

Mikroenergietechnik macht mobil

Die Bits sind willig, aber die Batterien sind schwach – Energiewandler auf kleinster Skala

Christopher Hebling

Während die Leistung von Computern und Speichermedien in den letzten Jahrzehnten exponentiell zugenommen hat, wächst die Kapazität von Batterien und Akkumulatoren vergleichsweise langsam. Neuartige Mikrosysteme haben aber das Potenzial, tragbare Geräte mit Energie zu versorgen, indem sie diese aus der Umgebung „ernten“ oder mithilfe konventioneller Brennstoffe Strom erzeugen.

Mit jeder neuen Produktgeneration steigt die Leistungsfähigkeit tragbarer elektronischer Geräte. So dient das Handy inzwischen längst nicht mehr nur zum Telefonieren, sondern auch zum Fotografieren, Filmen, Navigieren oder Fernsehen. Wir leben in einer Zeit zunehmender Mobilität und Erreichbarkeit. Auch unterwegs und ohne Zugang zu einer Stromversorgung werden Daten generiert, prozessiert und kommuniziert, wobei die Übertragungsraten selbst Musik- oder Fernsehübertragungen zulassen. Der Slogan „Always on“ bringt es auf den Punkt: Nicht zuletzt die moderne Geschäftswelt erwartet vom „Nomadic Office Worker“ ständige Erreichbarkeit, ganz gleich, in welchem Teil der Welt er sich befindet.

Neben Konsumergeräten gibt es andere, die in Netzwerken oder in Verbindung mit einer Basisstation Daten aufnehmen oder in Regelkreisläufe einspeisen. Beispiele sind Sensornetzwerke in Wohngebäuden, um die Energieeffizienz und den Wohnkomfort zu steigern, Messstationen, die Wetterdaten aufzeichnen oder die Luftqualität überwachen, kabellos betriebene Sensoren zur Prozesssteuerung in Produktionsabläufen oder für die medizinische Diagnostik, aber auch Smart Labels (sog. RFID-Chips) in der Logistik. All diese verteilten Mikrosysteme ermitteln Daten und prozessieren und übertragen sie, um komplexe Abläufe transparenter zu machen, um Waren- oder Verkehrsflüsse effizienter zu gestalten oder um in Produktion oder Medizin bei Toleranzüberschreitungen ein frühes Eingreifen zu gewährleisten.

Bei aller Faszination für diese Möglichkeiten stellt sich jedoch die Frage, wie sich diese Geräte mit Energie versorgen lassen [1, 2]. Obwohl die Energiedichte konventioneller elektrochemischer Speicher, also Primärbatterien, Akkumulatoren oder Super-Kapazitäten [3], bis zu 500 Wh/l beträgt, ist die Betriebsdauer pro Ladezyklus in vielen Fällen unbefriedigend. So ist z. B. bei einem UMTS-Handy schon nach gut einer Stunde



intensiver Nutzung der Gang zur nächsten Steckdose fällig. Durch gesteigerte Prozessor-Effizienzen, energieoptimierte Displaytechnologien oder ein intelligentes Powermanagement gelang es zwar durchaus, diesen Trend zu bremsen, aber aufhalten lässt er sich nicht. Hybride Systeme aus einem miniaturisierten Energiewandler gemeinsam mit einem elektrochemischen Speicher sollen daher die Betriebszeiten signifikant erhöhen (Abb. 1).

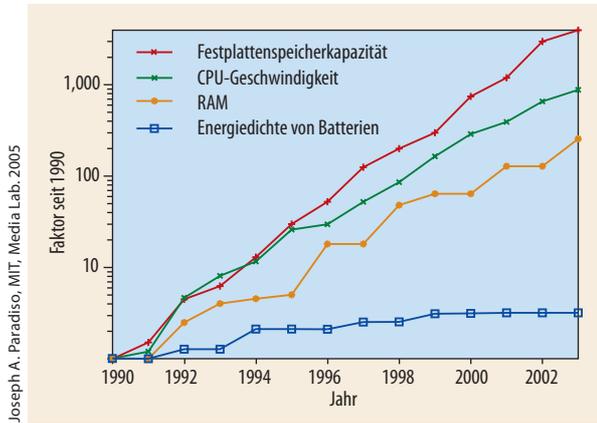
Neben den im Folgenden beispielhaft beschriebenen Wandlertechnologien kommt dem „Powermanagement“ des Gesamtsystems eine zentrale Bedeutung zu. Dies umfasst die optimale Abstimmung und Regelung peripherer Komponenten z. B. für den Transport von Reaktanten oder die bedarfsgerechte Stromverteilung unter Vermeidung von Leckströmen. Dazu kommt die günstige Anpassung der Spannungsniveaus der jeweiligen Elektronikkomponenten durch digitale Spannungswandler, ein echtzeitnahes Batteriemonitoring sowie der energieeffiziente Betrieb des Gesamtsystems.

Diese Designstudie zeigt, wie ein Handy aussehen könnte, das seine Energie sowohl von einer Solarzelle (links) als auch einer Brennstoffzelle (rechts) erhält.

KOMPAKT

- In Verbindung mit konventionellen Akkumulatoren sollen künftig Mikroenergiewandler die Energieversorgung von tragbaren oder netzfern betriebenen Geräten sicherstellen.
- Solarzellen, insbesondere aus organischen Materialien, thermoelektrische Generatoren oder Vibrationswandler sollen dazu die Energie ihrer lokalen Umgebung „ernten“.
- Reicht dies nicht aus, könnten mit Kohlenwasserstoffen oder Alkoholen betriebene Mikroturbinen, thermophotovoltaische Systeme oder Mikrobrennstoffzellen die Energieversorgung gewährleisten.
- Bei all diesen Energiewandlerprinzipien sind jedoch noch zahlreiche technologische Probleme zu lösen.

Dr. Christopher Hebling, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg



Joseph A. Paradiso, MIT, Media Lab, 2005
Abb. 1 Im Gegensatz zu typischen Leistungszahlen der Computertechnologie ist die Kapazität von Batterien zwischen 1990 bis 2003 nur langsam gewachsen.

Darüber hinaus erweitert die kabellose Energieübertragung auf einen Speicher, wie dies z. B. bei elektrischen Zahnbürsten bereits induktiv der Fall ist, die Möglichkeiten innovativer Mikroenergiesysteme. Mittels hochfrequenter, gerichteter Sender lässt sich Energie über Distanzen von mehreren Zentimetern effektiv übertragen, und schließlich ist es auch möglich, mithilfe eines Lasers in Kombination mit einer bandangepassten photovoltaischen Zelle elektrische Leistung mit hoher Effizienz über größere Distanzen zu übermitteln und damit in ein schlecht zugängliches Elektronikgerät einzukoppeln (**Abb. 2**).

Mikro bedeutet nicht nur kleiner

Bei Mikroenergiewandlern unterscheidet man generell zwischen Technologien, deren Wandlerprinzip auf konventionellen chemischen Energieträgern hoher Energiedichte (wie Kohlenwasserstoffen oder Alkoholen) basiert, und solchen, die Energie ihrer lokalen Umgebung wie Licht, Wärme und Bewegung passiv in Strom (und Wärme) transformieren und damit unter den Begriff „Energy Harvesting“ oder „Energy Scavenging“ fallen. Alan Epstein (MIT) hat für beide Technologien auch den Begriff PowerMEMS geprägt [4].¹⁾

Die konventionelle Energiewandlung in großem Maßstab basiert darauf, Wärme zu erzeugen, diese anschließend über thermomechanische Prozesse in mechanische Energie und schließlich über mechanoelektrische Prozesse in elektrische Energie zu konvertieren. Gemeinsam ist diesen Technologien die thermodynamische Begrenzung des Wirkungsgrads nach Carnot ($\eta_c = 1 - T_{\text{tief}}/T_{\text{hoch}}$), die den Betrieb bei hohen Temperaturen nahe legt. Als direkte Wandlerprinzipien unterliegen die elektrochemische Ladungstrennung über Brennstoffzellen sowie die photovoltaische Ladungstrennung in Halbleitern nicht der Carnot-Grenze.²⁾ Daher sind hier Konversionswirkungsgrade von über 50 Prozent möglich, wenn man Wasserstoff als Energieträger für Brennstoffzellen und bandangepasste monochromatische Einstrahlung bei photovoltaischen Zellen zugrunde legt.

Im Hinblick auf den Übergang zu Mikrosystemen widmet sich eine Vielzahl von Projekten der Miniaturisierung makroskopischer Systeme, z. B. mit dem Ziel, Mikro-Gasturbinen zu entwickeln. Bei Abmessungen bis hin in den Submikrometerbereich hinein gewinnen jedoch andere physikalische Parameter und Gesetzmäßigkeiten an Bedeutung, und neue Konzepte werden denkbar, die kein Pendant in der Makrowelt haben [5]. Nanoskalige Bauelemente erlauben somit eine neue funktionale Qualität – ganz im Sinne des berühmten Ausspruchs von 1959 „There is plenty of room at the bottom“ von Richard Feynman [6]. Besonders bei diesen kleinsten Maßstäben ist es auch wahrscheinlich, dass sich Disziplinen wie Mikrobiologie, Chemie, Medizin und klassische Mikrotechnologien synergetisch treffen, da es sich jeweils um hochkomplexe Systeme auf einer Mikrometerskala mit den gleichen Herausforderungen für den Massetransport, den Wärmehaushalt und die Austauschraten für die Energieumwandlung handelt. Vergleicht man die Funktionalität und die Strukturgrößen von mikromechanischen Bauteilen (64 nm bei einem Transistor) z. B. mit Viren (Strukturgröße 20 bis 200 nm) oder anderen Mikroben, so findet sich nicht nur eine erstaunliche Analogie, sondern es liegt auch nahe, deren Wechselwirkung verstehen zu lernen und unter der Berücksichtigung der Biokompatibilität gezielt anzuwenden [7, 8].

Für das Design von Mikroenergiesystemen sind unter anderem die folgenden Randbedingungen wichtig:

- Durch das extreme Verhältnis von Oberfläche zu Volumen in Mikrobauanteilen lässt sich der Energieumsatz pro Volumeneinheit oder der flächenbezogene Energiefluss durch die Bauteilhülle maximieren. Daneben steigt die Bedeutung von oberflächeninduzierten Phänomenen zur Verbesserung der Reaktionskinetik, z. B. bei katalytischen Reaktionen [9]. Während in makroskopischen Reaktoren das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen etwa bei $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$ liegt, sind in der Mikroreaktionstechnik Werte bis $50\,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ möglich.
- Das Verhältnis zwischen den Kräften innerhalb eines Materials und den Oberflächenkräften (Van-der-Waals-, Adhäsions- und elektrostatischen Kräften)

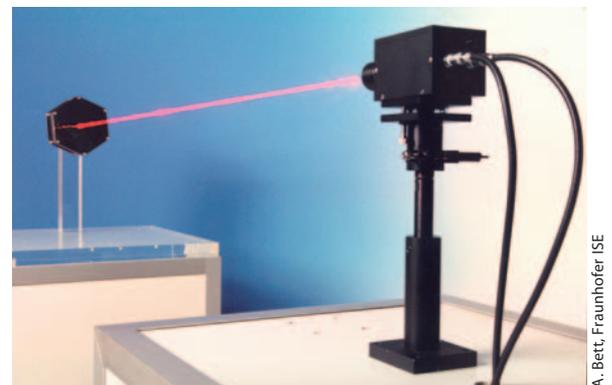


Abb. 2 Mit einem Laser und einer bandangepassten photovoltaischen Zelle aus III-V-Halbleitern (GaAs, AlGaAs, GaInP, GaSb) lässt sich elektrische Leistung mit einem Wirkungsgrad von über 50 Prozent übertragen, die Leistungsdichte beträgt etwa $100 \text{ W}/\text{cm}^2$.

1) Wengleich MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) im engeren Sinn ein Abzweiger der VLSI-Technologie (Very Large Scale Integrated) ist und sich auf photolithographische Übertragungsverfahren auf monokristalline Siliziumwafer bezieht, versteht man inzwischen unter PowerMEMS jegliche miniaturisierten Bauteile und Wandlerysteme mit hoher Energie- oder Leistungsdichte.

2) Für eine genauere Diskussion von Photovoltaik und Carnot-Grenze vgl. P. Würfel und T. Trupke, Physik Journal, Dezember 2003, S. 45.

verschiebt sich erheblich und ermöglicht neuartige Konzepte wie hochdynamische Systeme mit kleinsten bewegten Massen.

- Die Modifikation der Oberflächen gestattet es, den Wärmetransport in ein Umgebungsmedium zu maximieren. Außerdem lassen sich im Bereich des Strahlungsaustauschs an einer nanostrukturierten Oberfläche nichtlineare optische Effekte und Resonanz- bzw. Tunneleffekte innerhalb eines Bauteils ausnutzen.
- In Gasen tritt nicht-kontinuierlicher Wärmeaustausch auf, wenn die typische freie Weglänge zwischen Kollisionen der Gasmoleküle in vergleichbaren Größenordnungen wie der Längenskala des Systems liegt. Meist ist dies zu vernachlässigen, da die Diffusionslängen von Molekülen zwischen Kollisionen kleiner als 100 nm sind, bei Bauteilen im Submikrometer-Bereich dominieren diese Effekte jedoch.
- Makroskopisch spielt der Strahlungsdruck von Licht zwar keine Rolle, auf einer Mikro- bzw. Nanoskala lassen sich jedoch Piko-Newton-Kräfte, wie sie z. B. das Licht eines Laserpointers ausübt, für die Nanoprozessierung oder in Nanomaschinen einsetzen.

Die Optimierung von sich wechselseitig beeinflussenden physikalischen Parametern hat einen erheblichen Einfluss auf die Energie- und Leistungsdichte eines Mikrosystems, auf die Leistungsdynamik, das Massentransportverhalten und schließlich auf die Gesamteffizienz und Lebensdauer. Allerdings scheint kein System in Aussicht, das universell für einen großen Anteil elektronischer Systeme geeignet wäre. Vielmehr sind maßgeschneiderte Lösungen gefragt, welche die Systemumgebung mit einbeziehen und die Anforderungen hinsichtlich Geometrie, Leistungsdynamik und Nutzungsdauer in optimaler Weise erfüllen.

Energie ernten

Mikrosysteme lassen sich mit Strom versorgen, indem Energie aus der lokalen Systemumgebung in elektrische Leistung gewandelt wird. Dafür eignen sich Licht, thermische oder kinetische Energie, und je nach Verfügbarkeit wird die gewonnene Leistung direkt aufbereitet und verwendet oder in einen elektrochemischen Zwischenspeicher gespeist. Dies ermöglicht

vollständig kabellose und energieautark betriebene Produkte, z. B. Netzwerke mit tausenden von Einzelsensoren, die über lange Zeit Daten aufnehmen und kommunizieren. Dieser Ansatz ist sehr anschaulich auch als „mount-and-forget technology“ bekannt.

Photovoltaische Generatoren

In Solarzellen, die meist aus Halbleitern bestehen, generiert Licht Ladungsträger, wobei von der spektralen Verteilung breitbandiger Strahler (z. B. der Sonne) nur die Photonen mit einer Energie oberhalb der material-spezifischen Bandlücke im nahen Infrarot in elektrische Leistung umgewandelt werden. Hierdurch ist der Wirkungsgrad bei einem einzigen p/n-Übergang aus monokristallinem Silizium theoretisch auf etwa 28 Prozent begrenzt. Bei direkter Sonneneinstrahlung im Außenraum erreichen kommerzielle Systeme aus multi- oder monokristallinem Silizium derzeit einen Modulwirkungsgrad von etwa 15 bis 20 Prozent. Die Strahlungsdichte von etwa 100 mW/cm² legt die Nutzung von Photovoltaik als erneuerbare Energie in großem Maßstab nahe.

Da Mikrosysteme jedoch nicht notwendigerweise direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind, ist die Effizienz der verschiedenen Zelltypen bei schwacher Einstrahlung, z. B. 500 µW/cm² bei einer durchschnittlichen Schreibtischbeleuchtung, entscheidend. Für Anwendungen wie portable Elektroniksysteme oder Sensornetzwerke konzentriert sich die Forschung zum einen auf Mikrosolarzellenmodule mit höchstem Wirkungsgrad (> 20 Prozent, mono-Si) und damit maximaler Leistungsausbeute und zum anderen auf organische Solarzellen mit derzeit zwar noch geringem Wirkungsgrad (< 5 Prozent), dafür aber dem Potenzial, sehr dünne, flexible und kostengünstige Module vollständig aus polymeren Werkstoffen zu entwickeln (Abb. 3). Solche Module würden es gemeinsam mit elektronischen Bauelementen aus polymeren Werkstoffen („Plastik-Elektronik“) und gekoppelt mit organischen LEDs (OLEDs) oder flexiblen, dünnen Li-Ionen-Akkumulatoren ermöglichen, z. B. Kleidung elektronisch zu funktionalisieren und mit energieautarken Sicherheitselementen oder Sensorsystemen zu versehen. Derzeit wird intensiv versucht, organische Solarzellen aus einem konjugierten Polymer als Elektronen-

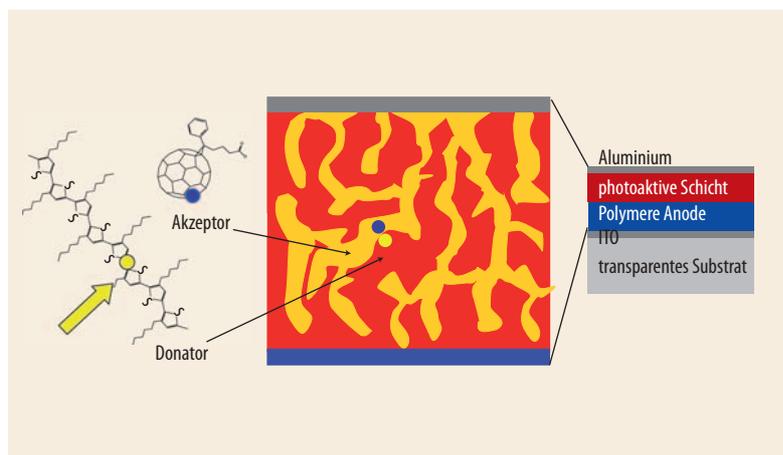
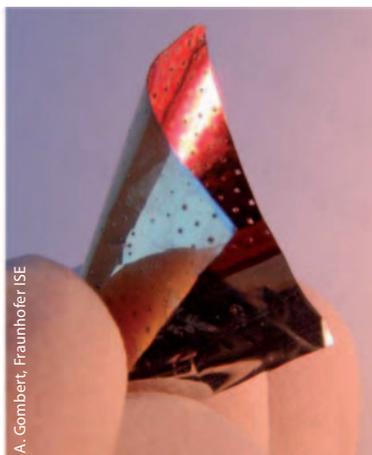
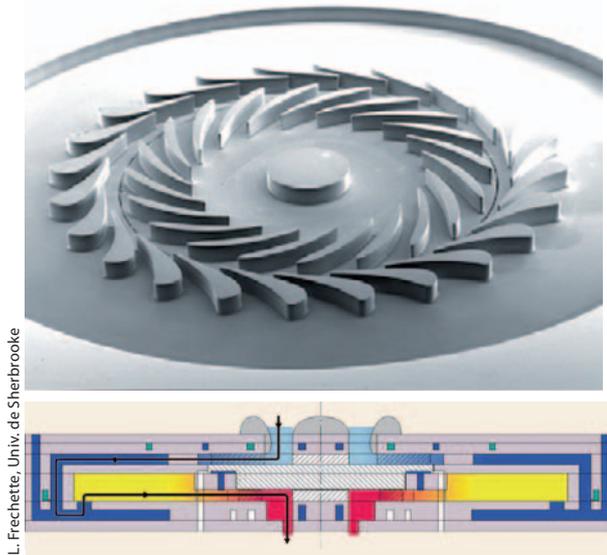


Abb. 3 Organische flexible Photovoltaikzellen (links) versprechen platzsparende mobile Energieversorgung. Rechts ist der Schichtaufbau mit der polymeren Anode (blau) sowie der photoaktiven Schicht gezeigt.



L. Frechette, Univ. de Sherbrooke

Abb. 4 Dieses Rotorblatt einer Mikrogasturbine (oben) hat einen Durchmesser von nur 4 mm, das vollintegrierte System (unten) ist 1 cm groß.

donator und einem Fulleren-Derivat als Elektronenakzeptor zu realisieren. Organische Solarzellen sind ein gutes Beispiel für Systeme, bei denen skalenabhängige physikalische Phänomene entscheidend sind [10]. Dies hängt damit zusammen, dass die Substratdicke der meisten organischen Solarzellen die Kohärenzlänge des Sonnenlichts übersteigt, wenngleich die Dicke der photoaktiven und passiven Schichten kleiner als die Wellenlänge der einfallenden Strahlung ist. Daher sind inkohärente und kohärente Optik zur Berechnung des optischen Nahfelds sowie rigorose Wellenoptik (Rigorous Coupled Wave Analysis), eine Methode zur Beschreibung von Nahfeldphänomenen an nanostrukturierten Grenzflächen, notwendig.

Thermoelektrische Generatoren

Der Seebeck-Effekt erlaubt es, aus Temperaturgradienten mittels thermoelektrischer Elemente eine Thermospannung zu erzeugen. Da der bereits erwähnte Carnot-Wirkungsgrad die maximale Energieausbeute physikalisch begrenzt, entscheidet neben der Materialauswahl der absolute Temperaturgradient direkt über die erreichbare elektrische Leistung [11]. Ein thermoelektrisches Bauelement besteht aus zwei miteinander verbundenen n- bzw. p-dotierten Halbleitereinheiten (Schenkel), deren Enden unterschiedlich warm sind. Die Thermospannung entsteht dadurch, dass am warmen Ende Ladungsträger ins Leitungsband gehoben werden, die zum Ausgleich des dadurch entstehenden Potentialunterschieds ans kalte Ende diffundieren. Bei typischen Seebeck-Koeffizienten von 400 μV pro Schenkel und 10 K Temperaturdifferenz lässt sich an den Enden eine Spannung von 4 mV abgreifen, d. h. zum Laden einer Batterie ist eine Serienschaltung von mehreren hundert Elementen notwendig.

Die Kunst bei der Entwicklung thermoelektrischer Materialien besteht darin, die elektrische Leitfähigkeit von der thermischen Leitfähigkeit zu entkoppeln. Ers-

tere sollte möglichst hoch sein, während die letztere möglichst gering sein sollte, um einen dauerhaften Temperaturgradienten aufrecht zu erhalten. Ansätze, mit denen sich die Wärmeleitung unterdrücken lässt, konzentrieren sich darauf, nanotechnologische Materialien zu entwickeln. Dazu zählen Halbleiter-Heterostrukturen, Nanostäbe mit minimiertem Stabdurchmesser, aber auch kristalline Übergitter, also Stapel aus epitaktisch gewachsenen, wenige Nanometer dicken Einzelschichten. Die Streuung der Phononen an jeder Grenzfläche soll hierbei die Wärmeleitung unterdrücken. Übergitter sind die bislang effizientesten thermoelektrischen Materialien und damit zugleich ein exzellentes Beispiel dafür, wie es die Nanotechnologie ermöglicht, die makroskopischen Volumeneigenschaften von Materialien gezielt zu verändern. Da die technische Umsetzung jedoch letztlich viele tausend solcher Übergitter erfordert, die nahezu defektfrei und zu einem einzigen Bauteil seriell verschaltet sind, gilt es bereits in einem frühen Entwicklungsstadium, ein besonderes Augenmerk auf die massentaugliche Herstellung solcher Arrays zu legen. Auch hier erschließen die Möglichkeiten der MEMS-Technologie ein erhebliches Entwicklungspotenzial – nicht nur für die thermoelektrische Stromerzeugung, sondern auch für die effiziente Kühlung von Mikrobauteilen durch den umgekehrten Peltier-Effekt.

Vibrationswandler

Kinetische Energie in Form niederfrequenter Schwingungen oder ungeordneter Bewegungen lässt sich auf elektromagnetische, elektrostatische und piezoelektrische Weise in elektrische Leistung umwandeln [12]. Das Transformationsprinzip beruht letztlich immer auf der Kopplung einer in einem Rahmen montierten bewegten Masse mit einem elektrischen Dämpfungsglied, d. h. eine mechanische Auslenkung ist an einen elektrischen Überträgermechanismus gekoppelt. Die meisten MEMS-Wandler basieren auf mechanischen Resonanzstrukturen, deren Resonanzfrequenz in hohem Maße an die Charakteristik des Anregungsspektrums angepasst ist. Der Wandler erzeugt elektrischen Strom durch die relative Auslenkung oder das Auftreten mechanischer Verformung innerhalb des Systems; bei letzterem sind wiederum aktive Materialien wie piezoelektrische Materialien notwendig [13, 14]. Bei den angestrebten Anwendungen wie Haushaltsgeräten (Kühlschrank, Waschmaschine), Produktionsanlagen, Autos und Flugzeugen oder aber auch Häusern und Brücken liegen die Beschleunigungsamplituden im Bereich von 1 bis 10 m/s^2 und die Anwendungsfrequenzen typischerweise zwischen 60 und 200 Hz. Beispiele noch niederfrequenterer Anregungen bei höheren Amplituden sind Bewegungen von Menschen oder von Bojen in Gewässern, die bis in den 1 Hz-Bereich gehen [8, 15].

Ein vereinfachtes Grundmodell mikromechanischer Wandler bringt die oszillierende Masse, die Beschleunigungsamplitude der anregenden Vibrationen, die Anregungsfrequenz und den mechanisch sowie elektrisch induzierten Dämpfungsfaktor mit der zu erzeugenden

elektrischen Leistung in einen Zusammenhang. Dabei ergibt sich, dass die elektrische Leistung proportional zur oszillierenden Masse des Systems und zum Quadrat der Beschleunigungsamplitude ist, aber umgekehrt proportional zur Frequenz. Daher sollte der Wandler so konzipiert werden, dass die Resonanzfrequenz bei der niedrigsten anregenden Frequenz liegt. Mit piezoelektrischen Wandlern ist es bislang gelungen, bei einem Volumen von etwa 1 cm^3 und einer Anregung mit 120 Hz (bei $2,25 \text{ m/s}^2$) eine elektrische Leistung von $200 \text{ }\mu\text{W}$ zu erzeugen. Allerdings entsteht dabei eine Wechselspannung, die zum Laden einer Batterie zunächst gleich zu richten ist. Weitere Forschungsfelder im Niedrigenergiebereich sind die Wandlung von Schall oder die Nutzung von seismischen Bewegungen. Hier liegen die erzielbaren elektrischen Leistungen im Bereich weniger Pikowatt, womit sich einfachste Sensornetzwerke versorgen lassen.

Brennstoffbetriebene Mikrowandler

Wenn die erzielbaren Leistungsdichten der beschriebenen passiven Mikroenergiesysteme für den Betrieb tragbarer oder netzfern betriebener Elektronikgeräte nicht ausreichen, muss man auf brennstoffbetriebene Energiesysteme zurückgreifen. Diese verwenden konventionelle Energieträger hoher Energiedichte wie Kohlenwasserstoffe (Diesel, Kerosin, Propan, Methan etc.) oder Alkohole (Ethanol, Methanol).³⁾

Mikroturbinen

Die Erweiterung von Silizium-Mikroverfahren von der Mikroelektronik zu den MEMS-Technologien Mitte der 90er-Jahre ermöglichte es, auch bewegte Mikroteile mit höchster Präzision und Verschleißarmut herzustellen. Das am MIT in Boston von Alan Epstein vorgeschlagene und verfolgte Konzept umfasst Technologien wie reaktives Ionenätzen, Fusion Wafer Bonding oder Dünnschichtabscheidung bzw. -prozessierung, um Komponenten wie Dichtungen, Lager und Brennkammern mit weniger als einem cm^3 Volumen zu produzieren und zu integrieren [16]. Mit einer theoretisch erwarteten Ausgangsleistung von bis zu 10 W/cm^3 und thermischen Effizienzen von 5 bis 20 % sind Mikroturbinen die leistungsdichtesten Mikrowandler, allerdings auf Grund der extremen Anforderungen wahrscheinlich auch am weitesten von einer Serienfertigung entfernt (Abb. 4). Während ein typischer Ausspruch zu Beginn der Mikroturbinenforschung lautete: „It'll take ten miracles to get this thing to work“, sind die Einschätzungen inzwischen etwas optimistischer: „Ok, we've gotten ten miracles, but now we have to get them to all happen simultaneously“.

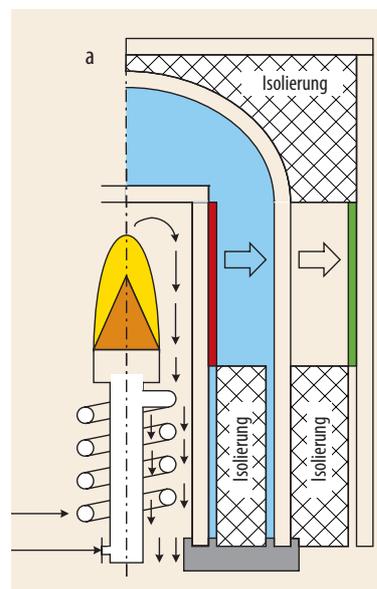
Die besonderen Randbedingungen einer Mikroturbine ergeben sich daraus, dass die zwischen der Turbine und dem Arbeitsmedium ausgetauschte Arbeit proportional zur Winkelgeschwindigkeit und umgekehrt proportional zum Durchmesser der Rotorblätter skaliert. Das erfordert Geschwindigkeiten

von mindestens 500 000, besser noch einer Million Umdrehungen pro Minute für Rotordurchmesser unterhalb von 20 mm. Die damit einhergehende extreme mechanische Belastung setzt absolut defektfrei hergestellte Werkstoffe voraus. Kritisch ist auch die Temperatur: Bei einem Verhältnis des Drucks hinter bzw. vor der Turbine von drei muss die Eingangstemperatur mindestens $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ betragen, wenngleich eine höhere Temperatur die Effizienz sogar noch erheblich steigern würde. Interne Kanäle kühlen die Rotorblätter in großen Turbinen, sie sind bei wenige Millimeter großen Rotorblättern aber nicht realistisch. Rotorblätter aus Si_3N_4 -TiN-Keramikkompositen in Kombination mit selbststabilisierenden aerodynamischen Luftlagern halten den hohen Temperaturen jedoch dauerhaft stand. Eine weitere Herausforderung besteht darin, die auftretenden Oberflächenkräfte zu beherrschen. Generell sind Mikroturbinen in MEMS-Technologie sicherlich ein faszinierender Ansatz, jedoch steht der Funktionsnachweis als Gesamtsystem noch aus.

3) In speziellen Anwendungen wie in Weltraummissionen dienen auch Radionuklide in Verbindung mit thermoelektrischen Wandlern als Energieträger.

Mikro-Thermophotovoltaik

Unter der thermophotovoltaischen (TPV) Energiekonversion versteht man die Kopplung der Schwarzkörper-Strahlung eines heißen Emitters mit photovoltaischen Zellen niedriger Bandlücke. Das Prinzip ist analog zur gewöhnlichen Photovoltaik mit dem Unterschied, dass der Emitter in einem TPV-System wesentlich kälter ist als die 5500 K heiße Sonnenoberfläche. Allerdings beträgt die Entfernung des Strahlers auch statt rund 150 Millionen Kilometer nur wenige Zentimeter oder gar weniger als ein Mikrometer. Dieser geringe Abstand ermöglicht auch mit relativ kalten Strahlern von 1500 K Leistungsdichten von über 1 W/cm^2 photovoltaisch aktiver Fläche [17]. Die Herausforderung liegt nun darin, das Emissionsspektrum eines Brenners an die spektrale Empfindlichkeit der photovoltaischen Zelle anzupassen. Dies gelingt mit einer dazwischen liegenden Infraroptik aus wellenlängen-selektiven Emittlern oder optischen Filtern, sodass



B. DiMatteo, MTPV Corp.

Abb. 5 Im Gegensatz zur normalen Thermophotovoltaik mit makroskopischen Abständen zwischen Quelle (gelb), Emitter (rot) und Zelle (grün, links) erfordert die Mikro-Thermophotovoltaik einen präzisen planparallelen Abstand vom Emitter zur Zelle unterhalb von einem Mikrometer, was durch tubulare Abstandshalter (REM-Aufnahme, oben) erreicht wird.

nur Photonen mit einer Energie oberhalb der Bandkante der photovoltaischen Zelle auf selbige treffen [18]. Ein System in radialer Anordnung besteht also aus einer mittig angebrachten Verbrennungskammer, in die das Brenngasgemisch injiziert wird, einer die Kammer umgebende spektral selektiven Emittierkonfiguration, dann einer Kühlung oder transparenter thermischer Isolation, schließlich geeignet reflektierenden Filtern und den ebenfalls gekühlten photovoltaischen Zellen [17] (Abb. 5a). Vorteile dieser Wandlerkonfiguration sind die Variabilität hinsichtlich der verwendbaren Energieträger, die Geräuschfreiheit und das Fehlen jeglicher bewegter Teile, die prinzipiell ein robustes System mit langer Lebensdauer erwarten lassen.

Allerdings sind hier noch fundamentale Probleme zu lösen: Auch bei einem Emissionsspektrum von 1500 K ist die Anpassung zur spektralen Empfindlichkeit photovoltaischer Zellen mit niedriger Bandlücke noch sehr gering, sodass oberflächenmodifizierte selektive Emittier wie z. B. strukturierte Wolframemittier oder photonische Kristalle aus Wolfram den emittierten Infrarotanteil jenseits der Bandlücke unterdrücken sollen. Bisher realisierte TPV-Systeme haben einen Wirkungsgrad von nur wenigen Prozent, was auf die Systemkomplexität, die hohen Temperaturgradienten und nicht stabile selektive Emittier zurückzuführen ist.

Alternativ wird bei der faszinierenden Mikro-TPV mittels MEMS-Herstellungsmethoden versucht, den Abstand des selektiven Emittiers zur photovoltaischen Zelle im Vakuum unterhalb der Wellenlänge von 1 µm zu halten, um dadurch den Strahlungswärme-Transfer in die Zelle durch Tunneleffekte um mindestens einen Faktor 10 zu steigern [19]. Hier wird also in einem Abstand von einem Mikrometer ein Temperaturgradient von bis zu 1200 K dauerhaft aufrechterhalten, was in keiner anderen Technologie und vermutlich auch nicht im Kosmos realisiert ist. Trotz extremer technologischer Herausforderungen wie z. B. Planparallelität von Emittier und Diode ist gelungen, diesen Ansatz als Prototyp zu realisieren (Abb. 5b).

Mikrobrennstoffzellen

Brennstoffzellen wandeln chemisch gebundene Energie eines Brennstoffs elektrochemisch in elektrische Energie – direkt, geräuschlos, abgasfrei und hocheffizient [3]. Die Oxidation des Brennstoffs, idealerweise Wasserstoff, und die Reduktion eines Oxidationsmittels, meist Luftsauerstoff, laufen in zwei räumlich voneinander getrennten Teilreaktionen ab, die über einen elektrisch isolierenden Ionenleiter, den Elektrolyten, verbunden sind. Der Elektrolyt ist beidseitig mit porösen Elektroden beschichtet, die für die katalytisch induzierten Teilreaktionen zuständig sind. Die Elektronen des katalytisch aufgespaltenen Wasserstoffs fließen dann über einen äußeren Verbraucher als elektrischer Strom, die Protonen diffundieren, getrieben durch die anliegende Potentialdifferenz, durch den Elektrolyten und rekombinieren an der Kathodenseite mit Sauerstoff zu Wasser, das mit dem Luftstrom ausgetragen wird. Die Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEMFC) eignet sich aufgrund der niedrigen Betriebstemperatur von etwa 60 bis 70 °C, dem Feststoffelektrolyt und des relativ einfachen Systemaufbaus besonders für Mikrosysteme. Neben Wasserstoff kommt auch flüssiges Methanol oder Ethanol als Brennstoff infrage. Dafür ist es nötig, die Katalysatormischung zu verändern und das Produktwasser zurückzuführen, um den hochkonzentrierten Ausgangsstoff zu verdünnen. Wasserstoffbetriebene Mikrobrennstoffzellen erreichen Leistungsdichten von etwa 250 mW/cm², methanolbetriebene Systeme aufgrund der reduzierten Reaktionskinetik etwa 50 mW/cm², bei Ethanol sind bis zu 20 mW/cm² möglich. Weiterhin erlauben vorgeschaltete Mikroreformer, auch konventionelle Kohlenwasserstoffe als Energieträger zur Wasserstofferzeugung einzusetzen, was die Energie- und Leistungsdichte des Systems gegenüber Methanol nochmals erheblich steigert, jedoch auch die Systemkomplexität aufgrund der Reaktions-temperaturen von bis zu 900 °C [20].

Um die Reaktanten in den beiden Halbräumen einer Brennstoffzelle gleichmäßig zu verteilen und gleichzeitig den Strom abzuleiten, befindet sich jeweils

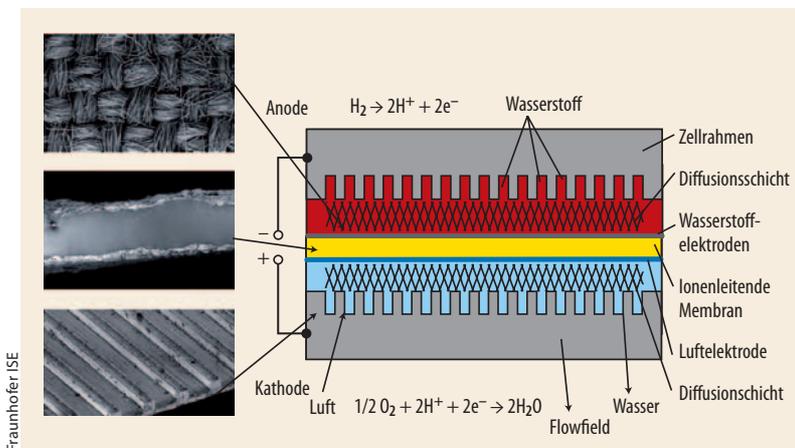


Abb. 6 Funktionseinheiten einer Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEMFC). Das Flowfield (links unten) dient der makroskopischen Verteilung

der Reaktanten, die durch die Diffusionsschicht (links oben) gleichmäßig auf der katalytisch beschichteten Elektrode verteilt werden.

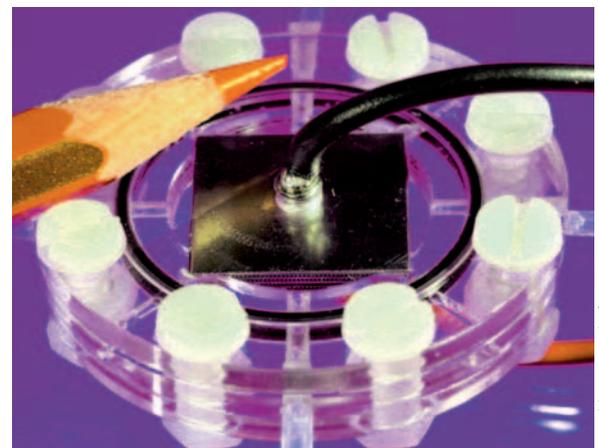


Abb. 7 Diese Mikrobrennstoffzelle ist gemäß Abb. 6 aufgebaut und erzielt bei einer Leistungsdichte von 1 W/cm³ eine Ausgangsleistung von 250 mW.

Fraunhofer ISE

C. Hebling, Fraunhofer ISE

eine Diffusionsschicht (GDL) auf den Elektroden, des weiteren sind Gaskanäle in die elektrisch leitenden Endplatten, die auch die elektrische Verbindung zur Nachbarzelle im Brennstoffzellenstapel herstellen, eingearbeitet (Flowfield) (Abb. 6, 7).

Bei einer Brennstoffzelle mit Wasserstoff und Sauerstoff ergibt sich theoretisch die Zellenspannung aus der Änderung der freien Reaktionsenthalpie zwischen Produkten und Edukten von 1,23 V. In der Realität liegt die Zellenspannung immer darunter und hängt stark vom Zellenstrom ab. Die Verluste werden als Überspannung bezeichnet und führen zu der für PEMFC typischen abfallenden U-I-Kennlinie. Die auftretenden Verluste sind im Wesentlichen auf interne Kurzschlüsse zurückzuführen (Mischpotential durch Diffusion der Reaktanten durch den Elektrolyten), nichtideale elektrochemische Reaktionen an der Phasengrenze zwischen den Elektroden und dem Elektrolyt (Durchtrittsüberspannung), einen Spannungsabfall durch Ladungsträgertransport im Schichtsystem (ohmsche Verluste) sowie Massentransportverluste bei hohen Stromdichten durch reduzierte Reaktionskinetik.

Um Zuverlässigkeit und Lebensdauer zu erhöhen, ist es nicht nur wichtig, diese Verluste zu minimieren, sondern vor allem auch, die Einzelkomponenten funktionsell zu optimieren. Dies gilt sowohl für die Einzelzelle als auch für periphere Mikroelemente im System wie Lüfter (Kühlung, Luftzufuhr für die elektrochemische Reaktion), Pumpen (Flüssigkeitstransport), Ventile (Mediendosierung), Sensoren (Temperatur, Methanolkonzentration) sowie die hocheffiziente Leistungselektronik zur Regelung des Gesamtsystems. Diese Regelalgorithmen sind keineswegs trivial, da Brennstoffzellensysteme hochkomplexe dynamische Systeme sind, in denen sich die freie Strömung von Gasen, Diffusion durch poröse Medien, wassergebundener Ionentransport im Elektrolyt, elektrochemische Reaktionen und die Koexistenz von flüssiger und gasförmiger Phase wechselseitig beeinflussen. Die Entwicklung von Mikrobrennstoffzellensystemen zielt u. a. darauf ab, einige der Funktionen der genannten peripheren Elemente passiv zu gewährleisten, insbesondere durch Oberflächenmodifikation in den einzelnen Brennstoffzellenkomponenten. Hierdurch verliert man jedoch auch Regelgrößen für den sicheren Betrieb besonders bei extremen Temperaturen oder bei dynamischen Lastspitzen [21]. Ein wichtiger Parameter für den Zellenbetrieb ist z. B. die relative Feuchte der Gase. Denn zum einen steigt die Protonenleitfähigkeit der Membran mit ihrem Wassergehalt, der zu der Gasfeuchte im Gleichgewicht steht. Andererseits führt kondensiertes Wasser zu erhöhten Massentransportverlusten in den porösen Medien, beziehungsweise zum Fluten von Zellbereichen und damit zu deren Deaktivierung. Sowohl die Temperatur als auch die Wasserkonzentration variieren nicht nur temporär als Funktion der entnommenen elektrischen Leistung aus der Zelle, sondern auch lokal durch die Abreicherung des Sauerstoffgehalts im Flowfield oder durch Temperaturgradienten im Zellenstapel.

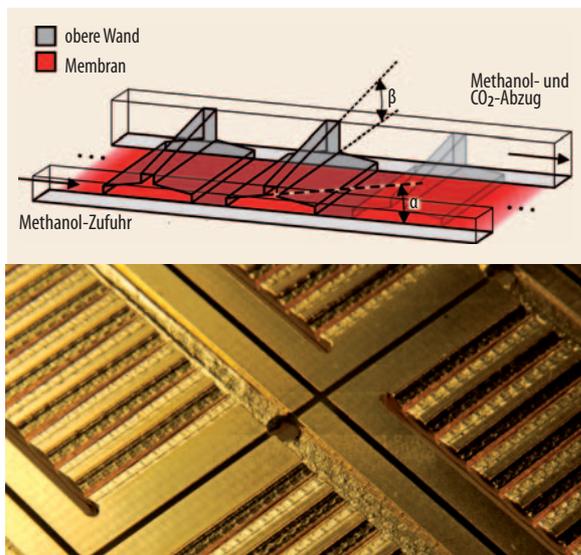


Abb. 8 Mikrostrukturen, die in zwei Richtungen angeschrägt sind (oben: Schema, unten: Foto), ermöglichen einen passiven, durch Kapillarkräfte angetriebenen Abzug von CO₂-Gasblasen in einer Direktmethanolfuelstoffzelle.

C. Littert, IMTEK

Das Herunterskalieren makroskopischer Komponenten in den sub-Mikrometerbereich durch MEMS-Technologien geht mit inhärenten Vorteilen einher wie erhöhten Wärme- und Massentransferraten, reduzierten Übergangswiderständen, erhöhter Energiekonversion und Speichereffizienz, verbesserter Temperaturkontrolle sowie schneller Reaktantenzufuhr und ermöglicht somit hochdynamische Systeme für schnelle Lastwechsel [22]. Nanostrukturierte Elektrodenmaterialien wie z. B. auf Kohlenstoffpartikeln abgeschiedene Platin-Ruthenium-Katalysatoren erhöhen die aktive Oberfläche und dadurch die Leistungsdichte des Gesamtsystems. Photolithographische Herstellungsmethoden und Dünnschichtprozesse ermöglichen es unter anderem, die Gasdiffusionselektrode ortsaufgelöst zu funktionalisieren, sodass sich Reaktionskinetik, Diffusionseigenschaften oder die elektrische Ankopplung an das Flowfield verbessern. Auch ein passiver Gasblasenausstrag winziger CO₂-Blasen, die durch die Methanoloxidation entstehen, ist durch gradierte Grenzflächen im Flowfield möglich (Abb. 8). Und schließlich wird eine 3D-Systemarchitektur mit einer integrierten Energiezufuhr als „on-chip-Lösung“ für eine Vielzahl von Systemen auf einem Si-Wafer angestrebt, was einen Quantensprung in der Mikroelektronik darstellen würde.

Ausblick

Das wirtschaftliche Potenzial und die technologischen Herausforderungen für die Mikroenergietechnik sind gleichermaßen hoch und die Anforderungen an maßgeschneiderte Energieversorgungen, die bisherige, speicherbasierte Lösungen übertreffen sollen, beträchtlich: Die Architektur des Energiesystems muss dem zu erwartenden Einsatz- bzw. Nutzungsprofil entsprechen und eine hohe Konversionseffizienz sowie Wartungsfreiheit und Zuverlässigkeit gewährleisten –

und zugleich gegenüber etablierten elektrochemischen Speichersystemen ökonomisch konkurrenzfähig sein [23]. Hier sind in besonderem Maße die Materialwissenschaften gefragt, neue Werkstoffe und Modifikationsverfahren für die jeweiligen Wandlertechnologien und deren spezielle Randbedingungen zu entwickeln, aber auch die Elektrotechnik, um auf Basis digitaler Signalprozessierung umfassende Gesamtsysteme zu erstellen, die eine Vielzahl von Einzelkomponenten auf intelligente und energieoptimierte Weise miteinander vernetzen.

Literatur

[1] S. Roundy et al., Power Sources for Wireless Sensor Networks, in: H. Karl, A. Willig und A. Wolisz (Hrsg.): EWSN 2004, LNCS 2920, S. 1, Springer Berlin (2004)

[2] D. Dunn-Rankin, E. Martins Leal und D. C. Walther, Progress in Energy and Combustion Science **31**, 422 (2005)

[3] G. J. La O' et al., Int. J. Energy Res. **31**, 548 (2007)

[4] A. H. Epstein et al., Proc. Intl. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, Transducers 1997, Bd. 2, S. 753 (1997)

[5] A. C. Ratzel, Mechanical Engineering **129**, S. 24 (März 2007)

[6] R. P. Feynman, J. of Microelectromech. Systems **1**, 60 (1992)

[7] A. C. R. Grayson et al., Proc. of the IEEE **92**, S. 6 (2004)

[8] P. Miao et al., Microsyst. Technol. **12**, 1079 (2006)

[9] V. Hessel, H. Löwe, A. Müller und G. Kolb, Chemical Micro Process Engineering, Wiley-VCH, Weinheim (2005)

[10] M. Niggemann et al., erscheint in Thin Solid Films (2007)

[11] J. Sommerlatte, K. Nielsch und H. Böttner, Physik Journal, Juni 2007, S. 35

[12] S. P. Beeby, M. J. Tudor und N. M. White, Meas. Sci. Technol. **17**, R175 (2006)

[13] S. R. Anton und H. A. Sodano, Smart Mater. Struct. **16**, R1 (2007)

[14] H. A. Sodano, G. Park und D. J. Inman, Shock Vib. Digest **36**, 197 (2004)

[15] S. Roundy, P. K. Wright und J. Rabaey, Computer Comm. **26**, 1131 (2003)

[16] A. H. Epstein, J. Eng. Gas Turbines & Power **126**, 2005 (2004)

[17] W. M. Yang et al., Energy Conversion and Management **44**, 2625 (2003)

[18] S. Basu, Y.-B. Chen und Z. M. Zhang, Int. J. Energy Res. **31**, 689 (2007)

[19] R. S. DiMatteo et al., Thermophotovoltaic Generation of Electricity, Sixth Conference, American Institute of Physics (2004)

[20] S. Ahmed und M. Krumpelt, Int. J. of Hydrogen Energy **26**, 291 (2001)

[21] C. Hebling, L. Rochlitz und T. Aicher, Micro Fuel Cell Systems, erscheint in Comprehensive Microsystems, hrsg. von Y. Gianchandani, O. Tabata und H. Zappe, Elsevier (2007)

[22] J. D. Morse, Int. J. Energy Res. **31**, 576 (2007)

[23] T. F. Havel, Towards an Industrial Ecosystem for Power MEMS, Master Thesis, MIT Sloan School of Management (2007)

MIKROENERGIETECHNIK @ FRAUNHOFER

Die Fraunhofer-Gesellschaft hat das Thema Mikroenergie-technik im Rahmen ihrer Initiative „Perspektiven für Zu-kunftsmärkte“ als eines der zwölf Innovationsthemen gewählt, in denen eine besondere Marktrelevanz erwartet wird.

Zehn verschiedene Fraunhofer-Institute arbeiten in diesem Gebiet zusammen und veranstalten am 25. November 2007 in Freiburg das „Fraunhofer-Symposium Mikroener-gietechnik – Power To Go“, gefolgt von dem siebten inter-nationalen PowerMEMS Workshop am 26. und 27. Novem-ber 2007 an gleicher Stelle. Beide Veranstaltungen werden vom Autor dieses Beitrags geleitet. Weitere Informationen finden Sie unter www.microenergy-technology.com bzw. unter www.powermems.org.

DER AUTOR

Christopher Hebling promovierte 1999 an der Uni Konstanz über dünne Silicium-Schichten für Solarzellen. Anschließend hat er am Fraunhofer ISE die Gruppe Mikro-energie-technik gegründet und koordiniert jetzt die Aktivitäten der Fraunhofer-Gesellschaft in diesem Gebiet. Zwischen-zeitlich leitet er die Abteilung für Energietechnologie mit dem Schwerpunkt Wasserstofftechnologie. In den letzten Jahren ist er seiner Leidenschaft für die humanistische Psychologie nachgegangen und hat eine Ausbildung als Gestalttherapeut absolviert. Falls es seine drei Kinder er-lauben, erklingen des nächstens in feinstem Röhrensound Rhythmen aus der New Yorker Avantgard-Jazzszene.

