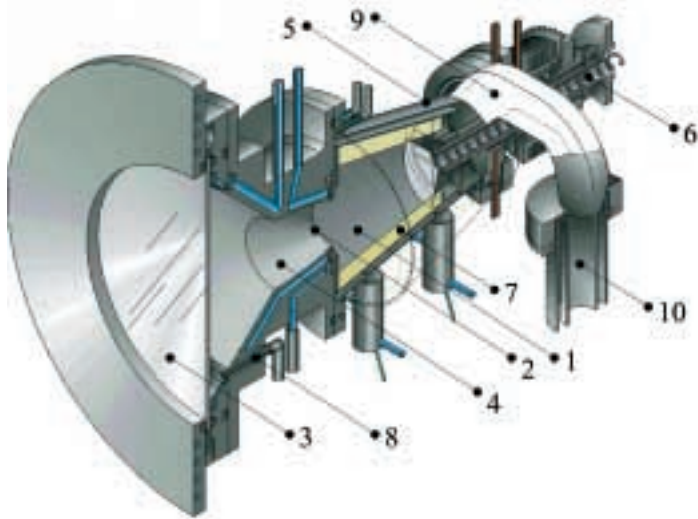


Abb. 3: Schema (links) eines solarchemischen Reaktors für die solarthermische Dissoziation von ZnO bei 2300 K. Legende: 1 = rotierender Hohlraum-Receiver, 2 = Eintrittsöffnung für konzentrierte Solarstrahlung, 3 = Quarzfenster, 4 = Sekundärkonzentrator, 5 = äussere Inconel-Wand, 6 = ZnO -Förderanlage, 7 = ZnO -Schicht, 8 = Inertgas-Einlass, 9 = Produktgas-Auslass, 10 = Zn -Quench-Vorrichtung.

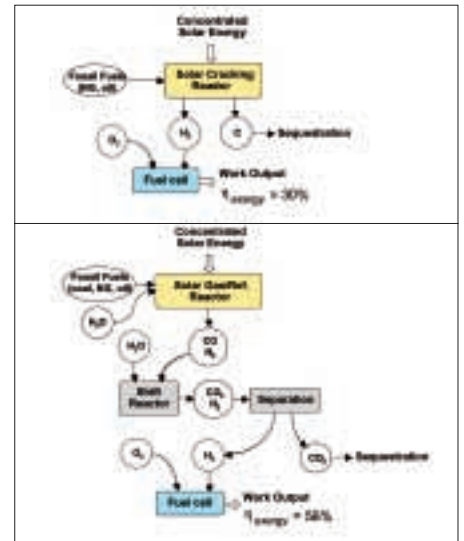


Abb. 4: Schema von zwei solaren Hybrid-Prozessen für die Dekarbonisierung von fossilen Brennstoffen zur Herstellung von Wasserstoff und Strom.

Ein zentraler Aspekt unserer Forschungsarbeit ist die Modellierung des Wärme- und Stofftransports in chemischen Reaktor-Systemen. Vor allem die Strahlungsübertragung, gekoppelt mit der chemischen Reaktionskinetik, bildet ein komplexes Phänomen, welches wir mit CFD («Computational Fluid Dynamics») und Monte-Carlo-Ray-Tracing-Methoden simulieren. Diese Modelle dienen dem fundamentalen Verständnis der solaren thermochemischen Prozesse und deren Optimierung.

«Upgrade» von fossilen Brennstoffen durch Sonnenenergie

Die Substitution von fossilen Brennstoffen durch solare Brennstoffe, zum Beispiel solaren Wasserstoff, ist ein längerfristiges Ziel, zu dessen Verwirklichung die Entwicklung neuartiger Technologien erforderlich ist. Aus strategischen Gründen ist es je-

doch erstrebenswert, mittelfristig hybride Prozesse zu entwickeln, die fossile Brennstoffe ausschliesslich als chemische Edukte verwenden, während die Solarenergie die benötigte Prozesswärme liefert. Dadurch wird die Qualität beziehungsweise der Heizwert dieser Brennstoffe erhöht. Solche Brennstoffe sind deshalb sauberer als die ursprünglichen fossilen Brennstoffe. Die hybriden Prozesse schaffen eine Verbindung zwischen den heutigen fossilen Technologien und den zukünftigen solarchemischen Technologien und ermöglichen den Übergang zu den solaren Brennstoffen. Ein Beispiel ist die carbothermische Reduktion von Zinkoxid bei 1300 K unter Verwendung von Kohle oder Erdgas als Reduktionsmittel. Im Rahmen eines EU-Projekts mit massgeblicher Schweizer Beteiligung (ETH/PSI) wird gegenwärtig die Reaktortechnologie für 500 kW solare Leistung entwickelt.

Abbildung 4 zeigt zwei hybride solarther-

mische Prozesse, nämlich «Cracking» und «Gasification/Reforming» von fossilen Brennstoffen. Diese werden in Wasserstoff umgewandelt und gleichzeitig dekarbonisiert, wobei der Kohlenstoffanteil entfernt wird, um CO_2 -Emissionen zu verhindern. Durch die Verwendung von Solarenergie als Prozesswärme wird der Brennstoff-Heizwert erhöht.

Solarthermische Wiederverwertung von Abfallstoffen

Solarthermische Prozesse eignen sich gut für die Behandlung und Wiederverwertung von komplexen Abfallstoffen aus vielfältigen Quellen (zum Beispiel Verbrennungsrückstände von Hausmüll, entladene Batterien sowie Beiprodukte der metallurgischen Industrie). Abfälle mit kohlenhaltigen Verbindungen lassen sich durch Pyrolyse und Vergasung in Synthesegas

und Kohlenwasserstoffe umwandeln, die zu wertvollen synthetischen Chemikalien weiterverarbeitet werden können. Abfälle mit Metalloxiden können durch carbothermische Reduktion in Metalle, Nitride, Carbide und andere metallische Verbindungen umgewandelt werden. Die chemischen Produkte dieser Umwandlungen sind Ausgangsstoffe für eine Reihe von Fertigungsprozessen und können auch als Brennstoffe verwendet werden. In Zusammenarbeit mit einem Industriepartner entwickelten PSI und ETH einen solarchemischen Reaktor, der die Wiederverwertung von geschredderten Autorückständen («Auto-Resh») und von Filterstaub aus Schmelzöfen («Electric arc furnace dust», EAFD) ermöglicht. Bei Experimenten im Solarofen des PSI ist es weltweit erstmals gelungen, mit konzentrierter Solarstrahlung Blei- und Zinkoxide aus EAFD bei 1600 K carbothermisch zu reduzieren (Abbildung 5).

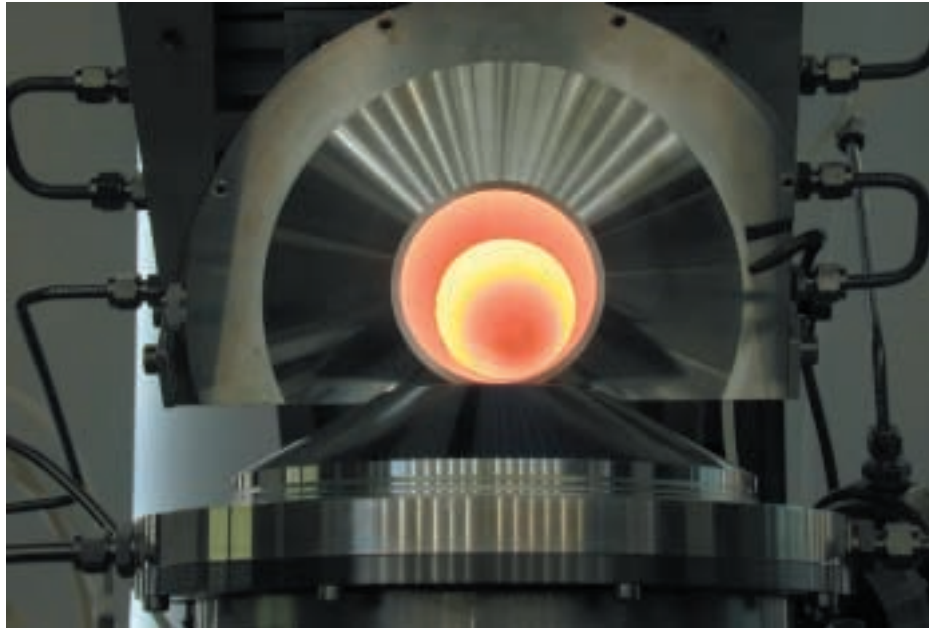


Abb. 5: Solarreaktor im Solarofen des PSI, kurz nach Beendigung eines Experiments zur Wiederverwertung von Filterstaub (EAFD).

Solarthermische Herstellung von Kalk und Zement

Die Herstellung von Kalk (CaO) geschieht durch die thermische Zersetzung von Kalkstein (hauptsächlich CaCO₃):



Die Verwendung von konzentrierter Solarenergie anstelle von fossilen Brennstoffen als Wärmequelle reduziert einerseits die Abhängigkeit der Kalk- und Zementindustrie von konventionellen Energiequellen und vermindert andererseits den Ausstoss von CO₂ und anderen Schadstoffen. Zu diesem Zweck entwickeln PSI und ETH zusammen mit einem Industriepartner eine solare Technologie, um hochreinen Kalk herzustellen, beispielsweise für spezielle Anwendungen in der chemischen und pharmazeutischen Industrie. Vorerst wurde ein Solarreaktor im Leistungsbereich von 10 kW gebaut und im Hochfluss-Solarofen des PSI getestet. Es zeigte sich, dass im Solarreaktor vollständig gebrannter Kalk mit beliebiger Qualität effizient hergestellt werden kann. Die experimentell ermittelten Daten werden nun mit einem numerischen Modell extrapoliert, um zusammen mit aktueller Information über die zu erwartenden Kosten der solaren Technologie die Gesteungskosten einer solaren Kalzinierungsanlage im Leistungsbereich von 500 kW abzuschätzen.

Solare Thermochemie bald konkurrenzfähig?

Es bestehen gute Aussichten, dass die solaren thermochemischen Technologien gegenüber konventionellen, auf fossilen Energieträgern basierenden Technologien konkurrenzfähig werden. Dies zeigen Ergebnisse von Studien, die in Projekten an der ETH und am PSI in Zusammenarbeit mit der Internationalen Energie-Agentur (IEA) und industriellen Partnern durchgeführt wurden. Voraussetzung dazu ist allerdings, dass die externen Kosten für die Verbrennung fossiler Brennstoffe berücksichtigt werden.

Unsere Forschung auf dem Gebiet der Hochtemperatur-Solarchemie bezweckt langfristig die Entwicklung von Brennstoffen, die mit einer sauberen, universellen und nachhaltigen Energiequelle hergestellt werden können. Solare Brennstoffe können für eine umweltfreundliche Energieversorgung genutzt werden und damit einen Beitrag zur Lösung der Klimaproblematik leisten.

Dank: Die Forschungsprogramme auf dem Gebiet der Solarchemie an der ETH und am PSI werden teilweise finanziert vom Bundesamt für Energie (BFE), vom Bundesamt für Bildung und Wissenschaft (BBW), vom Schweizerischen Nationalfonds (SNF) und von der Baugarten-Stiftung.

Forschungsinformationen

An der Professur für Erneuerbare Energien wird intensiv nach Möglichkeiten gesucht, erneuerbare Energiequellen in speicherbare und transportable chemische Brennstoffe umzuwandeln. Es besteht eine enge Zusammenarbeit mit dem PSI. Weitere Informationen unter:

www.pre.ethz.ch
<http://solar.webpsi.ch>
aldo.steinfeld@eth.ch
anton.meier@psi.ch

Literatur

Steinfeld A., Palumbo R., «Solar Thermochemical Process Technology», Encyclopedia of Physical Science and Technology, R. A. Meyers Ed., Academic Press, Vol. 15, pp. 237–256, 2001.

Prof. Dr. Aldo Steinfeld

Institut für Energietechnik am Department Maschinenbau und Verfahrenstechnik der ETH Zürich und Labor für Solartechnik, PSI Schweiz

Dr. Anton Meier

Labor für Solartechnik, Forschungsbereich Allgemeine Energie, Paul Scherrer Institut Schweiz

ANTRIEBSSYSTEME FÜR AUTOMOBILE DER ZUKUNFT

CH. BACH, K. BOULOUCHOS, L. GUZZELLA

Der Wunsch nach Mobilität wird in Zukunft auf der ganzen Welt stark zunehmen. Die Befriedigung dieser Bedürfnisse mit Antriebssystemen, welche vernachlässigbare Schadstoffemissionen und minimalen Treibstoffverbrauch aufweisen, ist eine Herausforderung. Die Suche nach Erfolg versprechenden Alternativen zu Benzin und Diesel kann nur durch gemeinsame Forschungsanstrengungen in diversen Ingenieurdisziplinen gemeistert werden.

Die Mobilität von Personen und der Transport von Gütern nimmt in der industrialisierten Welt etwa ein Drittel des gesamten Primärenergieverbrauchs für sich in Anspruch. Zudem weist dieser Energiesektor, vor der Stromerzeugung und der Heizungswärme, die höchsten Zuwachsraten auf. Die grössten Beiträge zu dieser Entwicklung liefern einerseits der automobiler Freizeitverkehr und andererseits der Güterverkehr. Da flüssige Kraftstoffe, davon heute praktisch zu 100% Kohlenwasserstoffe aus fossilen Quellen, den Transportmarkt dominieren, stellt die weltweite Mobilität eine wesentliche Variable bei allen Szenarien zur Klimaveränderung bzw. zur Entwicklung der anthropogenen CO₂-Emissionen dar. Fossile Brennstoffe sind unter anderem aufgrund ihrer spezifischen Energiedichte (siehe Abb. 1), Handhabung und etablierter Infrastruktur der bevorzugte Treibstoff.

Benzin und Diesel dominant

In Personenwagen und Nutzfahrzeugen haben sich mit Benzin oder Diesel betriebene Hubkolbenmotoren praktisch zu 100% durchgesetzt. Nur eine relativ kleine Anzahl Elektro- und Hybridfahrzeuge wird heute am Markt angeboten. Die Leistungsdaten dieser Systeme und deren Kostenvorteile lassen eine spürbare Marktdurchdringung aber nur dort erwarten, wo spezielle Randbedingungen anzutreffen sind. So lange weitgehend fossile Primärenergiequellen zur Stromerzeugung verwendet werden, sind die erwarteten Gewinne in Bezug auf den totalen CO₂-Ausstoss («well-to-wheel», das heisst inklusive aller vorgelagerten Prozesse zur Treibstoffbereitstellung) zudem eher bescheiden (siehe Abb. 5).

Neben der Verminderung des Schadstoffgehalts im Abgas stellen heute die CO₂-Reduktion und die Ressourcenschonung wichtige Ziele dar. So hat die Ratifizierung des Kyoto-Protokolls zu weitgehenden Selbstverpflichtungen der Automobilindustrie geführt. Dabei sollen bis 2008 die CO₂-Emissionen der neu in Verkehr gebrachten Personenwagen gegenüber 1995 um 25% gesenkt werden. Die Anforderungen des Gesetzgebers hinsichtlich niedrigsten Emissionen und guten Verbrauchswerten stehen jedoch oftmals in Konflikt zueinander. Neben der Weiterentwicklung der bestehenden Antriebs- und Abgasreinigungssysteme ist deshalb die Entwicklung von Alternativen im Bereich der Antriebstechnologien und/oder der Treibstoffe eine grosse Herausforderung, an deren Bewältigung sich auch der ETH-Bereich intensiv beteiligt.

neon

tachometer

08.22

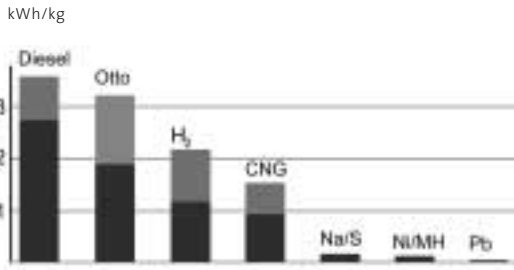


Abb. 1: Energiedichten (kWh mechanische Arbeit am Rad pro kg Energieträgermasse an Bord) für verschiedene Energieträger (CNG = Compressed Natural Gas, Na/S Natrium-Schwefel-Hochtemperaturbatterie, Ni/MH = Nickel-Metallhydrid, Pb = Blei-Gel-Batterie). Die Werte variieren je nach Wirkungsgrad der Energiewandlung und der verwendeten Speichertechnologie.

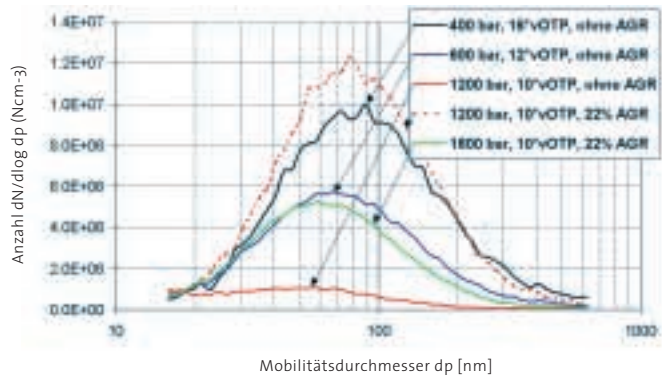


Abb. 2: Minimierung der Russpartikelkonzentration bei einem konstanten NO_x-Wert (fixiert bei 8 g/kWh) im Abgas eines Nutzfahrzeugforschungsmotors. Parameter: Einspritzdruck (400 bis 1600 bar) und Abgasrückführrate (AGR 0 bis 22%).

Thermochemische Antriebe

Die Effizienz der Kraftstoffenergieumsetzung in Verbrennungskraftmaschinen hängt einerseits von der thermodynamischen Prozessführung ab und ist somit nach oben hin grundsätzlich begrenzt. Andererseits tragen Wandwärme- und mechanische Verluste zur weiteren Reduktion des Gesamtwirkungsgrads bei. Schliesslich erfordert eine Minimierung gewisser Schadstoffe, vor allem der Stickoxide, moderate maximale Temperaturen des Arbeitsmediums, was einen suboptimalen Wirkungsgrad des Prozesses zur Folge hat. Konkret sieht die Situation bei gängigen und zukünftigen Verbrennungsverfahren folgendermassen aus:

Homogene Verbrennung mit externer Zündung: Es handelt sich hier um die Vormischverbrennung in benzin- oder erdgasbetriebenen Ottomotoren. Selbstzündung (Klopfen) bei Volllast, Drosselverluste aufgrund der Quantitätsregelung bei niedriger Leistung, mechanische Verluste und Antrieb der Nebenaggregate im PW-Fahrzyklus bei üblicherweise überdimensionierten Motoren begrenzen wesentlich die Effizienz des Antriebs.

Hubraumverkleinerung mit flexibler Aufladung, variable Ventilsteuerung, Kombination von hoher Turbulenz im Brennraum mit hoher Abgasrückführrate versprechen signifikante Wirkungsgradverbesserungen in der nahen Zukunft.

Eine weitere Möglichkeit ist die *geschichtete Verbrennung mit interner Selbstzündung*.

Der aufgeladene Dieselmotor mit Direkteinspritzung setzt heute den Massstab beim Wirkungsgrad moderner Antriebssysteme. Die damit verbundene Diffusionsverbrennung wird allerdings von relativ hohen Werten von Stickoxiden als auch Russpartikeln begleitet. Elektronische Einspritzsysteme mit sehr hohem Druck, variable Geometrie des Turboladers und der gezielte Einsatz von AGR (Abgasrückführrate), eröffnen weitere Verbesserungspotenziale im innermotorischen Bereich.

Geschichtete Verbrennung mit externer Zündung ist das relativ neue Konzept des direkteinspritzenden Ottomotors, bei welchem spezifische Vorteile des klassischen Ottomotors mit dem direkteinspritzenden Dieselmotor kombiniert werden sollen. Eine Optimierung der räumlichen und zeitlichen Zuordnung von Zündquelle und Einspritzung ist dabei erforderlich, um den Zielkonflikt «Schadstoffminimierung» versus «Effizienzmaximierung» zu entschärfen, wie Abb. 3 zeigt. Dazu werden modernste Werkzeuge der numerischen Strömungssimulation, der laseroptischen Messtechnik und der mikroprozessorgestützten Steuerungstechnik eingesetzt.

Das für die mittelfristige Zukunft anvisierte HCCI-Verfahren *Homogene Verbrennung mit interner Zündung* (Homogeneous Charge, Compression Ignition) verspricht die Aufhebung des erwähnten Zielkonfliktes zwischen Prozesswirkungsgrad und Schadstoffemissionen. Beim HCCI-Verfahren wird eine für praktisch alle Gemisch-

zusammensetzungen robuste Vormischverbrennung angestrebt. Der Schlüssel dazu ist eine simultane, verdichtungseingeleitete interne Zündung an vielen Orten im Brennraum. Zyklus-zu-Zyklus-Schwankungen des Brennbeginns, Lärmniveau, Flammlöschten bei niedrigen Wandtemperaturen stellen jedoch gewichtige Herausforderungen bei der Brennverfahrensoptimierung dar. Forschungsbedarf besteht mit Bezug auf die Wechselwirkung der intensiven Strömungsturbulenz mit der langsamen Reaktionskinetik der Selbstzündung von Kohlenwasserstoffen, der optimalen Gemischaufbereitung durch Mikrodüsen und schliesslich bei der Entwicklung geeigneter Steuerungs- und Regelalgorithmen zur robusten Beherrschung vor allem des transienten Betriebs.

Abgasreinigungssysteme

Es ist schon heute erkennbar, dass die für das langfristige Überleben der Verbrennungskraftmaschine unabdingbare Realisierung des «Null-Emissions»-Arbeitsprozesses sich nur durch den Einbezug einer umfassenden Abgasnachbehandlung verwirklichen lässt. Diese weitere Reduktion der Abgasemissionen ist erforderlich, weil vor allem die städtische Bevölkerung nach wie vor hohen Schadstoffkonzentrationen in der Atemluft ausgesetzt ist.

Bei Ottomotoren hat sich der Katalysator als effiziente Abgasminderungstechnologie bewährt. Heute steht die Verkürzung

CFD-RANS: Gasoline Direct Injection Engine
Influence of swirl (Dc) on mixture formation

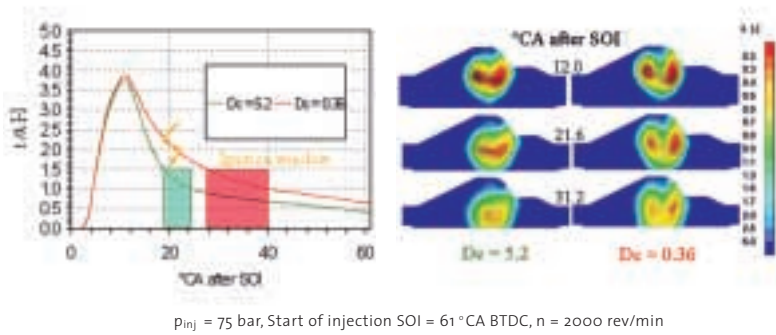


Abb. 3: Mittels 3-D-Strömungssimulation berechnete Gemischzusammensetzung (links an der Zündkerze, rechts räumlich verteilt im Brennraum) für einen Forschungsmotor mit direkter Benzineinspritzung (Dc = Drallzahl, SOI = Einspritzbeginn, °CA = Grad Kurbelwinkel).

der Anspringszeit auf einige wenige Sekunden, die Optimierung der Gemischbildung und Lambdaeinstellung sowie die Erhöhung der Umwandlungseffizienz des Katalysators im Vordergrund. Beim Dieselmotor sind die Probleme bei der katalytischen Abgasnachbehandlung noch nicht gelöst. Offene Forschungsthemen sind bei den Werkstoffen, Oberflächenchemie, der Sensorik und Aktuatorik sowie der Regelungs- und Systemtechnik angesiedelt. Abgaskatalysatoren, Partikelfilter und DeNO_x-Systeme können aber unter bestimmten Bedingungen auch problematische Sekundäremissionen bilden. Solche müssen frühzeitig erkannt werden, um Folgeprobleme rechtzeitig auszuschließen.

Hybride und elektrische Antriebssysteme

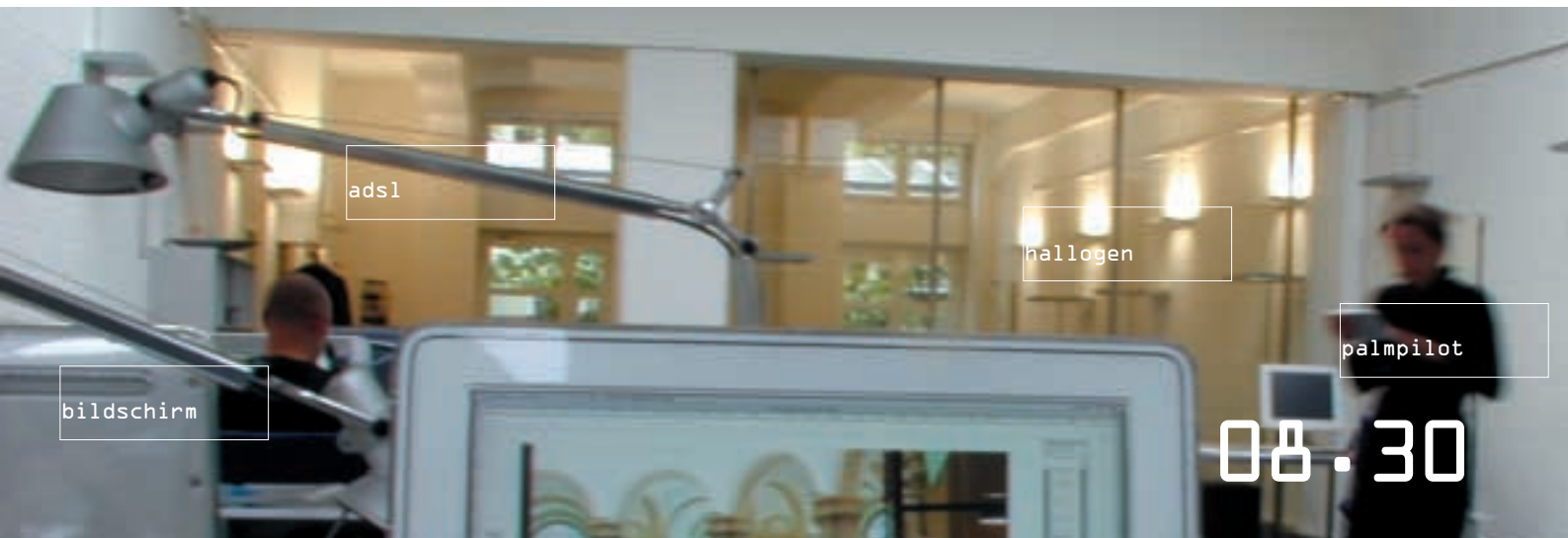
Wegen der vernachlässigbaren lokal anfallenden Schadstoff- und Lärmemissionen sind elektrische Antriebe an sich ideal für die Anwendung im Automobil geeignet. Völlig unbefriedigend ist hingegen die Speicherung der elektrischen Energie mittels Batterien.

Hybridantriebe, bestehend aus je einem Elektro- und einem Verbrennungsmotor (von etwa gleicher Leistung) wurden deswegen früh entwickelt und untersucht. Man erzielte zwar damit gegenüber optimierten Verbrennungsmotoren gewisse Verbrauchseinsparungen, die allerdings die hohen Zusatzkosten im Moment nicht rechtfertigen können. Neuerdings zeigen Antriebe mit einem leistungsstarken Verbrennungsmotor und einer parallel geschalteten kleineren Elektromaschine (so genannte «Mildbrids»), dass es möglich

ist, wesentliche Verbrauchsvorteile bei kleineren Zusatzkosten zu erzielen, zumal bei moderaten Spannungen von 42 V und der Beschränkung der rein elektrischen Fahrweise auf relativ kurze Distanzen teure und schwere Batterien entfallen. Mit Bezug auf die Verbrauchsreduzierung ist der «Downsizing»-Ansatz interessant. Hier erlaubt die bedarfsgerechte Unterstützung eines verkleinerten Verbrennungsmotors durch die kurzfristig überlastbare Elektromaschine gute Fahrleistungen bei besserem Antriebswirkungsgrad im üblicherweise auftretenden Teillastbereich.

Eine Schlüsselkomponente für die Realisierung solcher Antriebssysteme ist ein reversibler elektrischer Kurzzeitspeicher z. B. Superkondensatoren («Super-caps»). Obwohl von niedrigerer Energiedichte als Batterien, sind sie aufgrund ihrer hohen Leistungsdichte und dem nach vielen Ladezyklen anhaltend hohen Wirkungsgrad für diesen Einsatzzweck sinnvoll.

Brennstoffzellen ergänzen prinzipiell die Vorteile elektrischer Antriebe mit sinnvollen Reichweiten. Die Umwandlung von chemischer zu elektrischer Energie ist zudem nicht der Einschränkung unterworfen, die mit dem Umweg über die Verbrennung (Wärmeentwicklung) verbunden sind. Für die Anwendung in der Mobilität bieten Niedertemperaturbrennstoffzellen gegenüber anderen Ausführungen Vorteile. Da sie jedoch nur mit Wasserstoff betrieben werden können, muss man diesen Energieträger entweder aus fossilen Kraftstoffen durch Reformierung «on-board» gewinnen oder zentral in «Raffinerien» erzeugen. Da Wasserstoffspeicherung mit Aufwand und niedrigen Energiedichten verbunden ist, erscheint der erste Weg, zumindest in einer Übergangsphase, sinnvoller. Die bei der Reformierung anfallenden Verluste an Energie von 30 bis 40% gleichen jedoch zurzeit die prinzipbedingten Vorteile der



elektrochemischen gegenüber der thermochemischen Umwandlung etwa aus, sodass der «tank-to-wheel»-Energiebedarf sich wie in Abb. 4 dargestellt verhält.

Da verbrennungsmotorische Antriebe in den nächsten Jahren praktisch zu «Null-Emissions Systemen» weiterentwickelt werden, muss die Brennstoffzelle ihre Berechtigung aber gerade in einem geringeren CO₂-Ausstoss suchen. Interessant dabei ist, dass Brennstoffzellensysteme ihren besten Wirkungsgrad von etwa 40% bei kleinen Leistungen erreichen, was für den Alltagseinsatz sehr günstig ist. Weiter wird dieser relativ hohe «tank-to-wheel»-Wirkungsgrad besonders dann gefragt sein, wenn Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen zur Verfügung stehen wird. Diese und weitere Argumente begründen, wieso grosse Forschungsanstrengungen auf diesem Gebiet weiterhin sinnvoll sind.

Zukunftspotenzial

Die Frage nach dem Antriebssystem der Zukunft kann aus heutiger Sicht nicht eindeutig beantwortet werden. Sowohl thermochemische als auch elektrochemische Energiekonverter und deren Kombinationen haben spezifische Vor- und Nachteile sowie ein noch deutliches Verbesserungspotenzial.

Bei den verbrennungsmotorischen Antrieben wird, nebst neuen Brennverfahren und verbesserten Kraftstoffeigenschaften, die nachgeschaltete Abgasnachbehandlung eine zunehmend wichtige Rolle spielen. Bei den elektrochemischen Antrieben wird hingegen der vorgeschaltete Prozess der optimalen Kraftstoffaufbereitung entscheidend sein. Für die Gesamtsystemevaluation werden neben der Energieeffizienz Fragen der Kosten, der Verfügbarkeit, der Infrastruktur, des Komforts, der Sicherheit

und des Kundennutzens gehören. Dabei kann man von einer anwendungsspezifischen Diversifizierung der optimalen Technologie ausgehen. Für den Personen- und Gütertransport in der Luft (Leistungsdichte) und auf dem Wasser (Wirkungsgrad) wird mit hoher Wahrscheinlichkeit die Verbrennungskraftmaschine auch langfristig dominieren. Auch beim Gütertransport auf der Strasse ist die Herausforderung für elektrochemische Systeme gross, wohingegen die Chancen für elektrochemische und hybride Antriebssysteme beim individuellen Verkehr vergleichsweise am günstigsten sind. Voraussetzung dazu ist die allmähliche Verfügbarkeit von Wasserstoff aus regenerativen Energiequellen. Infolge der mit einer solchen Umwälzung verbundenen langen Zeiträume (typischerweise mehrere Jahr-

zehnte) ist die Bedeutung von Erdgas als wichtigem Kraftstoff während der Übergangsphase hervorzuheben.

Dr. Christian Bach

Leiter der Abt. Verbrennungsmotoren/ Feuerungen an der EMPA in Dübendorf

Prof. Dr. Konstantinos Boulouchos

Professor für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme im Departement Maschinenbau und Verfahrenstechnik der ETH Zürich

Prof. Dr. Lino Guzzella

Professor für Thermotronik im Departement Maschinenbau und Verfahrenstechnik der ETH Zürich

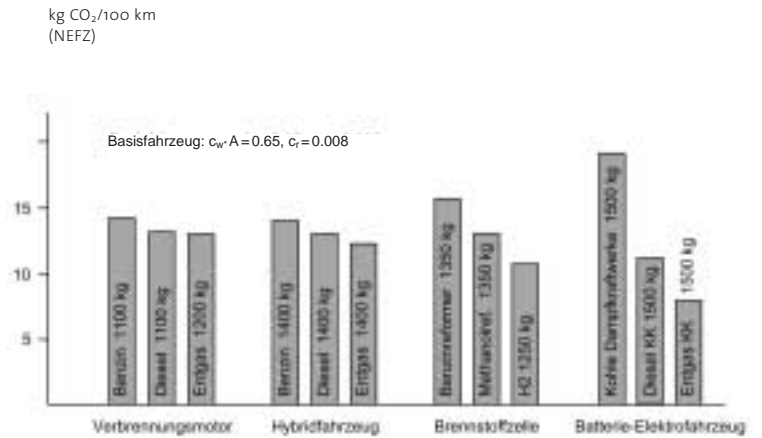


Abb. 4: «Well-to-Wheel»-CO₂-Ausstoss diverser Antriebssysteme, in kg CO₂ pro 100 km eines normierten Testzyklus (NEFZ), Aerodynamik ($c_w \cdot A$) und Rollreibung (C_r) konstant, Masse je nach Konzept wie angegeben, KK = Kombi-Kraftwerke (gekoppelte Gas- und Dampfturbinen).



DIE MACHBARE UTOPIE

KONSTANTINOS BOULOUCHOS

Der globale Klimawandel und die lokale Beeinträchtigung der Luftqualität stellen die Gestaltung von Energiesystemen vor neue Aufgaben. Nebst den langfristig relevanten erneuerbaren Energien sind mittelfristig die grössten Fortschritte durch Verbesserungen in der Verwertung fossiler Primärenergieträger zu erwarten. Die Vision von Null-Emissions-Verbrennungstechnologien, einst als Utopie betrachtet, wird heute für unabdingbar und machbar gehalten.

Voraussetzung dazu ist die Realisierung von Technologiesprüngen bei der Entwicklung neuer Brennverfahren, der Einführung verbesserter Brenn- und Treibstoffe und der Integration von Abgasnachbehandlungskomponenten ins Gesamtsystem.

Abbildung 1a zeigt die Aufteilung des Endenergiebedarfs auf verschiedene Bereiche am Beispiel einer typischen westlichen Industrielandschaft: Der gesamte Endenergiebedarf pro Kopf beträgt etwa 25-mal mehr als das Energieäquivalent der Nahrungsaufnahme und ist fast dreimal so gross wie das für nachhaltig gehaltene Ziel der «2-kW-Gesellschaft». Andererseits teilt sich dieser Endenergiebedarf ungefähr in 40% für Heizung und Warmwasser, knapp ein Drittel für Personen- und Gütertransport und gut 25% für den elektrischen

Strom auf. Fossile Brennstoffe (Kohle, Öl, Erdgas) tragen zu mindestens 85% zur Gesamtendenergie bei und werden heute praktisch ausschliesslich über Verbrennungsprozesse verwertet. Auch wenn der Brennstoffzellentechnologie beim Personentransport und bei der dezentralen Stromproduktion in Zukunft Vorteile erwachsen können, werden bei einer Nutzungsdauer von 10 bis 20 Jahren für Fahrzeuge und etwa 40 Jahren für Kraftwerke mittelfristig Verbrennungssysteme den Energieumwandlungsmarkt wohl dominieren.

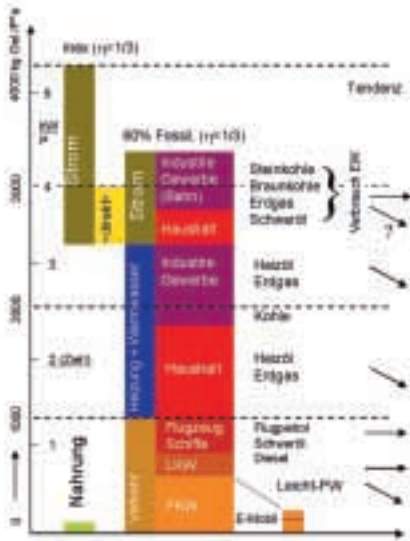
Eindrücklich gezeigt werden die für umfassende Umwälzungen des Energiesystems erforderlichen Zeiträume anhand der Abbildung 1b. Selbst bei einem optimistischen Szenario, ausgehend vom Kyoto-Protokoll unter Berücksichtigung vom weltwei-

ten Handel u. a. mit Emissionszertifikaten ab 2010, wird darin in der Mitte des 21. Jahrhunderts ein Primärenergieanteil fossiler Brennstoffe von etwa zwei Dritteln prognostiziert, wobei deren absoluter Beitrag gegenüber heute noch wesentlich zunehmen soll. Unverkennbar und klimafreundlich ist dabei die erwartete Umschichtung von Kohle und Öl zu Erdgas.

Die oben erwähnten Argumente sollen keinesfalls die Wichtigkeit der Zunahme des Anteils erneuerbarer Energiequellen am gesamten Energiesystem in Zweifel ziehen. Sie zeigen nur auf, dass in den nächsten Jahrzehnten Fortschritte bei Verbrennungssystemen einen weit grösseren Beitrag zur Entschärfung der Umweltproblematik leisten werden als alle Alternativen zusammengezählt.



a) Fossile Endenergie je Person und Jahr, entwickelte Länder, ≈ 1997 (qualitativ)



b) Primary Energy, Kyoto Scenario, World; Full Trade Starting 2010

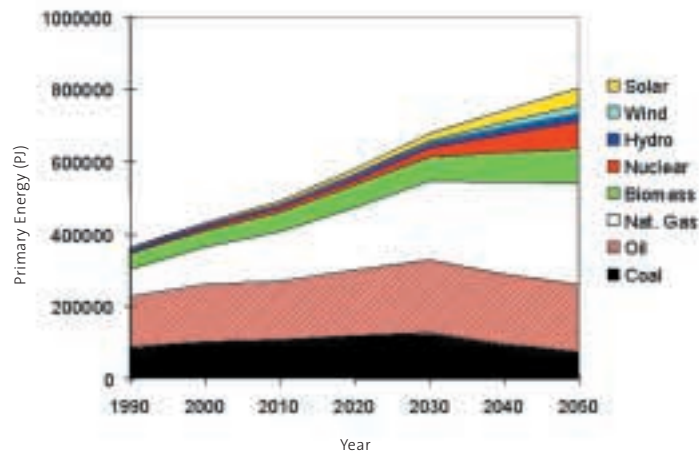


Abb. 1: Aufteilung der verbrauchten Energie in einem industrialisierten Land nach Bedarfskategorien (a, links) und Vorhersage des weltweiten Primärenergiebedarfs (b, rechts).

Null-Emissions-Verbrennungssysteme: eine Utopie?

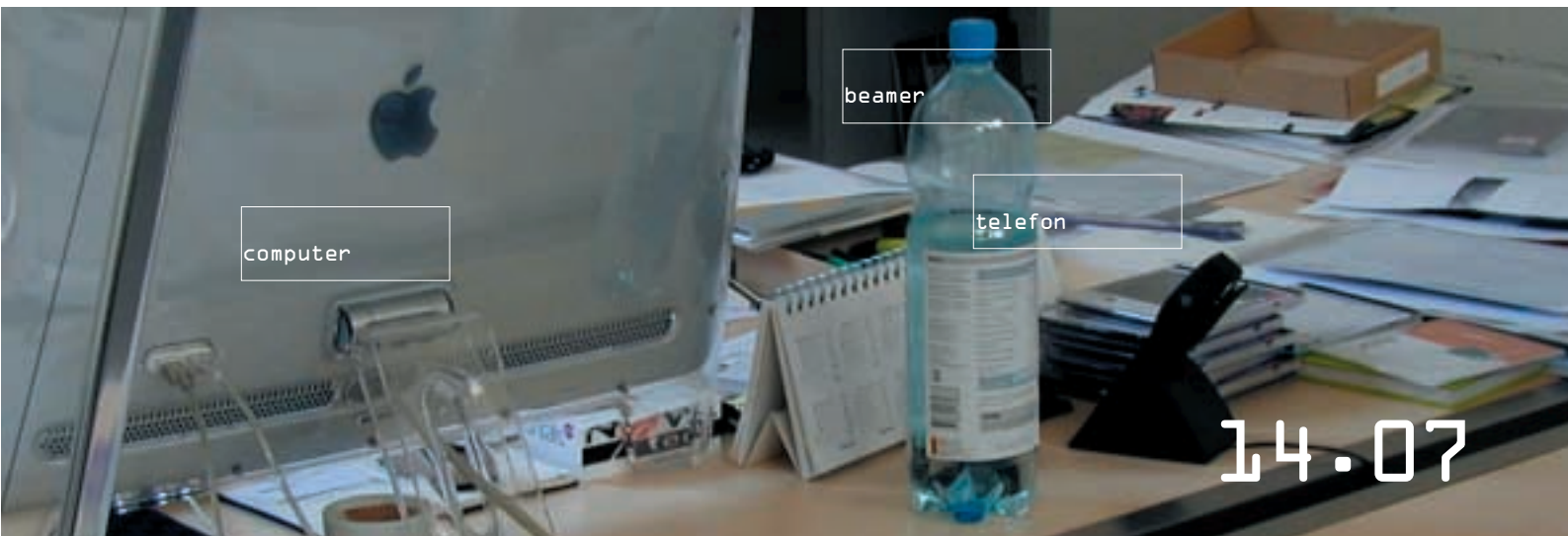
Unabdingbare Voraussetzung aus der Technologieperspektive für den Übergang zu einer nachhaltigen Energieversorgung ist deswegen die Realisierung von Null-Schadstoff-Emissionssystemen auf Verbrennungsbasis. Damit sind lokal anfallende Emissionen gemeint, wie unverbrannte Kohlenwasserstoffe (UHC), Kohlenmonoxid (CO), Russ, Stickoxide (NO_x) usw. Die Reduktion von Treibhausgasen ist, nebst der zunehmenden Bedeutung von Erdgas, über die wesentliche Steigerung des Systemwirkungsgrades zu erreichen, je nach Randbedingungen auch über die Verwendung erneuerbarer Energien (Biomasse, synthetische Kraftstoffe).

Lange als Utopie betrachtet, rückt die «Null-Emissions»-Vision doch in die Nähe des Machbaren. Drei Jahrzehnte Forschung und Entwicklung bei Verbrennungssystemen selbst und bei katalytisch unterstützten Methoden der Abgasnachbehandlung haben eine Reduktion der ausgestossenen Schadstoffe um etwa zwei Grössenordnungen bewirkt. Weitere ein bis zwei Grössenordnungen sind jedoch zur Erfüllung des (beinahe) «Null-Emissions»-Ziels erforderlich. Letzteres kann auf pragmatische Art definiert werden, indem man Schadstoffgrenzwerte anstrebt, die, über die ganze Betriebsdauer des Systems integriert, die entsprechenden bei der Herstellung anfallenden Emissionen unterschreiten. Damit zieht man mit den lokal schadstofffreien Systemen (Brennstoffzellen, elektrische Antriebe)

gleich, deren Produktion ebenfalls ein ähnlich hohes Emissionsniveau bedingt.

Diese in der mittelfristigen Zukunft unbedingt zu realisierende weitere Emissionsreduktion bei Verbrennungssystemen kann nicht einfach durch Extrapolation der bisherigen Entwicklung, d. h. als semiempirischer, «trial and error», teilweise aber nicht umfassend wissenschaftlich unterstützter Prozess erreicht werden. Vielmehr können Durchbrüche nur dann erzielt werden, wenn die wissenschaftlichen Grundlagen wesentlich vertieft und in optimaler Synergie mit dem zielgerichteten industriellen Entwicklungsprozess verzahnt werden.

Abbildung 2 illustriert nachdrücklich, warum es ausserordentlich schwierig ist, Null-Emissions-Verbrennungssysteme durch



Challenges in Combustion Systems

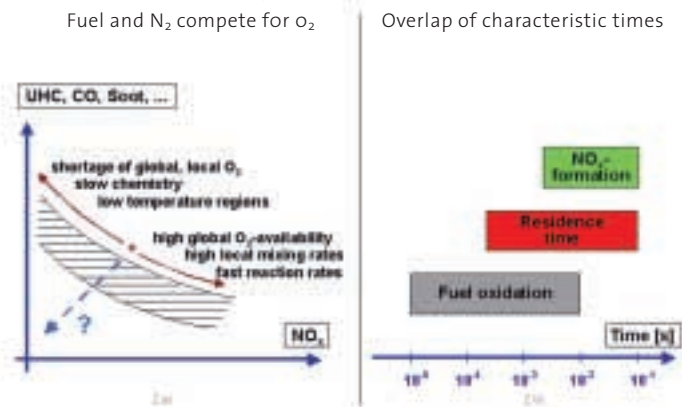


Abb. 2: Wettbewerb zwischen unvollständig umgesetztem Brennstoff und Stickoxiden (a, links) und Überlappung charakteristischer chemischer und physikalischer Zeitskalen in der Verbrennung (b, rechts).

weitere empirische Feinoptimierung bestehender Brennverfahren zu realisieren. Es besteht nämlich ein fundamentaler Zielkonflikt zwischen der Anforderung nach vollständiger Oxidation aller Brennstoffkomponenten und derjenigen nach vollständiger Unterbindung der Oxidation des Stickstoffs zu Stickoxiden. Langsame Verbrennungskinetik, Brennraumbereiche niedriger Temperatur und langsame Mischung von Kraftstoff und Sauerstoff bis zur molekularen Ebene reduzieren die Stickoxide zulasten hoher C-haltiger Emissionen; den umgekehrten Einfluss haben hohe Mischungsgeschwindigkeiten und hohe Flammentemperaturen, welche zusätzlich die Energieeffizienz des Gesamtprozesses erhöhen. Da jeweils beim Arbeitsmedium simultan sehr unterschiedliche Zustände aus einem breiten Bereich von Temperaturen, Gemischzusammensetzungen und Turbulenzparametern herrschen und die charakteristischen Zeiten zur Oxidation von N- und C-Komponenten sich dementsprechend über 2 bis 4 Grössenordnungen erstrecken, verspricht einzig die Vertiefung und anschliessende Anwendung grundlegender Kenntnisse über die

Wechselwirkungsdynamik zwischen chemischer Kinetik, Thermodynamik und turbulenter Strömung weitere deutliche Verbesserungen.

Die wissenschaftlichen Grundlagen

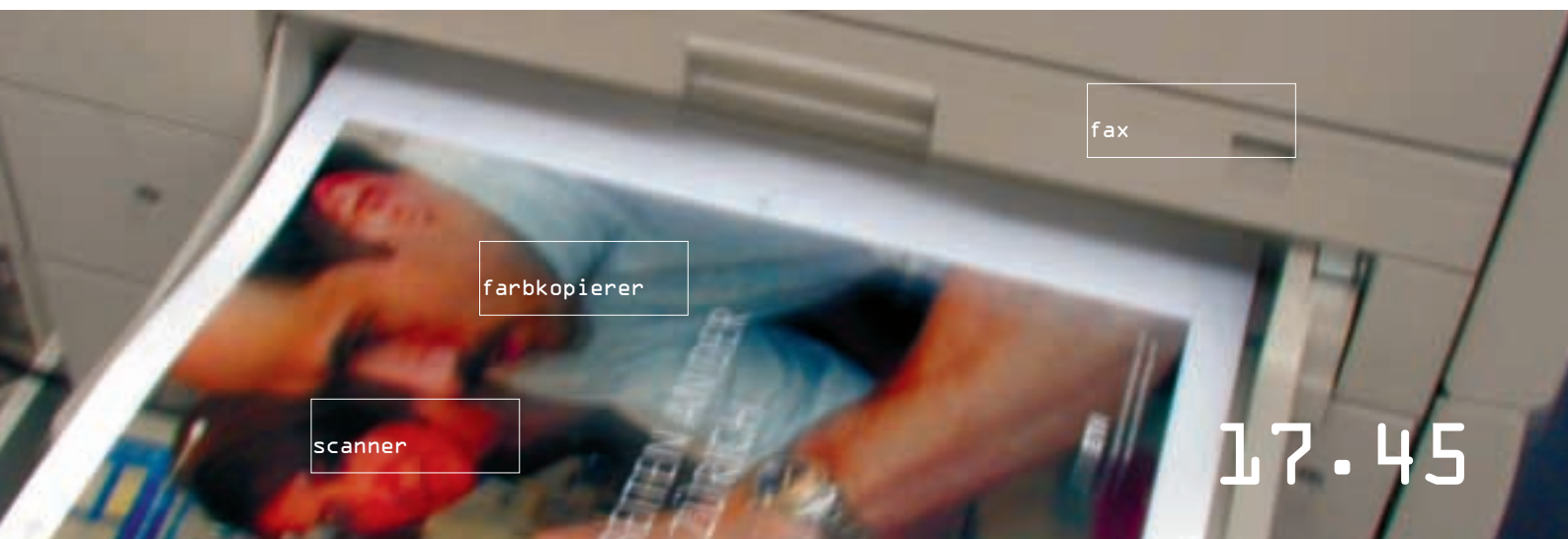
Grundsätzlich sind die physikalisch-chemischen Zusammenhänge, welche das Verhalten turbulenter Strömungen mit chemischen Reaktionen bestimmen, im qualitativen Sinn bekannt. Die Navier-Stokes-Gleichungen, ergänzt durch Quellterme aufgrund der chemischen Kinetik, sind prinzipiell in der Lage, Verbrennungsprozesse in Fluiden zu beschreiben. Allerdings ist bei turbulenten Strömungen der Rechenaufwand für die vollständige räumliche und zeitliche Auflösung des Strömungsfeldes prohibitiv zu hoch, da er mit der dritten Potenz der Reynolds-Zahl skaliert. Erschwerend kommt dazu die Komplexität der chemischen Kinetik, die selbst für einfache Brennstoffe Dutzende von chemischen Komponenten und Hunderte von Reaktionen umfasst. Viele der Letzteren haben noch unbekannte Reaktions-

raten; selbst wenn man sie alle kennen würde, entstünde durch die Berücksichtigung der detaillierten Reaktionskinetik (Erhaltungsgleichungen für alle Komponenten) ein vom Rechenaufwand her nicht zu bewältigendes System von gekoppelten, partiellen Differentialgleichungen.

Abbildung 3 zeigt, dass uns ausgehend von heute verfügbaren Rechnerleistungen im Teraflopereich (entsprechend einer Anzahl C₀ von Freiheitsgraden, d. h. Variablen multipliziert mit der räumlichen und zeitlichen Diskretisierungstiefe) noch mindestens 10 bis 12 Grössenordnungen fehlen, um grössere, realistische Verbrennungssysteme modellfrei zu simulieren. Zusätzliche Herausforderungen entstehen dadurch, dass in der technischen Verbrennung oft Mehrphasenprozesse vorkommen und zunehmend katalytisch unterstützte Verfahren von Bedeutung sind, womit noch ungenügend verstandene chemische und Transportmechanismen das Geschehen wesentlich beeinflussen. Interessanterweise fallen zudem einzelne Teilprozesse ausserhalb des Gültigkeitsbereichs der Kontinuumsströmungsmechanik (so z. B. die Russoxidation an der Oberfläche von Nanopartikeln in atmosphärischen Flammen, nicht jedoch unter Hochdruck wie bei Dieselmotoren), was eine jeweils differenzierte Betrachtungsweise erfordert.

Methodenkombination und optimale Anwendung

Aus Abbildung 3 ist also klar ersichtlich, dass selbst für einphasige technische Verbrennungssysteme, unter Fortschreibung der bisherigen Fortschritte in der Rechnerhardware, bei voller Ausnützung des Parallelisierungspotentials und unter Zuhilfenahme möglicher algorithmischer Weiter-



DNS of reactive flows: a perspective view

Degrees of Freedom

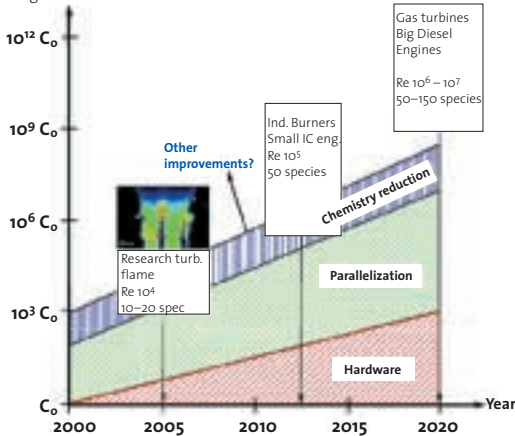


Abb. 3: Ein (angestrebtes) Szenario zum Zukunftspotenzial der modellfreien, direkten numerischen Simulation chemisch reagierender turbulenter Strömungen und deren industriellen Anwendung (C_0 als Anzahl Freiheitsgrade ist idealerweise proportional zum Rechenaufwand).

Turbulent flow field and flame position

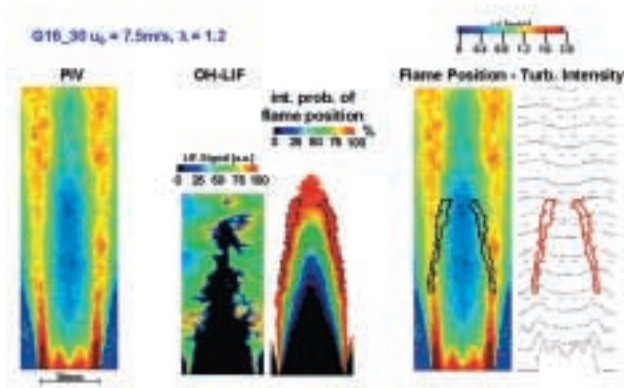


Abb. 4: Die gleichzeitige Strömungs- (PIV, links) und Flammfront-Visualisierung (OH-LIF, Mitte) ermöglicht ein vertieftes Verständnis der Turbulenz-Chemie-Wechselwirkung bei der Vormischverbrennung.

entwicklungen optimistischerweise mindestens 10 und realistischerweise eher 20 Jahre vergehen werden, bis die modellfreie, direkte numerische Simulation zur Anwendung innerhalb der industriellen Entwicklung gelangt.

Da natürlich bis dann nicht einfach erwartet werden kann, ist der Bedarf nach kontinuierlicher Verbesserung bestehender und nach Entwicklung neuer Modelle zur Implementierung in die Simulationsalgorithmen sehr gross. Unter anderem versteht man darunter die systematische Reduktion der Komplexität der Reaktionskinetik (skelettale Mechanismen), die geeignete Modellierung der feineren Turbulenzskalen (Large Eddy Simulation), die geeignete Schliessung des nicht linearen Reaktionstermes für die nicht aufgelösten Skalen usw.

Wo immer Modellbildung vorkommt, ist natürlich die Validierung durch gezielte Experimente erforderlich. Insbesondere bei Verbrennungssystemen ist die Entwicklung und Anwendung von berührungslosen, meist laseroptischen Messmethoden von grosser Bedeutung. Bildgebende Verfahren sind vorteilhaft, vor allem, wenn sie, wie für die nahe Zukunft anvisiert, aufgrund einer hohen Repetitionsrate, die Dynamik transients Vorgänge z.B. bei der Wirbel-Flammfront erfassen können.

Abbildung 4 zeigt ein charakteristisches Beispiel mit Bezug auf eine atmosphärische turbulente Vormischflamme. Die Beschreibung des Strömungsfeldes mittels PIV (Particle Image Velocimetry) und die Visualisierung der Reaktionszone durch laserinduzierte Fluoreszenz am OH-Molekül in Kombination führen zu neuen Erkennt-

nissen im Hinblick auf den wahrscheinlichsten Aufenthaltsort und die Stabilisierung der Flamme, die Flammfrontstruktur und die turbulente Flammgeschwindigkeit, welche den Simulationsergebnissen gegenübergestellt werden.

Was bringt die Zukunft?

Ein vertieftes Grundlagenwissen ist zwar notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung zur Realisierung innovativer, deutlich umweltfreundlicherer und energieeffizienterer Verbrennungstechnologien. Die Überführung in die Anwendung bedarf auch Methoden der effizienten Optimierung von Multiparametersystemen, einer robusten, kostengünstigen, miniaturisierten Sensorik, aber auch einer geeigneten Aktuatorik, um die als ausschlaggebend erkannten Merkmale z.B. der optimalen Gemischaufbereitung in der Praxis realisieren zu können. Beispielhaft für Letzteres sei hier eine optimale Einspritzdüse für zukünftige Dieselmotoren (die es selbstverständlich noch nicht gibt) erwähnt: Sie soll fähig sein, für bis zu 10 Einspritzungen von je 200 μ s Dauer mit variablem Abstand in einem Verbrennungstakt, Einspritzdrücke von 250 MPa, Brennraumdrücke von 20 MPa und Gastemperaturen von 2500 K auszuhalten. Ein variabler Einspritzquerschnitt im Verhältnis 1:10 (Lochgrösse von deutlich unter 100 μ m, Nadelhub von 300 μ m), Lebensdauer entsprechend 10 Millionen Mal öffnen/schliessen und Beherrschung in der Serie von mehreren Millionen Stück pro Jahr sind weitere Anforderungen. Reinraumtechnik in der Fertigung, mikroelektromechanische Präzision und neue Oberflächen-

behandlungsmethoden stellen gewichtige Herausforderungen dar.

Auf der Brennstoffseite werden sich möglicherweise sauerstoffhaltige Komponenten für die Russunterdrückung bei Diffusionsflammen, Wasserstoffanreicherung durch Teilreformierung von Kohlenwasserstoffen für einen erweiterten Stabilitätsbereich bei Vormischflammen und biogene sowie synthetische aromaten- und schwefelfreie Kraftstoffe durchsetzen.

Schliesslich werden wir in den nächsten Jahrzehnten einen spannenden Wettbewerb zwischen thermochemischen (verbrennungsbasierten) und elektrochemischen Energiekonvertern erleben. Der Ausgang ist langfristig offen, die «Null-Emissions»-Energiesysteme werden aber so oder so Realität.

Forschungsinformationen

Die Ausführungen in diesem Artikel stützen sich auf Forschungsarbeiten, die sowohl mit internen (ETH-eigenen) als auch mit Drittmitteln finanziert wurden. Am wichtigsten unter Letzteren ist die kontinuierliche Unterstützung durch das Bundesamt für Energie (Programme «Energie 2000» und «Energie Schweiz»).
<http://www.lav.ethz.ch/>

Prof. Dr. Konstantinos Boulouchos

Professor für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme am Institut für Energietechnik, Departement Maschinenbau und Verfahrenstechnik, ETH Zürich

METHODISCHE PRODUKTENTWICKLUNG

DANIEL SCHMID, MARKUS MEIER

Die Schlüsseltechnologie Brennstoffzelle macht Fortschritte. Doch wenn eine Technologie erfolgreich sein will, muss sie nicht nur funktionieren, sie muss auch langfristig betriebs- und marktwirtschaftliche Bedürfnisse erfüllen. Können Brennstoffzellen gegenüber konventionellen Batterien und Verbrennungsmotoren marktfähig sein? Im Rahmen des «PowerPac»-Projekts wird eine kostengünstige portable Brennstoffzelle entwickelt, die als mobile Stromzelle vielfältig einsetzbar ist.

Heutige Entwicklung basiert auf strukturiertem, prozessorientiertem Vorgehen und wissenschaftlich erprobten Methoden. Kombiniert mit Kreativität und Originalität, ergibt sich das Potenzial für ein marktfähiges Produkt. Am Beispiel der komplexen Brennstoffzellentechnologie soll im Folgenden die Leistungsfähigkeit methodischer Produktentwicklung gezeigt werden.

Die Technologie der Brennstoffzelle beruht auf einem bereits 1839 entdeckten Prinzip. Miteinander gekoppelte elektrochemische Vorgänge, Reduktion und Oxidation, laufen räumlich getrennt voneinander ab. Auf der einen Seite eines Elektrolyten wird der Brennstoff in Ionen und Elektronen aufgetrennt, auf der anderen Seite reagieren diese mit Sauerstoff. Während die Ionen durch den Elektrolyten diffundieren, neh-

men die Elektronen gezwungenermassen den Umweg über einen elektrischen Leiter mit der zu speisenden Last. Auf diese Weise wird erreicht, dass die bei der Oxidation frei werdende Energie nicht nur als Wärme, sondern direkt als elektrischer Strom nutzbar wird.

«PowerPac»-Projekt

Im Rahmen des «PowerPac»-Projektes, getragen von der ETH Zürich, vom Paul Scherrer Institut (PSI) und vom Bundesamt für Energie (BFE), wird eine portable, mobile Stromaggregat-Familie von 0,5 bis 2 kW entwickelt. Als technologische Grundlage dient die bei Niedertemperatur häufig zwischen 20 und 70 °C operierende Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle (PEFC). Die

eigentliche Produktidee liegt in der multiplen Anwendung des Gerätes als mobile Stromquelle.

Das Kernteam, zusammengesetzt aus Mitarbeitern der ETH Zürich (Zentrum für Produkt-Entwicklung) und des PSI (Labor für Elektrochemie), wird durch die Mitarbeit des Institutes für Mess- und Regeltechnik (ETH) und die Unternehmen Brütsch Elektronik AG, MES-DEA SA, Tribecraft AG und Weidmann Plastics Technology AG ergänzt.

jalousien

mikrowellen

abwaschmaschine

18.28



Abb. 1: Dieser Stapel mit 50 Zellen und einer Leistung von ca. 3,5 kW dient als technische Grundlage für die Weiterentwicklung im «PowerPac»-Projekt.

Die Ausgangslage

Die Ausgangslage des vorliegenden Projektes bilden verschiedene Dissertationen und Arbeiten an der ETH Zürich und am PSI auf dem Gebiet der PEFC. Der Stapel, in Serie geschaltete Zellen mit einer entsprechenden Einspannung, stand im Fokus früherer Arbeiten. Hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit machte er enorme Fortschritte. Einige Eckdaten zeigen dies:

	1998	2000
Gewicht	208 g	146 g
Leistung der Zelle	48 W	65 W
Leistungsdichte	230 W/kg	445 W/kg

Tabelle 1: Entwicklung der PEFC (Zelle) bis ins Jahr 2000 an der ETH Zürich und am PSI.

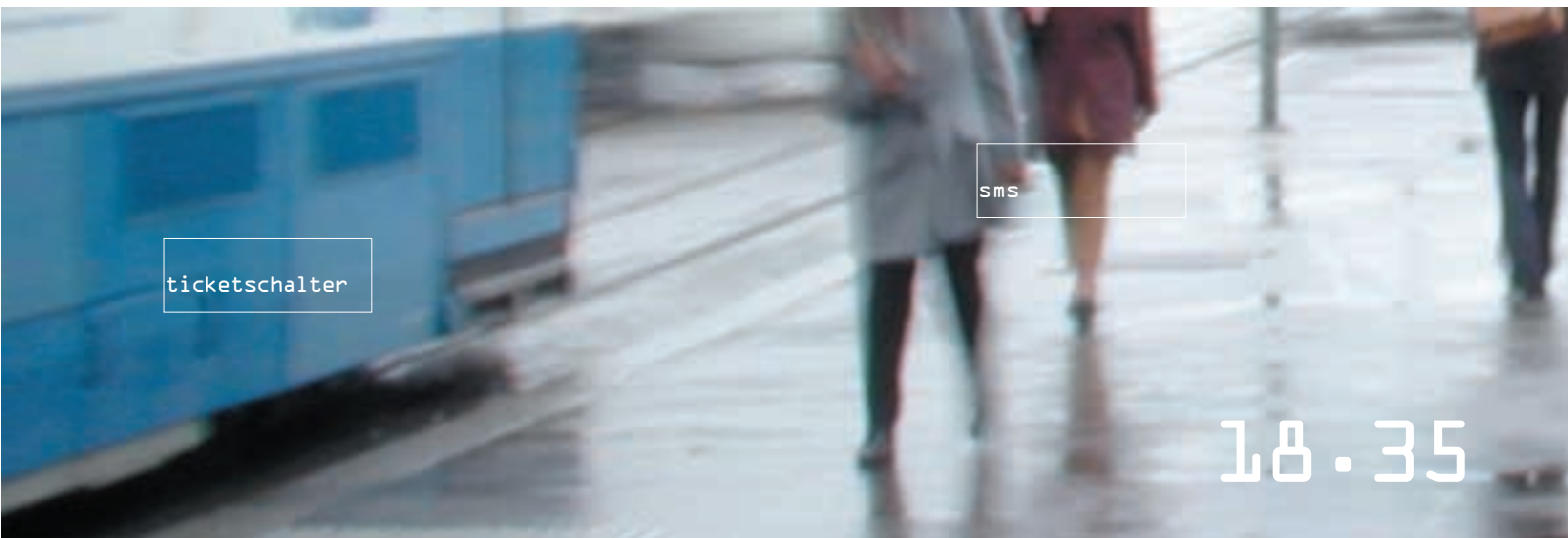
Die bipolare Platte, die jeweils zwischen benachbarten Zellen für die Versorgung mit Prozessmedien sorgt, besteht aus zwei Hälften. Diese werden miteinander zu einer Einheit verklebt. Der Klebprozess ist aufwendig und kostenintensiv.

Neben dem Stapel, dem Herzen der Technologie, interessiert das Gesamtsystem eines Stromaggregates. Unterschiedlichste periphere Komponenten sind dazu notwendig. Wesentlich sind Kühlung, Befeuchtung, Wasserstoffrückführung, Leistungselektronik, Regelung, um nur einige zu nennen. Zusammen mit dem Stapel tragen diese Komponenten zur Funktion, zum Wirkungsgrad, zum Gesamtgewicht und zu den Gesamtkosten bei. In den aktuellen Arbeiten ist nun nicht mehr der Stapel im Zentrum des Interesses, sondern das gesamte Sys-

tem. Ein Stapel mit einer hohen Leistungsdichte ergibt nicht zwingend, weder funktionell noch betriebswirtschaftlich, ein Gesamtsystem, welches den Anforderungen des Marktes standhält. Um den angestrebten Gesamtwirkungsgrad von ca. 40% zu erreichen, sind eine enge Abstimmung aller Komponenten, neue konstruktive Konzepte und methodisches Vorgehen gefragt.

Analyse «PowerPac»

Die Methode «Szenariotechnik» dient zum systematischen Entwerfen von Zukunftsbildern, um daraus die massgeblich zum Erfolg des Gestaltungsfeldes (hier die Brennstoffzellen-Technologie) beitragenden Faktoren abzuleiten. 10 Schlüsselfaktoren wurden ermittelt, welche zum Teil durch das Entwicklungs-Team beeinflusst werden können. Unter anderem resultierten daraus, als einer der wesentlichen Schlüsselfaktoren, die Herstellkosten des Gesamtsystems. Der Vergleich mit etablierten Technologien auf der Basis von Verbrennungsmotoren und Batterien ist äusserst anspruchsvoll. Die zu substituierende etablierte Technologie, optimiert nach Jahrzehnten der Forschung und millionenfach produziert, setzt die Ziele sehr hoch. Die Ziel-Herstellkosten des Gesamtsystems können durch diesen Benchmark klar definiert werden. Um diesen Zielwert auf die Module des Gesamtsystems zu transferieren, wurde zur leicht adaptierten Methode «Target Costing», zu Deutsch «Zielkostenmanagement», gegriffen. Dabei ergeben die Modulkosten, ins Verhältnis zu den Gesamtherstellungskosten gesetzt, die Kostenanteile. Parallel dazu wurden die Module entsprechend der Bedeutung ihrer Funktion im Gesamten bewertet, was die Teilgewichte ergibt.



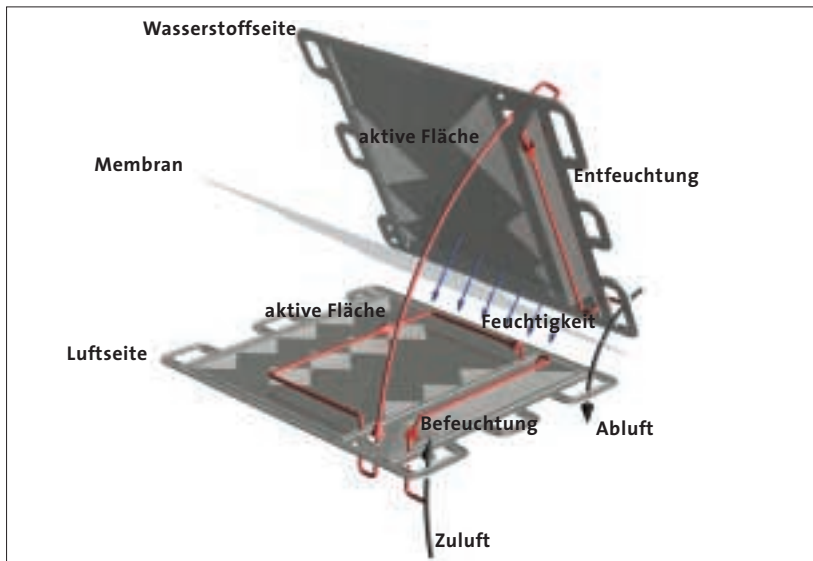


Abb. 2: Prinzip «Interne Befeuchtung».
Feuchtigkeit der Abluft diffundiert durch die Polymermembran zur Zuluft.

Daraus resultiert der Index, Teilgewicht zu Kostenanteil, welcher als Mass für die Kostenbeurteilung gilt. Ist er kleiner als eins, muss der Schluss gezogen werden, dass zurzeit die Baugruppe bezüglich ihrer Funktion zu teuer ist. Umgekehrt verhält es sich bei einem Index grösser als eins. Einige Komponenten des «PowerPacs» sind im Diagramm (siehe Abb. 3, schwarze Zahlen) dargestellt. Dabei handelt es sich um die Membran (1), die Bipolarplatte (2), die Elektrode (3), den Kompressor (4), die Gasbefeuchtung (5) und die Wasserstoffpumpe (6).

Lösungen zur Kostensenkung

Die Analyse zeigt, dass eine markante Indexverbesserung nur durch radikale Systemvereinfachung und Funktionsvereinigung zu erreichen ist. Kostengünstige Fertigungsverfahren für die Bipolarplatten,

Elimination der externen Befeuchtung durch zelleninterne Befeuchtung, vollständiges Ersetzen des Klebeprozesses der ETH/PSI-Platten und Reduktion der Wasserstoffmenge, um nur einige Aspekte zu nennen, wurden in die Anforderungsliste aufgenommen.

Mit Methodik und Kreativität wurden neue Lösungen gesucht und zu innovativen Konzepten vereint: Die Befeuchtung der Luft (siehe Abb. 2), notwendig für eine optimale elektrochemische Reaktion, wurde direkt in den Stapel integriert. Somit wird die Bipolarplatte (2) zwar teurer, nähert sich aber dank der Funktionsintegration mit der Befeuchtung dem Indexwert 1 an. Für ein mobiles Stromaggregat ist das Entfallen eines Nebenaggregates von grösster Bedeutung. Nur so kann erreicht werden, dass das «PowerPac» nicht nur kostengünstiger, sondern auch leichter und kompakter wird. Im Weiteren

muss nur noch eine Zelle bezüglich des Wassermanagements ausgelegt werden. Die Erhöhung der Zellenzahl führt ohne weiteres Zutun zur notwendigen Skalierung der Gasbefeuchtung. Gleichzeitig wird in Zusammenarbeit mit der Firma Weidmann Plastics Technology AG an Spritzgiessverfahren gearbeitet, welche den Herstellungsprozess der Bipolarplatten um Faktoren verkürzt und kostengünstiger gestaltet.

Ein neuartiges Dichtungskonzept mittels Graphitfolie zwischen den Bipolarplattenhälften ersetzt den aufwändigen Klebeprozess, was sich in den sinkenden Montagekosten niederschlägt. Zudem werden durch die gewonnene Flexibilität grössere Fertigungstoleranzen zulässig, und der elektrische innere Widerstand des Stapels wird verringert.



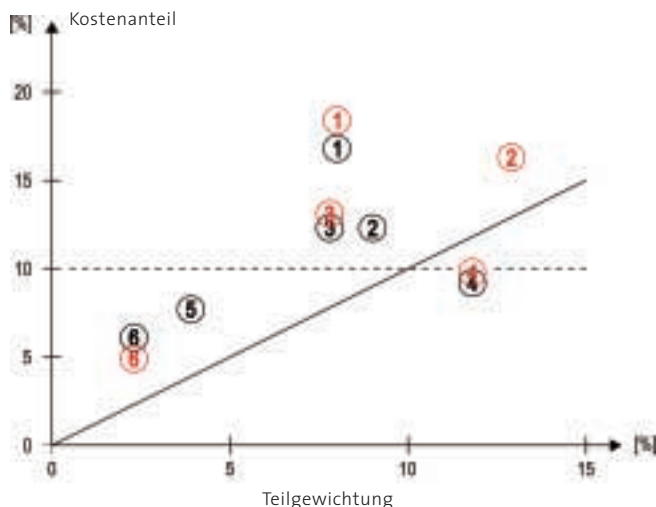


Abb. 3: «Target Costing» einiger Komponenten des «PowerPacs»; schwarz: altes Konzept, rot: neues Konzept.

Nr.	Baugruppe	Kosten		
1	Membran	17,6	17,6	11,7
2	Bipolarplatte	11,7	14,6	2,6
3	Elektrolyt	11,7	11,7	11,7
4	Kompressor	8,8	8,8	4,4
5	Gasbefeuchtung	7,3	0	0
6	Wasserstoffpumpe	5,9	4,4	0,9
7	weitere Komponenten	32,6	32,6	22,8
Subtotal		95,6	89,7	54,1
Endmontage		4,4	2,9	2,0
Total		100	92,6	56,1

Tab. 2: Produktkomponenten im «Target Costing». 3. Spalte: bisher, 4. Spalte: aktuell, 5. Spalte: Zukunft; Kosten (normiert auf 100).

Mit demselben Material, einer flexiblen Graphitfolie, werden auch die Stromabnehmer neu gestaltet. Die grossflächige, naturgemäss teure vergoldete Kupferplatte wird ersetzt. An ihre Stelle tritt ein Kupferblechstück, welches zwischen zwei Graphitfolien zu einer Einheit verpresst wird. In einem nächsten Schritt kann auch eine aufgefächerte Kupferlitze verarbeitet werden. Bei beiden Varianten wird mehr als 50% des Gewichtes der alten Stromabnehmer eingespart. Diese drei Innovationen, die Befeuchtungsintegration, die neue Dichtungstechnik und die Stromabnehmer, wurden als Patente hinterlegt.

Weiter wurde ein Konzept erarbeitet, um die Wasserstoffrückführung zu verringern. Es werden nun nur noch wenige Prozent des früheren Volumenstroms zurückgepumpt, was eine deutliche Redimensionierung der Baugruppe zur Folge hat. Bei gleicher Funktion führen die geringeren Kosten zu einer Annäherung der Wasserstoffpumpe (6) an den Indexwert 1. Die Auswirkungen auf die Zielkosten sind wiederum im Diagramm (siehe Abb. 3) und in der Tabelle 2 zu erkennen (rote Zahlen).

Zu beachten ist, dass die erarbeiteten Vereinfachungen einzelner Baugruppen nicht direkt im «Target Costing» ersichtlich sind. Wird eine Komponente eliminiert oder vereinfacht, steigt gleichzeitig der Index bei anderen Bauteilen, da diese relativ betrachtet teurer werden. Geschehen ist dies beim Elektrolyt (3). Die Membran (1), zurzeit das relativ teuerste Bauelement, ist am PSI Gegenstand intensivster Forschung, um auch dieses Element positiv zu beein-

flussen. Alle Innovationen sind mit dieser Methodik aufeinander abgestimmt; jede Veränderung einer Komponente hat Auswirkungen auf das Gesamtsystem.

Prototyp greifbar

Bei Produktentwicklungen sind strukturiertes, prozessorientiertes Vorgehen und modernste Werkzeuge nicht nur nützlich, sondern unbedingt erforderlich. Kombiniert mit Kreativität und vernetztem Systemdenken, lässt dies innovative Lösungen entstehen, welche zukunftsweisende Technologien ein Stück weiter in den Markt bewegen.

Bis Ende Februar wird im Rahmen des «PowerPac»-Projektes ein funktionstüchtiger Prototyp als Vorstufe zu einem Vorserienprodukt erstellt. Parallel mit der Arbeit an der ETH Zürich und am PSI erfolgt ein kontinuierlicher Wissenstransfer in die Industrie und an die Öffentlichkeit. Dies umfasst unter anderem einen projekteigenen Webaufttritt (www.powerpac.ethz.ch). Für Unternehmen, welche vertiefte Kenntnisse erhalten möchten, existiert das «Netzwerk PE-Brennstoffzelle». Mitglieder erhalten dreimal pro Jahr einen Newsletter und können kostenlos an Seminaren teilnehmen. Interessierte Personen können jederzeit mehr über das Projekt, die Technologie und Publikationen erfahren.

Forschungsinformationen

Das vorliegende Projekt beinhaltet die Entwicklung eines Produktes mit dem Namen «PowerPac» einer nicht netzgebundenen, tragbaren, mobilen Stromversorgung.

Weitere Informationen und die Anmelde-möglichkeit erhält man unter:

www.powerpac.ethz.ch

Daniel Schmid
Mechanische Systeme
CLA E 15.2
ETH Zentrum
CH-8092 Zürich
Tel. 01 632 24 28
schmid@imes.mavt.ethz.ch

Daniel Schmid,

wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mechanische Systeme, Zentrum für Produkt-Entwicklung, der ETH Zürich

Prof. Dr. Markus Meier,

ordentlicher Professor am Institut für Mechanische Systeme, Zentrum für Produkt-Entwicklung, der ETH Zürich

EINE UNVERMUTETE REVOLUTION?

KLAUS FRÖHLICH, KURT KALTENEGER

Die Verteilnetze für Energie aus der Steckdose sind gebaut und funktionieren. Doch die zentrale Energieversorgung mit Drehstrom ist nicht optimal für die Aufnahme von Energie aus neuen Energieträgern. Neueste Technologie-Entwicklungen geben der Utopie eines dezentralisierten Stromnetzes auf Gleichstrombasis neue Nahrung.

Max Planck prophezeite im ausgehenden 19. Jahrhundert, dass es in der Physik nichts Grundlegendes mehr zu entdecken gebe. In der Folge wurde die gesamte Physik umgekrempelt! Vielleicht ist es in der Energieversorgung ähnlich. Die heutigen Systeme und Netze zur Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie sind hoch entwickelt und äusserst zuverlässig. Ist es dann sinnvoll, quasi auf der grünen Wiese ein neues Versorgungsnetz aufzubauen, das neue Technologien und auch solche, die am Horizont erscheinen, besser berücksichtigen kann als unsere bestehende Netztechnologie?

Die Randbedingungen verändern sich

Aus kommerzieller Sicht ist die Liberalisierung des Strommarktes wohl der einschneidendste Veränderungsprozess, der bereits seit einigen Jahren in Gang ist. Durch den Bezug elektrischer Energie von frei wählbaren Lieferanten muss die Flexibilität Letzterer bezüglich Menge und Termin wesentlich höher werden, als dies bisher der Fall war. Auch der Qualität des «Produktes» Strom wird heute schon, künftig aber noch vermehrt wesentliche Bedeutung zugemessen. So ist zum Beispiel für einen Industriebetrieb mit automatisierter Produktion die 100%ige Verfügbarkeit der elektrischen Energie wie auch ein geringes Mass an transienten Störungen essenziell. Im Haushalt dagegen ist beides von geringerer Bedeutung. Neben der Flexibilität des Bezuges ist es also wünschenswert, auch die Qualität für

den jeweiligen Verbraucher angepasst zu gestalten. Diese Fakten geben bereits Anlass, das bestehende Drehstromsystem vom Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit her auf seine optimale Eignung zu hinterfragen.

Die klassische Stromerzeugung basierte im Wesentlichen auf drehenden Prinzipien (Generatoren), sodass das Drehstromsystem nahe liegt. Die entsprechenden Quellen haben in der Regel hohe Leistung und sind dort installiert, wo die primäre Energie (Wasser, Kohle usw.) zur Verfügung steht. Altbewährte zentrale Energieerzeugung! Neue Prinzipien der Energiewandlung von Primärenergie in elektrische Energie wie Brennstoffzellen, Fotozellen, Windturbinen oder Geowärme, folgen jedoch nicht zwangsläufig dem drehenden Prinzip, sondern sie liefern Gleichstrom oder erzeugen Wechselstrom mit unter



Umständen variierender Frequenz. Es wird geschätzt, dass diese neuen Quellen in Zukunft etwa 20% bis 30% des gesamten Bedarfs decken könnten. Allerdings ist ihr Leistungsangebot im Einzelnen relativ bescheiden, was eine grosse Anzahl solcher meist dezentraler Quellen erfordert. Die Erzeugung ist oft verbunden mit einem stark schwankenden Leistungsangebot (Wind, Sonne). Sie erfolgt mit unterschiedlichsten Frequenzen von 0 Hertz (Gleichstrom) bis zu einigen hundert Hertz. Für den auf Stabilität bedachten Netzbetreiber bietet die Einbindung und Synchronisation solcher Quellen oftmals Probleme, was nicht zuletzt der Grund dafür ist, dass dezentrale Energieerzeuger nicht schon vermehrt eingesetzt werden.

Die Leistungselektronik mit einer Palette von leistungsstarken Halbleiterbauelementen bietet heute neue Möglichkeiten der Energieumformung, z. B. zwischen verschiedenen Spannungsniveaus oder zwischen verschiedenen Frequenzen, die vor zehn Jahren noch als viel zu teuer abgetan werden mussten. Ebenso stehen heute durch die fortgeschrittene Informationstechnologie computerunterstützte Automatisierungs-, Steuer-, Regel- und Schutzverfahren zur Verfügung, deren Potenzial mit den bestehenden relativ starren Drehstromnetzen nicht voll ausschöpfbar ist.

Mehr denn je muss in allen Bereichen der Energieversorgung auf höhere Umweltverträglichkeit geachtet werden, sei es, um mehr erneuerbare Energiequellen zu nutzen und/oder zu erforschen, oder sei es, um Technologien zu finden, um die nicht gerade schönen Freileitungen «unter die Erde» zu bringen. Der Rahmen spannt sich von ästhetischen Aspekten bis zu Energieverlusten und elektromagnetischer Strahlung. Die angeführten Aspekte lassen er-

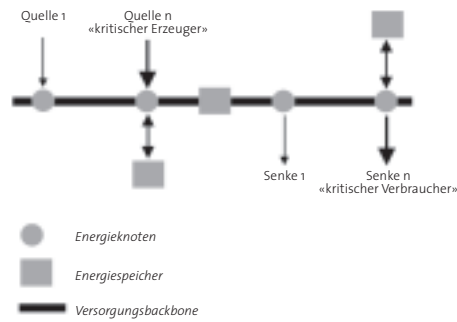


Abb. 1: Schematisches Bild des virtuellen Kraftwerks.

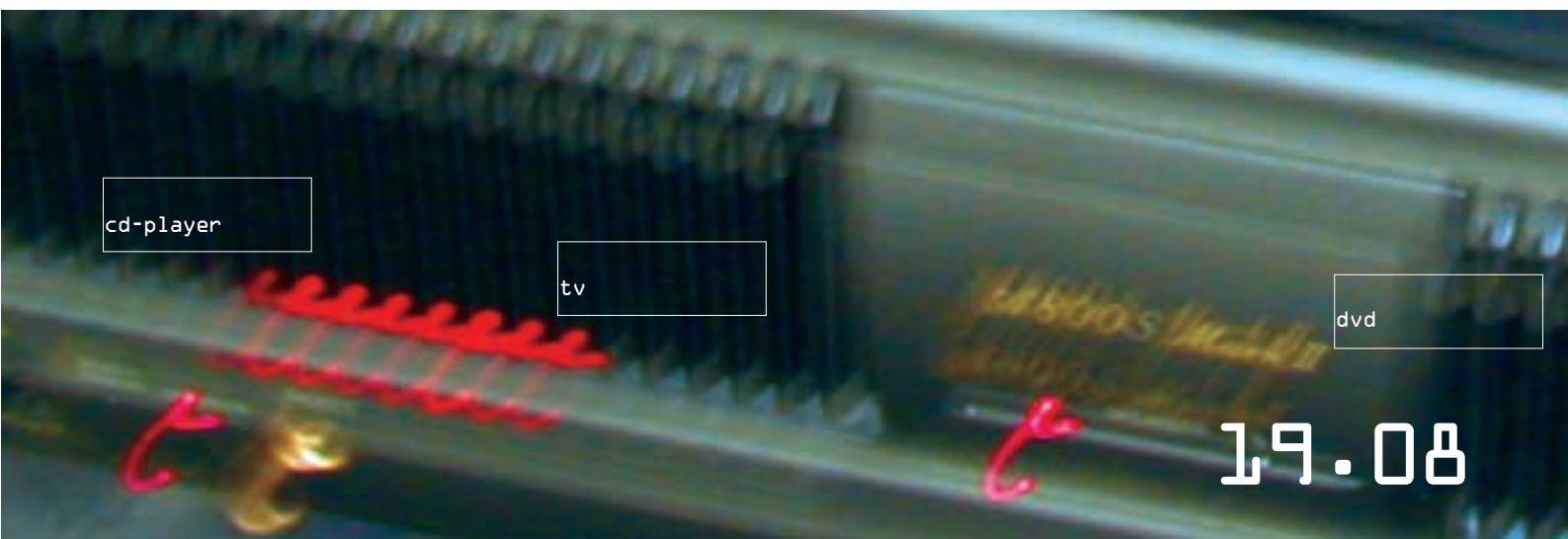
kennen, dass zum Teil bereits heute zwischen sich verändernden Anforderungen und dem bestehenden Drehstromsystem Inkompatibilität besteht.

Noch unerwähnt war, dass im Allgemeinen die bestehenden Strukturen neue am Horizont auftauchende Technologien als unfinanzierbar erscheinen lassen, weil in der Regel die neuere Technologie als Ersatz einer alten Komponente betrachtet wird und so keine synergetischen Systemaspekte berücksichtigt werden. Verfügbare neue Technologien (oder am Horizont sichtbare) müssen in einen neuen Zusammenhang gesetzt werden, was nichts anderes heisst, als dass ein neues System zu überlegen ist, in dem diese neuen Technologien synergetisch zusammengesetzt werden, wodurch ein allen Anforderungen besser gerecht werdendes System entsteht – technisch wie ökonomisch.

Das multifrequente virtuelle Kraftwerk

Ein viel versprechender Ansatz, der den Anforderungen nach flexibler Lieferbarkeit, variabler Stromqualität und Automatisierbarkeit entgegenkommt, ist das so genannte virtuelle Kraftwerk. Quellen, Energiespeicher und Verbraucher sind über ein geeignetes Netz miteinander verbunden. Die Flexibilität der Stromlieferung wird dadurch erreicht, dass weniger wichtige Verbraucher zu- und weggeschaltet werden. Energie wird zwischengespeichert. Auf diese Weise erzielt man mit Hilfe moderner Informationstechnologie eine ökonomische Nutzung der Quellen unter höchster Verfügbarkeit für kritische Verbraucher. Abbildung 1 zeigt schematisch ein derartiges System.

Wie schon eingangs angedeutet wurde, ist die optimale Betriebsfrequenz der verschiedenen Quellen oder auch der Energiespeicher nicht zwangsläufig 50 Hz, sondern sie kann zwischen 0 Hz (Gleichstrom) und mehreren hundert Hertz variieren. Um das Synchronisierungsproblem zu umgehen, ist es daher nahe liegend, alle Quellen, Speicher und Verbraucher über eine Gleichstromschiene (Bus) zu verbinden und erstere mit ihrer optimalen Frequenz



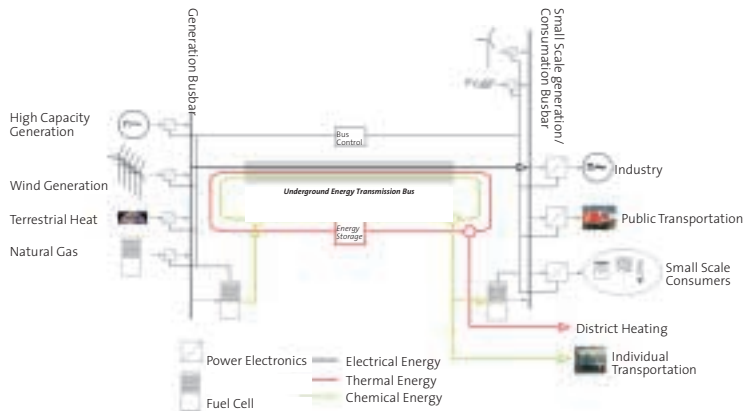


Abb. 2: Die Vision eines multifrequenten virtuellen Kraftwerks.

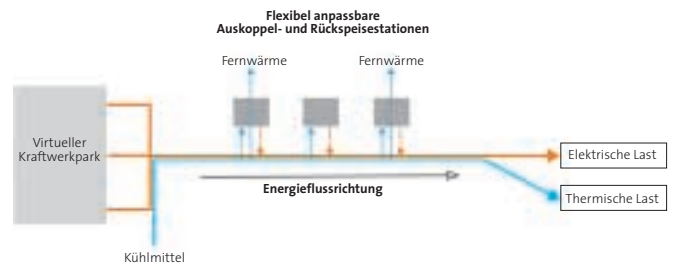


Abb. 3: Gleichstromübertragung mit Längskühlung und Rückgewinnung der Abwärme.

zu betreiben, die wie bei Windturbinen sehr stark variieren kann.

Abbildung 2 zeigt schematisch solch ein multifrequentes virtuelles Kraftwerk, bei dem die einzelnen Komponenten über leistungselektronische Knoten eingebunden sind. Die Vorteile des Gleichstrombusses sind wie folgt zusammenfassbar:

- Das System ist wesentlich unempfindlicher gegen Spannungseinbrüche (Ausregeln beim Verbraucher über den leistungselektronischen Knoten),
- Wegfall des Synchronisierproblems für Quellen, Speicher und Verbraucher,
- Leichtere Automatisierbarkeit,
- Individuellere Bezugsgestaltung,
- Wegfall der Wechselstromverluste,
- Paralleler Transport chemischer Energie wäre denkbar.

Natürlich ergeben sich auch Nachteile eines DC-Bussystems, die aber gering sind im Vergleich mit den aufgelisteten Vorteilen. Die Erforschung eines derartigen Systems erfolgt zurzeit am Institut des Autors in Kooperation mit Nachbarinstituten und in enger Zusammenarbeit mit der Industrie.

Das Konzept des Gleichstrombusses

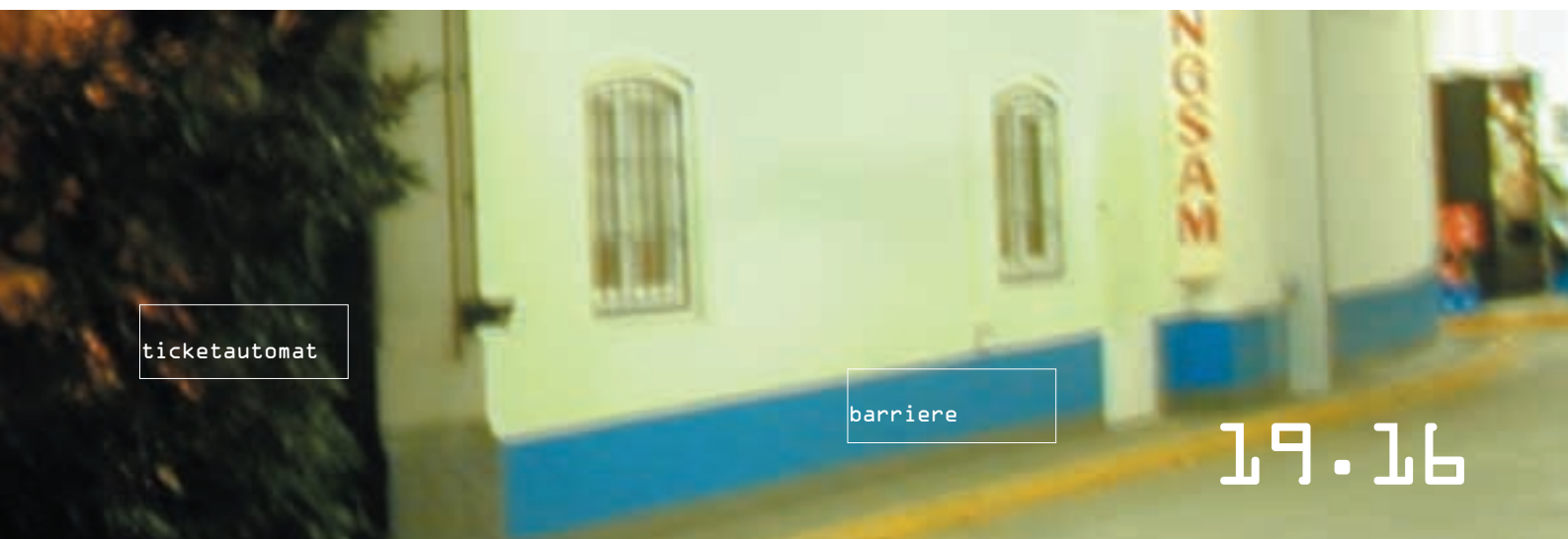
Zentrales Element des Systems zum Transport der Energie ist sicherlich das Verbindungssystem zwischen den einzelnen Komponenten.

Hierzu folgende Überlegung: Die Leistungselektronik hat heute noch erhebliche Kostenbarrieren. Es gilt generell, dass der Aufwand überproportional mit der Spannung steigt. Daher liegt es nahe, für das Gleichstrom-Bussystem nicht über Mittelspannungswerte hinauszugehen – und selbst dies ist keine harte Einschränkung, da heute schon die Energieübertragung über besonders weite Strecken mit Gleichspannungsleitungen betrieben wird. Für eine hohe Übertragungsleistung ergibt das allerdings extrem hohe Stromstärken im Bereich von einigen zehntausend Ampere. Mit Priorität gilt es daher einerseits die ohmschen Verluste und andererseits die emittierten elektromagnetischen Felder zu beherrschen.

Die Verluste können nur mit Supraleitern oder mit extrem grossem Querschnitt eines konventionellen Leiters (z. B. Kupfer) in vertretbarem Ausmass klein gehalten werden. Supraleiterkabel sind zwar am Markt

verfügbar, allerdings nur für kurze Strecken von etwa 100 m, und in Anbetracht der Situation ist nicht zu erwarten, dass die Leiterentwicklung in den nächsten zehn Jahren einen entscheidenden Durchbruch erzielen wird, um ein adäquates Kabel zu ermöglichen. Ein Kupferkabel mit Feststoffisolation des erforderlichen Querschnittes wäre unverhältnismässig teuer. Hinzu kommt noch bei einem Feststoffkabel, dass die Verluste in das Erdreich abgegeben werden, was aus ökologischer Sicht unerwünscht ist. Um diese Problematik zu umgehen, wird an der ETH folgender Ansatz verfolgt (siehe Abb. 3):

Der Strom wird in einem System aus zwei koaxialen Leitern geführt. Auf diese Weise wird die Feldemission vernachlässigbar. Die Leiter sind von einem Kühlmittel durchflossen, das auch die Isolationsfunktion zwischen den Leitern übernimmt. Ohmsche Verluste werden zugelassen und mit dem Kühlmittel längs abgeführt. Eine thermische Aussenisolation verhindert den Abfluss von Wärme in die Umgebung. Da ohne Gegenmassnahmen der Wirkungsgrad des Systems sehr schlecht wäre, muss an diskreten Punkten längs der



Leitung die Abwärme wieder genutzt werden. Ideal wäre, diese wieder in elektrische Energie umzuwandeln und einzuspeisen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Abwärme für Heizzwecke verschiedenster Art zu nutzen, so etwa durch Einspeisung in ein Fernwärmenetz. Es versteht sich, dass viele Fragen noch zu klären sind. Die Machbarkeit ist Gegenstand grundlegender Forschung am Institut für Hochspannungstechnologie. Bringt man den Gesamtwirkungsgrad über jenen einer konventionellen Übertragung sowie die Kosten in den Bereich heutiger Systeme, so bestehen gute Chancen einer Realisierung, zumal der Lösungsansatz den Energietransport unterirdisch ermöglicht und damit die ständig wachsenden Probleme der Freileitungen (wie Lärmemission, Ästhetik, Feldemission, Blitz, Abneigung der Anrainer) vermeidet.

Die Wandlung geothermischer Energie «down hole»

Als exemplarisches Beispiel für die Gewinnung erneuerbarer Energie soll ein völlig neuartiger Ansatz zur Nutzung geothermischer Energie kurz diskutiert werden. Die Gewinnung geothermischer Energie ist lange bekannt. Heisses Wasser oder Dampf wird aus verschiedenster Tiefe (bis zu 3000 m) gewonnen, und damit wird dann direkt oder über Wärmetauscher eine Dampfturbine betrieben. Die Wirkungsgrade sind oftmals schlecht, weil die Dampftemperaturen mit 150 bis 200 °C relativ niedrig sind. Eine Vision, wie die Energie direkt im Bohrloch in Elektrizität umgewandelt werden könnte, wird am Institut des Autors verfolgt. Abbildung 4 zeigt das Prinzip.

Im einem doppelwandigen Rohr, das das Bohrloch ausfüllt und das je nach geologischer Gegebenheit 3000 m bis 5000 m tief reichen könnte, wird vom nach oben expandierenden Dampf ein Kolben nach oben getrieben. Das Rohr ist von einer elektrischen Wicklung umgeben, entsprechend der Wicklung eines drehenden Generators. Permanentmagnete im Kolben erzeugen bei dessen Bewegung ein transversal bewegtes Magnetfeld, sodass in der Wicklung Spannung induziert wird und an der Erdoberfläche elektrische Energie entnommen werden kann. Benötigt wird ein elektrisches Umfeld, wie es eben das multifrequente virtuelle Kraftwerk bietet. Entsprechende Machbarkeitsstudien sind gemeinsam mit Kollegen vom Maschinenbau im Gange.

Die stille Revolution

Am Reissbrett nimmt die Ideallösung eines möglichen Energieversorgungssystems bereits Formen an, fehlende Bausteine sind identifiziert, wirtschaftliche Randbedingungen klar – und dennoch ist der Weg noch weit und vieles noch Vision. Viele der angesprochenen Einzellösungen scheinen für sich zu teuer zu sein, ergeben aber sehr wohl Sinn und Vorteile durch ihr Zusammenwirken in gänzlich neuen Strukturen – ermöglicht durch neue Technologien (Leistungshalbleiter, Computer, Internet...) und veränderte Randbedingungen (Liberalisierung, Umwelt...). Die wichtigste Randbedingung aller zukünftigen Lösungsansätze sollte allerdings nicht übersehen werden: Solch ein optimales System hat sich in das bestehende System einzupassen; man wird nichts Bestehendes von einem Tag auf den anderen und überall gleichzeitig ersetzen, man wird vielmehr nur Teile erneuern, die dann zur

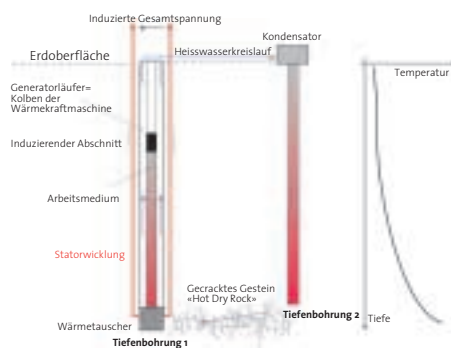


Abb. 4: Direkte Energiewandlung im Bohrloch

konventionellen Technologie kompatibel zu sein haben. Die Geschwindigkeit dieser Revolution wird durch die Verlierer und Gewinner dieser neuen Lösungen bestimmt werden.

Forschungsinformationen

Projekte zu den in diesem Artikel skizzierten Visionen für ein neues Energiesystem sind am Institut des Autors in Arbeit. Weitere Informationen unter:

<http://www.eeh.ee.ethz.ch/hvl/>
<http://www.eeh.ee.ethz.ch/psl/>

Prof. Dr. Klaus Fröhlich

ordentlicher Professor am Institut für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie der ETH Zürich

Dr. Kurt Kaltenecker

Business Area Technology Manager Medium Voltage ABB Switzerland



ENERGIE FÜR KLEINSTFORMATE

DIMOS POULIKAKOS, ARUN MAJUMDAR

Miniaturisierte Systeme erobern die Welt, sei es in Form der Informationstechnik oder in der Medizinaltechnologie. Wie man die dazu notwendigen Systeme zur Energieumwandlung und Energieübertragung entsprechend auf Liliputgrösse bringt und ihren Wirkungsgrad verbessert, ist eine ingenieurwissenschaftliche Herausforderung.

Forschung im Mikro- und Nanobereich auf den Gebieten Energieumwandlung und Wärmeübergang stiess etwa gegen Ende der 80er-Jahre weltweit auf zunehmendes Interesse. Vorangetrieben wurde diese Entwicklung durch den enormen Erfolg der Mikroelektronik. Die damit einhergehende Erfindung einer Vielfalt von neuen Instrumenten wie Rastertunnelmikroskop, Rasterkraftmikroskop und Femtosekundenlaser gewährte neu auch direkten Einblick in Phänomene im Nanobereich. Ungefähr zur selben Zeit wurde die Möglichkeit, Mikroanwendungen basierend auf MEMS-Technologie (Technologie mikroelektromechanischer Systeme) herzustellen, zum Standard. Zunehmend verfügbare Rechenleistungen ermöglichten molekulardynamische und stochastische Simulationen von thermischen Phänomenen im Mikro- und Nanobereich. Alle diese Faktoren zusammen führten zu einem beachtenswerten Tempo des Fortschritts.

Das exponentielle Wachstum von mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) in einer Vielfalt von technischen Anwendungen war die Triebkraft für die Entwicklung von effektiven Energieumwandlungsmethoden, die sich unmittelbar auf den Betrieb dieser Systeme bezogen. Häufig soll diese Umwandlung mechanische Arbeit erzeugen durch die möglichst direkte Wandlung von thermischer Energie, basierend auf einfachen Methoden, die keine komplexen (Mikro-)Maschinen mit beweglichen Teilen erfordern. Einfachheit und Machbarkeit bezüglich der Produktion sind noch immer sehr wichtig. Zunehmend gewinnen aber auch Fragestellungen zum Wirkungsgrad der Energieumwandlung an Bedeutung. Energieumwandlungen dieser Art sind erwünscht im Betrieb von Mikropumpen, Mikroaktuatoren, Mikroschaltern und Mikroventilen, alles bereits verbreitete MEMS-Applikationen.

Stromerzeugung und Kühlung

In den letzten Jahren wuchs auch das Interesse an der Entwicklung von miniaturisierten Energieumwandlungsanwendungen, die für elektrische Stromerzeugung oder für lokale Kühlung eingesetzt werden können. Das steigende Interesse wurde unter anderem durch die starke Zunahme miniaturisierter Systeme bedingt, die ihrer Grösse entsprechende Energiequellen benötigten. Zurzeit sind Batterien die meistverbreiteten Energiequellen. Es ist jedoch festzuhalten, dass die Energiedichte von Batterien (max. ~750 Wh/kg) eine Grössenordnung kleiner ist als die von Kohlenwasserstoffen wie Methanol (6000 Wh/kg). Folglich lohnt sich die Erforschung von möglichen miniaturisierten Energiequellen, welche Kohlenwasserstoffe oder andere Brennstoffe hoher Energiedichte verwenden. Zusätzlich erwärmen sich energiewandelnde miniaturi-



türöffner

chip

solarium

19.37

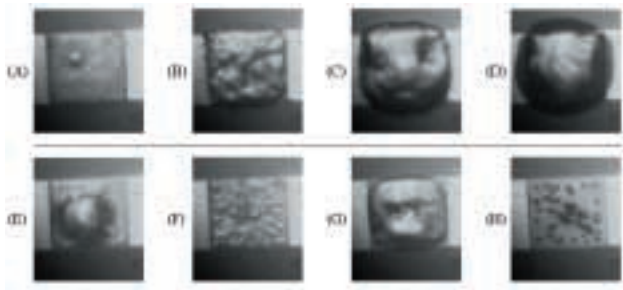


Abb. 1: Zeitliche Abfolge von Zuständen der explosiven Verdampfung auf einem Dünnschicht-Wärmeelement (Zhao et al., Intl. J. Heat Mass Transfer, Vol. 43 p. 281, 2000). (A) Beginn. (B) Bildung einer einzelnen Blase. (C) Stets wachsende Blase, Beginn verzögernden Wachstums. (D) Maximales Blasenvolumen. (E) Blase schrumpft und bricht auf. (F) Wiederbeginn des Blasenwachstums. (G) Maximales Blasenvolumen während Neubildung. (H) Blase teilt sich auf in kleine Blasen.

sierte Systeme oft, sodass miniaturisierte Kühlungssysteme benötigt werden, um eine gewünschte Temperatur aufrechtzuerhalten.

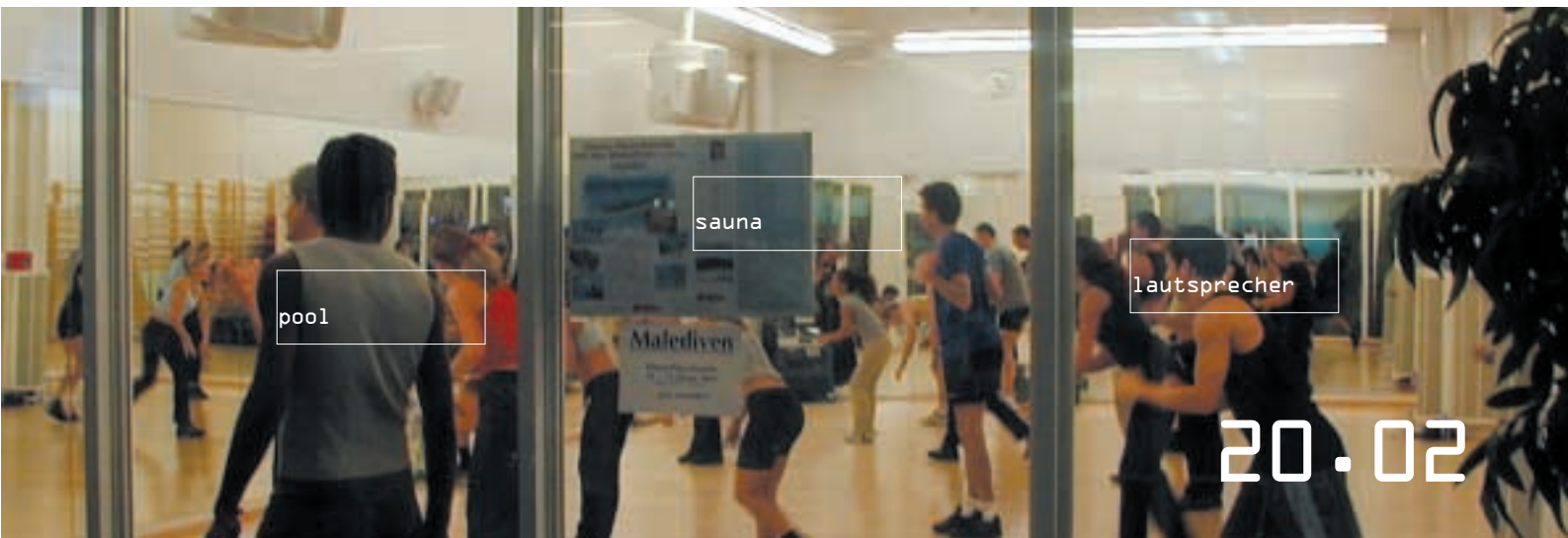
Während die meisten gegenwärtigen Systeme der Informationsverarbeitung und Informationsspeicherung angehören, ist es wahrscheinlich, dass andere Systeme, wie solche, die das Gesundheitswesen betreffen, bald einen zusätzlichen Bedarf an Energieumwandlungsanwendungen hervorrufen werden. Für derartige Anwendungen ist die Regelung der Temperatur von grosser Bedeutung, da biologische Substanzen wie Proteine bei Temperaturen höher als 40 °C häufig denaturieren. Luftkühlung wird allgemein für die Temperaturregelung in gegenwärtigen Systemen wie Laptops verwendet. Für zukünftige kommunikationsverarbeitende, informationsverarbeitende und das Gesundheitswesen betreffende Systeme, die höhere Leistungsdichten dissipieren, wird dies

möglicherweise nicht ausreichen. Aktive Kühlung, die imstande ist, Temperaturen im Bereich von 25 bis 30 °C aufrechtzuerhalten, wird auf grösste Nachfrage treffen.

Besonderheiten miniaturisierter Systeme

Aufgrund des Erfolgs von Verbrennungsmotoren und Dampfkomppressionskühlungen als Maschinen grosser Skalierung liegt der Gedanke nahe, deren Grössenordnung einfach zu verkleinern, um auf diese Art miniaturisierte Systeme zu erzeugen. Man sollte sich allerdings bewusst sein, dass derartige Maschinen auf volumetrischen Prozessen basieren, das heisst, sie beruhen auf der Änderung von Druck und Volumen, um Arbeit zu erzeugen oder umzusetzen. In vielen miniaturisierten Systemen ist dies aufgrund des höheren Oberflächen/Volumen-Verhältnisses jedoch eher schwie-

rig zu erreichen. Folglich ist zu erwarten, dass sich in der Miniaturisierung oberflächenbasierte Energieumwandlungsanwendungen durchsetzen werden anstatt der volumenbasierten Anwendungen. Andererseits sind, was Ventile, Schalter und Aktuatoren betrifft, wo die Hauptanforderung deren zuverlässige Funktionsweise unter Einfluss skalierbarer Kräfte ist, auf Druck basierte Mikroanwendungen attraktiv. Sie können nämlich bis zu drei Grössenordnungen mehr Kraft pro Volumeneinheit erzeugen als elektrostatische Anwendungen. Im Folgenden werden drei spezifische energietechnische Beispiele genauer betrachtet: a) druckgetriebene Systeme basierend auf metastabilen Dampfexplosionen auf Mikrowärmelementen (engl. «microheaters»), b) thermoelektrische Anwendungen und c) Brennstoffzellen, wobei die letzten zwei Beispiele zur Kategorie der oberflächenbasierten Energieumwandlungsanwendungen gehören.



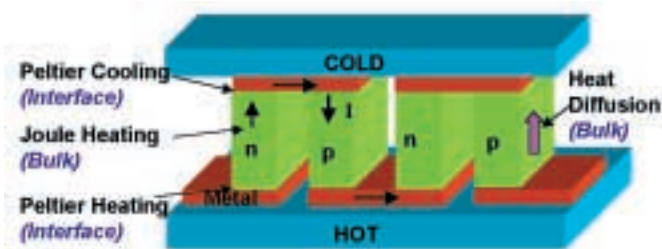


Abb. 2: Skizze eines thermoelektrischen Geräts, wo die n und p dotierter Halbleiter elektrisch in Serie und thermisch parallel miteinander verbunden sind. Falls Strom durch die Halbleiterelemente fliesst, wird die eine Seite gekühlt und die andere erwärmt. Umgekehrt, falls eine Temperaturdifferenz über das Gerät erzeugt wird, produziert der Wärmestrom elektrischen Ladungsfluss über eine Potentialdifferenz und somit elektrische Leistung.

Druck mit «Microheaters»

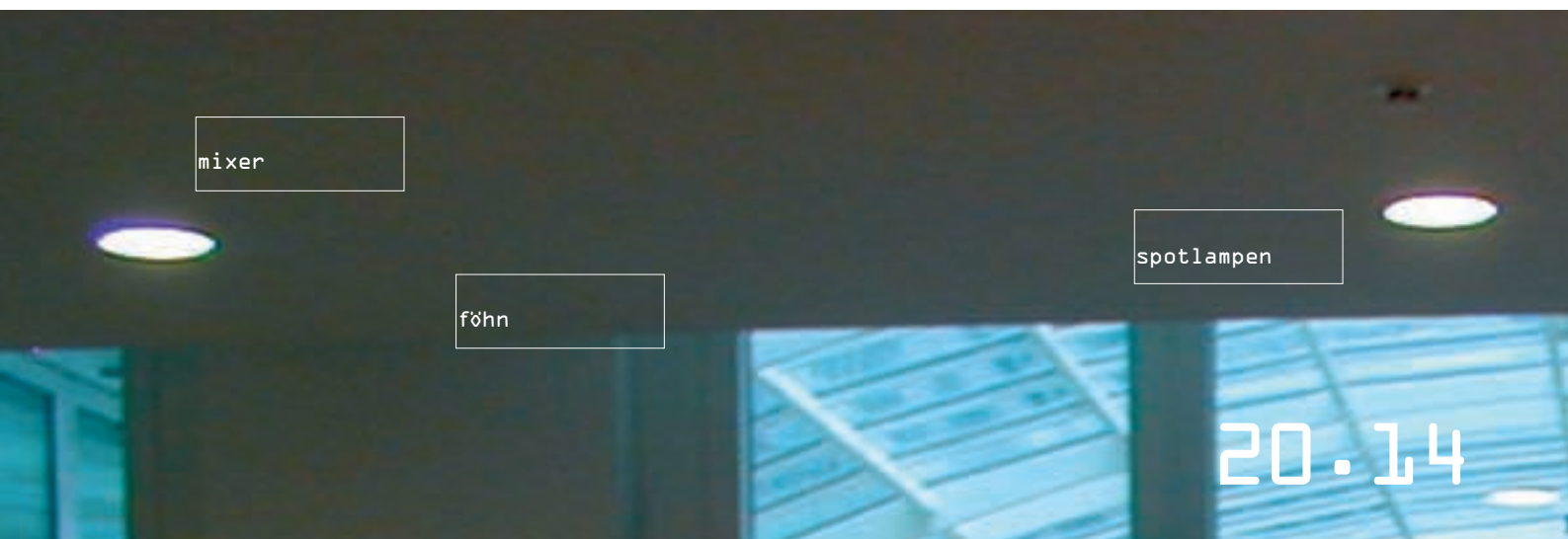
Eine Dampfexplosion ist ein physikalischer Vorgang, in welchem das Volumen der Dampfphase sehr schnell in der Flüssigkeitsphase expandiert. Schnelle Zufuhr von Energie in die volatile Flüssigkeitsphase ist notwendig für die Initiierung und das Aufrechterhalten des Dampfblasenwachstums bei grosser Rate. Auf diese Weise verdampft die Flüssigkeit bei hohem Druck und expandiert, wobei Arbeit an der unmittelbaren Umgebung verrichtet wird. Im Gegensatz zu Dampfexplosionen grosser Skalierung, wie sie bei Störfällen in Kernkraftwerken zu erwarten sind, wird die hier betrachtete mikroskopische explosive Verdampfung durch die schnelle Erhitzung der Flüssigkeit mit Mikrowärmeelementen erzeugt; sie ist elektronisch kontrollierbar und kann als sehr lokalisierte Energiequelle in einer Vielzahl neuer mikroelektromechanischer Systeme eingesetzt werden. Ein entsprechendes Beispiel ist der kommerzielle Erfolg des thermischen Tintenstrahldruckers (TIJ). Der Schlüssel zur thermischen Tintenstrahldruck-Technologie ist die Explosion von Mikroblasen, welche winzige Tintentropfen durch die kleinen Öffnungen des

Druckkopfs treiben, und zwar mittels direkter Umwandlung von thermischer in mechanische Energie. Mikromechanische Aktuatoren, Schalter und Pumpen werden auch in anderen Anwendungen in Betracht gezogen, wie in Medizin, Optik, Informationstechnologie, Microassembly, Automation, Photonics, Automobil- und Raumfahrtindustrie.

Um grosse Wärmeraten zu erhalten, muss die thermische Masse des Wärmeelements so klein wie möglich sein. Dies wird normalerweise erreicht mit mikroskopischen Dünnschicht-Wärmeelementen mit Dicken im Submikrometerbereich, aufgebracht auf einem Substrat mit kleiner thermischer Leitfähigkeit. Derartige Dünnschicht-Mikrowärmeelemente (Grösse: 100 Mikrometer \times 100 Mikrometer) des Druckkopfs eines kommerziellen thermischen Tintenstrahldruckers wurden verwendet zur Durchführung von Experimenten an der ETH Zürich (www.ltnt.ethz.ch). Für einen typischen elektrischen Puls von 25 V mit einer Dauer von 6 μ s (elektrische Erwärmung), wurde eine totale Leistungsdichte von ca. 1 GW/m² auf der Oberfläche des Wärmeelements erzeugt, die natürlich

nur für wenige Mikrosekunden andauerte. Eine Visualisierung des Verhaltens einer typischen explodierenden Mikroblase ist in Abbildung 1 gezeigt.

Von grossem Interesse ist die Frage nach dem thermodynamischen Wirkungsgrad von solchen auf Mikrowärmeelementen basierenden Anwendungen. Es ist gezeigt worden (www.ltnt.ethz.ch), dass die berechneten Wirkungsgrade bemerkenswert klein sind, in der Grössenordnung von 1%. Die wichtigste Erkenntnis dieses Resultats ist, dass Energieumwandlungen in Systemen im Mikrobereich zukünftig Lösungen erfordern werden, welche Einfachheit und hohen Wirkungsgrad vereinen.



Thermoelektrische Geräte

Thermoelektrische Kühlung und Stromerzeugung kann mit Hilfe des Peltier-Effekts erreicht werden, wobei elektrischer Strom, der durch die Schnittfläche zwischen zwei Materialien von unterschiedlichem thermischem Leistungs- oder Seebeck-Koeffizienten fließt, Kühlung bzw. Erwärmung bewirkt. Umgekehrt erzeugt eine Temperaturdifferenz über ein thermoelektrisches Material einen Stromfluss über eine Potentialdifferenz und somit elektrische Leistung (vgl. Abb. 2). Die Leistung von thermoelektrischen Anwendungen hängt ab von der dimensionslosen Zahl $ZT = S^2 \sigma T / k$, worin S die thermische Leistung ist, k die thermische Leitfähigkeit, σ die elektrische Leitfähigkeit und T die absolute Temperatur. Die besten zurzeit erhältlichen thermoelektrischen Materialien setzen sich aus dotiertem Bi_2Te_3 zusammen, weisen $ZT \approx 1$ bei Raumtemperatur auf und erreichen eine maximale Temperaturdifferenz von ungefähr 82 K bei Raumtemperatur und bei Kühlung. Das Leistungsverhalten von Anwendungen basierend auf derartigen Materialien ist jedoch makroskopischen Anwendungen, die auf volumetrischen Prozessen basieren, weit unterlegen. Auf theoretischer Basis kann gezeigt werden, dass der Leistungskoeffizient von thermoelektrischen Kühlungen oder der Wirkungsgrad von thermoelektrischen Maschinen vergleichbar ist mit demjenigen von Dampfkompansionsmaschinen, wenn ZT sich gegen 3 nähert. Sie haben zudem den zusätzlichen Vorteil, dass sie über keine beweglichen Teile verfügen, umweltverträglich sind und Miniaturisierung zulassen. Zusätzlich sind thermoelektrische Maschinen die vielleicht flexibelsten Maschinen in Bezug auf Brennstoffe,

da jede Wärmequelle (Kohlenwasserstoffe, Solarenergie oder nukleare Brennstoffe) verwendet werden kann. Trotz intensiver Forschung während der letzten vier bis fünf Jahrzehnte ist es nach wie vor sehr schwierig, Werte grösser als 1 für ZT zu erreichen.

Über die letzten Jahrzehnte haben M. S. Dresselhaus und Mitarbeiter am MIT theoretisch und experimentell bewiesen, dass das entsprechende ZT über eins hinaus erhöht werden kann, wenn thermoelektrische Materialien 2D nanostrukturiert («quantum wells») oder 1D nanostrukturiert («Nanodrähte») sind. Diese Erhöhung folgt aus mehreren Gründen: 1. Der Quanteneinschluss von Elektronen kann die elektronische Dichte von Zuständen in der Nähe der Fermiebene und die Elektronenstreuungsrate modifizieren, und verändert somit die thermische Leistung und die elektrische Leitfähigkeit. 2. Phononengrenzflächenstreuung und Phononeneinschluss können die elektrische Leitfähigkeit drastisch reduzieren. Abbildung 3 zeigt für Bi die vorausgesagte Zunahme in ZT als Funktion der Grösse für 2D- und 1D-Nanostrukturen. Während Bi über interessante Merkmale in der elektronischen Bandstruktur verfügt, die zu diesen Voraussagen führen, können ähnliche Trends für ZT auch bei anderen Materialien beobachtet werden. Diese Resultate eröffneten die Möglichkeit, thermoelektrische Energieumwandlungs-Anwendungen basierend auf nanostrukturierten Materialien zu erzeugen. Abbildung 4 zeigt BiTe -Nanodrähte (von oben) für die Verwendung in thermoelektrischen Anwendungen. Zurzeit wird weltweit in verschiedensten Laboratorien daran gearbeitet, Anwendungen aus einer

Vielzahl solcher Nanostrukturen herzustellen und zu zeigen, dass deren Leistungsverhalten besser ist als ihr Gegenstück aus kompakten Materialien. Somit könnten thermoelektrische Anwendungen zu einer existenzfähigen Alternative zur Stromerzeugung führen.

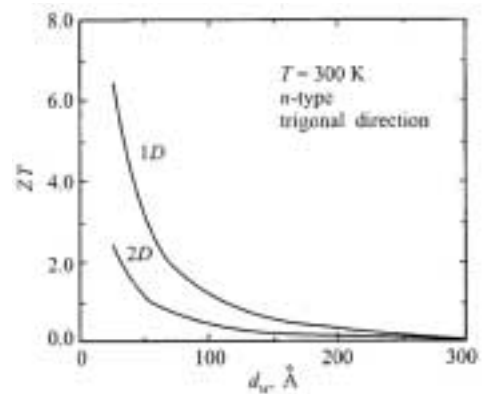
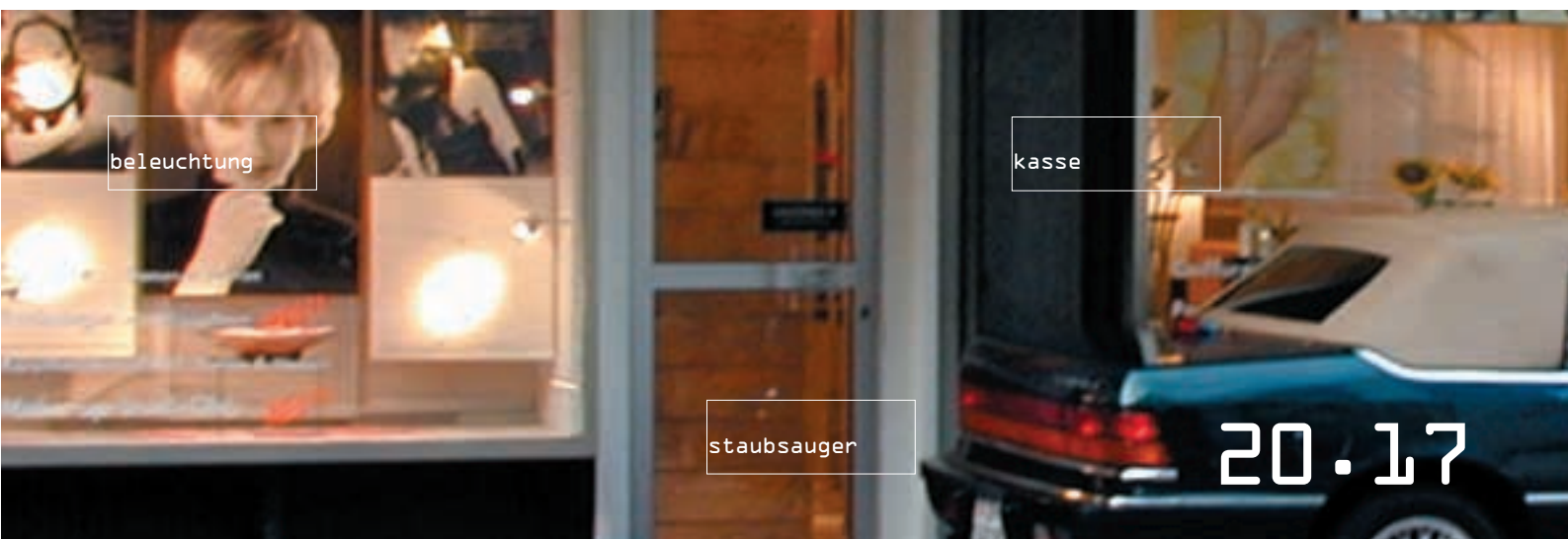


Abb. 3: Berechnete Abhängigkeit von ZT von Bi «quantum well» (2D) und Nanodraht (1D) Dimensionen (Dresselhaus et al., *Microscale Thermophysical Engineering*, Vol. 3, pp. 89–100, 1999).

Brennstoffzellen

Brennstoffzellen sind Anwendungen, die aufgrund einer katalytischen Reaktion zwischen Brennstoff (beispielsweise Wasserstoff) und Sauerstoff elektrischen Strom erzeugen. Von Natur aus basieren sie auf Grenzflächenphänomenen und sind folglich für die Miniaturisierung geeignet. In den meisten Brennstoffzellen wird ein Elektrolyt verwendet, durch den Wasserstoffionen von der Anode zur Kathode, wo die katalytische Reaktion abläuft, transportiert werden. Der Elektrolyt,



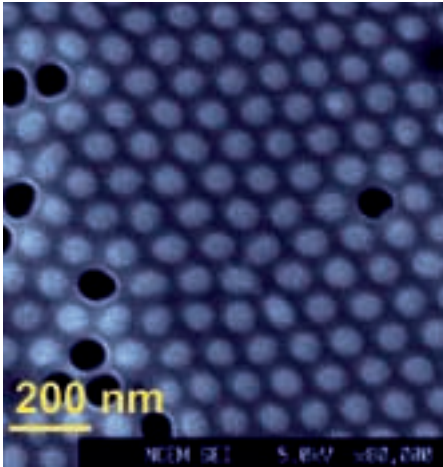


Abb. 4: BiTe-Nanodraht-Gitter (von oben gesehen), elektrochemisch erzeugt in einer Aluminium-Schablone (zur Verfügung gestellt von Prof. Angy Stacy, Chem. Dept., UC Berkeley).

der bei tiefen Temperaturen (100–150 °C) am häufigsten verwendet wird, ist die Polymer-Protonen-Austauschmembran (PEM) wie Nafion von DuPont. Tieftemperaturbrennstoffzellen benötigen eine Quelle von Wasserstoff. Möglicherweise könnte komprimierter Wasserstoff als Brennstoffquelle benutzt werden, obwohl flüssige Brennstoffe wie Ethanol oder Methanol viel bessere Transporteigenschaften aufweisen und weniger teuer sind. Um Wasserstoff von solchen Brennstoffen erzeugen zu können, ist jedoch ein katalytischer Reaktor oder ein Reformier notwendig. Während Reformier für makroskopische Brennstoffzellen erfolgreich hergestellt werden und weit verbreitet sind in ihrer Anwendung, stellt deren Miniaturisierung die grösste Herausforderung dar. Eine mit diesen Reformieren verbundene Problemstellung ist die Produktion von CO nebst

H₂, welches die Pt-Anode, wo H⁺-Ionen von H₂ erzeugt werden, kontaminieren kann.

Um die mit den Reformieren verbundenen Probleme zu umgehen, basieren viele makroskopische Brennstoffzellen auf Feststoffoxid-Elektrolyten. Im Gegensatz zu PEM's sind in diesen Materialien die mobilen Ionen diejenigen des Sauerstoffs, die auf der Anodenseite katalytisch mit Wasserstoff reagieren. Die Mobilität von Sauerstoff in diesen Elektrolyten ist stark temperaturabhängig, womit Feststoffoxid-Brennstoffzellen (SOFC) bei hohen Temperaturen (~700 °C) betrieben werden müssen. Bei diesen Temperaturen kann Wasserstoff von Brennstoffen wie Ethanol oder Methanol gewonnen werden ohne die Notwendigkeit eines Reformiers. Das macht die SOFC sehr attraktiv für die Miniaturisierung. Die grösste Herausforderung ist jedoch die Aufrechterhaltung der hohen Temperatur in der Membran bei miniaturisierten Anwendungen. Während dies für makroskopische Systeme keine Probleme darstellt, muss man sich bewusst sein, dass der Wärmeübergang ein Oberflächenprozess ist, der mit grösser werdendem Oberflächen/Volumen-Verhältnis zunimmt. Folglich erfordern Temperaturen von 700 °C innerhalb einer Mikroanwendung, deren Peripherie bei Umgebungstemperatur gehalten werden soll, sorgfältig überlegtes thermisches Design. Zurzeit wird ebenfalls intensiv an der Entwicklung von Feststoffoxid-Elektrolyten geforscht, die bei tiefen Temperaturen betrieben werden können.

Die Beispiele zeigen, dass die Energieumwandlung von grösster Wichtigkeit ist für das Design von erfolgreichen Systemen und Anwendungen im Mikrobereich. Umgekehrt zeigt sich, dass die Nanotechnologie, primär durch neuartig entwickelte Materialien (siehe z. B. X. Fang, et al., Applied Physics Letters, Vol. 78, pp. 1580, 2001) dazu beitragen kann, erhebliche Verbesserungen in Energieumwandlungsanwendungen zu erreichen, auch auf der makroskopischen Ebene.

Forschungsinformationen

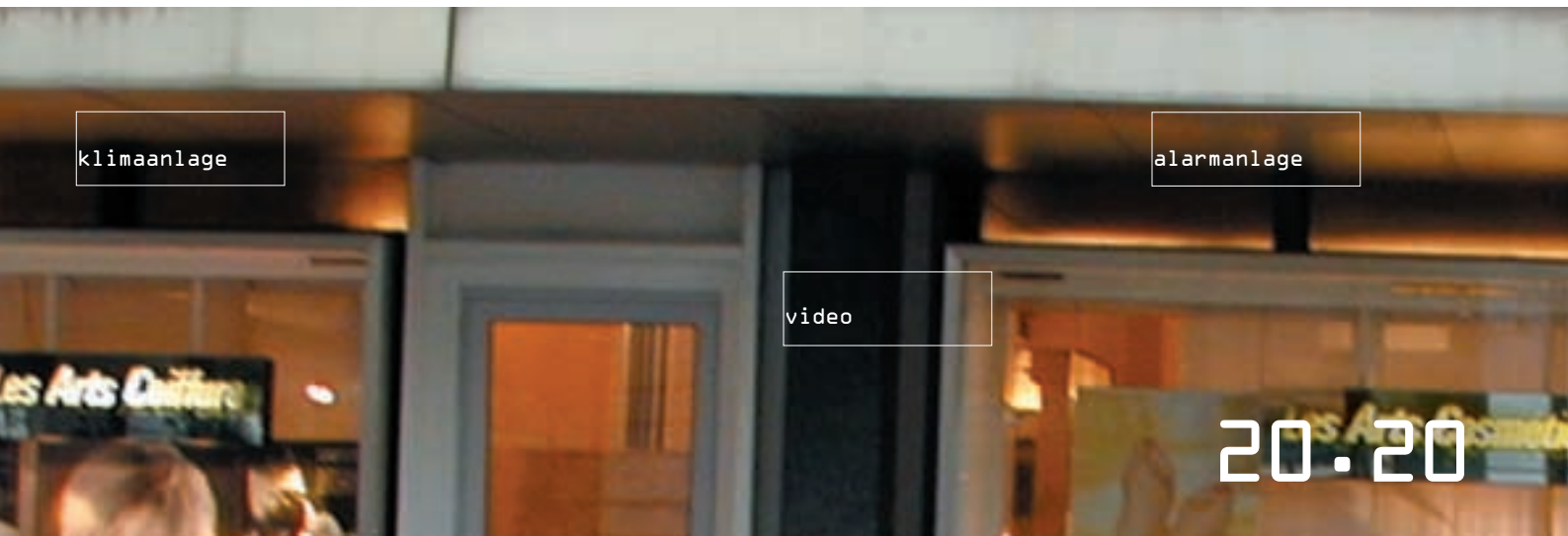
dimos.poulikakos@ethz.ch
<http://www.ltnt.ethz.ch>
 majumdar@me.berkeley.edu
<http://www.nano.me.berkeley.edu>

Prof. Dr. Dimos Poulikakos

Institut für Energietechnik,
 Laboratorium für Thermodynamik in
 Neuen Technologien, ETH Zürich

Prof. Dr. Arun Majumdar

Mechanical Engineering Department,
 University of California at Berkeley,
 Berkeley, CA 94720-1740, USA



Markus Steiner, IT

«Manchmal ist das richtige Gefühl entscheidend.»

«Bei der Entwicklung neuer Programme fürs Investment Banking ist mein Fachwissen von der ETH das eine. Fingerspitzengefühl und Teamwork das andere. So oder so, es sind Höchstleistungen gefragt. Nur volles Engagement führt zu kreativen Lösungen und erfolgreichen Umsetzungen.»

Welcome to an
exciting career.

www.ubs.com/graduates



WIE MOLEKULARE MASCHINEN ZELLEN BEWEGEN

PETER DIMROTH, MATTHIAS PETER, GAUDENZ DANUSER

Energie ist die Grundlage des Lebens. Unser Körper ist ständig dabei, Energie umzusetzen. Selbst die kleinsten lebenden Einheiten, die Zellen, produzieren und nutzen Energie für zahlreiche Prozesse. Eine Entdeckungsreise in die Welt der molekularen Maschinen und der Nanomotoren.

Jede Form von Leben ist an einen ständigen Energieumsatz gebunden. Die kleinsten lebenden Einheiten, die Zellen, erzeugen dabei aus dem Nahrungsangebot ihre Energiewährung in Form von Adenosintriphosphat (ATP) und verwenden diese zum Antrieb mannigfaltiger Prozesse. Dazu zählen der Aufbau der zelleigenen Bausteine (zum Beispiel Proteine), der Stoffaustausch über Membranschränke oder der Transport von Stoffen innerhalb der Zelle.

Ein weiterer Grossverbraucher von Energie sind Zellbewegungen. Die für uns wohl nachvollziehbarste Form von Zellbewegung ist die Muskelkontraktion, die uns die Fortbewegung ermöglicht und unseren Herzschlag antreibt. Viele andere Formen von Zellbewegungen sind uns weniger bewusst. Beispielsweise erfordert die embryonale Entwicklung eine Vielzahl von Zellbewegungen, bei denen verschiedene Zellarten, welche an örtlich getrennten

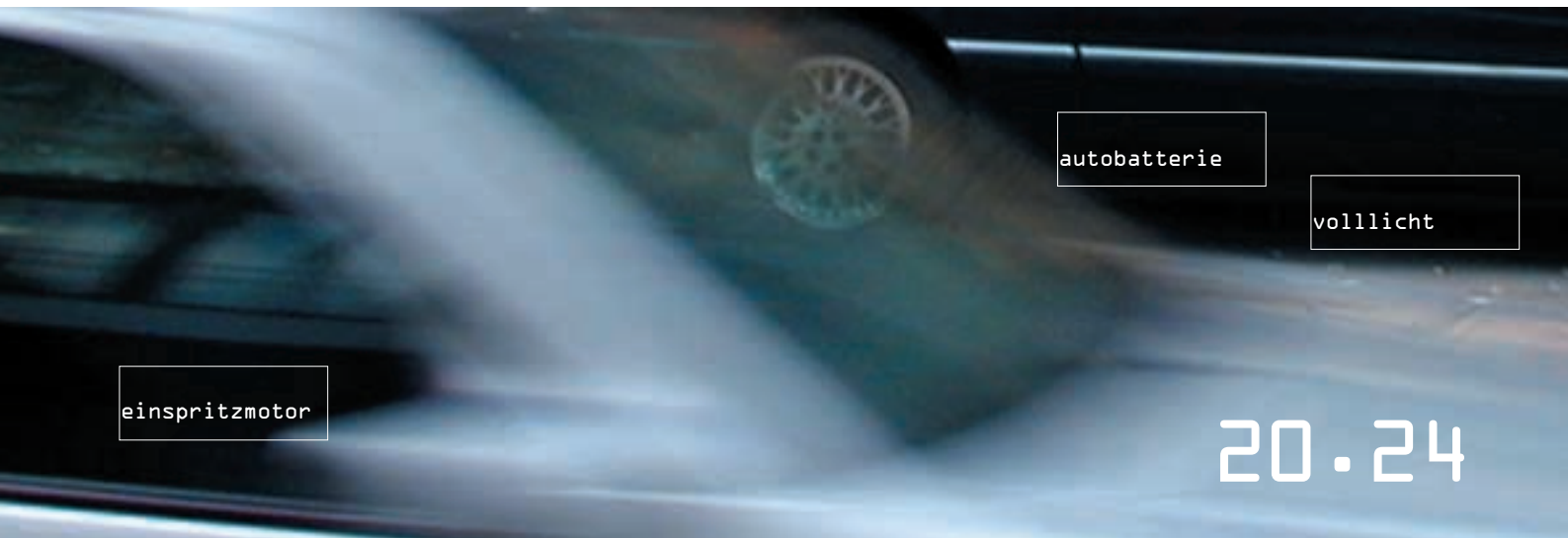
Stellen produziert werden, sich in Geweben und Organen zusammenfinden. Dasselbe gilt für die stetige Gewebeerneuerung in unserem Körper, die Heilung von Wunden oder das Immunsystem, wo Zellen Schadstoffe finden, sie einfangen, umschliessen und anschliessend über biochemische Reaktionen neutralisieren. Viele Erkrankungen, insbesondere Krebs, stehen im Zusammenhang mit einer gestörten Zellmigration.

Wegen der offensichtlich grundlegenden Bedeutung dieser Prozesse für die Biologie und Medizin, aber auch wegen der vielen potenziellen Anwendungen zum Beispiel in den Materialwissenschaften wurde die Forschung in diesem Feld in den letzten drei Jahrzehnten weltweit sehr stark aktiviert (Chicurel, 2002). Vor allem in den USA werden grosse Summen in diese Aktivitäten investiert. Beispielsweise entsteht an der University of Virginia das Cell Migration Consortium, wo ein grosses Team von

Biologen, Chemikern, Physikern und Computerwissenschaftlern sich in einem multidisziplinären Ansatz dieser Frage widmet. Auch an der ETH Zürich wird in verschiedenen Gruppen an diesem Thema geforscht. Drei von ihnen haben sich in diesem Artikel zusammengefunden, um einige Aspekte aus der Perspektive der Energieerzeugung und Umwandlung zu beleuchten und ihre neuesten Resultate vorzustellen.

Der ATP produzierende Nanomotor

Am Institut für Mikrobiologie untersucht eine Forschungsgruppe unter der Leitung von Prof. P. Dimroth den ATP produzierenden Nanomotor (ATP-Synthase). Dies ist ein grosser, in der Membran integrierter Komplex, der aus acht verschiedenen Proteinuntereinheiten zusammengesetzt ist. In Abbildung 1A ist ein Modell des molekularen Aufbaus dargestellt. Der Komplex ist aus zwei Motoren zusammengesetzt. Der



einspritzmotor

autobatterie

volllicht

20.24

so genannte F_1 -Motor (grün) produziert ATP. Der F_0 -Motor (blau), der sich in der Membran befindet, nutzt ein Gefälle von Natriumionen oder Protonen über die Membran aus, um eine Drehbewegung des Rotors gegenüber dem Stator in Gang zu setzen. Der Rotor besteht aus einer zirka 100 Å langen gekrümmten Welle, die sich zum Teil innerhalb des F_1 -Zylinders befindet und zum Teil die zentrale Verbindung zum F_0 -Motor herstellt, wo sie mit einem Rotorring (c_{11}) verbunden ist. Die Struktur dieses Rotorrings, der für die Erzeugung von Drehmoment von zentraler Bedeutung ist, wurde in Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Biophysik in Frankfurt gelöst und ist in Abb. 1B zu sehen. Das grüne und das rote Modell zeigen den Rotor von den beiden Membranseiten. Beide bestehen aus einem dicht gepackten inneren Ring um einen zentralen Hohlraum sowie aus einem äusseren Ring mit grösseren Abständen zwischen den einzelnen Untereinheiten. Hier befinden sich die Kanäle, durch die die Natriumionen bis zur Bindungsstelle in der Mitte der Membran diffundieren. Zu diesem F_0 -Motor gehört ausser dem Ring eine ebenfalls in die Membran eingebaute Statoruntereinheit (a, orange). Diese ist über einen peripheren Stiel (b_2) mit den Statoruntereinheiten des F_1 -Zylinders verbunden. Durch diese zweite Verbindung wird sichergestellt, dass sich der Rotor gegenüber dem Stator dreht und ein Mitdrehen von Teilen des Stators mit dem Rotor verhindert wird. Für den Antrieb des F_0 -Motors sind elektrostatische Kräfte verantwortlich. Auf jeder der elf Proteineinheiten der Turbine befindet sich in der Mitte der Membran eine negativ geladene Aminosäure. Diese wird von dem an der Membran anliegenden elektrischen Feld angezogen, was eine Drehbewegung induziert. Durch diese Drehung kommt die negative Rotorladung in Kontakt mit dem

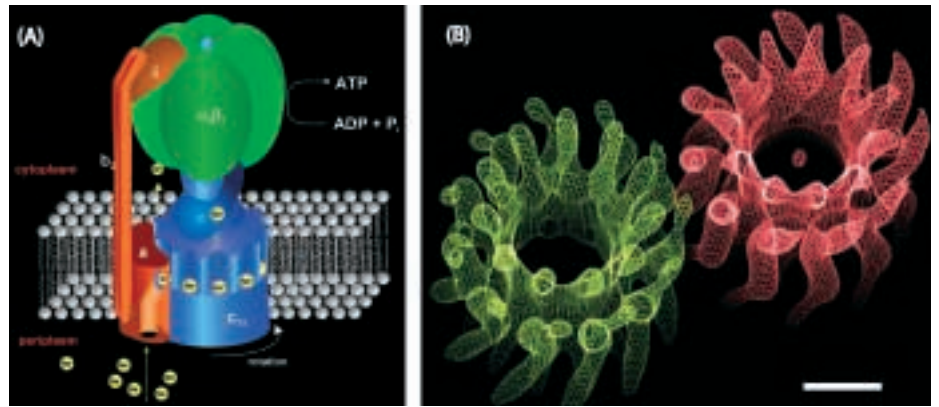


Abb. 1: Der Nanomotor. Schematischer Aufbau und Funktion der ATP-Synthase (A) und Struktur des Rotorringes (c_{11}) (B). Der gezeigte Balken entspricht 1,5 nm.

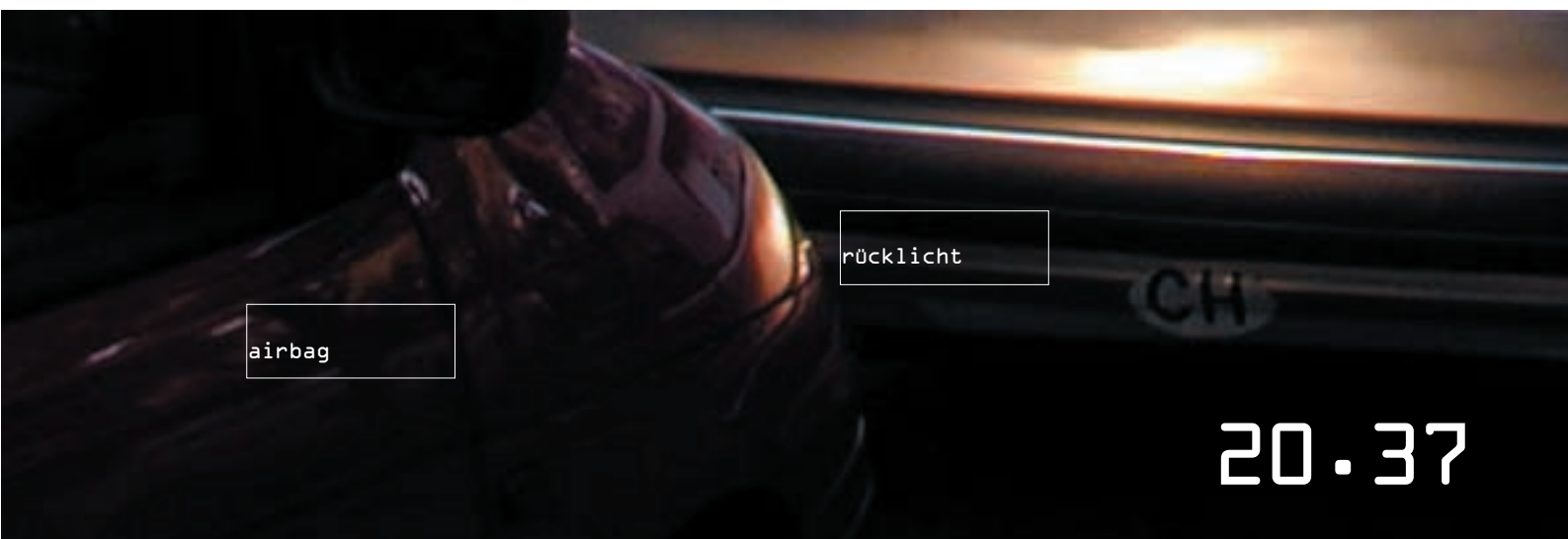
Ionkanal der Statoruntereinheit a und bindet ein Natriumion (oder Proton), das durch diesen Kanal hindurch diffundiert (Vonck et al. 2002; von Ballmoos et al.). Damit wird die negative Ladung neutralisiert und die elektrostatische Anziehung auf die nächste mit einer negativen Ladung versehene Rotoreinheit übertragen.

Der Rotor macht in elf einzelnen Schritten eine vollständige Umdrehung um seine Achse. Die an den Rotoreinheiten gebundenen Natriumionen werden über Kanäle im Rotor auf die ihrer ursprünglichen Herkunft gegenüberliegende Membranseite abgegeben. Die negativen Ladungen am Rotor werden so regeneriert und eine kontinuierliche Rotation sichergestellt. Durch die Drehbewegung kommt es wegen der Krümmung der Welle im Inneren des Zylinders zu unterschiedlichen Kontakten mit den angrenzenden Proteinen, die sich bei jeder Drehung wiederholen. Dadurch werden zyklische Veränderungen in der Struktur der Zylinderproteine induziert, mit deren Hilfe die Herstellung von ATP möglich wird. Der Rotor dreht sich mit etwa 50 Hz, und jede einzelne Drehung hat zur Folge, dass am F_1 -Motor drei Moleküle ATP produ-

ziert werden. Dies entspricht der täglichen Produktion von 12 960 000 ATP-Molekülen durch eine einzige Maschine. Da der Mensch unter extremen Anstrengungen bis zu 500 kg ATP am Tag umsetzen kann, kann man ausrechnen, dass dafür 10^{19} dieser Nanomotoren in unseren Zellen vorhanden sein müssen.

Der Zyklus der Zellbewegung

Einen Teil der Energie nutzen Zellen, um sich zu bewegen. Zellbewegungen entstehen durch einen immer wiederkehrenden Zyklus von Vorstossen, Kontrahieren und Entspannen (siehe Abb. 2). Die Kräfte für den Zellvorstoss werden durch Polymerisation des Proteins Aktin erzeugt, wobei chemische Energie in Form von ATP in mechanische Arbeit in Form einer Vorwärtsbewegung gewandelt wird. Gleichzeitig mit dem Vorstoss baut die Zelle neue Adhäsionsstellen. Die Dichte der Bindungen am vorstossenden Zellrand ist hoch und nimmt entgegen der Bewegungsrichtung graduell ab. Die räumliche Variation von Adhäsionsstellen ist in Abb. 2A gezeigt, wo deutliche Unterschiede in der Dichte der



Schritt 1: Vorstossen

Schritt 2: Kontrahieren

Schritt 3: Entspannen

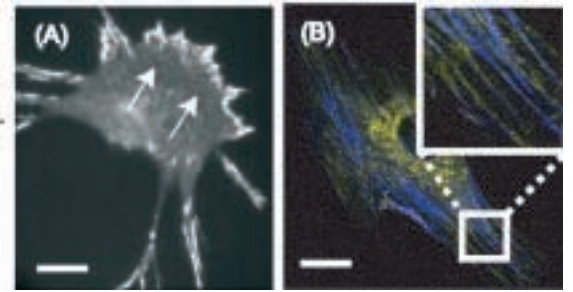
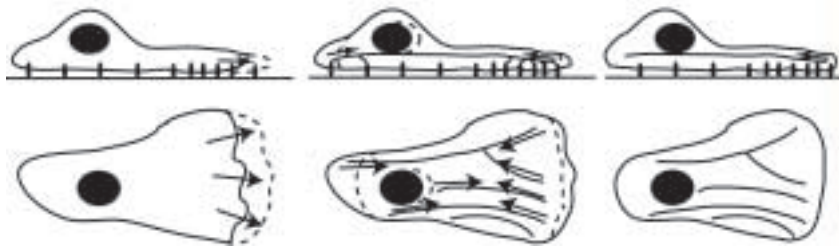


Abb. 2: Schema des Migrationszyklus der Zelle. (A) Verteilung der Zelladhäsionsstellen in einer migrierenden Zelle (Aufnahme von Toru Fischbach, Gruppe Danuser). (B) Bündelstruktur der Kontraktionsmaschinerie in einem Fibroblasten; Aktin-Filamente (blau) und Myosin-Filamente (gelb). (Aufnahme von Jonas Dorn, Gruppe Danuser). Balken = 10 μm .

Proteine (Integrine) sichtbar sind, die auf der unteren Seite der Zelle die Membran an das Substrat binden. Die Richtung der Zellbewegung ist mit Pfeilen angezeigt. Im zweiten Schritt bedient sich die Zelle einer molekularen Maschinerie, welche die Zelle zusammenzieht. Sie besteht aus einer Vielzahl von molekularen Motoren (Myosinen), die unter ATP-Verbrauch entlang des Aktin-Polymerskeletts wandern. In Abbildung 2 skizzieren wir eine Kontraktionsmaschinerie aus linearen Bündeln von ineinander greifenden Aktin- und Myosin-Filamenten. Die einzelnen Filamente sind mechanisch gekoppelt, und die Myosin-Motoren wandern zum jeweils näher gelegenen Bündelende, womit Zugkräfte entstehen. Die Struktur solcher Bündel ist in Abb. 2B visualisiert, wo im vergrößerten Fenster die Überlagerung der beiden Proteine Aktin (blau) und Myosin (gelb) in einer linearen Form deutlich wird. In diesem Zusammenhang wird die Bedeutung des Adhäsionsgradienten verständlich:

Während die Zugkräfte am vorderen Ende bei starker Adhäsion auf das Substrat übertragen werden, werden die wenigen schwachen Bindungen am hinteren Ende abgelöst, sodass das Zellende einen Schritt nach vorne geschleift wird. Im dritten und letzten Schritt entkoppelt sich die Kon-

traktionsmaschine wieder von den Adhäsionsstellen, und letztere werden in einen neuen, geeigneten Gradienten umverteilt.

Wandlung von ATP in mechanische Arbeit

Damit die Zelle sich bewegen kann, ist ein koordiniertes Zusammenspiel von molekularen Kräften notwendig. Die Polymerisation von Aktin ist eine chemische Reaktion, bei der Monomere, also einzelne Moleküle, in ein Polymer, das heißt einen Molekülverbund, eingebaut werden. Das Aktin-Polymer bildet lange, in eine Doppelhelix gewirnte Filamente, die am einen Ende (dem Plus-Ende) wachsen und am anderen Ende (dem Minus-Ende) abgebaut werden. Interessanterweise führt die Polymerisation am Plus-Ende zu einer Stosskraft. Ein Aktin-Monomer kann nur dann in ein Filament eingebaut werden, wenn es ein ATP-Molekül gebunden hat. Beim Einbau wird die im ATP gespeicherte Energie mit einem Wirkungsgrad von zirka 30% in mechanische Arbeit umgesetzt, das heißt, das Aktin-Polymer kann entgegen einer Kraft wachsen. Die maximale Kraft, die die Polymerisation eines Filaments erzeugen kann beträgt 6,4 pN. Das scheint wenig, genügt

aber, um im ersten Schritt des Migrationszyklus (Abb. 2) die Membran nach vorne zu stossen. Pro μm^2 stehen der Zelle circa 280 Filamente zur Verfügung, alle mit ihrem polymerisierenden Plus-Ende in Richtung des Vorstosses weisend. So entsteht ein Druck von 2 kPa. Wäre die Zelle so gross wie ein Schneepflug, so könnte sie also mit der über Polymerisation erzeugten mechanischen Kraft eine Tonne Schnee vor sich hinschieben. Während der Polymerisation wird ATP in die beiden Abfallprodukte Adenosindiphosphat (ADP) und ein anorganisches Phosphat (P_i) abgebaut. Nach der Depolymerisation, das heißt dem Zerfall der Aktin-Filamente in Monomere am Minus-Ende, wird das ADP wieder durch ein ATP ersetzt, damit die «verbrannten» Monomere für eine erneute Polymerisation kompetent werden. Das freie ADP wiederum wird über den oben beschriebenen Nanomotor wieder zu ATP rezykliert (Abb. 1).

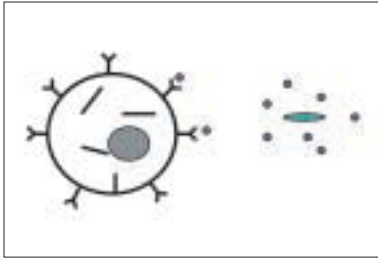
In sehr ähnlichen Zyklen arbeiten auch molekulare Motoren. Im Falle des Myosin führt der ATP-Abbau zu einem mechanischen Kippen des Motorkopfs, wodurch ein Hebelarm das gebundene Aktin-Filament einen Schritt in die Minus-Richtung transportiert (Abb. 4). Wirkungsgrad und Kraft-

lüftung

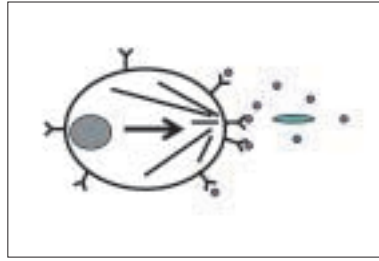
eiswürfel

20.38

Schritt 1: Empfangen von Signalen



Schritt 2: Entstehung von Asymmetrie und Start der Zellbewegung



Schritt 3: Phagozytose (d. h. Umschliessen des Bakteriums)

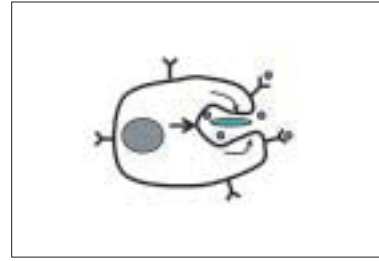


Abb. 3: Schema zur Kraftentwicklung durch Aktin-Polymerisation und Funktionsprinzip eines einzelnen Myosin-Motorkopfes. Beide Prozesse wandeln chemische Energie in Form von ATP in mechanische Arbeit.

erzeugung solcher Motoren liegen im Bereich der Werte für die Polymerisation. In den oben erwähnten kontraktile Bündeln sind Tausende solcher Motorköpfe in einem Myosin-Filament zusammengefasst, und mehrere solcher Filamente gleiten zwischen Hunderten von Aktin-Filamenten. Durch dieses Ineinandergreifen entstehen die für die Zellkontraktion notwendigen Zugkräfte.

Die Entstehung von Zellasymmetrie

Die intrazelluläre Asymmetrie bildet eine weitere wichtige Grundvoraussetzung für die Bewegung von Zellen (Bähler und Peter, 2000). Die Zelle muss die Polymerisation von Aktin-Filamenten und die Aktivierung von Myosin-Motoren an einem Ende der Zelle konzentrieren und koordinieren, so dass eine gerichtete Vorwärtsbewegung entstehen kann. Der Ort dieser Konzentration ist nicht zufällig, sondern wird von verschiedenen äusseren Faktoren bestimmt. Ein anschauliches Beispiel liefert die Phagozytose eines Bakteriums. Wenn ein weisses Blutkörperchen ein eindringendes Bakterium erfolgreich bekämpfen will, muss es den Eindringling nicht nur aufspüren, sondern es muss sich auch dar-

auf zubewegen und den Parasiten einverleiben (Abb. 3).

Den eigentlichen Kompass der Zellen bilden verschiedene Sensoren in der Zellmembran, die chemische Signale empfangen und mittels einer Kettenreaktion ins Zellinnere weiterleiten. Diese Sensoren sind anfangs gleichmässig auf der Zelloberfläche verteilt, werden aber beispielsweise von einem Bakterium ungleichmässig angeregt (Abb. 3; Schritt 1). Das anfangs kleine asymmetrische Signal wird so verstärkt, dass eine robuste Polarisationsachse entsteht (Schritt 2). Die Empfänger der Signale sind das Aktin-Skelett und die Myosin-Motoren, die gemeinsam die notwendige mechanische Arbeit leisten, um die Zelle vorwärts zu bewegen. Die Polymerisation von neuen Aktin-Filamenten in einer Zelle geschieht nicht spontan, sondern benötigt neben ATP auch einen Initiator (Nukleator) und verschiedene weitere Moleküle, die kurze Aktin-Filamente verlängern und stabilisieren. Es ist der Gruppe von Prof. M. Peter am Institut für Biochemie kürzlich gelungen, zwei dieser Nukleatoren zu identifizieren: Formine sind verantwortlich für gerade Aktin-Filamente, während Arp2/3-Komplexe ein verästeltes Netzwerk von Aktin-Filamenten

erzeugen (Chang und Peter, 2002). Es hat sich gezeigt, dass die angeregten Sensoren an der Zelloberfläche die Aktivität dieser Nukleatoren regulieren und somit bestimmen, wann und wo in der Zelle neue Aktin-Filamente entstehen. Die örtlich erzeugten Kräfte erlauben dann eine Vorwärtsbewegung in Richtung der aktivierten Sensoren und somit in der Richtung des Eindringlings. Die grosse Schwierigkeit für eine Zelle besteht darin, dass sie jederzeit ihre Richtung ändern können muss, damit sich das Bakterium nicht absetzen kann. Die Regelung des Aktin-Skelettes ist daher sehr dynamisch, und die Aktin-Nukleatoren müssen sehr schnell ein- und ausgeschaltet werden können. Wenn das Bakterium eingefangen ist, wird das Aktin-Skelett erneut umgebaut, um den Eindringling zu umschliessen und ihn letztlich abzutöten (Schritt 3).

Steuerung der Zellbewegung

Das einfache Modell des Migrationszyklus in Abb. 2 kann nicht erklären, wie sich Zellen entlang komplizierter Bahnen im zwei- und dreidimensionalen Raum bewegen. Dazu bedarf es eines gleichzeitigen Zusammenspiels aller drei Faktoren: Vorstoss

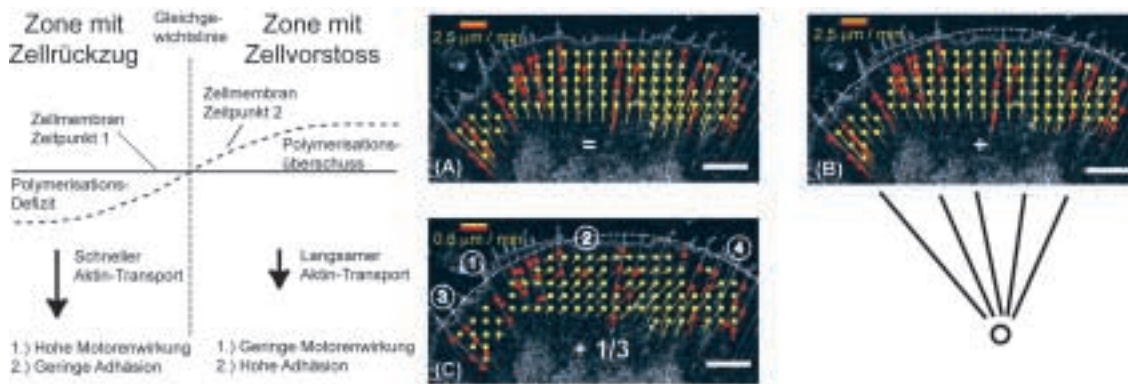


Abb. 4: Modell und Daten zum räumlich differenzierten Aktin-Transport in einer Zelle, welcher die Zellbewegung und die Membrandeformation steuert. Die Bilder (A) bis (C) quantifizieren den Aktin-Transport an der Spitze einer migrierenden Nervenzelle. Balken = 5 µm.

über Polymerisation, Kontraktion über Motoren und Traktion über adhäsive Proteine. Ein sehr vereinfachtes Modell für den gleichzeitigen Zellrückzug (links) und Vorstoss (rechts) ist in Abbildung 5 gegeben. Gemäss diesem Modell führt eine starke Kontraktion infolge grosser Motoren-Aktivität bei gleichzeitig geringer Adhäsion zu einem erhöhten Transport des Aktin-Skeletts weg von der Zellmembran. Dieser Transport könnte über gesteigerte Polymerisation an der Zellmembran kompensiert werden. Geschieht dies jedoch nicht, so entsteht ein Polymerisationsdefizit, und die Membran, welche an das Aktin-Skelett gebunden ist, wird zurückgezogen. Umgekehrt kann bei geringer Motoren-Aktivität und grosser Adhäsion ein Polymerisationsüberschuss entstehen, der zu einem Vorstossen der Zellmembran führt. Demnach können nun komplexe Zellbewegungen durch räumlich differenzierten Aktin-Transport und Polymerisation erklärt werden. In der Realität sind die Modelle zur Entstehung solch differentieller Phänomene wesentlich komplizierter, und es bedarf aufwändiger molekularer und genetischer Techniken im Zusammenspiel mit Computersimulationen der Polymermechanik, um diese Maschinerie komplett aufzuschlüsseln (Forschungsthema der Gruppe von Prof. G. Danuser am Labor für Biomechanik).

Diese Modelle sind von zellbiologischen Messdaten inspiriert. Tatsächlich ist es uns gelungen, solch differentielle Aktin-Transportfelder mittels spezialisierter Lichtmikroskopie aufzulösen (Danuser & Oldenbourg 2000). Abb. 4A zeigt den gesamten Aktin-Transport an der Spitze einer migrierenden Nervenzelle. Abb. 4B zeigt die zentripetale Transportkomponente, die im Mittel durch Polymerisation an der Membran wieder ausgeglichen wird. Dadurch entsteht eine hemisphärische Gleichge-

wichtslinie, die die mittlere, kreisförmige Form dieser Zelle bestimmt. Abb. 4C stellt die räumlichen Abweichungen zwischen den Feldern A und B dreimal vergrössert dar. Dieses Störfeld entspricht den differentiellen Transport-Abweichungen, die zu den im Modell beschriebenen Vorstössen und Rückzügen führen. Tatsächlich beobachten wir einen Vorwärtsdrift im Störfeld (das heisst eine Verlangsamung des Gesamttransportes in A) dort, wo die Zellmembran relativ zur Gleichgewichtslinie vorstösst (Marke 1). Das Störfeld weist eine Seitwärtsbewegung auf, wo die Membran sich verflacht (Marke 2). Und die Zelle hat eine Tendenz, sich zurückzuziehen, wo das Störfeld eine Beschleunigung des Transports zum Zentrum beschreibt (Marken 3 und 4, wobei der Effekt bei Marke 4 visuell nicht sehr klar ist, da diese Transportfelder einem statischen Bild überlagert sind).

Forschungsinformationen

Informationen zu den vorgestellten Forschungsprojekten:

Gruppe Dimroth:
http://www.micro.biol.ethz.ch/re/re_dimroth/
 Gruppe Danuser:
<http://www.lfb.ethz.ch/BMMG/>

Allgemeines zur Zellmigration:
<http://users.rcn.com/jkimball.ma.ultranet/BiologyPages/>
 The cell migration consortium:
<http://www.cellmigration.org/index.html>
 The myosin Homepage:
<http://www.mrc-lmb.cam.ac.uk/myosin/myosin.html>

Literatur

- Chicurel, M. (2002). Cell Migration Research Is on the Move. *Science* 295 (5555): 606–609.
- Chang, F., and Peter, M. (2002). Formins set the record straight. *Science* 297: 531–532.
- Danuser, G., Oldenbourg R. (2000). Probing f-actin flow by tracking shape fluctuations of radial bundles in lamellipodia of motile cells. *Biophys. J.*, 79 (1): 191 – 201.
- Vonck, J., Krug von Nidda, T., Meier, T., Matthey, U., Mills, D. J., Kühlbrandt, W., Dimroth, P. (2002). Molecular Architecture of the Undecameric Rotor of a Bacterial Na⁺-ATP Synthase. *J. Mol. Biol.* 321: 307–316.
- Von Ballmoos, Appoldt, Y., Brunner, J., Granier, T., Vasella, A., Dimroth, P. (2002). Membrane topography of the coupling ion binding site in Na⁺-translocating F₁F₀ ATP synthase. *J. Biol. Chem.* 277: 3504–3510.

Prof. Dr. Peter Dimroth

ordentlicher Professor für Mikrobiologie an der ETH Zürich

Prof. Dr. Matthias Peter

ordentlicher Professor am Institut für Biochemie der ETH Zürich

Prof. Dr. Gaudenz Danuser

Assistenzprofessor für Zellbiomechanik am Laboratorium für Biomechanik der ETH Zürich

aquarium

klimaanlage

zigarettenautomat

20.48

CAREER START



Geben Sie Impulse, setzen Sie Ihr Wissen um und verwirklichen Sie Ihre Ziele. Bei uns haben qualifizierte, talentierte und motivierte Persönlichkeiten mit einem (Fach-) Hochschulabschluss vielfältige und individuelle Einstiegs- und Laufbahnmöglichkeiten. Ob im globalen Investmentbanking/Trading, im internationalen Private Banking, in der weltweiten Vermögensverwaltung für institutionelle Anleger oder im Fondsbereich, im Firmen- und Individualkundengeschäft, e-Business oder bei Versicherungsdienstleistungen im Leben- und Nichtlebensgeschäft, überall stellen sich Ihnen interessante Herausforderungen. Und stets bieten sich Ihnen vielfältige Perspektiven für eine aussergewöhnliche Karriere bei der CREDIT SUISSE GROUP. Kommen Sie mit uns ins Gespräch!

ENERGIESYSTEME OPTIMAL KONFIGURIEREN

ADRIAN BEJAN

Was haben ein Flugzeug, eine Fliege und ein Kraftwerk gemeinsam? Ein ideales Energiesystem wandelt den grösstmöglichen Anteil der zur Verfügung stehenden Energie in nutzbare Arbeit (Exergie) um. In Realität gehen aber mehr oder weniger grosse Teile dieser Exergie wegen unvermeidbarer Fließwiderstände verloren. Die Kunst der Energiesystemoptimierung besteht darin, die Summe dieser verlorenen Exergien durch kluge Wahl der Strukturen möglichst klein zu halten.

In der Energietechnik geht die Entwicklung hin zu immer komplexeren Systemen, wobei die kleinsten Skalen immer kleiner werden und die Anzahl der Systemkomponenten wächst. In diesem Beitrag werden einige der neusten Strategien zur Maximierung des thermodynamischen Wirkungsgrades komplexer Energiesysteme vorgestellt. Die Grundlage dazu bildet die Exergieanalyse und die Exergieoptimierung der Struktur von Strömungssystemen.

Der Hauptgedanke ist folgender: Am Anfang eines jeden Entwurfs ist die Struktur des Energiesystems noch unbekannt. Die Zielfunktion im Entwurfsprozess ist die Maximierung des totalen Systemwirkungsgrades. Dabei ist es notwendig, eine *ganzheitliche Perspektive* einzunehmen. Wie erfolgreich auch immer kleinskalierte

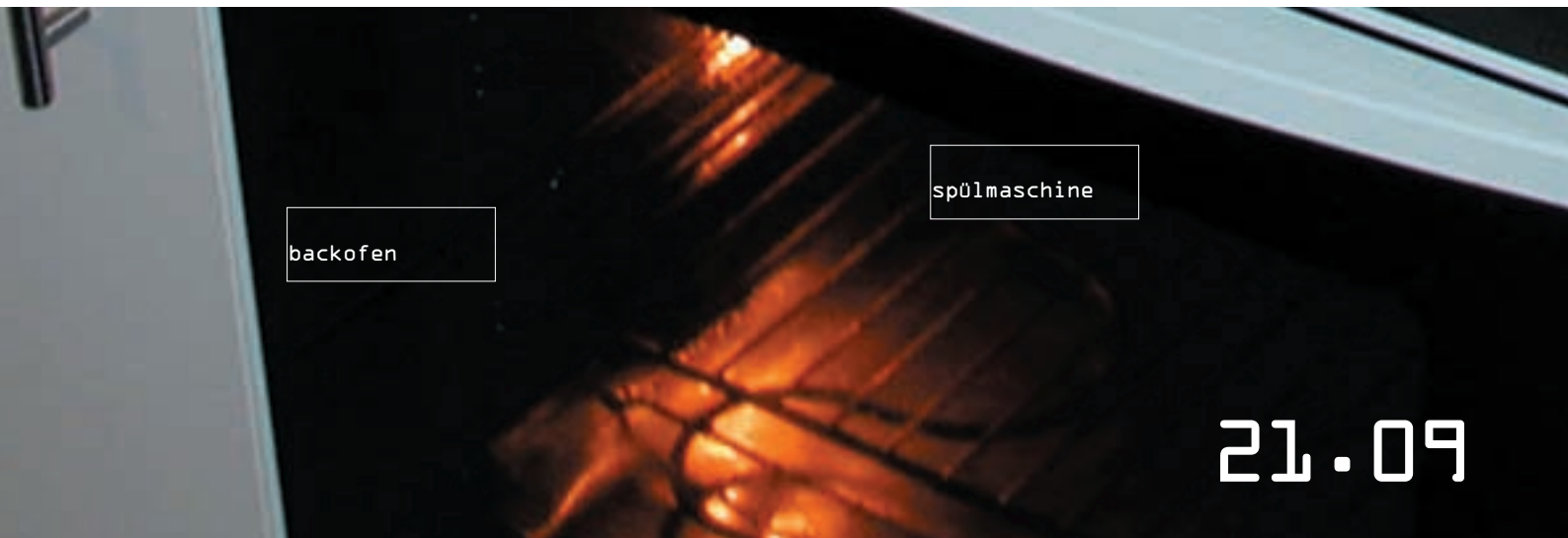
Prozesse und Apparate entwickelt werden, am Schluss müssen diese vielen Einzelelemente zu grossen Anlagen integriert werden. Die Herausforderung besteht darin, in diesem Schritt das vorhandene Optimierungspotenzial voll auszuschöpfen.

Die Exergieanalyse hat sich als eine hervorragende Grundlage zur Optimierung der globalen thermodynamischen Eigenschaften erwiesen. Ein Kernpunkt dieser Strategie ist die Minimierung der *totalen* Fließwiderstände («thermodynamische Irreversibilität») bei einzuhaltenden Systemrandbedingungen. Die daraus resultierende Konfiguration des Energiesystems ist durch eine Vielzahl von Längen-, Zeit- und Kräfteskalen gekennzeichnet. Diese Struktur zeichnet sich speziell durch ihre *Geometrie* aus: Formenvarianten, baumar-

tige Netzwerke für die Aufnahme und Verteilung, Anzahl der Bauteile, Grössenverhältnisse der Teile und ihre Anordnung zueinander.

Das ideale System

Die Exergieanalyse basiert auf dem Grundgedanken, dass in jedem System (sei es offen oder geschlossen) eine bestimmte Menge nutzbarer Energie steckt (die so genannte Exergie). Dieser Anteil der totalen Energie kann, wenn das System ideal (d. h. verlustfrei) mit der Umwelt ins Gleichgewicht gebracht wird, in mechanische Arbeit umgewandelt werden. In der ersten Abbildung fliesst beispielsweise ein gegebener Massenstrom durch ein ideales Kraftwerk, das in thermischer Verbindung



backofen

spülmaschine

21.09

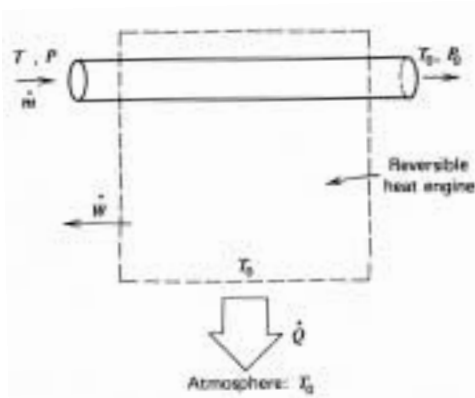


Abb. 1: Modell eines theoretisch idealen Kraftwerks ohne Exergieverlust. Ein Strom einer Substanz, der nicht die gleiche Temperatur oder den gleichen Druck wie die Umgebung aufweist, hat das Potenzial, nutzbare Energie (Exergie) zu produzieren. Am meisten Exergie würde dann produziert, wenn Stoffstrom und Umgebung reversibel interagieren, d. h. ohne Strömungswiderstände.

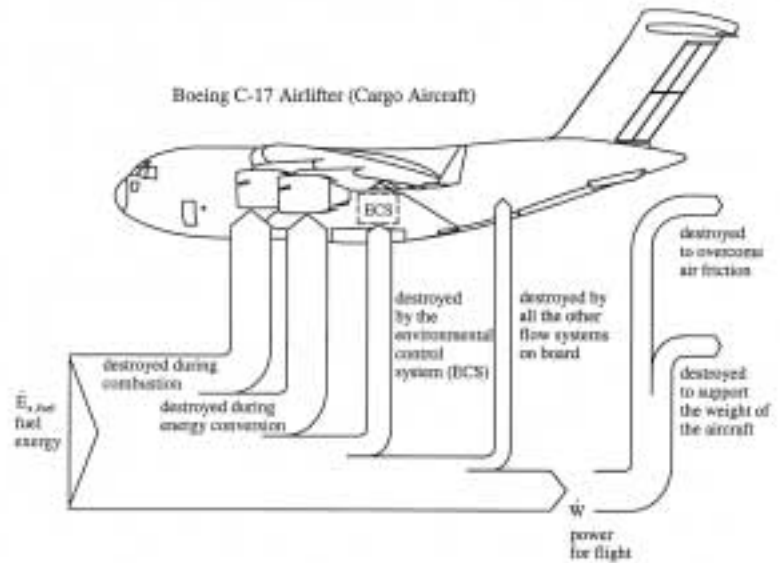


Abb. 3: Die Dissipation von Exergie durch die Flüsse um und im Körper eines modernen Flugzeugs. Die Exergie wird als Treibstoff mitgeführt und vollständig dissipiert, um alle Funktionen des Energiesystems des Flugzeugs zu betreiben.

mit der Umgebung steht. Das Kraftwerk entnimmt dem Massenstrom all seine Arbeitsfähigkeit und gibt ihn danach an die Umwelt ab. Dieser austretende Massenstrom ist unbrauchbar geworden, d. h. seine Temperatur, sein Druck usw. sind mit der Umwelt im Gleichgewicht. Die Arbeit, die dieses Kraftwerk produziert, ist in diesem theoretischen Fall die in dem einfließenden Massenstrom vorhandene Exergie, welche nur relativ zur spezifischen Umgebung definiert und gemessen werden kann.

In realen Systemen müssen alle Flüsse (Fluide, Wärme, Elektrizität usw.) Widerstände überwinden. Reale Flüsse verlaufen daher unumkehrbar. Sie erzeugen Entropie, und als Konsequenz davon ist die produzierte Arbeit kleiner als diejenige, die vom oben beschriebenen idealen System erzeugt wird. Dieses Resultat ist als der zweite Hauptsatz der Thermodynamik bekannt und kann mit dem Begriff der Exergie wie folgt formuliert werden: Die Exergie des zufließenden Massenstroms wird teilweise oder gänzlich durch die verschiedenen Strömungswiderstände dissipiert. Die übrige Exergie wird als Arbeit vom Kraftwerk an die Umwelt abgegeben.

ten die Dimensionen, welche ihrem Beitrag an die totale Systemirreversibilität entsprechen. Die optimale Verteilung der Irreversibilitäten ist das Prinzip, das die bestmögliche Struktur des Energiesystems hervorbringt.

In der Planung von modernen Kraftwerken, welche beträchtlich komplexer sind als das Beispiel von Bild 2, werden diese Ansätze zunehmend verwendet. Zwei Entwicklungsebenen sind dabei wichtig: einerseits die thermodynamische Optimierung bzw. die Minimierung der totalen Exergieverluste und andererseits die thermökonomische Optimierung, d. h. die Verminderung der totalen Kosten, wobei die dissipierte Exergie eine wichtige Komponente davon ist. Dieser Ansatz ist zur vorherrschenden neuen Methode in der energietechnischen Lehre, Forschung und industriellen Praxis geworden. Die Grundlagen dazu wurden von Aurel Stodola (1859–1942) formuliert, der mehr als dreissig Jahre an der ETH Zürich wirkte. Im Anhang zu seinem berühmten Buch über Dampfturbinen (*Steam Turbines*, Van Nostrand, New York, 1905) rief Stodola alle Ingenieure dazu auf, thermodynamische Irreversibilität durch kluge Systementwürfe zu minimieren.

Das optimale Flugsystem

Eine der komplexesten und herausforderndsten Anwendungen dieser Theorie ist in der dritten Abbildung dargestellt. In einem modernen Flugzeug tragen viele

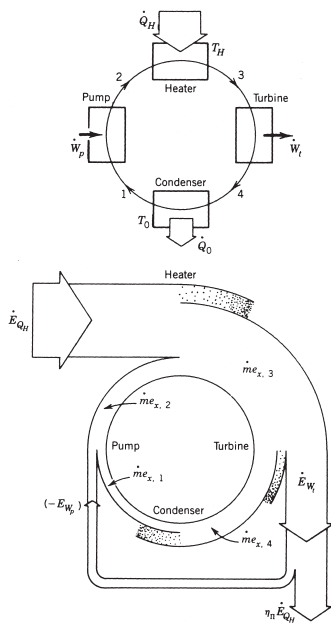


Abb. 2: Der Exergiekreislauf eines Dampfturbinenkraftwerks. Die obere Zeichnung zeigt die traditionelle Darstellung des Wasserkreislaufs. Die zugeführte Wärme wird nur teilweise in Arbeit umgewandelt. Die untere Darstellung zeigt den Exergiefluss zusammen mit der Wasserströmung. Exergie wird dem System zugeführt und teilweise in jeder Komponente dissipiert (gezeichnet als dunkle Ströme, die ins Nichts führen).

Exergieanalyse und Kraftwerke

Die zweite Abbildung zeigt, wie jede der vier Hauptkomponenten eines klassischen Rankine-Zyklus-Kraftwerks einen Teil der einfließenden Exergie dissipiert. Der obere Teil ist die klassische Darstellung des Wasserkreislaufs und erklärt, wie die zugeführte Wärme teilweise in Arbeit umgewandelt wird. Der untere Teil von Bild 2 stellt das entsprechende Exergierad dar. Es zeigt, wie die einzelnen Komponenten einen Teil des Exergieflusses der Wasserströmung dissipieren. Diese verlorene Exergie wird als dunkel schattierte Ströme dargestellt, die ins Leere laufen. Das Ziel der Exergieanalyse und der Exergieoptimierung besteht darin, die Summe dieser dissipierten Exergieströme zu minimieren. Dabei wird der Systemwirkungsgrad maximiert, und die Systemkomponenten erhal-

Komponenten und Prozesse zur endgültigen Dissipation der Exergie $E_{x, fuel}$ bei, die durch den Treibstoff an Bord mitgeführt wird. Der erste Exergieverlust (ungefähr 30 Prozent) entsteht beim Verbrennungsprozess selbst. Ein weiterer Verlust wird durch die irreversible Funktionsweise der Triebwerke verursacht. Der verbleibende Exergiestrom treibt alle Subsysteme des Flugzeugs an.

An erster Stelle steht die Exergie W , die gebraucht wird, um den Flug aufrechtzuerhalten. Diese wird in der Strömung um das Flugzeug und in den Randwirbeln dissipiert. Die verbleibende Exergie wird durch die zahlreichen Hilfssysteme verbraucht. An erster Stelle steht hier das Klimatisierungssystem für die Kabinen (ECS = cabin environmental control system), das selbst wiederum eine Ansammlung von thermodynamischen Subsystemen darstellt. Die Konfiguration und die Dimensionen aller dieser Komponenten (zum Beispiel eines Wärmetauschers) können mit Hilfe desselben Grundprinzips, nämlich die totale Dissipation von Exergie an Bord zu minimieren, abgeleitet werden. Jedes Optimum stellt die ideale Verbindung von zwei oder mehr irreversiblen Mechanismen dar, und das Ergebnis ist eine Struktur in Raum und Zeit. In einem Wärmetauscher zum Beispiel resultieren die Formen und Dimensionen der aktiven Elemente aus dem Wettbewerb zwischen den Widerständen des Flüssigkeits- und des Wärmestroms.

Ein anderes Beispiel ist der «Tradeoff» zwischen der Exergie, die bei der Überwindung des Luftwiderstands dissipiert wird, und der Exergie, die verbraucht wird, um das Eigengewicht des Flugzeugs zu tragen (induzierter Widerstand). Diese beiden Verluste wetteifern in der Verringerung von W in Abbildung 3. Der Verlust durch den Luftwiderstand nimmt proportional D^2V^3 zu, wobei V die Geschwindigkeit und D die Länge des Flugzeugs darstellt. Der Exergieverlust durch den induzierten Widerstand ist proportional zu D^4/V . Die Minimierung der Summe dieser Verluste zeigt, dass es eine optimale Fluggeschwindigkeit mit minimalen Exergieverlusten, d.h. mit minimalem Treibstoffverbrauch, gibt. Die optimale Geschwindigkeit ist proportional zu $D^{1/2}$ oder $M^{1/6}$, wobei M die Masse des Flugzeugs ist.

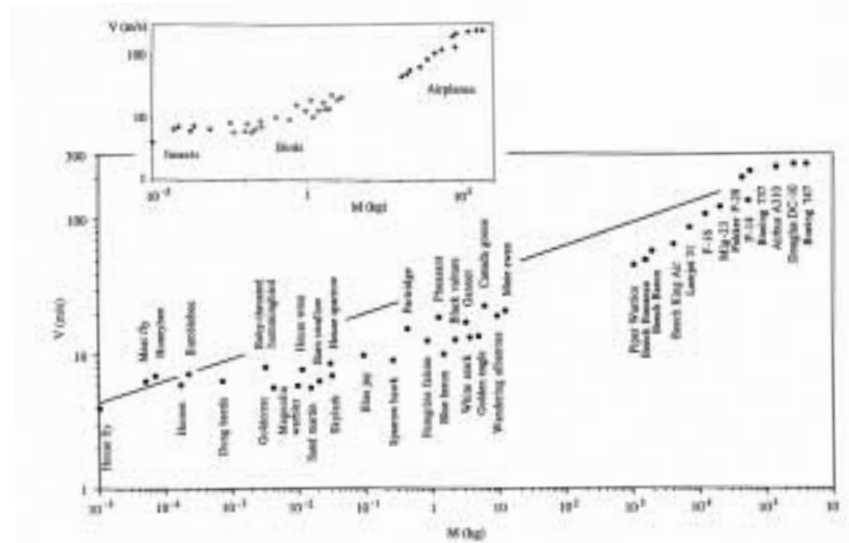


Abb. 4: Das universale Verhältnis von Fluggeschwindigkeit und Körpermasse hoch 1/6. Die Linie ist das theoretische Resultat, das man erhält, wenn man die Gesamtexergie, die gebraucht wird, um den Flug aufrechtzuerhalten, minimiert. Die Bewegung von einem Punkt zum anderen wird mit minimalem Exergiebedarf (d. h. Treibstoff oder Nahrung) erreicht, wenn innerhalb des Flugkörpers und um ihn herum alle Flüsse mit geringstem Widerstand geführt werden.

Die vierte Darstellung zeigt die theoretische Linie $V_{opt} \sim M^{1/6}$, die nahe den optimalen Fluggeschwindigkeiten moderner Flugzeuge zu liegen kommt. Die beobachteten Fluggeschwindigkeiten vieler Vögel und Insekten stimmen ebenfalls mit dem theoretischen Resultat überein. Deshalb lassen sich die Implikationen dieser Theorie verallgemeinern: Alle fliegenden Energiesysteme sind so konfiguriert, dass sie möglichst wenig Exergie dissipieren. Eine Fliege beispielsweise erreicht dies dadurch, dass sie möglichst wenig Treibstoff beziehungsweise Futter benötigt. Alle internen und externen Flüsse eines solchen Systems stossen auf minimale Widerstände und dissipieren so am wenigsten Exergie.

Neuland im Entwurfsprozess

Im Maschinenbau regiert das gleiche Prinzip die evolutionäre Entwicklung der Struktur in verwandten Energiesystemen, seien es Strassenfahrzeuge, Schiffe, tragbare Werkzeugmaschinen oder Raumanzüge. Über die Struktur komplexer, multi-skalierter Fließsysteme in dieser Art nachzudenken heisst, im Entwurfsprozess Neuland zu betreten. Angesichts der Computerwerkzeuge, die heute verfügbar sind, ist es Zeit, diesen Schritt zu unternehmen.

Der traditionelle Entwurf besteht darin, eine bestimmte Konfiguration anzunehmen, ein Modell zu bauen und die Leistung des Modells zu optimieren. Wenn Zeit und Geld es erlauben, werden ein oder zwei

weitere Konfigurationen modelliert und optimiert, sodass der Designer am Ende eine von wenigen angenommenen Konfigurationen wählen kann. Im Gegensatz dazu befreit diese «konstruktale» («*constructal*») Perspektive, die hier dargestellt wird, den Ingenieur von der Zwangsjacke der vorgegebenen Konfiguration. Die Zukunft gehört der Sichtweise, dass die physische Konfiguration die grosse Unbekannte im Design ist und dass die optimale Wahl dieser Konfiguration (Geometrie, Struktur) der Weg ist, der zu einem Maximum an totaler Leistung führt. Optimierung und Konstruktion gehen dabei völlig frei vor sich, indem sie die Struktur des Systems als eine Menge geometrischer Variablen betrachten, welche auf jeder Ebene des Entwurfsprozesses optimiert werden können.

Literatur

- A. Bejan, Advanced Engineering Thermodynamics, second edition, Wiley, New York, 1997, ch. 13.
- A. Bejan, Shape and Structure, from Engineering to Nature, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.

Prof. Dr. Adrian Bejan

J. A. Jones Distinguished Professor of Mechanical Engineering, Duke University, Durham, NC, USA

HAT DIE ATOMENERGIE EINE ZUKUNFT?

Deutschland beschliesst den Ausstieg aus der Atomenergie, Finnland plant den Bau eines neuen Atomkraftwerks, und in der Schweiz lehnt das Stimmvolk den Bau eines Sondierstollens für die Endlagerung von Atommüll ab. Gleichzeitig deckt die Schweiz gegenwärtig zirka 36% ihres Elektrizitätsbedarfs durch Atomstrom. Vor dem Hintergrund dieser aktuellen Stimmungsbilder diskutieren Experten eine umstrittene Form der Energiegewinnung.

Hans Issler ist Präsident der Nagra (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle).

Eberhard Jochem ist Professor für Nationalökonomie und Energiewirtschaft an der ETH Zürich und Mitglied des Rates für Nachhaltige Entwicklung der deutschen Bundesregierung.

Wolfgang Kröger leitet den Forschungsbereich «Nukleare Energie, Sicherheit» am Paul Scherrer Institut (PSI) und ist Professor für Sicherheitstechnik an der ETH Zürich.

Leo Scherer ist Jurist mit Nachdiplom in Umweltlehre, war Besetzer von Kaiseraugst und arbeitet heute bei Greenpeace in der «Atomkampagne».

Das Gespräch führten Richard Brogle und Christoph Meier

Nach dem Nein des Nidwaldner Stimmvolkes zum Bau des Sondierstollens am Wellenberg ist die Frage eines Endlagers für Atommüll in der Schweiz wieder offen. Ist es zu verantworten, eine Technologie zu gebrauchen, ohne die Entsorgungsfrage geklärt zu haben?

Issler: Mit dem Wellenberg hatten wir einen Standort ausgewählt, der aus technisch-geologischer Sicht Erfolg versprechend war. Das Projekt ist aus politischen Gründen gescheitert. Damit ist ein zehnjähriges Untersuchungsprogramm gestoppt worden. Ich glaube, dass dies keinen unmittelbaren Einfluss auf die Kernenergienutzung hat, weil wir die Fragen der Entsorgung und der Nutzung trennen müssen. Umso mehr, da radioaktive Abfälle auch im Bereich der medizinischen Anwendung und der Industrie anfallen und es auch im Ausland Beispiele gibt, in

denen geologische Lager für radioaktive Abfälle realisiert worden sind. Wir haben hier weniger ein technisches als ein politisches Vollzugsproblem.

Sieht Greenpeace die Entsorgung auch als politisches Vollzugsproblem?



Scherer: Wir sehen das ganz anders. Nutzung und Entsorgung sind untrennbar. Wir lassen uns nicht erpressen. «Ihr seid alle im gleichen Masse mitverantwortlich, ihr habt alle eine Kilowattstunde Atomstrom gebraucht, und ihr müsst nun auch einen

ticketautomat

neon

22.28

Teil des radioaktiven Abfalles in eure Verantwortung nehmen.» So geht es nicht. Für uns ist wichtig, dass man sich zuerst für die Abfallvermeidung entscheidet – ab sofort beziehungsweise so bald als möglich. Solange dies nicht geschehen ist, gibt es politische Hindernisse. Dies ist keine Sorglosigkeit, sondern man will nicht Hand bieten zu einer «Problemlösung», solange die Ursache des Problems nicht angegangen wird. Wellenberg ist atompolitisch eine grosse Niederlage. Dies muss und wird Konsequenzen haben für die weitere Atompolitik in der Schweiz. Es ist das Signal, dass wohl kaum eine Landesregierung in der Schweiz oder auch das Ausland diese Abfälle einfach so entgegenzunehmen bereit ist. Wäre das Ergebnis anders herausgekommen, so wäre in lauten Tönen gesagt worden: Jetzt ist das Entsorgungsproblem gelöst.

Sieht man die Wellenberg-Abstimmung auch bei der Nagra als Signal?



Issler: Es ist falsch zu glauben, dass alle Gegner des Wellenberges zuerst den Ausstieg wollen. In der sehr emotionalen Kampagne hat man bewusst Ängste geschürt, ganz nach dem Motto: «Die Milch ist dann nicht mehr trinkbar und das Gras ist verseucht.» Die Politik gewisser Umweltorganisationen: «Zuerst aussteigen und dann die Entsorgung lösen», ist meiner Meinung nach verantwortungslos. Es hat zur Folge, dass wir eine Vogel-Strauss-Politik betreiben und das Problem vor uns her

schieben. Wenn ich Herrn Scherer richtig verstehe, hiesse dies, dass wir zuerst die Atomkraftwerke abstellen müssten. Aber auch Umweltschutzorganisationen sagen, dass dies erst in 20–30 Jahren der Fall sein wird. Wollen wir das Problem so lange vor uns her schieben und es dann unseren Kindern in die Schuhe schieben? Die Frage wird dann sein, ob das Know-how dann noch vorhanden sein wird und ob die Finanzierung dann noch gesichert sein wird.

In Deutschland hat man den Ausstieg beschlossen. Wie realistisch ist er?

Jochem: Wir beschäftigen uns nun zu sehr mit dem einzelnen Ereignis. Beim Entscheid für die Kernenergie hat man in den 60er-Jahren nicht bedacht, dass es drei Elemente gibt, die möglicherweise für die Akzeptanz seitens der Bevölkerung eine grosse Rolle spielen werden. Man hat nicht richtig eingeschätzt, welche Akzeptanzprobleme man bekommt. Ich darf sie kurz nennen. Wir haben einen Risikobegriff, der aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmass besteht. Neu für die Industriegesellschaft ist das maximale Schadensausmass. Wir haben eine winzige Eintrittswahrscheinlichkeit und ein ungewohnt grosses Schadensausmass. Es gibt eine subjektive Werteentscheidung, die sagt: Mir ist das maximale Schadensausmass zu gross, und ich will daher eine andere Stromerzeugung. In Deutschland wurde dies heftig diskutiert, und mit einer knappen demokratischen Entscheidung wurde das maximale Schadensausmass als innere Bedrohung bezeichnet. Als zweiter Punkt wird über die Langlebigkeit des radioaktiven Abfalls gestritten. Ich sehe diesen Punkt lockerer als die Umweltschutzorganisationen.

Das dritte Problem ist dann die nukleare Proliferation, die Weiterverbreitung von

Atomwaffenbestandteilen. Um dies zu verhindern, bräuchte man eine militärische Eingreiftruppe, die auf einen UNO-Beschluss hin tätig wird. Wenn man sieht, wie stark einzelne nationale Interessen dominieren, kann ich mir schlecht vorstellen, wie in den nächsten 50–80 Jahren eine solche Truppe gebildet werden könnte. Indien und Pakistan werden sich sicherlich nicht hineinreden lassen, ob sie ihre Waffen einsetzen werden oder nicht. Es wird weitere Staaten geben, die die Atomtechnologie militärisch nutzen wollen. Beim Irak hingegen ist es ein vorge-schobener Grund. Dort geht es schlicht und ergreifend um den Zugriff auf die Ölfelder.

Welches Gefahrenpotenzial liegt in der Weiterverbreitung von Atomwaffenbestandteilen?



Kröger: Sie ist sicher ein ernstes Thema. Die Gleichstellung der Proliferationsgefahr mit der friedlichen Nutzung der Kernenergie ist aber irreführend, wenn sie sich anschauen, wie viel leichter waffentaugliches Material anders produziert und wo es sonst hergeholt werden könnte. Das gilt auch für radioaktives Material zur Verschmutzung von Explosivstoffen («dirty bombs»). Das könnte von einer Strahlenquelle aus einem Krankenhaus stammen.

Im Hinblick auf unsere zukünftige Energieversorgung sollten wir uns von Einzelaspekten und Präferenzen lösen und

wecker

bodenheizung

22.45

zunächst über Grundbedürfnisse reden und uns fragen, ob diese auf dem heutigen Niveau sein müssen und wie sich der Bedarf trotz aller Sparmassnahmen weltweit entwickelt. Zu dessen Deckung sollten wir uns bemühen, geeignete Technologien zu entwickeln. Entscheidend ist, welche Optionen wir überhaupt haben und welche die besten sind. Das Weiterentwickeln solcher Technologien ist ein Beitrag, dem ich gerne mein berufliches Leben widme; die Kernenergie gehört dazu.

Wie kann man die Akzeptanz der Atomenergie bei der Bevölkerung erhöhen?

Kröger: Studien zeigen, dass man keine Chance hat, Akzeptanz für eine Technologie zu bekommen, wenn die Menschen von dem Nutzen für sie selbst nicht überzeugt sind. Wenn die Bevölkerung – aus welchem Grund auch immer – Strom nicht zu brauchen glaubt und insbesondere keinen Atomstrom will, dann dürfen wir nicht hoffen, sie umstimmen zu können, indem wir zeigen, dass die Risiken sehr klein sind. Sie wird sie nicht akzeptieren.

Jochem: Sie sprechen einen wichtigen Punkt an. Wir haben andere Systeme in unserer Gesellschaft, die hochgefährlich sind. Betrachten wir nur den Strassenverkehr. Im Grunde genommen sind Autos ja auch Waffen. Ein Auto aus tausend produziert einen tödlichen Unfall pro Jahr. Der Nutzen, den die Gesellschaft in dieser Mobilität sieht – ob ein Brainwash dahinter steht sei dahingestellt – wird so hoch eingeschätzt, dass man beispielsweise in den USA bereit ist, pro Jahr 40 000 Tote zu akzeptieren. Und in Europa sieht es nicht viel anders aus. Auch erneuerbare Energien oder Gaskraftwerke bergen erhebliche Risiken. Neu für die Gesellschaft ist bei der Kernenergie die Ungewohntheit des maxi-

mal möglichen Schadens und die langfristig möglichen Auswirkungen. Dafür haben die Leute noch kein Gefühl. Sie haben ein Gefühl für Verkehrsunfälle: ein Mensch oder auch zehn Menschen sind einfach tot.

Wie sieht man die Entsorgungsfrage in der Forschung?

Kröger: Aus der Forschungssicht heraus muss ich sagen, dass die Endlagerung von radioaktivem Abfall als technisch machbar und vertretbar angesehen wird. Im übrigen hat in vielen Ländern die Kernenergie als Einstiegstechnologie gedient, um das Bewusstsein zu schärfen, dass mit Hochtechnologien oft ein Risikopotenzial einhergeht. Aversionen waren und sind die Folge. Die Problematik besteht dementsprechend nicht nur bei der Kernenergie. Welches Recht aber haben einzelne Länder, für sich ein Nullrisiko zu fordern und dann von Produkten anderer, die bei sich ein Risiko in Kauf nehmen, zu profitieren? Die Endlagerung ist ein Risiko, aber signifikant nur, wenn wir an das Fremdeindringen in ein solches Lager denken. Ich frage mich, wie unser Leben aussähe, wenn wir an alle Lebensbereiche so rigorose Anforderungen an die Sicherheit stellten wie an die Kernenergie. Die Notwendigkeit, ein gewisses Mass an Risiko zu tolerieren, lässt sich nicht «wegreden».

Studien zeigen, der Verzicht auf Kernenergie ist theoretisch möglich, aber teuer. Sind die Konsumentinnen und Konsumenten bereit, mehr für Öko-Strom zu bezahlen?

Jochem: Dies ist eine Frage der Optionen. Wenn die Option Öko-Strom gilt, für die Kilowattstunde 10 Rappen mehr zu bezahlen, dann gibt es viele Konsumentinnen und Konsumenten, die bereit sind, sich damit einen ruhigen Schlaf zu erkaufen. Das



Problem liegt dann allerdings darin, dass die ökonomischen Verflechtungen zwischen den Volkswirtschaften so gross sind, dass es für stromintensive Industrien bei Alleingängen bei Strompreisaufschlägen schwierig wird. In Deutschland gibt es hingegen Dienstleistungsunternehmen, die beziehen Ökostrom, um ihr Image damit aufzupolieren.

In einem Expertenbericht des Bundesamtes für Energie wird gefordert, dass künftig Schlüsselerkenntnisse auf nationaler Ebene gefällt werden müssten. Wird in Zukunft den Kantonen ein Endlager aufgewungen werden?

Issler: Es gibt einen Konsens, dass die Entsorgung in erster Linie eine nationale sein soll. Die Politik muss nun entscheiden, wie sie solche nationalen Infrastrukturaufgaben lösen will. Selbstverständlich kann man solche Anlagen nicht gegen den Widerstand der Region durchsetzen. Es braucht ein Mit- und Einspracherecht der Gemeinden und Regionen. Zurzeit revidieren die Räte das Kernenergiegesetz. Der Ständerat hat sich für eine nationale Lösung ausgesprochen, während der Nationalrat den Kantonen ein Vetorecht geben will. Nun findet die Differenzbereinigung statt.

teekoher

zahnbürste

23.07

Besteht nicht die Gefahr, dass bei einem Vetorecht der Kantone jeder Kanton sagt: «wir nicht, lieber die anderen» und dass so aus dem Zwischenlager in Würenlingen ein Endlager wird?

Issler: Das Zwischenlager ist eine provisorische Lösung, das keine Endlagerqualität hat. Nach Gesetz ist gefordert, dass wir die radioaktiven Abfälle so entsorgen, dass über lange Zeiträume Mensch und Umwelt nicht gefährdet werden. Diese Aufgabenstellung ist neu. Unsere Industriegesellschaft produziert tagtäglich eine Vielfalt von Abfällen, und viele sind ebenso toxisch, wenn ich an die chemischen Rückstände denke. Und die haben wir bisher relativ sorglos in Sondermülldeponien entsorgt. Und dort war niemand gefordert, eine Langzeitsicherheitsanalyse zu machen.

Scherer: Doch, doch, Greenpeace hat eine Kampagne gestartet...

Issler: Ja, Greenpeace hat wieder einmal eine Pionierstellung eingenommen. Weil wir bei der Kernenergie solch hohe Sicherheitsanforderungen haben, ist es sinnvoll, wenn diese Sicherheitsphilosophie auf andere Entsorgungsanlagen übertragen wird.

Aber wie sieht es mit der Sicherheit des Zwischenlagers aus?

Issler: Das Zwischenlager ist an der Oberfläche weniger gut geschützt als ein geologisches Lager in der Tiefe. Da haben Herr Scherer und ich wohl keine Differenzen. Dass man bei einem Vetorecht der Kantone kein Endlager bauen kann, ist ein Horrorszenario, das wir von der Nagra haben. Wenn die Akzeptanz nicht da ist, werden wir das Problem vor uns her schieben, und das finde ich auch als Staatsbürger schade, denn die Technologie wäre vorhanden, um ein geologisches Lager zu realisieren. Das Problem bei der Überzeugungsarbeit liegt darin, dass viele den direkten Nutzen nicht sehen. Sie fragen sich: «Warum soll ich für eine Entsorgungsanlage in meinem Garten ja sagen, wenn ich als Konsument keinen unmittelbaren Nutzen habe?» Unsere Gesellschaft ist sehr individualistisch geworden, und die Solidarität findet leider an einem sehr kleinen Ort statt. In Zukunft müssen wir wohl mehr den Nutzen des Einzelnen in den Mittelpunkt stellen.

Wo könnte der direkte Nutzen des Einzelnen am Wellenberg denn liegen?

Scherer: Nidwalden ist ja Nettowasserstromexporteur. Der erste Punkt ist klar: Die Produktion von radioaktiven Abfällen aus Atomkraftwerken muss gestoppt werden. Dies kann nicht von heute auf morgen geschehen. Mit unserer Volksinitiative «Strom ohne Atomenergie» haben wir ein gangbares Ausstiegsszenario aufgezeigt: Die alten drei AKWs werden zwei Jahre nach der Abstimmung abgestellt und die anderen nach je 30 Betriebsjahren. Das ist in etwa das, was in Deutschland beschlossen wurde und etwas härter als das, was in Belgien vorgesehen ist. Der Trend geht klar in Richtung Ausstieg.

Wie beurteilen Sie die Revision des Kernenergiegesetzes?

Scherer: Im jetzigen Ausarbeitungsstadium ist ausgerechnet für Tiefenlager der demokratische, nationale Entscheid *nicht* vorgesehen. Es gibt nicht einmal ein Referendumsrecht, geschweige denn ein obligatorisches Referendum. Ich halte es für das Beste, wenn ein Projekt so gut ausgelegt und kommuniziert werden muss, dass es eine Volksabstimmung überstehen muss. Aber solange wesentliche Bestrebungen der schweizerischen Atomwirtschaft dahin gehen, irgendwelche dubiosen Kanäle Richtung Russland zu öffnen, solange besteht ein Glaubwürdigkeitsproblem.

Issler: Gegen ein demokratisches Verfahren über ein geologisches Tiefenlager habe ich nichts einzuwenden.

Scherer: Ich habe aber noch nie davon gehört, dass sich die Nagra diesbezüglich je bei den Kommissionen dafür eingesetzt hätte. Tatsache ist, dass ein neues Atomgesetz ausgearbeitet wird, das die Volksrechte beschneidet. In Zukunft könnte der betroffene Kanton nicht mehr über ein Tiefenlager entscheiden.

Welches sind Optionen neben der Atomenergie?

Jochem: Herr Issler sprach die fehlende Solidarität an. Diese fehlt aber um so mehr zwischen den Entwicklungsländern und den Industriestaaten. Wenn wir unsere energiefressenden Technologien in die Entwicklungsländer exportieren, so verschärft sich die Situation, denn dort wird der Strom vor allem aus fossilen Brennstoffen

gewonnen. Somit stellt sich die Problematik des Klimawandels, bei der uns auch die Kernenergie nicht weiterhilft, da sie auch in Zukunft nur einen Teil der benötigten Energie liefern wird. In dieser Betrachtungsweise fahren wir in einem Auto mit 180 km/h gegen eine Mauer – und zwar völlig unabhängig davon, ob wir uns für oder gegen Kernenergie entscheiden.

Könnte man die Energie besser nutzen, um den «Aufprall» zu vermeiden?

Jochem: Heute fallen im Durchschnitt 38% auf der Nutzenergiestufe als Verluste an. Beispielsweise könnten die Energieverluste bei Gebäuden sogar um einen Faktor zehn reduziert werden. Bei Autoverbrennungsmotoren fallen gar 80% als Verluste an. Wie lange kann es sich eine moderne Gesellschaft leisten, derartige gewaltige Energiemengen zu verpuffen? Über diese Frage werden wir uns wahrscheinlich erst Gedanken machen, wenn wir an der Wand kleben. Man benutzt Autos für den Stadtverkehr, die für die Fahrt durch Schlamm und Flüsse konzipiert sind und daher zwei Tonnen wiegen. Statt drei Liter bei Cityautos benötigen diese 25 Liter auf 100 km. Wenn man diese schweren Wagen gar nicht zulassen würde, sondern nur noch kleinere, dann hätte man auch einen um den Faktor fünf verminderten Stahlbedarf. Es geht noch weiter. In Deutschland hat man alte Leute, die in grossen Wohnungen leben, gefragt, ob sie in eine kleinere Wohnung ziehen wollen, wenn man ihnen beim Umziehen behilflich wäre. Fünfhundert haben in einem ersten Test ja gesagt. Pro Umzug wurden im Schnitt so 20 Quadratmeter gewonnen.

Und wo liegen aus Ihrer Sicht die grössten Herausforderungen der Energieproblematik?

Jochem: Wir sollten die Energieproblematik nicht beschränkt auf ein Land betrachten, sondern global. Für mich ist die Frage: Wie schafft es die Nordwelt mit maximal einer Milliarde Menschen, die Technologieentwicklung so voranzukatapultieren, dass die Menschheit es schafft, mit dem Klimawandel einigermassen über die Runden zu kommen? Die zukünftigen gravierenden Schäden werden nicht die Schäden der Kernenergie sein, sondern die des Klimawandels. Aber auch die Armut wird Schäden mit sich bringen. Es würde mich nicht wundern, wenn die terroristischen Aktivitäten noch weiter zunehmen würden – ausgelöst durch die soziale Ungerechtigkeit weltweit.

INTERN

GEOGRAFISCHE UND «INTELLEKTUELLE» MOBILITÄT

NEUE BACHELOR-STUDIENGÄNGE AN DER ETHZ

Eine stolze Bilanz: Dieses Wintersemester haben fünf weitere ETH-Departemente die neuen Bachelor-Studiengänge eingeführt. Ein Gespräch mit ETH-Rektor Konrad Osterwalder.

Herr Prof. Osterwalder, was ist die Idee des Bologna-Abkommens, und wo sehen Sie Vorteile für die Studierenden?

Die grundlegende Idee ist, Mobilität zu fördern, und zwar die Mobilität, die positiv genutzt wird und nicht im Sinne von einem Aufwand-Minimalismus missbraucht wird. In der heutigen Zeit von Globalisierung ist es eine fast unerlässliche Voraussetzung eines jeden zukünftigen Akademikers, die Erfahrung gemacht zu haben, sich in einem fremden Kulturbereich zu behaupten, mit den Leuten zu leben, mit ihnen umgehen zu können, die Fremdsprache zu reden. Das wird dann auch eine grundlegende Erfahrung für das spätere Berufsleben sein. Die geografische Mobilität an sich hat keinen besonderen Wert: Das generelle Ziel jeder universitären Ausbildung ist es, die sogenannte «intellektuelle» Mobilität zu fördern und zu entwickeln. Hier wird die geografische Mobilität zu einem wichtigen Mittel zum Zweck.

Mit dem Erasmus-Programm beispielsweise war das auch bisher möglich. Was ist beim Bologna-Abkommen anders?

Mit der Einführung des Kreditsystems wird das Studium transparenter gestaltet, und die Strukturen werden europaweit harmonisiert. Man darf allerdings nicht dem Irrtum verfallen zu denken, man könne jetzt überall in Europa seine Kredite sammeln gehen und dann an die ETH kommen mit dem Anspruch: da habe ich meine 120 Punkte, bitte geben Sie mir einen Master. So einfach wird das nicht gehen.

Es gibt auch Leute, die sich fragen, ob wir mit dem Bologna-Abkommen nicht die Mobilität gar erschweren, statt sie zu fördern. Die Bachelor- und Master-Blocks sind kürzer als das bisherige viereinhalbjährige Studium, und für jemanden, der ein Semester weggehen möchte, ist es nicht mehr ganz so einfach, dieses Semester optimal

zu «platzieren». Das ist ein interessanter Punkt. Ich habe darum die Departementvorsteher und die Verantwortlichen für die Gestaltung der Studiengänge in einem Brief aufgefordert, systematisch die Möglichkeit einzuplanen, dass ein Studierender im Rahmen des Bachelor-Studiums für ein Semester weggehen kann. Im Master-Programm ist es fast nicht mehr möglich, es sei denn, man gehe weg für die Masterarbeit. Die wichtige neue Möglichkeit, die das System der gestuften Studiengänge bietet, ist die des Wechsels des Studienortes (oder auch der Studienrichtung) beim Übergang vom Bachelor- ins Master-Studium.

Was halten die Studierenden von den neuen Studiengängen?

Ich treffe mich regelmässig mit den Studentenvertretern von allen Departementen und den Vertretern des VSETH. Ich habe mit ihnen über die ganze Bologna-Idee und alle Entwicklungen immer wieder diskutiert, und das Echo von den Studierenden war immer positiv. Das gleiche Gefühl habe ich auch jetzt. Die Studierenden haben überall sehr konstruktiv mitgearbeitet, und von daher wage ich zu behaupten, dass auch sie den grossen Vorteil dieser Reform sehen. Natürlich gibt es gewisse Aspekte, die im neuen System vielleicht schwieriger sind als im alten; das ist immer so. Allerdings muss man einerseits wissen, dass auf schweizerischer Ebene die offizielle organisierte Studentenschaft, der VSS, Fundamentalopposition macht. Am 13. September, als die Hochschulrektorenkonferenz einen Richtlinienentwurf zuhanden der politischen Instanzen verabschiedete, sagte der VSS, dieser Tag sei ein schwarzer Freitag für die schweizerische Studentenschaft. Es ist andererseits wichtig darauf hinzuweisen, dass die Studierenden von mehreren schweizerischen



ETH-Rektor Prof. Konrad Osterwalder freut sich über die fünf neuen Bachelor-Studiengänge an der ETH.

Universitäten nicht Mitglieder des VSS sind, unter anderem die der beiden ETH.

Entsteht durch die Bachelor/Master-Aufteilung eine grössere Kluft zwischen den guten und den weniger guten Studenten, führt das zur Entstehung von «Studenten zweiter Klasse»? Die Guten machen den Master, und die Schlechten müssen sich mit dem Bachelor begnügen?

Wir wollen aus verschiedenen Gründen nicht, dass der Eindruck entsteht, wir würden die schwächeren Studierenden mit dem Bachelor wegschicken. Erstens wollen wir nicht, dass unser Bachelor als zweitklassiger Abschluss angeschaut wird, sondern als ein anspruchsvoller Zwischenabschluss auf dem Weg zum Master. Zweitens würden wir den Fachhochschulen, wo alle – auch die ganz guten Leute – mit einem Bachelor abschliessen, in der Öffentlichkeit schaden, wenn wir den Eindruck erwecken würden, dass das ein Abschluss für Studierende mit Schwierigkeiten ist.

Wozu braucht man noch einen Bachelor, wenn man die Fachhochschulen hat? Entsteht da nicht eine gewisse Konkurrenz?

Diese Reform hat zwar dazu geführt, dass man in ganz Europa Abschlüsse mit dem gleichen Namen haben wird, aber die Diversität dieser Abschlüsse wird gross sein. Wir sagen immer: Bachelor ist nicht gleich Bachelor. Wenn Sie zum Beispiel den Bachelor in Elektrotechnik in ganz Europa anschauen, werden Sie einen riesigen Strauss von Varianten finden. Ein Bachelor von einer Fachhochschule ist nicht gleich dem Bachelor der ETH. Der Übertritt von einer Institution an eine andere ist darum mit der Einführung einheitlicher Titel noch lange nicht gelöst. Das gilt beispielsweise für einen möglichen Übertritt mit einem universitären Bachelor in ein Master-Programm einer Fachhochschule: in diesem Fall hätten die Studierenden zu wenig praktisch orientierte Ausbildung genossen und sie müssten einiges nacharbeiten.

Das Problem besteht in ganz Europa, und damit haben wir von Anfang an gerechnet. Wir haben ein Netzwerk von vier technischen Universitäten gebaut – die IDEA-League (als Akronym für Imperial College, Delft, ETH und Aachen) – und versuchen dort zu erreichen, dass die Studierenden ihren Ort innerhalb dieser vier Universitäten möglichst einfach wechseln können.

Andere Netzwerke mit ähnlichen Zielsetzungen sind überall im Entstehen oder existieren bereits.

Wie wird der Markt auf den ETH-Bachelor reagieren?

Das wird sehr vom Fach abhängen. Wir hatten immer Studienabbrecher, die dann mit nichts in der Hand weggegangen sind. Das Vordiplom war leider kein Ausweis. Jetzt können sie mit dem Bachelor gehen, was auch ein Vorteil dieser Reform ist. Ich kann mir vorstellen, dass bei gewissen Studienrichtungen, wie zum Beispiel in Informatik, der Markt wie ein Staubsauger versuchen will unsere Bachelor-Absolventen zu rekrutieren. Andererseits gibt es Gebiete, wo man einen Master oder sogar ein Doktorat beinahe zwingend braucht, in der Chemie zum Beispiel. Um die 90 Prozent unserer Diplomanden in Chemie machen ein Doktorat, dort ist der «Marktwert» eines Bachelorgrades nicht sehr hoch. Da sind Fachhochschul-Absolventen mit ihrer praktisch orientierten Ausbildung besser dran.

Und zum Schluss dieses Gesprächs?

Ich freue mich, dass zusätzlich zu dem Pilotprojekt im Bereich Elektrotechnik, das bereits letztes Jahr gestartet wurde, jetzt weitere fünf Studiengänge gemäss dem

neuen Modell anlaufen, und ich bin stolz, dass unsere Schule so viel Flexibilität und Enthusiasmus bei der Vorbereitung gezeigt hat. Das sagt auch etwas über die Hochschule aus.

Interview: Vanja Lichtensteiger-Cucak

Im Juni 1999 vereinbarten die europäischen Bildungsminister in Bologna, europaweit die Hochschulabschlüsse zu koordinieren und dabei das aus dem angelsächsischen Raum bekannte zweistufige Modell mit Bachelor (drei Jahre) und Master (eineinhalb bis zwei Jahre) einzuführen. Letztes Jahr hat das Departement für Elektrotechnik und Informationstechnologie als erstes ETH-Departement das Bachelor/Master System eingeführt. Fünf weitere Departemente folgen ihm nun in diesem Wintersemester:

- Maschinenbau und Verfahrenstechnik,
- Materialwissenschaft,
- Chemie und Chemieingenieurwissenschaft,
- Bewegungswissenschaft und Sport,
- Berufsoffiziere.

ZÜRCHER HOCHSCHULEN BÜNDELN KRÄFTE IN DER LEHRE

UNIVERSITÄT UND ETH ZÜRICH LANCIEREN GEMEINSAMEN STUDIENGANG MIKROBIOLOGIE

(CC) Forschungszusammenarbeiten zwischen der Universität und der ETH Zürich gibt es schon seit langem. Der neue Studiengang Mikrobiologie ist nun aber der erste gemeinsam konzipierte Studiengang für Studierende beider Hochschulen. Das Modell ist wegweisend für künftige Unterrichtsmodelle, da Universität und ETH Zürich vermehrt auch bei der Ausbildung zusammenspannen wollen. Komplementäre Stärken können zusammengeführt und so die Qualität der Ausbildung in einem Mass gesteigert werden, die keine der beiden Hochschulen alleine realisieren könnte. Erstmals ist es auch gelungen, die unterschiedlichen Studienordnungen und Prüfungsmodalitäten der beiden Hochschulen einander so anzugleichen, dass bei Auf-

rechterhaltung der eigenen «Kultur» von Universität und ETH ein gemeinsames Lehrangebot möglich wird. Selbst der Umstieg auf ein gestuftes Studium mit Bachelor und Master ist berücksichtigt worden. Zum Erfolg wesentlich beigetragen hat der Umstand, dass der Prozess von Dozierenden initiiert wurde und deshalb auch von der Basis getragen wird.

Mikrobiologen für aktuelle Themen wie Antibiotikaresistenzen

Mikrobiologen sind gesuchte Fachleute. Sie beschäftigen sich mit so brisanten Problemen wie den Antibiotikaresistenzen von Krankheitserregern oder der bakteriel-

len Verunreinigung von Trinkwasser und Nahrungsmitteln. Mikrobiologie wurde an beiden Hochschulen bisher als Bestandteil des Biologie-Studiums angeboten. Dabei lag der Schwerpunkt an der ETH bei der naturwissenschaftlichen Mikrobiologie sowie auf deren technischer Anwendung z. B. im Bereich Lebensmittel oder Biotechnologie, an der Universität hingegen auf der Ökologie und der medizinischen Mikrobiologie. Durch die Zusammenlegung der Ressourcen beider Hochschulen steht für die Zürcher Studierenden ein einmaliges Ausbildungsangebot bereit, das ihnen das ganze breite Spektrum der Mikrobiologie eröffnet.

HEAT AND STEAM

EIN VATER DER GAS- UND DAMPFTURBINEN

Aurel Stodola, langjähriger ETH-Professor und Wegbereiter der Gas- und Dampfturbine, wird in einer Ausstellung der ETH-Bibliothek gegenwärtig. Anlass ist sein 60. Todestag im kommenden Dezember.

Das erste Viertel des 20. Jahrhunderts war geprägt von einem Umbruch im Ingenieurwesen. Die empirischen und intuitiven Methoden einer Generation grosser Erfinder wurden abgelöst von den präziseren und wissenschaftlicheren Methoden des modernen Ingenieurs. Die Entwicklung von Dampfturbinen und die frühen Versuche mit Gasturbinen hatten zu jenem Zeitpunkt einen Höhepunkt erreicht.

Aurel Stodola war ohne Zweifel einer der massgeblichen Initiatoren dieser neuen Entwicklung. Sein Lehren und seine Publikationen eröffneten den Weg, um nun Forschung nach streng wissenschaftlichen Kriterien zu realisieren. Stodolas Zeitgenossen sowie die folgende Generation von Wissenschaftlern beschränkten diesen Weg kontinuierlich weiter. Das wissenschaftliche Experiment in gut ausgestatteten Laboratorien gewann vermehrte Bedeutung. Stodola gelang es, die Notwendigkeit eines Maschinenlaboratoriums für die technikwissenschaftliche Forschung und die Kontakte zwischen Hochschule und Industrie klar zu machen. So wurde das Maschinenlabor am Zürcher Polytechnikum nicht allein als Einrichtung für die Lehre konzipiert, sondern seine Bedeutung für die Entwicklung der technischen Wissenschaften und für die Lösung von Problemen der Praxis von Anfang an erkannt und gezielt verfolgt.



Aurel Stodola, Maschinenbauer, 1859–1942.

Der 1859 in der Slowakei geborene Aurel Stodola studierte von 1878 bis 1881 in Zürich und wurde 1892 zum Professor für Thermodynamik und thermische Maschinen an der ETH Zürich ernannt. Hier entwickelte er sich zum weltweit anerkannten Fachmann für die Konstruktion und den Bau von thermischen Turbomaschinen. Sein Lehrbuch «Dampf- und Gasturbinen», das zahlreiche Auflagen und mehrere Übersetzungen erfuhr, diente Generationen von Ingenieuren als «Bibel» des Baus thermischer Turbomaschinen. Als anerkannte Autorität auf dem Gebiet der Wärmekraftmaschinen war Stodola auch als kritischer und unbestechlicher Gutachter für führende Unternehmen der schweizerischen Maschinenindustrie tätig.



Das alte Maschinenlabor am damaligen Zürcher Polytechnikum.

Stodola sind zahlreiche Ehrungen und Auszeichnungen zuteil geworden, darunter die James-Watt-Medaille, der «Nobelpreis» für Ingenieure, und die Grashof-Denk Münze des Vereins Deutscher Ingenieure. Aber nicht nur als Wissenschaftler und Lehrer ist Aurel Stodola von Bedeutung, sondern auch als Mensch mit universellen Interessen und als Philosoph. Mit seinem Werk «Gedanken zu einer Weltanschauung vom Standpunkte des Ingenieurs» (Springer-Verlag, 1931) lieferte er einen wichtigen Beitrag zur Technik-Diskussion. Stodola starb 1942 in Zürich.

Margit Unser

Sonderausstellung und Buchpräsentation

Mit ihrer neuen Sonderausstellung gedenkt die ETH-Bibliothek des Wegbereiters der Dampf- und Gasturbine, Aurel Stodola. Gemeinsam mit der Vernissage wird eine detaillierte Biografie über Aurel Stodola vorgestellt.

Die zahlreichen Exponate in der Ausstellung stammen aus dem Archiv der ETH Zürich, der ETH-Bibliothek, dem Historischen Archiv der ABB sowie weiteren Archiven aus dem In- und Ausland. Ausstellung: 14. November 2002 bis 8. Februar 2003 im Foyer der ETH-Bibliothek, Rämistrasse 101, Zürich, Mo–Fr 8.30–21 Uhr und Sa 9–16.45 Uhr. Vernissage/Buchpräsentation: 13. November 2002, 18.15 Uhr, Hauptgebäude, Hörsaal E5

Virtuelle Ausstellung
<http://www.ethbib.ethz.ch/exhibit/>

Führungen auf Anfrage.

Weitere Auskünfte:
ETH-Bibliothek, Dr. Margit Unser,
Rämistrasse 101, 8092 Zürich,
Tel. 01 / 632 64 77
E-Mail unser@library.ethz.ch

FORSCHUNG

WEITERFORSCHEN INS UNBEKANNTE

CHEMIE-NOBELPREIS FÜR PROF. KURT WÜTHRICH

Für seine Entwicklung der NMR-Methode zur Bestimmung der dreidimensionalen Struktur biologischer Makromoleküle wurde Prof. Kurt Wüthrich mit dem diesjährigen Nobelpreis in Chemie ausgezeichnet. ETH Bulletin sprach mit dem Laureaten.

Als ich Sie im Frühling 2000 interviewt habe, sagten Sie mir, dass die Zukunft zeigen würde, ob Sie in Bezug auf Ihre Forschung das Richtige tun. Vor kurzem erfuhren Sie, dass sie für Ihre Arbeit den Nobelpreis erhalten haben. Haben Sie das insgeheim gehofft?

Gehofft vielleicht schon, aber ich habe sicher nicht damit gerechnet. Es gibt viele Gründe, die eher gegen den Preis gesprochen hätten. Um so grösser ist natürlich die Freude daran, dass mir der Preis zuerkannt wurde.

Was wären das für Gründe gewesen, die dagegen gesprochen hätten?

Es ist ja wirklich erstaunlich, dass nun die ETH auf dem NMR-Gebiet innerhalb eines Jahrzehnts zwei Nobelpreise kriegt. Vielleicht ist es auch ein Ausdruck dafür, dass die ETH auf diesem Gebiet eine Hochburg ist. Das hat nicht nur mit Prof. Ernst und mir zu tun, die Basis dafür wurde viel früher gelegt. Felix Bloch, der erste Nobelpreisträger im Bereich der NMR, war ein ETH-Absolvent, und auch die Herren Günt hard und Primas, langjährige Professoren am Institut für physikalische Chemie, haben auf dem Gebiet der NMR und der magnetischen Resonanz im Allgemeinen Hervorragendes geleistet. Dort müssen wir die Basis sehen für das, was später gekommen ist: Ernst war ja ein Schüler von Herrn Primas.

Sie waren aber trotzdem optimistisch?

Unsere Methode war so erfolgreich, dass jedes Jahr hunderte von Strukturen mit ihr gelöst wurden, und das gab schon Grund zu einem gewissen Optimismus.

Gibt es jemanden, der zu Ihrem Erfolg wesentlich beigetragen hat? Wen würden Sie als «Wissenschaftskomplizen» speziell erwähnen?

Es gibt natürlich viele, die beigetragen haben. Wir sprechen hier über ein grosses Projekt, das sich über gut 15 Jahre hingezogen hat, bis die Resultate da waren. Unter den vielen hervorragenden Doktoranden und Postdoktoranden ist in erster Linie Gerhard Wagner zu nennen, der als Doktorand, Postdoc und am Schluss als Privatdozent mitgearbeitet hat und zurzeit als Professor an der Harvard Medical School tätig ist. Die Zusammenarbeit mit Prof. Richard Ernst war enorm wichtig: In diesem Zusammenhang möchte ich speziell auch den Postdoktoranden Kunjaki Nagayama erwähnen. Natürlich spielten auch das hervorragende Umfeld der ETH, sowie die Unterstützung des Schweizerischen Nationalfonds eine grosse Rolle.

Was würden Sie heute studieren, wenn Sie wieder wählen könnten?

Das ist eine schwierige Frage. Ich habe mich schon damals nicht entscheiden können: ich habe Chemie, Physik und Mathematik studiert, das eidgenössische Turn- und Sportlehrerdiplom erworben und nebenbei sogar Theaterwissenschaft verfolgt. Ich weiss nicht, ob ich heute bei den sehr stark beladenen Studienplänen ebenso die Freiheit hätte, auszulesen, was ich tun will. Ich denke, dass ich möglicherweise Biologie studieren würde, weil Biologie heute auch bei der Bevölkerung mit allen Diskussionen über Gentechnologie im Mittelpunkt steht.

Von Interdisziplinarität hat man damals nicht gross gesprochen?

Man hat es einfach getan. Ich bin fast täglich von einem Fach ins andere gerutscht.



ETH-Professor Kurt Wüthrich, Nobelpreisträger für Chemie 2002, mit seiner Frau. (Foto: V. Lichtensteiger)

Wo würden Sie heute studieren: In der Schweiz oder den USA? Was würden Sie dem Nachwuchs empfehlen?

Ich habe meine ganze akademische Karriere in der Schweiz gemacht: in Bern studiert, in Basel doktriert und mich hier an der ETH habilitiert, allerdings mit einer Arbeit, die in den USA durchgeführt wurde. Wenn man jung ist, hat man ja im Allgemeinen nicht genügend Überblick, um zu entscheiden, was nun besser wäre. Ich glaube, dass ich wiederum in der Schweiz studieren würde und dass der Weg, den ich gegangen bin, auch heute noch ein guter ist: in der Schweiz die Schulen zu besuchen, das Studium bis zum Doktorat abzuschliessen und dann für einige Jahre als Postdoktorand in die USA zu gehen, um Berufserfahrung zu sammeln. Die Möglichkeit, hier zu studieren und dann in den USA zu doktorieren ist sicher auch erfolgreich gewählt worden. Andererseits glaube ich nicht, dass ein Studium in den

USA notwendigerweise Vorteile bringen würde im Vergleich mit einem Studium in der Schweiz. Ich bezweifle eher, dass ein Student die Vorteile des amerikanischen Forschungssystems nutzen könnte, während das bei einem Postdoktoranden viel besser aussieht.

Alle sind stolz auf Sie: die ETH, die Schweiz... Worauf sind Sie persönlich am meisten stolz?

Ich bin jetzt glücklich darüber, dass ich wenigstens von einem Gesichtspunkt aus in den letzten 30 Jahren offenbar doch häufig das Richtige gemacht habe. Den Stolz überlasse ich anderen.

Nächstes Jahr werden Sie emeritiert und gehen nach Amerika, wo Sie schon ein ähnliches Forschungslabor eingerichtet haben. Warum verlassen Sie die Schweiz?

Ich habe schon auf 1. Januar 2001 eine Abmachung mit der ETH-Schulleitung getroffen, nach der ich bis zum altersbedingten Rücktritt zu 100 Prozent an der ETH angestellt bleibe, jedoch während einer 3-jährigen «Übergangszeit» als Gastprofessor am Scripps Research Institute in La Jolla, Kalifornien, eine neue Arbeitsgruppe aufbaue. In Kalifornien bin ich seither vier Monate pro Jahr tätig, und die Amerikaner finanzieren dort für mich ein Forschungslabor. Dieser Entscheid wurde vor fast drei Jahren getroffen und hat mit dem Nobelpreis nichts zu tun, es sei denn, sie hätten

in den USA mit mir als zukünftigem Nobelpreisträger gerechnet. Das kann man nicht ausschliessen, aber das steht sicher nicht im Vertrag (er lacht).

Gibt es noch Geheimnisse in der Prionenforschung, deren Lösung Sie sich widmen möchten, oder heisst es für die Zukunft Kurswechsel?

Die Forschung ist nie abgeschlossen, und den nächsten Schritt muss man zuerst machen, bevor man sehen kann, was er bringt. Das Prionenproblem ist sicher nicht gelöst heute, und die Entwicklung der NMR-Methodik auf dem Gebiet der strukturellen Genomik steckt immer noch in den Kinderschuhen. Somit gibt es zum Glück auch in den kommenden Jahren noch viel zu tun. Der Plan ist der, dass ich an der ETH über meinen Rücktritt hinaus ein Labor führen werde auf dem Gebiet der Prionenforschung. Das wurde vor dem Nobelpreis so abgemacht. In den USA werde ich weiterhin die NMR-Methodik in der Strukturbiologie und der strukturellen Genomik anwenden und weiterentwickeln. Der Schwerpunkt liegt momentan bei der strukturellen Genomik, und ich werde mich vor allem mit den Membranproteinen befassen. Ich dürfte so noch einige Zeit in der Forschung tätig sein.

Was wird der Nobelpreis für Sie konkret bedeuten?

Darüber kann ich in zwei Jahren vielleicht mehr sagen.

Ihre Zukunftsvision? Kann man sich überhaupt noch etwas wünschen?

(denkt länger nach): Das ist etwas heikel. Sie können ein Ziel anstreben in der Forschung, aber wenn Sie genau angeben könnten, was sie als Nächstes noch erforschen wollen, dann waren Sie vermutlich nicht mehr in der Grundlagenforschung tätig. Ich bin noch als Berater an einigen Firmengründungen beteiligt in Kalifornien, die sich mit der strukturellen Genomik als Grundlage für die Entwicklung von pharmazeutischen Produkten befassen. Dort geht es natürlich um handfeste Anwendungen; mit meinen Labors an der ETH und in Kalifornien möchte ich aber weiterhin ins Unbekannte hinausforschen.

Gibt es noch eine Botschaft, die Sie als Nobelpreisträger übermitteln möchten?

Es ist eine Tatsache, dass in den USA in den letzten sieben Jahren die Ausgaben für die Grundlagenforschung verdoppelt wurden; in Japan wurden sie trotz der Wirtschaftskrise mehr als verdoppelt, während sie in der Schweiz um 10 Prozent zurückgegangen sind. Hier besteht für die Schweiz ein dringender Handlungsbedarf.

Interview: Vanja Lichtensteiger-Cucak

DAS GEHEIMNIS DER VULKANE – IM STEIN VERBORGEN

Zukünftige Eruptionen sind zwar (noch) nicht vorhersagbar, aber dafür können ETH-Geologen aus nur 10 Mikrometer grossen Proben die Genese von ganzen Vulkansystemen über einen Zeitraum von einigen Millionen Jahren rekonstruieren und gleichzeitig neue Erzlagerstätten aufspüren.

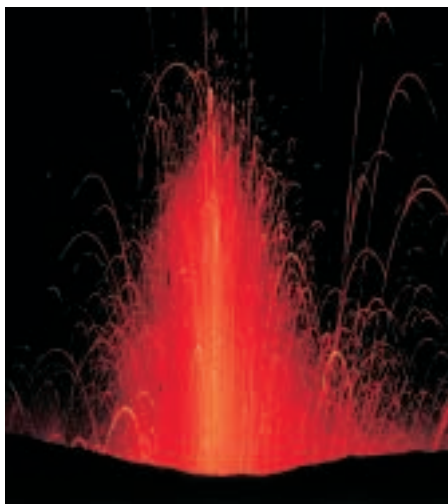
(vac) Die Zürcher Vulkanforscher kommen eigentlich aus der Lagerstättenkunde, und ihr Interesse gilt primär der Entstehung von Erzlagerstätten. Eine wichtige Voraussetzung dafür sind Kenntnisse über die geologischen Prozesse, die in einer Tiefe von 5 bis 15 km unter den Vulkanen, in der so genannten Magmakammer, stattfinden. Die ETH-Wissenschaftler wollen die Kreisläufe in magmatischen Systemen besser

verstehen, um die Bildung von Erzlagerstätten erklären zu können und um Aufschluss über die gesamte magmatische Aktivität in einem Vulkansystem zu erhalten.

«Detektivarbeit» mit geologischer Uhr...

Die ETH-Forscher Dr. Werner Halter und Dr. Thomas Pettke sind Assistenten am Insti-

tut für Isotopengeologie und mineralische Rohstoffe in der Gruppe von Prof. Christoph Heinrich. «Der Gegenstand unserer Forschung ist ein Vulkankomplex, der vor 9 bis 6 Millionen Jahren aktiv war und von dem wir wissen, dass er eine riesige Kupfer-Gold-Lagerstätte gebildet hat», erklärt Halter. Magma, in der Erdkruste, besteht aus geschmolzenem Stein sowie Kristallen, die bei der Abkühlung wachsen und sich auch



Ausbruch des Ätna-Vulkans.

neu bilden. Die wachsenden Kristalle fangen ganz kleine Tröpfchen von der umgebenden Gesteinsschmelze ein; so entstehen die sogenannten Schmelzeinschlüsse, die von essentieller Bedeutung für die ETH-Wissenschaftler sind, da sie die chemische Entwicklung der Magmakammer enthüllen.

Das dynamische Verhalten von Magma sei, so Halter, von verschiedenen Faktoren abhängig – neben den Druck- und Temperaturbedingungen in der Magmakammer ist vor allem der Wassergehalt von entscheidender Bedeutung. Das Wasser übt im Magma zweierlei Funktionen aus: Einerseits ist der Wasserstrom, der nach oben fliesst und dabei verschiedene Metalle aus der Magmakammer mitnimmt, für die Bildung von Erzlagerstätten verantwortlich. Andererseits kann das Wasser für gelegentliche Vulkanausbrüche sorgen. Die Aktivität eines Vulkans sowie die Bildung subvulkanischer Intrusionen, in welchen man Erzlagerstätten finden kann, hängen von der Temperatur sowie von der chemischen Zusammensetzung der Schmelze ab. Je nachdem, ob siliziumreich oder -arm, ob dick- oder dünnflüssig, wird dies die Art der Eruption eines Vulkans massgeblich beeinflussen.

...um die Entstehung von Vulkanen zu enthüllen

Die Stärke der neuen Methode der jungen ETH-Geologen liegt darin, dass Schmelzproben mit einem Durchmesser von nur 10 Mikrometern ausreichen, um Aussagen über ein ganzes Vulkansystem zu machen, das durchaus 20 km Durchmesser haben kann. Wissen die Forscher ganz genau, was für eine Probe sie suchen, bevor sie ihre Koffer packen und beispielsweise nach Argentinien reisen, wo eine ihrer grossen Erzlagerstätten, die riesige Kupfer-Gold-Mine von Bajo de la Alumbrera, liegt? Halter: «Anhand der Fragestellung müssen wir die Proben vor Ort gezielt aussuchen.» Häufig dauert die Feldarbeit monatelang. Die «guten» Proben zu finden sei die Kunst der Feldarbeit, meint Pettke.

Und was, wenn man eine «falsche» Probe nimmt? Der Prozess der Probensuche sei iterativ, erklärt Pettke: «Nach ersten Analysen erkennt man allfällige Informationslücken. Man geht ins Feld zurück und schaut, ob einem die Geologie <die Tür aufmacht>, und man sucht weitere Proben, mit deren Hilfe dann versucht wird, vorhandene Lücken zu füllen.»

Wie kann man denn den magmatischen Gesteinen die «richtigen» Informationen entlocken, um das uralte Geheimnis eines Vulkans zu lüften?

Zunächst werden mit einem Ultraviolettlaser ganze Einschlüsse im Kristallinnern freigelegt und ablatiert. Dadurch entstehen feine Aerosol-Partikel, die dann mit einem Gasstrom in ein Plasma-Massenspektrometer überführt werden, wo die chemische Zusammensetzung des Materials gemessen wird. Die Apparatur ist vor ein paar Jahren von Prof. Detlef Günther in der Gruppe von Prof. Heinrich an der ETH Zürich entwickelt worden mit dem Ziel, kleine Flüssigkeitseinschlüsse in chemisch einfachen Mineralien zu untersuchen, erklärt Pettke. Die Methodik wurde seither weiterentwickelt und erlaubt jetzt, Schmelzeinschlüsse in chemisch komplexen Mineralien verlässlich zu analysieren. Kann man aufgrund der Informationen, die man aus der Analyse von Schmelzeinschlüssen gewinnt, eine Art Prognose der Vulkanaktivität machen? «Das System, das

wir untersuchen, war 3,5 Millionen Jahre lang aktiv, der Vulkan ist jedoch nur gelegentlich ausgebrochen; deshalb ist eine kurzfristige, für die Gesellschaft nützliche Vorhersage nicht möglich», erklärt Halter. «Wir könnten höchstens sagen, dass in 10 000 Jahren etwas passieren würde», fügt Pettke lachend hinzu.

Keine Erzlagerstätte in der Schweiz

Sie machen Grundlagenforschung, um zu verstehen, welche Prozesse die Entwicklung einer Magmakammer in der Erdkruste wesentlich beeinflussen, betonen die Forscher. Solche Erkenntnisse ermöglichen es, die Geschichte eines Vulkans vom chemischen Standpunkt aus zu rekonstruieren. Auf dieser Basis ist es dann mittels geophysikalischer Daten möglich, eine verlässlichere Prognose der kurzfristigen Vulkanaktivität zu machen.

Die neue Methode hat aber auch eine direkte Anwendung: die Erkundung neuer Erzlagerstätten aufgrund der chemischen Analyse von Sulfidschmelzen (Schwefel-Eisen-dominierte Schmelzen), die sich im Magma entmischen und dabei ganz spezifisch Erzmetalle anreichern. Die Forscher konnten zeigen, dass die Metallverhältnisse in Sulfid-Schmelzeinschlüssen den Metallverhältnissen entsprechen, die man in den Erzlagerstätten erwarten kann. Ein grosser Vorteil der Methode der ETH-Geologen liegt also darin, dass sie aufgrund von solch kleinen Proben Informationen über das Metallverhältnis der ganzen Erzlagerstätte gewinnen können und somit beispielsweise sagen können, ob eine Lagerstätte gold-, kupfer- oder platinreich ist. In einem Land wie der Schweiz, die keine eigenen Erzlagerstätten hat und bezüglich metallischer Rohstoffe vom Ausland abhängt, sei ihre Forschung gesellschaftlich relevant, meinen die Forscher unisono: «Die Schweiz beherbergt keine abbauwürdigen Erzlagerstätten, also kann der Metallkonsum nur durch Rohstoff-Importe gedeckt werden.» Die Forscher hoffen dabei, dass ihre Arbeit nachhaltig zur langfristigen Versorgung unserer Gesellschaft mit metallischen Rohstoffen beitragen kann.

DIE ONLINE-ÄRZTE KOMMEN

FORT- UND WEITERBILDUNG DER BESONDEREN ART

Was Ärzte in Zukunft für ihre Weiterbildung nutzen können, ist auch für Hochschulen und Universitäten von Interesse. Die pnn AG, ein Spin-off-Unternehmen der ETH Zürich, bietet eine Weiterbildung der besonderen Art an.

Was für Ärzte draussen in der Praxis gedacht ist, testet die ETH auch in ihrer eigenen Ausbildung. Mittels Internet können sich die Pharmazie-Studierenden Grundwissen aneignen. Auf einer Homepage stehen Folien und Vorträge der letzten Stunde zur Verfügung, die in eigenem Tempo durchgegangen werden können. Ein Fragebogen ermittelt, ob die Studenten für die kommende Stunde genügend vorbereitet sind. «Lernen per Internet macht Sinn, um sich das Grundwissen anzueignen; in der Stunde kann das Wissen dann vertieft werden», so Gerd Folkers, Professor am Institut für Pharmazeutische Wissenschaften. Dies sei nötig, da es immer mehr zu wissen gebe und immer weniger Zeit, um es den Studierenden beizubringen.

Ärzte müssen sich ständig weiterbilden

Dieses Tool ist aber nicht nur für Studierende der Angewandten Biowissenschaften, Sportphysiologie und der Universität Basel zugänglich. Die zunehmenden ökonomischen Zwänge sowie das sich rasant wandelnde medizinische Wissen zwingen Ärzte zur ständigen Weiterbildung. Dies brachte junge Wissenschaftler am ETH-Pharmazie-Institut auf eine Idee. Unter dem Firmennamen pnn AG und gemeinsam mit der FMH und der Landesärztekammer Hessen entwickelten sie eine zertifizierte Fort- und Weiterbildung für Ärztinnen und Ärzte online. Jeder, der Zugang zu einem Computer mit einem Modem und einem Standard-Internetbrowser hat, kann sich online weiterbilden. Auf der Homepage der pnn AG, <http://pnn.ethz.ch>, kann sich der Benutzer registrieren und erhält umgehend Zugriff auf die persönliche Lernübersicht.

Aktive und passive Kurse

Die Online-Fortbildung für Ärzte umfasst beispielsweise Typ 1 Diabetes Mellitus. Sie beinhaltet drei Online-Vorträge mit Folien und gesprochenem Text, vier Fallstudien und ein umfassendes Hintergrundwissen. Für die Vorträge konnten renommierte Opinion-Leader aus Deutschland als Referenten gewonnen werden. Diese behandeln verschiedene Aspekte von Typ-1-Diabetes, wie Folgeerkrankungen oder Therapien. Die Fallstudien sind mit einem Self-Assessment kombiniert, um den eigenen Lernerfolg zu überprüfen. Ist eine Frage beantwortet, kann man sich dank Links noch tiefer in die Materie einlesen. Suchmaschine, Glossar und Literaturliste machen es möglich, ein Thema genauer unter die Lupe zu nehmen.

Jeder Kurs ist in Lernmodulen organisiert, die aus aktiven und passiven Kursen zusammengesetzt sind und so einen Mix von Präsentation, Tutorat und Self-Assessment bieten. In einer persönlichen Übersicht werden alle Kurse einer zertifizierten Online-Weiter- oder Fortbildung dargestellt und gezeigt, wie viel vom jeweiligen Kurs bereits bearbeitet worden ist. Die Online-Fort- und Weiterbildung kann kostenlos absolviert werden. Soll der absolvierte Kurs mit einem Zertifikat bestätigt werden, kostet dies eine geringe Bearbeitungsgebühr.



Individuelles Lernen ermöglichen

Die Weiterbildung der pnn AG wird von der FMH anerkannt. Die Verbindung der Schweizer Ärztinnen und Ärzte FMH hat als erste europäische Ärztegesellschaft im Juni 1995 die strukturierte und kontrollierte Fortbildung für ihre Mitglieder für obligatorisch erklärt. Seither werden auf dem Gebiet der Medizinischen Aus-, Weiter- und Fortbildung zunehmend moderne Lernmethoden eingesetzt. Durch den Einsatz von Online-Kursen mit Selbstevaluation in der Fortbildung soll allen Fachärztinnen und Fachärzten ein individuelles Lernen ermöglicht werden. Die FMH will durch eine Anerkennung solcher Kurse, die mit dem Zeichen «FMH-approved» verbreitet werden, die Qualität der Fortbildung fördern.

Regina Rysler

Die pnn ag ist ein Spin-off-Unternehmen der ETH Zürich und Teil der unabhängigen Businessdivision von ETH World. Sie ist aus dem Institut für Pharmazeutische Wissenschaften hervorgegangen. Entwickelt wurde eine Internetplattform und darauf basierend Module für Berufsleute im Gesundheitswesen.

Die pnn ag bietet im deutschsprachigen Raum akkreditierte Online-Fort- und Weiterbildung an. Dafür arbeitet sie mit wichtigen Berufsorganisationen in der Schweiz und in Deutschland zusammen.

Informationen unter:
<http://www.pnn.ethz.ch/>

GALERIE

Christofer Hierold ist seit dem 1. April 2002 ordentlicher Professor für Mikro- und Nanosysteme an der ETH Zürich.



Christofer Hierold, geboren am 25. März 1962 in Regensburg, studierte Allgemeine Elektrotechnik, Schwerpunkt Halbleiter, an der Technischen Universität München. Er doktorierte bei Prof. R. Müller mit einem Ernst-von-Siemens-Stipendium und beendete als Visiting Scholar an der Universität von Washington, Seattle, USA, sein Doktorat. Danach arbeitete er im Bereich Corporate Technology der Siemens AG in der Abteilung Mikroelektronik und baute dort die MEMS-Gruppe auf. Als Abteilungsleiter für Siliziumprozessertechnik war er verantwortlich für die Forschung und Entwicklung von Mikrosystemen, CMOS-Prozessen, Speichern, Nanoelektronik und neuen Materialien. 1999 wechselte er zu Infineon Technologies AG und übernahm später als Vizepräsident Technology and IP Management die Verantwortung für die Technologieentwicklung der Wireless Products Business Group sowie in Folge das Kompetenz- und Innovations-Management. Seine Forschung leistete Beiträge zu den Grundlagen für CMOS-kompatible Mikrosysteme. Auf den Ergebnissen seiner Gruppe aufbauend, wurden ein integriertes Drucksensorsystem für Automobilanwendungen und ein Fingertipsensor auf dem Markt eingeführt. 1998 wurden sein Team und er für den Deutschen Zukunftspreis (Preis des Bundespräsidenten für Technik und Innovation) mit dem Projekt «Biometrischer Sensor Finger TIPTM» nominiert. Christofer Hierold hält 15 Patente oder Patentfamilien als Erfinder oder Miterfinder.

Seine gegenwärtigen Forschungsschwerpunkte gliedern sich in die angewandte Forschung für integrierte Mikrosysteme (MEMS; MOEMS) der nächsten Generation und die Grundlagenforschung für Materialien der Mikrosystemtechnik und deren (mechanischen) Eigenschaften. Ein erstes Projekt wird auf dem Gebiet der Polymere als Material für Mikrosysteme beginnen.

Prof. Dr. Reza. S. Abhari, Professor der ETH Zürich für Aerothermodynamik, ist von der American Society of Mechanical Engineers (ASME) zum Fellow ernannt worden.

Prof. Dr. Peter Bösiger, Professor für biomedizinische Technik an der Universität Zürich, ist zum Vorstandsmitglied der International Society for Magnetic Resonance in Medicine (ISMRN) gewählt worden.

Prof. Dr. Hans Bühlmann, Professor i. R. der ETH Zürich für Mathematik, hat von der Heriot Watt University, Edinburgh, den Honorary Degree of Doctor of Science erhalten.

Prof. Dr. Hans M. Eppenberger, Professor i. R. der ETH Zürich für Zellbiologie, ist zum Fellow der European Society of Cardiology gewählt worden.

Prof. Dr. Albert Eschenmoser, Professor i. R. der ETH Zürich für Organische Chemie, ist von der Internationalen Gesellschaft für die Erforschung des Lebensursprungs die Alexander-Ivanovich-Oparin-Medaille verliehen worden.

Prof. Dr. Gerd Folkers, Professor der ETH Zürich für Pharmazeutische Chemie, war Gast der Vrije Universiteit, Amsterdam, und ist mit dem Nauta Chair 2002 ausgezeichnet worden.

Prof. Dr. Armin Grün, Professor der ETH Zürich für Photogrammetrie, ist als Ehrenprofessor der Yunan Normal University, Kunming, China, berufen worden. Zudem ist er als erster Ausländer zum Ehrenmitglied der Japanischen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung gewählt worden.

Prof. Dr. Jeffrey A. Hubbell, Professor der ETH Zürich und der Universität Zürich für Biomedizinische Technik, ist zusammen mit einem internationalen Forscherteam der Körber-Preis für die Europäische Wissenschaft 2002 für Mediziner und Materialforscher verliehen worden, dies in Anerkennung ihrer Entwicklungen auf dem Gebiet der narbenlosen Wundheilung durch «Tissue Engineering».

Prof. Dr. Hanns Möhler, Professor der ETH Zürich und der Universität Zürich für Pharmakologie, ist zusammen mit Prof. Dr. Dominique Muller (Universität Genf) der Théodore-Ott-Preis der Schweizerischen Akademie der Medizinischen Wissenschaften verliehen worden.

Prof. Dr. Helga Nowotny, Professorin i. R. der ETH Zürich für Wissenschaftsphilosophie und Wissenschaftsforschung, ist zum Foreign Member der Royal Society of Sciences in Uppsala gewählt worden und ist nun neu auch Mitglied des Kuratoriums des Max-Planck-Instituts für europäische Rechtsgeschichte.

Prof. Dr. Vladimir Pliska, Professor i. R. der ETH Zürich, ist von der Chemischen Technologischen Hochschule in Prag die Emil-Votocek-Medaille der Tschechischen Chemischen Gesellschaft verliehen worden.

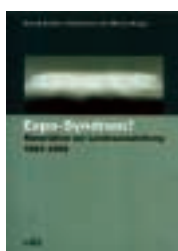
Prof. Dr. Otto Sticher, Professor i. R. der ETH Zürich für Pharmazie, sind mehrere wissenschaftliche Auszeichnungen verliehen worden:

1. der Degree of Doctor of Science honoris causa der School of Pharmacy der Universität London,
2. die Ehrenmitgliedschaft der internationalen Gesellschaft für Arzneipflanzenforschung,
3. die Anniversary Medal der Akademia Medyczna in Lublin, Polen.

NEUE BÜCHER

Georg Kohler, Stanislaus von Moos (Hrsg.) Expo-Syndrom?

Materialien zur Landesausstellung
1883–2002
Reihe Zürcher Hochschulforum, Band 32
288 Seiten, zahlreiche Abbildungen,
Format 17 x 24 cm, broschiert, Fr.48.–
vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich,
2002



«Expo-Syndrom?» – Thema des vorliegenden Buches ist nicht nur und auch nicht in erster Linie die Expo.02. Sowohl der Begriff Expo (Exposition, Ausstellung) als auch der Ausdruck «Syndrom» zielen über den Schweizer Kontext hinaus. Was geschieht, wenn die moderne Warenwelt, wie 1851 im Londoner Kristallpalast, einen Grad an Vielheit und Vielfalt erreicht, dem das Auge nicht mehr gewachsen ist? In einer solchen Situation müssen neue Formen der Wahrnehmung sowie mittel- und längerfristige neue Strategien der Inszenierung von Fortschritt und nationaler Identität erfunden werden. Die Geschichte der Schweizerischen Landesausstellung von 1883 bis heute bietet spannendes Anschauungsmaterial dazu. Sie wird in diesem Buch an exemplarischen Fallstudien vorgestellt. Dabei wird sichtbar, wie diese einzigartige und für die Schweiz charakteristische Institution immer wieder ein Ort kollektiver Selbstverständigung geworden ist. Das Zustandekommen der ersten Landesausstellung im dritten Jahrtausend ist in diesem Zusammenhang ein auffälliges Indiz.

Den Beiträgen liegen Vorträge zugrunde, die im Sommersemester 2000 an der Universität Zürich gehalten wurden. In den anschliessenden Diskussionen kamen bisher kaum dokumentierte zeit- und kulturgeschichtliche Aspekte der Institution «Schweizerische Landesausstellung» zur Sprache; sie bilden daher einen integrierenden Bestandteil des Buchs.

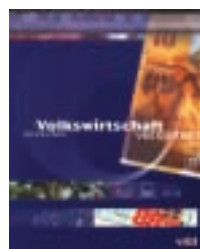
Beiträge von:

Thomas W. Bechtler, Mario Botta, Lucius Burckhardt, Elisabeth Castellani Zahir, Bernard Crettaz, Umberto Eco, Karin Gimmi, David Gugerli, Kurt Imhof, Hans-Ulrich Jost, Georg Kohler, Beatrice von Matt, Stanislaus von Moos, Jakob Tanner, Monika Wagner, Werner Weber, u.a.

Bernhard Beck

Volkswirtschaft verstehen

2., überarbeitete Auflage, 488 Seiten,
zahlreiche Darstellungen, Format 20 x 26 cm,
brochert, Fr. 68.–
vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich,
2002



Dieses Buch macht Sie damit vertraut, wie Märkte funktionieren. Es analysiert ihre beeindruckenden Leistungen und zeigt die Ursachen für ihre Mängel und ihr Versagen auf. Einerseits staunen wir über das ungeheuer vielfältige und verlockend präsentierte Angebot, das dem neuesten Stand der Technik und der Mode entspricht; andererseits sind wir täglich mit Problemen konfrontiert, die die Marktwirtschaft begleiten: Umweltzerstörung, soziale Unsicherheit, Arbeitslosigkeit.

Wo Märkte versagen, greift der Staat korrigierend und lenkend ein. Wie löst der Staat die Probleme? Wo schafft er neue? Wo und warum versagt auch er? Darüber wird in diesem Buch eingehend diskutiert. So gewinnen Sie Kriterien, mit denen Sie sich ein kritisches und unabhängiges Urteil bilden können.

«Volkswirtschaft verstehen» ist Lehrbuch, Lesebuch und Nachschlagewerk in einem. Es vermittelt auf der Grundlage moderner Theorie in leicht verständlicher Form komplexe ökonomische Zusammenhänge. Dabei berücksichtigt es die neuesten internationalen Entwicklungen und verwendet die aktuellsten Daten zur Schweizer Wirtschaft. Die Grafiken der vorliegenden Publikation wurden teilweise als Unterrichtsfolien

aufbereitet und können über:

www.vdf.ethz.ch abgerufen werden (Format pdf). Alternativ sind sie gegen eine Schutzgebühr beim Verlag als Foliensatz erhältlich.

Lukas Weber

Energie in Bürogebäuden

Verbrauch und energierelevante Entscheidungen

Reihe «Wirtschaft Energie Umwelt», Band 5
156 Seiten, zahlreiche Abbildungen,
Format 16 x 23 cm, broschiert, Fr. 54.–
vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich,
2002

Energieeinsparmassnahmen sind nur gerade eine – relativ teure – Möglichkeit, den Energieverbrauch effizienter zu machen. Höhere Energieeffizienz kann auch durch umsichtige Entscheidungen über den zukünftigen Energieverbrauch erreicht werden, etwa wenn ein Gebäude gebaut wird oder wenn Energieanwendungen beschafft werden. Dass dies bis heute selten getan wird, belegt dieses Buch.

Für eine repräsentative Stichprobe von Schweizer Bürogebäuden wurden die jährliche Entwicklung des Elektrizitätsverbrauchs und energieverbrauchsrelevante Entscheidungen im Zeitraum 1986–1996 erhoben und im Detail untersucht. Die Arbeit zeigt, dass der Elektrizitätsverbrauch in Bürogebäuden praktisch eine unbeabsichtigte Folge der Unternehmenstätigkeit ist. Einzelne Gebäudemerkmal und Veränderungen der technischen Infrastruktur legen die Höhe und die Entwicklung des Energieverbrauchs weitgehend fest. Organisatorische Massnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz – etwa ein Energiebeauftragter – führen nicht systematisch zu einem tieferen Verbrauch. Zur Förderung einer effizienteren Energienutzung wird daher empfohlen:

- Konzentration auf grössere Veränderungen im Bestand und Betrieb von Energieanwendungen,
- Konzentration auf Schlüsselentscheidungsträger (Beschaffungseinrichtungen, technischer Dienst, externe Planer),
- Förderung der Kenntnis der Energiefolgen von geschäftsbezogenen energierelevanten Veränderungen.

IM GESPRÄCH

KONTAKTE ZU HOCHSCHULEN ERWÜNSCHT

INTERVIEW MIT PETER RUFLLI, CHIEF ENGINEER BEI ALSTOM POWER

Das Marktumfeld für Gasturbinen ist schwierig geworden für ALSTOM Power, die Kraftwerkssparte des gleichnamigen französischen Konzerns. Zudem kämpft ALSTOM mit der Behebung von Fehlern aus der ABB-Vergangenheit.

Dr. Peter Rufli, promovierter Maschinenbauingenieur der ETH, ist Chief Engineer im Bereich Gasturbinen von ALSTOM Power, der in Baden domiziliert ist. Im folgenden Gespräch erklärt er, wieso die Industrie vermehrt die Zusammenarbeit mit Hochschulen wie der ETH sucht und schätzt.

Herr Rufli, vor einem Monat lehnte das Schweizer Stimmvolk das Elektrizitätsmarktgesetz (EMG) ab. Wie stark ist ALSTOM als Gasturbinenhersteller davon betroffen?

In der Schweiz haben wir letztmals eine Gasturbine nach Döttingen geliefert. Das war vor vier Jahren. Der Markt für thermische Maschinen in der Schweiz ist sehr klein, die Auswirkungen des EMG-Neins sind entsprechend klein für ALSTOM.

Wo sind die grossen Märkte für das Gasturbinengeschäft?

Bis vor kurzem waren die USA der grosse Markt. Der ist inzwischen zusammengebrochen, und wir sind mit unserem Marktanteil wieder auf dem Niveau von 1998 angelangt. Heute setzen wir in den verschiedenen Weltregionen etwa gleich viel ab. Eine interessante Entwicklung ist allerdings in Südeuropa, vor allem in Italien und Spanien, zu beobachten, wo als Folge der EU-weiten Strommarkt-Liberalisierung die Nachfrage nach Gasturbinen merklich zugenommen hat.

Was ist das Problem in den USA?

Bis vor ein paar Jahren waren die Reserven für die Stromproduktion in den USA viel zu klein. Das löste grosse Investitionen aus, allerdings mit dem Resultat, dass eine



Dr. Peter Rufli, Chief Engineer Alstom: «Von einer Kooperation mit der ETH profitieren beide Seiten... wir kommen vom Produkt her, die ETH bringt die Forschung ein, und treffen tut man sich da, wo es ums Verstehen von Technologien geht.»

Überkapazität entstanden ist, die auch heute noch besteht. Dies hat in kurzer Zeit zum Einbruch des US-Marktes geführt. Auch ist für heute mögliche Investitionen wohl kaum förderlich, dass aufgrund des 11. Septembers und des Enron-Debakels in den USA eine allgemeine Verunsicherung entstanden ist.

Im weltweiten Kraftwerksgeschäft gibt es inzwischen zwei grosse Player, General Electric und Siemens. Kann man als Nischenplayer, der ALSTOM Power mit einem Marktanteil von 5 Prozent ist, überleben?

Wir glauben natürlich daran und sind überzeugt, mit unseren Produkten in Zukunft wieder ein grösseres Stück vom Kuchen zurückzuerobieren. Unsere Massnahmen greifen, und die Produktpalette wird dies mittelfristig bestätigen. Im übrigen betrachten wir uns gar nicht als Nischenplayer, sondern wir konkurrieren mit dem Anspruch, während der nächsten Jahre die Nummer 2 im Gasturbinenge-

schäft zu werden, was wir vor vier Jahren schon einmal waren.

Sie sind schon lange im Kraftwerks-Geschäft, zuerst bei ABB, seit der Übernahme dieses Geschäftsteils vor zwei Jahren nun bei ALSTOM. Wo liegt der wesentliche Unterschied im Management der beiden Konzerne?

Die grosse Differenz ist sicher die, dass ALSTOM im Unterschied zu ABB an den Kraftwerksbau glaubt. Vergleichsweise wird bei ALSTOM dafür wesentlich mehr investiert, unser Entwicklungsbudget ist verdoppelt worden. Das ist die Grundlage für die Sanierung der Altlasten und für die Entwicklung von neuen Produkten.

Sie haben es angesprochen: ALSTOM schleppt immer noch die Altlast der zwei Turbinentypen GT24/26 mit sich herum, die noch zu ABB-Zeiten zu früh auf den Markt gebracht worden waren. Wo steht man heute?

Es ist tatsächlich so, dass diese Gasturbinen zu schnell in den Verkauf gelangten und dass wir unser Lehrgeld zahlen mussten. Wir haben die Schwachstellen dieser Turbinen inzwischen erkannt und sind daran, die Lösungen im Feld zu implementieren.

Wie kam es überhaupt dazu, ein noch nicht ausgereiftes Produkt zu lancieren?

Damals, das heisst Mitte der 90er-Jahre, wies der Markt ein starkes Wachstum auf. Man wollte an diesem Geschäft teilhaben und übersah dabei die Risiken. Es ist sicher so, dass die Möglichkeit, verkaufen zu können, auch das Risiko beinhaltet, auf einem Auge blind zu entscheiden.

Kommen wir zur Forschungszusammenarbeit zwischen ALSTOM und der ETH. Warum will man vermehrt mit Hochschulen zusammenarbeiten?

Drei Gründe stehen im Vordergrund: Erstens können beide Seiten von einer Kooperation profitieren. Wir kommen vom Produkt her, die ETH bringt die Forschung ein, und treffen tut man sich da, wo es ums Verstehen von Technologien geht, die irgendwann in ein Produkt einfließen können. Zweitens geht es um die mögliche Synergie dank der gemeinsamen Optimierung zwischen Technologieforschung und Produkteentwicklung. Drittens und nicht zuletzt eröffnet sich damit ein Rekrutierungsfeld von jungen Ingenieuren.

Konkret äussert sich die Zusammenarbeit ja im «Center of Energy Conversion» [CEC], das es seit zwei Jahren gibt. Um welche Fragen geht es hierbei?

Beispielsweise geht es um die Frage, wie man den Wirkungsgrad von thermischen Kraftwerken steigern kann. Eine Gasturbine auf dem neusten technischen Stand erzielt heute einen Wirkungsgrad von 38 Prozent. Als kombiniertes Gas- und Dampfkraftwerk bringt man es auf einen Wirkungsgrad von 57 Prozent. In ein paar Jahren wird es möglich sein, diese Maschinen noch einmal um drei Prozent effizienter zu machen. Dies mag zwar als wenig erscheinen, aber 3 Prozent können eben den Unterschied ausmachen, ob man zum Beispiel die Ziele des Kyoto-Protokolls (CO₂-Ausstoss) erreicht oder nicht. Oder in anderen Worten: in Anbetracht eines durchschnittlichen Wirkungsgrades eines Kraftwerkes von ca. 34% stellt die Implementierung neuer Kraftwerkstechnologie einen Quantensprung dar.

Wie hoch ist das Forschungsbudget von ALSTOM und wie viel Geld steht für die Zusammenarbeit mit der ETH zur Verfügung?

Konzernweit beinhaltet das Forschungsbudget für den Gasturbinen-Bereich einen dreistelligen Euro-Millionenbetrag. Das schliesst aber alles ein, von unserer Grundlagenforschung über die Komponentenentwicklung bis hin zur eigentlichen Produktentwicklung. Was die Zusammenarbeit mit der ETH angeht, kann unser Engagement zwischen drei und vier Millionen Schweizer Franken betragen. In einer ersten Phase geht es vor allem um die Finanzierung von Doktorarbeiten.

Peter Rufli ist in Birr im Kanton Aargau mitten in den Stammlanden von ABB (vormals Brown Boveri) aufgewachsen. 1978 schloss er sein Maschinenbaustudium an der ETH ab und doktorierte in der Folge unter Professor Walter Traupel zum Dr. sc. techn. ETH. Seine Dissertation schrieb er über kombinierte Gas- und Dampfkraftwerke. Zwischen 1989 und 1992 war er im Ingenieurbüro von Motor Columbus tätig, seit 1992 bei ABB. Mit der Übernahme des Kraftwerksgeschäftes durch ALSTOM arbeitet Peter Rufli seit dem Jahr 2000 als Chief Engineer bei ALSTOM Power Gas Turbine Business in Baden.

Interview: Roman Klingler

Der französische Konzern **ALSTOM** beschäftigt weltweit rund 118 000 Mitarbeiter und ist hauptsächlich in den zwei Bereichen Transport (Bahntechnik: 29% usw.) und Power (Energie/Kraftwerksbau: 51%) tätig. ALSTOM Power ging aus einem Joint-Venture mit ABB hervor und wurde im Jahr 2000 von ALSTOM vollständig übernommen. ALSTOM (Schweiz) AG beschäftigt heute rund 5200 Mitarbeitende, vor allem in der Region Baden. Seit der Integration der Kraftwerkssparte in den ALSTOM-Konzern wurden rund 1600 zusätzliche Stellen geschaffen. In jüngster Vergangenheit wurden jedoch aufgrund der schwierigen Marktlage verschiedentlich Gerüchte über einen bevorstehenden Arbeitsplatzabbau laut.

Das Center of Energy Conversion (CEC) wurde im Juni 2001 gegründet und stellt ein richtungsweisendes Konzept für eine partnerschaftliche Kooperation zwischen ETH und Industrie dar. Es wurde eine langfristige Zusammenarbeit zwischen der ETH Zürich und ALSTOM Schweiz vereinbart, um gemeinsam fortschrittliche Technologien der Energieumwandlung sowie der Stromerzeugung voranzutreiben und die erforderlichen wissenschaftlichen Grundlagen in diesem Bereich zu erarbeiten. Kernpunkt der Vereinbarungen ist es, die punktuelle Zusammenarbeit in Zukunft durch einen ganzheitlichen interdisziplinären Ansatz zu ersetzen, bei dem ein intensiver Austausch innerhalb aller Forschungsprojekte stattfinden kann. Nur mit einem solchen Konzept kann ein weiterer technischer Fortschritt und eine Beschleunigung des Transfers von neuen Technologien von den Technischen Hochschulen an die Industrie erreicht werden.

TREFFPUNKT

UNTERSTÜTZEN SIE IHR ETH-TEAM!

CHALLENGE 03 IN SAVOGNIN

Vor zwölf Jahren von der ETH Zürich und von der EPF Lausanne gemeinsam ins Leben gerufen, ist das Challenge-Treffen mittlerweile zu einem Ereignis mit Tradition geworden, das einen informellen Austausch zwischen den beiden Schulen und Kulturen in einer ungezwungenen Atmosphäre ermöglicht. Über das Wochenende vom 10. bis 12. Januar 2003 findet die nächste Auflage von Challenge statt – im dann zumal hoffentlich verschneiten Savognin.

Je 50 Studierende aus Zürich und Lausanne werde sich in den Disziplinen Ski, Snowboard und Telemark messen. Am Abend werden Sieg und Niederlage gleichermaßen begossen. Schon allein die Organisation dieses Anlasses wird ihrem Namen gerecht. Dass dies enorme Ressourcen benötigt, ist ebenso selbstverständlich wie die Tatsache, dass nicht alles mit öffentlichem Geld finanziert wird. Die Fremdfinanzierung gestaltet sich leider in diesem Jahr äusserst schwierig, weshalb wir für das kommende Challenge besonders auf Gönner angewiesen sind. Unterstützt werden wir unter anderem freundlicherweise durch die ETH-Alumni-



Vereinigung. Wir vom Organisationskomitee würden uns freuen, wenn wir auch auf Ihre Unterstützung zählen dürften.

Als ehemaliger Student, ehemalige Studentin der ETH sind Sie jedenfalls herzlich eingeladen, diesem Ereignis als Gast beizuwohnen. Sie können sich entweder direkt anmelden unter

<http://www.challenge03.ch/> oder über folgende E-Mail-Adresse: andreas@challenge03.ch.

Schriftliche Anmeldungen bitte senden an: Andreas Hutterli
Challenge 03 c/o VSETH
Leonhardstrasse 15
8001 Zürich

NEUE RUNDE FÜR IAESTE-PRAKTIKUMSSTELLEN

IAESTE (International Association for the Exchange of Students for Technical Experience) ist eine Nonprofit-Organisation, die schweizerischen Studierenden in technischen und naturwissenschaftlichen Studiengängen Praktikastellen in über 80 Ländern anbietet und vice versa.

Wir sind überzeugt – und diese Auffassung teilen auch die Rektorate der ETHs, Universitäten und Fachhochschulen – dass den Studierenden mit dem IAESTE-Angebot ein attraktives, wichtiges und ergänzendes Stück Bildung angeboten wird, das sich an einer Hochschule selbst nicht vermitteln lässt.

Anfangs November schreiben wir die Firmen für Praktikumsstellen an. Bitte kontaktieren Sie uns, wenn Sie Unterlagen möchten:

Tel. 01 632 20 67, fink@iaeste.ethz.ch.
Weitere Infos www.iaeste.ch.

ETH Alumni

Vereinigung der Absolventinnen und Absolventen der ETH Zürich, ETH Zentrum, 8092 Zürich, Tel. 01-632 51 00, Fax 01-632 13 29, info@alumni.ethz.ch, www.alumni.ethz.ch



Die neuen Projektoren von Sony – komfortabler, heller und leichter

Die ultraportablen Projektoren **VPL-CS5** und **VPL-CX5**.

komfortabler | Neigung, Trapezkorrektur und Signalwahl werden mit dem intelligenten Auto-Setup automatisch für Sie eingestellt – ein Knopfdruck, und Ihre Präsentation kann beginnen.

heller | mit einer Helligkeit von bis zu 2000 ANSI-Lumen projizieren Sie brillante, klare Bilder, auch bei vollem Tageslicht.

leichter | mit nur 2,7 kg sind die neuen Sony-Projektoren kompakt und leicht zu transportieren – ob ins Büro nebenan oder zu einem Termin ausser Haus.

SONY



VPL-CX5
Memory Stick-Projektor für Präsentationen ohne PC.

- 2000 ANSI-Lumen
- Intelligentes Auto-Setup
- XGA-Auflösung
- 2,7 kg
- Transporttasche

VPL-CS5
Kompakter Einstiegsprojektor.

- 1800 ANSI-Lumen
- Intelligentes Auto-Setup
- SVGA-Auflösung
- 2,7 kg
- Transporttasche

**Sony
Professional
Center**

PNC Group
SONY Professional Center
Industriestrasse 33
8304 Wallisellen

Telefon 01 883 21 00 Fax 01 883 21 14
www.pnc.ch info@pnc.ch





**BUSINESS
TECHNOLOGY**
**CORPORATE
FINANCE**
**BUSINESS
BUILDING**
**MARKETING
ORGANIZATION
STRATEGY**

McKinsey & Company
Alpenstrasse 3
8065 Zürich
Telefon 01 - 876 8000
Fax 01 - 876 9000
recruiting@mckinsey.ch

Was immer Sie erfolgreich bewältigen wollen, erfordert Einsatz und Ausdauer, aber auch Köpfchen und Vorstellungskraft. Diese Erfahrung haben Sie bei Ihrem hervorragenden Hochschulabschluss und Ihrer Zeit in der Privatwirtschaft bereits gemacht. Für McKinsey&Company, die international führende Unternehmensberatung, gilt dasselbe Prinzip. Als **CONSULTANT** bei McKinsey packen Sie entschlossen echte Herausforderungen an: Sie gewinnen den grundlegenden Themen der Unternehmensführung wie Strategie, Marketing oder Organisation neue Seiten ab. Sie schaffen Unternehmenswert durch weitsichtige Corporate Finance. Sie generieren neues Business mit innovativen Informatiklösungen oder denken über neue Ansätze im E-Enabling nach. Dass dabei die Teams immer wieder wechseln, finden Sie genauso bereichernd wie die enge Zusammenarbeit mit dem Topmanagement des Klienten. Weil Sie im Inland wie im Ausland tätig sein werden, sind Sprachkenntnisse unerlässlich. Und grosse Eigenständigkeit, die Sie auch ausserberuflich bewiesen haben, ist genauso ein Vorteil wie Flair für Analysen, Zahlen und faktenorientierte Argumentation. Lesen Sie mehr darüber bei www.mckinsey.ch. Und schreiben Sie dann Sarina Forrer, wenn Sie gerne Ihr Wissen und Ihre Persönlichkeit für knifflige neue Aufgaben kombinieren.

McKinsey&Company