

Auf die Größe kommt es an – Vor- und Nachteile der Miniaturisierung

Sangkyun Kang, Sang-Joon J. Lee, Fritz B. Prinz

So paradox es klingen mag, aber die Miniaturisierung spielt in unserem Leben eine immer größere Rolle. PCs, Telefone, PDAs und Geräte der Unterhaltungselektronik werden immer kleiner. Und sie sind schneller geworden: die Submikron-Technik ermöglicht Betriebsfrequenzen, die vor wenigen Jahren noch unvorstellbar waren. Nun hält die Miniaturisierung auch in andere Produktbereiche Einzug, beispielsweise in Strömungsmaschinen und Brennstoffzellen. Hier verspricht sie jedoch nicht nur beträchtliche betriebliche Vorteile, sie hat auch ihren Preis – zum Beispiel in Form von höheren Reibungsverlusten oder Einbußen bei der Genauigkeit.

In den letzten Jahren konnte man feststellen, dass Ideen aus der Welt der Miniaturtechnik mit großer Begeisterung von anderen Disziplinen übernommen wurden. Ein gutes Beispiel hierfür sind die MEMS (Micro-Electronic Mechanical Systems), die auch unter der Bezeichnung Mikrosystemtechnik (MST) bekannt sind. Diese Systeme werden mit den bestehenden Fertigungsverfahren der Mikroelektronik hergestellt und als Miniatursensoren (z.B. Beschleunigungssensoren) und Mikro-Aktoren (Ventile, Spiegelanordnungen) ausgeführt. Ein großer Vorteil der MEMS liegt darin, dass sie relativ leicht parallel angeordnet werden können, um so die Zuverlässigkeit der Produkte zu verbessern. Allerdings sind sie auch mit einem Nachteil behaftet: mit der Verringerung der Abmessungen sinkt die Genauigkeit und die Reibungsverluste erhöhen sich.

Vor diesem Hintergrund ist es interessant, auf die MEMS-Herstellung genauer einzugehen. Zwei Bereiche, die von der MEMS-Technologie und anderen Präzisionsfertigungsverfahren bereits geprägt werden, sind die Mikroturbinen und die Mikrobrennstoffzellen.

Auswirkungen der Skalierung bei Strömungsmaschinen

Ein mechanisches System kann durch seine Masse m , die Strecke d , die Gerätegröße l und die Zeit t beschrieben werden. Um das Verhalten großer Systeme mit dem ihrer kleineren Ausführungen zu vergleichen, müssen einige Annahmen getroffen werden. So wird beispielsweise angenommen, dass die potenzielle Energiedichte $U(d,d)$ und auch die Materialdichte ρ konstant bleiben. Ferner wird angenommen,

dass eine Änderung der Größe l , die mit $m = l^3$ zur Masse in Beziehung steht, auch mit einer Änderung der Strecke d einhergeht.

Auf der Basis dieser Annahmen kann jetzt untersucht werden, wie sich eine maßstäbliche Verkleinerung auf eine Turbine auswirkt.

Der Nettobetrag der Energiedichte, die im Beharrungszustand bei Außerachtlassung von Schwerkraft und Entropieverlusten auf die Welle einer Strömungsmaschine übertragen wird, kann in Form der Energiegleichung (kinetische + potenzielle Energie) dargestellt werden:

$$\frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2) + p_2 - p_1 = E / V$$

$v_{1,2}$ steht für die Strömungsgeschwindigkeit des Mediums am Eintritt bzw. Austritt der Maschine. Der Ausdruck $p_2 - p_1$ für die potenzielle Energiedichte enthält keinen Parameter, der von der Größe der Strömungsmaschine abhängig ist; dies führt zu dem wichtigen Ergebnis, dass *die Länge und Zeit (Dauer) proportional sind*. Wenn beispielsweise eine Gasturbine verkleinert wird (kürzere Baulänge), dreht sie sich schneller (kürzere Zeitdauer), wenn man von der Annahme ausgeht, dass die Energiedichte des Heißgases gleich ist. Obwohl diese Analyse sehr vereinfacht ist (sie vernachlässigt die Verluste und den Wirkungsgrad), können doch nützliche Erkenntnisse über die Baugröße und Leistungsdichte gewonnen werden, wie nachfolgend nachgewiesen wird.

Das dynamische Verhalten von Strömungsmaschinen kann durch mathematische Beziehungen zwischen dem Läuferdurchmesser D und

der Drehzahl N beschrieben werden. Die Dimensionsanalyse [1] gibt das erzeugte Drehmoment einer Turbine an mit

$$L = c_1 \rho D^5 N^2$$

Auch die erzeugte Leistung ist definiert als $P = L N = c_1 \rho D^5 N^3$.

Hier wird die Leistungsdichte als Volumen wie folgt definiert

$$p = \frac{P}{V} = c_2 \frac{D^5 N^3}{D^3} = c_2 D^2 N^3$$

Daraus ergibt sich, dass die Leistungsdichte einer Strömungsmaschine von D und N abhängig ist. Hält man die Umfangsgeschwindigkeit konstant und verwendet man die Proportionalbeziehung zwischen Länge und Zeit wie oben dargelegt, dann ist $D \times N$ konstant. Dementsprechend ergibt sich die Leistungsdichte

$$p = c_2 D^2 N^3 = c_2 (D \times N)^3 \frac{1}{D} = c_2 (c_3)^3 \frac{1}{D} = c_4 \frac{1}{D}$$

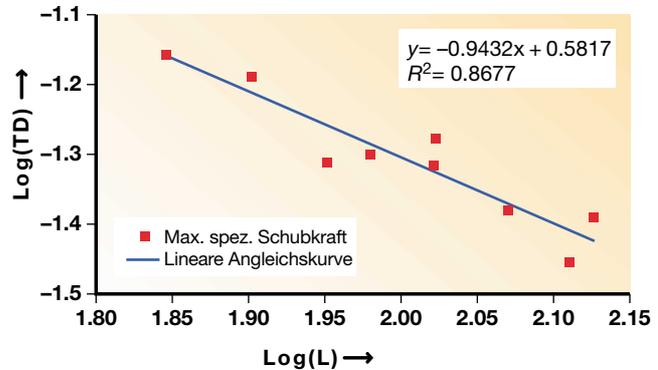
Daraus ist ersichtlich, dass die Leistungsdichte von Strömungsmaschinen mit abnehmender Baugröße zunimmt. Ein ähnliches Argument gilt für Gasturbinen mit Vortrieb bzw. Axialschub. **1** [2] zeigt die Beziehung zwischen spezifischer Schubkraft und Baulänge für kommerzielle Strahltriebwerke von Pratt and Whitney. Die Steigung der Angleichskurve von $-0,94$ stimmt gut mit dem prognostizierten Wert von -1 überein.

Ferner kann nachgewiesen werden, dass es, da die maximale lineare Geschwindigkeit der Rotorschaukelspitze, d. h. die Schaukelumfangsgeschwindigkeit, von der Festigkeit des Rotormaterials bestimmt wird, sinnvoll ist, die Umfangsgeschwindigkeit bei Strömungsmaschinen unterschiedlicher Baugrößen konstant zu halten. Der Höchstwert von $D \times N$ ist dann bei zwei Rotoren unterschiedlicher Baugröße, aber mit gleicher Form und aus gleichem Werkstoff, konstant. Konstante Rotorumfangsgeschwindigkeit bedeutet bei Strömungsmaschinen gleiche Strömungsgeschwindigkeit. Auch die Schaukelumfangsgeschwindigkeiten verhalten sich bei Strömungsmaschinen mit unterschiedlichen Durchmessern ähnlich.

Zuverlässigkeit und mechanische Massiv-Parallel-Systeme

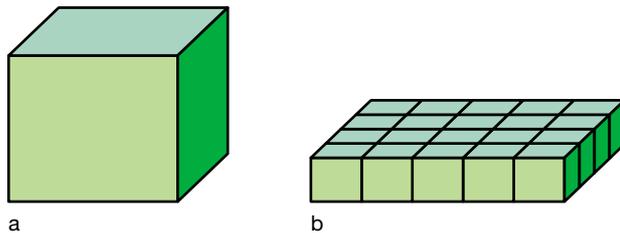
Die steigende Leistungsdichte kleiner mechanischer Systeme bietet die Möglichkeit, so genannte mechanische Massiv-Parallel-Systeme (MPMS – massively parallel mechanical systems) aufzubauen. Diese haben beträchtliche Vorteile hinsichtlich Baugröße und Zuverlässigkeit. So kann beispielsweise eine große Maschine durch mehrere kleine

1 Beziehung zwischen spezifischer Schubkraft (TD) und Baulänge (L) der kommerziellen Strahltriebwerke von Pratt and Whitney



2 Einturbinensystem (a) und redundantes System (b) mit 20 kleinen Turbinen

Eine große Turbine wird durch viermal kleinere Turbinen ersetzt. Da die Leistungsdichte der kleineren Turbinen viermal höher ist, erzeugt das Massiv-Parallel-System mit einem Viertel des Volumens die gleiche Leistung. Im eingesparten Raum werden 4 zusätzliche Kleinturbinen aufgestellt, um die Zuverlässigkeit des Systems zu erhöhen.

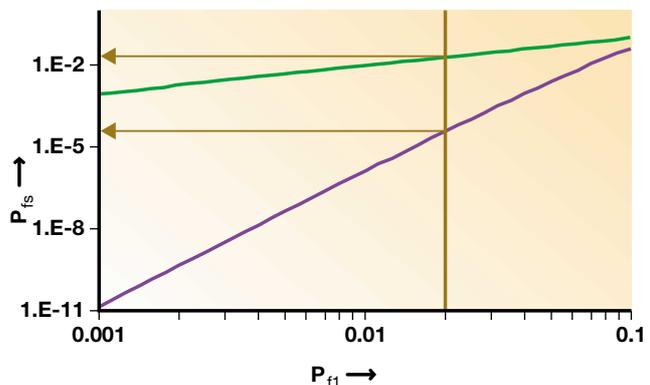


3 Ausfallwahrscheinlichkeit eines Systems mit einer großen Maschine (grüne Linie) und eines Systems mit 20 kleinen Maschinen (lila Linie) im Vergleich.

Nimmt man an, dass die Ausfallwahrscheinlichkeit jeder Maschine 2×10^{-2} beträgt, ist die Ausfallwahrscheinlichkeit 2×10^{-2} für eine Maschine, aber $3,8 \times 10^{-5}$ für das redundante System.

P_{f1} Ausfallwahrscheinlichkeit jeder Maschine

P_{fs} Ausfallwahrscheinlichkeit des Systems mit 20 Maschinen

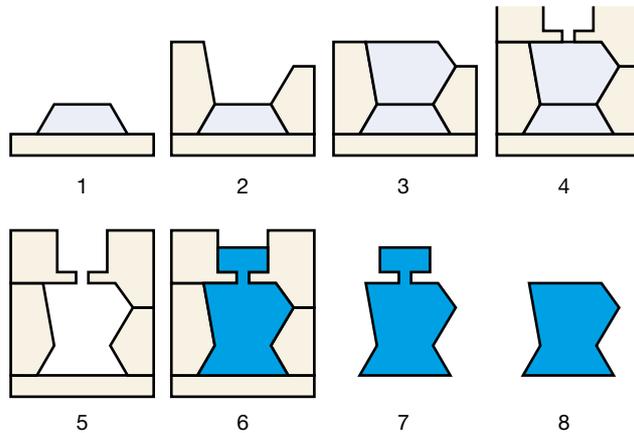


4 Mold SDM-Verfahren

Beige *Formmasse*

Grau *Stützmaterial*

Blau *Material des Teils*



Maschinen ersetzt werden. Da die Leistungsdichte bei einer kleinen Maschine höher ist als bei einer großen, kann die erstere bei kleinerem Volumen die gleiche Leistung erbringen **2**. In **3** ist die Ausfallwahrscheinlichkeit einer großen Maschine der des in **2** dargestellten redundanten Systems gegenübergestellt.

Nachteile verkleinerter mechanischer Systeme

Mit herkömmlichen Fertigungsverfahren wie Fräsen, Drehen und Umformen können relative Genauigkeiten in der Größenordnung von 10^{-4} bis 10^{-6} erreicht werden. Die relative Genauigkeit ist definiert als die mit einem Verfahren erzielbare Fertigungstoleranz Δl , geteilt durch die charakteristische Teilabmessung l . Daraus ist klar ersichtlich, dass diese mit immer kleiner werdenden Abmessungen sinkt.

Mit modernen Mikrofertigungsverfahren wie dem RIE-Prozess (reaktives Ionenätzen) wird ein $\Delta l/l$ von nur 10^{-2} bis 10^{-4} erreicht, und mit der Manipulation von einzelnen Atomen oder Molekülen mit AFM-Sonden können bestenfalls $\Delta l/l$ -Werte in der Größenordnung von $0,5 - 10^{-2}$ erzielt werden. Die niedrigere relative Genauigkeit bei kleineren Abmessungen ist besonders in mechanischen Systemen problematisch, in denen sich Teile zueinander bewegen können. «Raue» Oberflächen können zu höherer Reibung und Wärmeentwicklung führen und bei kleinen Systemen niedrigere Wirkungsgrade und kürzere Lebensdauer bewirken.

«Mold shape deposition manufacturing» bei Strömungsmaschinen

Die unter der Bezeichnung «Mold shape deposition manufacturing» (Mold SDM) **4** bekannte Schichtabscheidung ist ein zweistufiges Fer-

5 M-DOT Mikrogasturbine

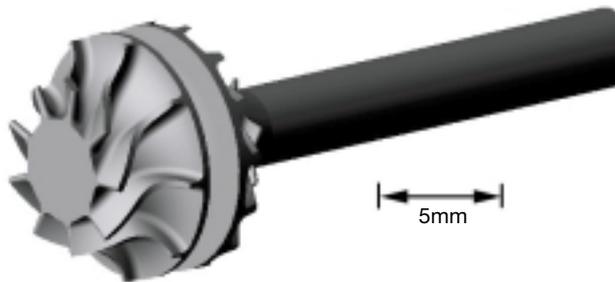


tigungsverfahren, das zum Aufbau von Keramik-, Metall- und Polymeren verwendet werden kann. Hierbei wird zunächst mit einem Additiv-Subtraktiv-Schichten-Fertigungsverfahren eine flüchtige Wachsform aufgebaut (Schritte 1 bis 4). Anschließend können in diese Form zahlreiche gießbare Werkstoffe, z. B. Keramik- und Metallgel-Gießschlämme sowie gießbare wärmeaushärtende Polymere, gegossen werden, um ein Teil herzustellen (Schritt 6). Nach dem Entfernen der Form (Schritt 7) wird das Teil zur Beseitigung von Graten usw. nachbearbeitet, so dass man das Fertigteil gemäß Schritt 8 erhält. Die Sinterung kann entweder nach Schritt 7 oder 8 erfolgen [4].

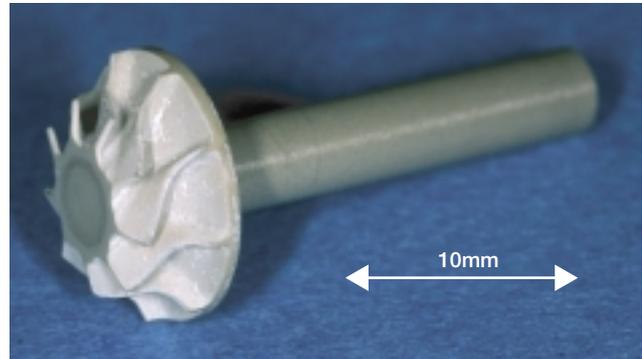
Mold SDM hat gegenüber anderen Fertigungsverfahren mehrere Vorteile. Als Schichten-Fertigungsverfahren eignet es sich für den Aufbau komplexer Formen, und anders als die meisten dieser – rein additiven – Verfahren arbeitet es additiv-subtraktiv. Der Subtraktionsschritt, der durch CNC-Fräsen erfolgt, erlaubt die Herstellung glatter, genauer Geometrien. Mold SDM ermöglicht auch den Aufbau von Teilen aus einer breiten Palette gießbarer Werkstoffe.

Für die Herstellung komplexer Keramikteile bietet Mold SDM gegenüber anderen Schichten-Fertigungsverfahren zwei entscheidende Vorteile. Erstens werden alle Oberflächen entweder maschinell bearbeitet oder von maschinell bearbeiteten Oberflächen repliziert. Dadurch erhält man glatte, genaue Oberflächen ohne Stufenerscheinungen. Zweitens wird der Werkstoff für das Teil monolithisch gegossen. Deshalb weist das Fertigteil keine potenziellen fehlerfördernden Schichtenränder auf. Diese Vorteile sind besonders für fehlerempfindliche Werkstoffe wichtig, bei denen Oberflächenrauheit und Fehler innerhalb der Teile die mechanische Festigkeit erheblich reduzieren können.

6 CAD-Modell des Siliziumnitrid-Rotorblocks der Mikrogasturbine. Turbinendurchmesser: 12 mm. Mindestdicke der Schaufelspitze: 220 µm. Der Block ist für eine Drehzahl von 800 000 min⁻¹ ausgelegt.



7 Die gesinterte Mikroturbine, mit der die Leerlaufprüfung durchgeführt wurde.



Mold SDM und die Miniaturturbine

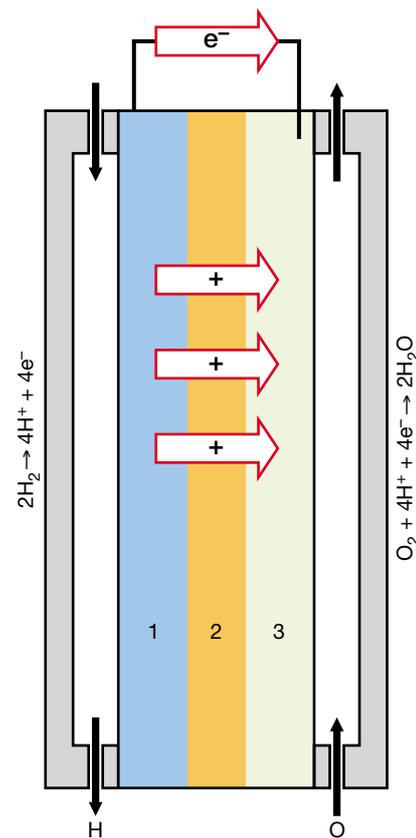
5 zeigt die aus Metall hergestellte Mikrogasturbine, die von M-DOT Aerospace (Arizona, USA) entworfen und gebaut wurde. Ein besseres Schub-Gewichtsverhältnis und ein höherer Wirkungsgrad können dadurch erreicht werden, indem die Metallteile durch Keramikteile ersetzt werden, weil ein keramischer Werkstoff eine niedrige Dichte aufweist und höhere Temperaturen aushält. Bei der nächsten Version dieser Turbine **6** werden die Rotorwelle, der Verdichter und die Turbine zu einem monolithischen Block aus Siliziumnitrid zusammengefasst werden.

Die Oberflächenqualität des Rotorblocks ist sehr wichtig, weil die Festigkeit von Keramikteilen in hohem Maße vom Oberflächenzustand abhängt. Auch ist zu beachten, dass die Rotorgeometrie wegen ihrer komplexen Form eine Nachbearbeitung, beispielsweise Schleifarbeiten, nicht zulässt. Um die Teile der Mikrogasturbine bauen zu können, braucht man ein Fertigungsverfahren, mit dem ein Keramikeil komplexer Gestalt mit hoher Oberflächengüte hergestellt werden kann.

In letzter Zeit sind Miniaturturbinen aus Siliziumnitrid **7** mit dem Mold SDM-Verfahren gebaut und mit Luft bei Raumtemperatur im Leerlauf getestet worden. Die Testergebnisse zeigten, dass die Mikroturbine Drehzahlen bis 460 000 min⁻¹ erreicht hat. Wenn man bedenkt, dass eine solche Turbine für den Betrieb mit Hochtemperaturgas ausgelegt ist, das eine höhere Schallgeschwindigkeit und mehr innere Energie besitzt, sind die Ergebnisse recht günstig [4].

Auswirkungen der Skalierung bei Brennstoffzellen

Eine Brennstoffzelle ist eine elektrochemische Stromquelle, die elektrische Energie direkt aus chemischen Reaktionen gewinnt. Im Prinzip



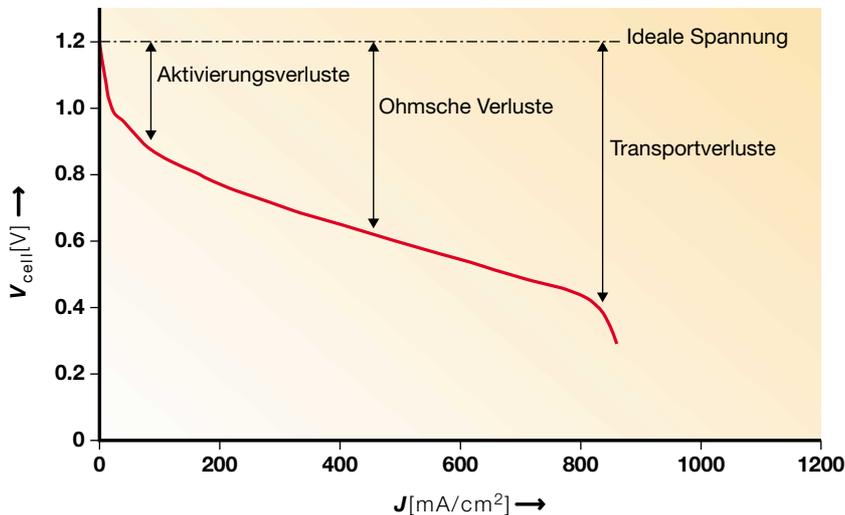
8 Grundsätzlicher Aufbau der Brennstoffzelle

- 1 Anode
- 2 Membran
- 3 Kathode

9 Typische I-V-Kurve einer Brennstoffzelle

V_{cell} Zellenspannung

J Stromdichte



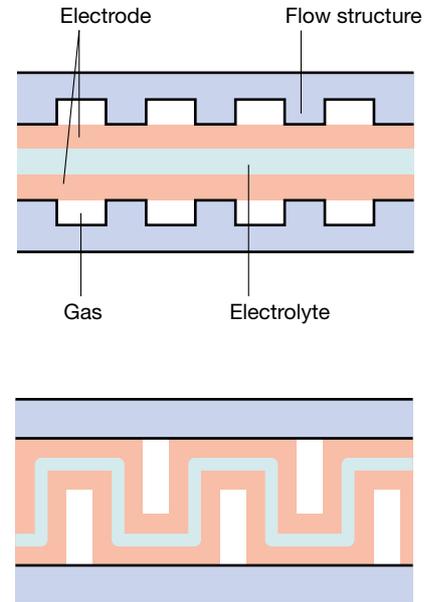
besteht sie aus einer ionenleitenden Elektrolyt-Membran zwischen zwei Elektroden, die auf beiden Seiten mit Strömungsverteilern für Brennstoff (Wasserstoff) bzw. Sauerstoff versehen ist [8]. Ein Katalysator auf einer Elektrode unterstützt auf der Brennstoffseite die Trennung von Ionen und Elektronen. Nur die Ionen wandern durch den Elektrolyten und verbinden sich auf der Sauerstoffseite wieder mit Elektronen. Die Elektronen wandern durch einen äußeren Stromkreis und liefern somit elektrische Energie.

Im Idealfall würde die Brennstoffzelle (oder der Brennstoffzellenstapel) so viel Strom liefern, wie der äußere Verbraucher benötigt, und die Spannung würde konstant bleiben. In Wirklichkeit treten jedoch Spannungsabfälle auf, die mit ansteigendem Verbraucherstrom zunehmen, wie aus der typischen Strom-Spannungskurve in [9] ersichtlich ist.

Eine Hochleistungs-Brennstoffzelle ist eine Zelle, die eine hohe Spitzenleistung und Stromdichte bei minimalem Spannungsabfall liefert. Verluste entstehen hauptsächlich durch die beschränkte Aktivierung bei niedriger Stromdichte, die ohmschen Verluste bei mittlerer Stromdichte sowie den eingeschränkten Reaktionsstofftransport bei hoher Stromdichte.

Der zentrale Punkt bei der Miniaturisierung der Brennstoffzelle ist deren Auswirkung auf die Gesamtleistungsdichte der Zelle. Es gibt zwei grundlegende Lösungsansätze, um die Auswirkungen der Skalierung

10 Planarzelle (oben) und 3-D-Konfiguration



auf Brennstoffzellen zu untersuchen, wobei angenommen wird, dass als Hauptziel eine maximale Leistungsdichte angestrebt wird.

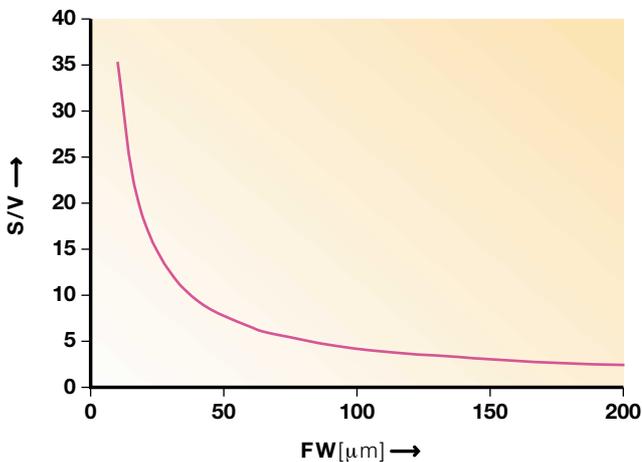
Es stellt sich nun die Frage, ob die Miniaturisierung durch geometrische Faktoren die Stromdichte in Watt pro Flächeneinheit positiv beeinflussen kann. Hier liegt bei sehr kleinen Brennstoffzellen das Hauptaugenmerk auf dem Oberfläche/Volumen-Verhältnis.

Die zweite, aber ebenso wichtige Überlegung ist der Umfang, in dem kleinere Abmessungen grundlegende Vorteile hinsichtlich einer Verbesserung der Strom-Spannungskurve bieten können, indem sie Faktoren wie die Kinetik, die Strömungsmechanik und die Wärmeübertragung beeinflussen. In den folgenden Beispielen werden einige spezielle Fälle untersucht.

Leistungsdichte und geometrische Überlegungen

Die meisten Brennstoffzellen haben flache, mikroporöse Elektroden, die durch eine Elektrolytschicht voneinander getrennt sind. Dieser Aufbau eignet sich besonders gut für die Fließfertigung. Einige Festoxid-Brennstoffzellen haben jedoch, hauptsächlich aus fertigungstechnischen und betrieblichen Gründen, eine zylindrische und gewellte Bauform [5].

Das Prinzip der nichtplanaren Grenzflächen lässt sich dahingehend erweitern, dass das Oberflächen/Volumen-Verhältnis wesentlich verbessert wird, besonders wenn Größenordnungen wie bei Mikrofertigung erreichbar sind. [10] zeigt eine herkömmliche Planarbauweise



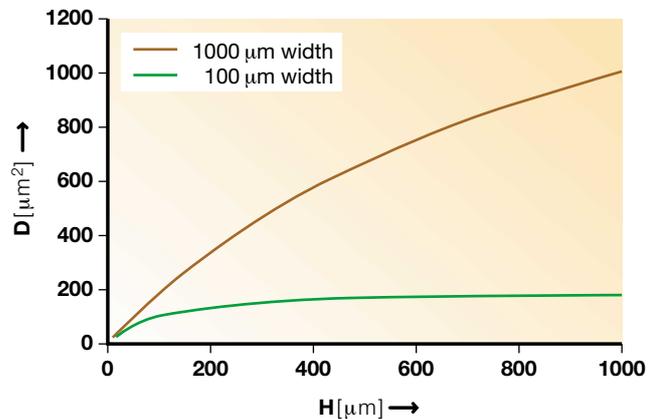
11 Normalisiertes Oberflächen/Volumen-Verhältnis (S/V) in Abhängigkeit von der Typenbreite (FW) bei einer gewellten Brennstoffzelle

Elektrolytdicke 60 µm, Elektrodendicke 80 µm, Strömungsverteiler 500 µm. Die Grafik zeigt, dass bei gewellten Ausführungen mit sehr kleinen Typengrößen eine dramatische Verbesserung des Oberflächen/Volumen-Verhältnisses erreicht wird. (Das normalisierte Oberflächen/Volumen-Verhältnis ist hier definiert als Oberflächen/Volumen-Wert einer texturierten Zelle, geteilt durch den Wert bei einer planaren Ausführung.)

mit einer dreidimensionalen Grenzfläche. Die 3-D-Bauweise bietet an der Elektrolytgrenzfläche eine zusätzliche Oberfläche, weil sie auch vertikale Oberflächen zur Verfügung stellt. Diese sogenannten Meso-Scale-Merkmale in der Größenordnung von 10 oder 100 µm ergänzen die mikroporösen und nanoporösen Oberflächen, die bereits in den Gasdiffusionselektroden selbst vorhanden sind.

Das Gesamtvolumen der Zelle gegenüber einer streng planaren Ausführung vergrößert sich, wenn eine Höhenkomponente vorgesehen wird. Allerdings vergrößert sich das Volumen bei einer Vergrößerung der Höhe durch Textur nur um einen endlichen Betrag, während sich bei einer Verminderung der Typenbreite die Oberfläche weiter vergrößert, ohne dass dies weitere Auswirkungen auf das Volumen hat.

Das Ausmaß, in dem die Fläche vergrößert werden kann, wird nur durch die Mindesttypenbreite begrenzt, die für die Funktionalität und Herstellbarkeit notwendig ist. Dementsprechend gelten ähnlich wie bei der Herstellung von integrierten Schaltkreisen einschränkende Ent-



12 Hydraulischer Durchmesser (D) in Abhängigkeit von der Kanalhöhe (H) bei zwei Kanalbreiten

Ein größerer hydraulischer Durchmesser entspricht der erwünschten Auswirkung eines niedrigeren Druckverlustes, so dass in diesem Beispiel der breitere Kanal (1000 µm) vorzuziehen ist. Interessanterweise verlangen die Skalierungsbeziehungen, dass D gegenüber H relativ unempfindlich ist, nachdem bereits für die Breite (100 µm) eine Konzession gemacht worden ist.

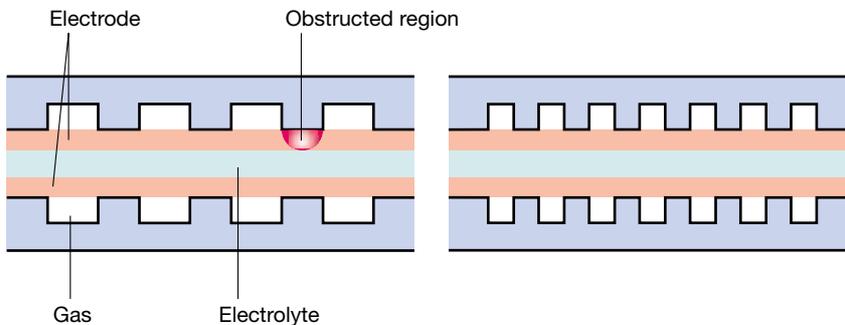
wurfsregeln und kritische Abmessungen. Typische Abmessungen, die bei PEM-Brennstoffzellen bereits üblich sind, lassen sich in der Tat noch beträchtlich verbessern. Es wird damit gerechnet, dass die Zahl der kritischen Abmessungen im Zuge der Weiterentwicklung der Miniaturbrennstoffzellen-Technologie sinken wird; damit werden rasch Verbesserungen möglich, die an die erfolgreiche Verkleinerung von integrierten Schaltungen erinnern. **11** zeigt ein Fallbeispiel mit Parametern, die bereits mit der heutigen Technologie erreichbar sind.

Energiedichte und Leistungsüberlegungen

Der Strömungswiderstand ist ein wichtiger Parameter bei der Miniaturisierung. In Strömungskanälen ist der Druckverlust umgekehrt proportional dem -hydraulischen Durchmesser-, der sich mit der Kanalgröße ändert **12**.

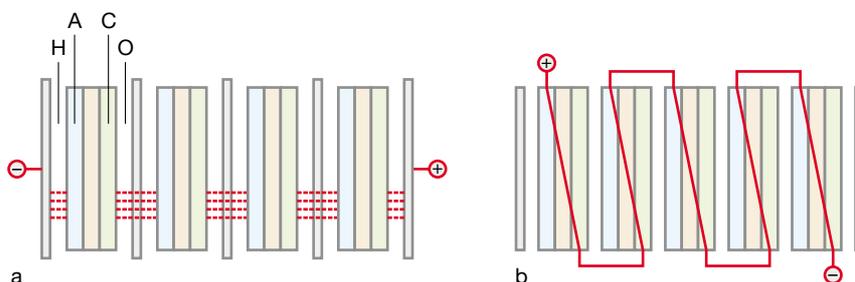
Ein zweiter wichtiger Parameter ist die Gasdiffusion. In Brennstoffzellen wird der Transport von Reaktanten zur Elektrolytgrenzfläche

13 Die Mikrobearbeitung erlaubt die Reduzierung blockierter Regionen in Schulterbereichen, indem sie die einzelne Kontaktfläche verringert (rechts).



14 Bipolare (a) und monopolare (b) Bauweise von Brennstoffzellenstapeln

- A Anode
- C Kathode
- H Wasserstoff
- O Sauerstoff



durch die Diffusion von Gasmolekülen durch poröse Elektroden sichergestellt. Ein besonderer Vorteil von mikrobearbeiteten Strömungsstrukturen besteht darin, dass blockierte Regionen in Schulterbereichen verringert werden können. Auf diese Weise wird die Gesamt-Gasdiffusionsleistung durch die porösen Elektroden verbessert.

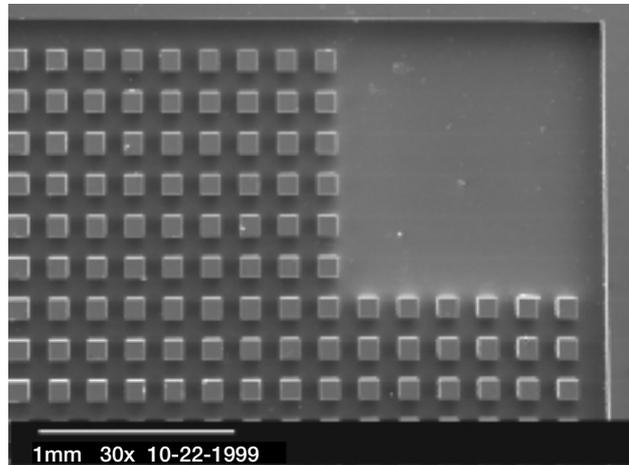
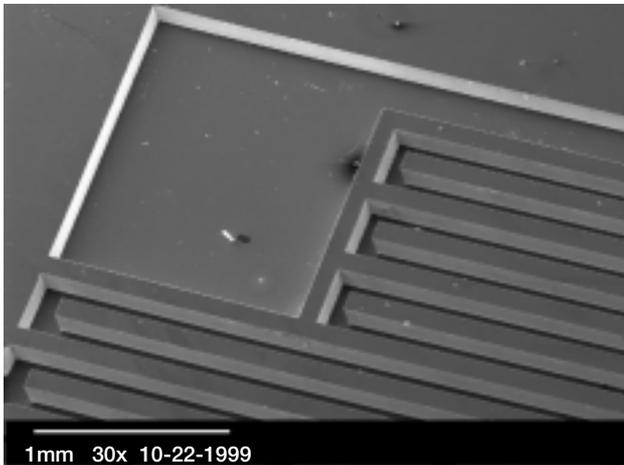
13 zeigt, wie eine reduzierte Kanalgröße mit kleineren blockierten Regionen und gleichmäßigerer Verteilung der mechanischen Stützung die gleiche elektrische Kontaktfläche (in diesem Fall 50%) bieten kann.

Eine weitere signifikante Eigenschaft einer Brennstoffzelle ist ihr elektrischer Widerstand. Ein niedriger elektrischer Widerstand ist wünschenswert, um einen hohen Wirkungsgrad bei der Umwandlung der Brennstoffzellenenergie zu erhalten. Der elektrische Widerstand R ist der Weglänge L proportional und der Querschnittsfläche A umgekehrt proportional.

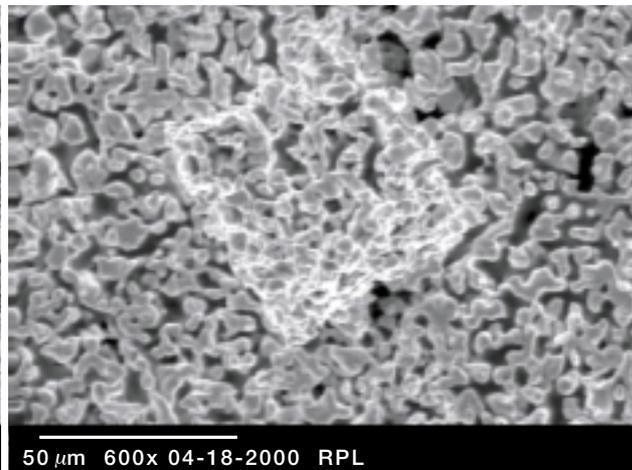
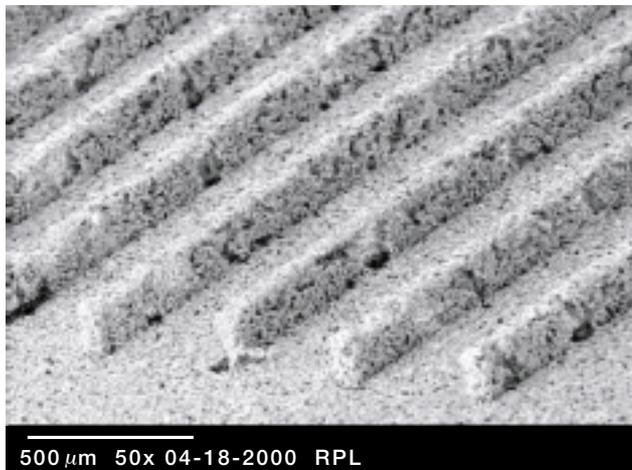
Der spezifische Widerstand eines Werkstoffes ist in der Regel nicht von der Größe abhängig, außer wenn sich die Abmessungen dem atomaren Bereich nähern. Ein Vorzug der Miniaturbauweise liegt darin, dass die Verbindungen zwischen Zellen in Reihenschaltung im Allgemeinen kürzer sind als bei ihren in großem Maßstab ausgeführten Pendants. Allerdings hat eine einheitliche Reduzierung aller Abmessungen generell einen höheren elektrischen Widerstand zur Folge, weil sich der Widerstand umgekehrt proportional zum Quadrat der Länge verhält.

Die Miniaturisierung bietet dank der kürzeren Leitungswege tatsächlich einen raffinierten Vorteil. Für Brennstoffzellen in Reihenschaltung sind zwei Konfigurationen üblich, die monopolare und die bipolare **14**. Die bipolare Bauweise wird fast überall in Kraftfahrzeugen und in maßstäblich größeren Anwendungen eingesetzt, weil sie sich durch einen einfachen Aufbau auszeichnet. Demgegenüber

15 Muster von Strömungsstrukturen in Silizium mit 100- μm -Kanälen. Die Kanalgrößen von 200 μm bis 50 μm wurden auf Zellen von 1 cm^2 hergestellt, wobei generell sechzehn oder mehr Zellen gleichzeitig auf jedem Wafer von 100 mm hergestellt werden.



16 Mikroporöse Elektroden, hergestellt durch Metalgel-Gießen



ist die monopolare Bauweise von Natur aus kompakter, weil eine Brennstoffkammer zwei Anoden und eine Sauerstoffkammer zwei Kathoden versorgt.

Die monopolare Ausführung hat bei großen Systemen einen Nachteil, weil der elektrische Strom seitlich über die Elektroden fließen muss; allerdings sind diese Entfernungen in einem Miniatursystem viel kürzer. Dadurch zeichnet sich ein kleineres System bei Verwendung der monopolen Stapelanordnung durch einen kompakteren Aufbau aus.

Brennstoffzellen-Herstellung

Anders als herkömmliche Fertigungsprozesse wie die maschinelle Bearbeitung ermöglicht die so genannte Silizium-Tiefätzung **15** eine hohe geometrische Komplexität bei vergleichbar geringen Kosten.

An das Elektrodenmaterial werden u. a. folgende grundsätzliche Anforderungen gestellt: eine große Oberfläche zur Unterstützung der Katalyse, hohe elektrische Leitfähigkeit und gleichmäßige Gasdiffusion. Das Konzept der mesoskopischen, dreidimensionalen Grenzfläche

ergänzt diesen Katalog noch durch eine weitere, nicht ganz alltägliche Forderung, nämlich die Texturdefinition. Mehrere mögliche Lösungsansätze wurden bereits untersucht, um dieses hohe Maß an Fertigungssteuerung zu erreichen. Gegenstand der ersten Untersuchungen waren u. a. Plasmaspritzen, galvanotechnische Verfahren mit Opfermaterial und pastöses Beschichten. In den meisten Fällen erwies sich die Steuerung der Porosität als größtes Problem.

Eine neuartige Gießtechnik mit der Bezeichnung Mikroform-Metallgel-Gießen (micro-mold metal gel-casting) wurde entsprechend angepasst, um eine gemusterte, mikroporöse Struktur zu erhalten, die vorher mit anderen Verfahren nicht zu erzielen war. Bei dieser Technik wird Metallpulver so in eine Lösung dispergiert, dass sich ein Gel bildet, das dann in eine bestimmte Form gegossen wird. Nach dem Entbindern, wird der Grünkörper unter Bedingungen gesintert, die optimale Porosität und Festigkeit sicherstellen. Geätzte Siliziumformen sowie andere photolithografisch hergestellte Gießformen wurden eingesetzt, um mikroporöse Silberelektroden mit Textur-Elementen in der Größenordnung von 100 µm gemäß **16** zu schaffen. Mit Siliziumformen sind Elemente von nur 25 µm erfolgreich gegossen worden.

Die Fähigkeit, Elektroden mit gesteuerter Porosität willkürlich zu gestalten, hilft nicht nur beim Entwurf der 3-D-Grenzfläche, sondern bietet auch mehr Möglichkeiten für eine integrierte, funktionsoptimierte Strömungsverteilung. Dieser Entwurfsspielraum ermöglicht erweiterte Lösungen für kritische Probleme wie Strömungswiderstand und Gleichmäßigkeit der Diffusion.

Von der Theorie zur Praxis

Wenngleich in allen Bereichen beträchtliche Fortschritte erzielt worden sind, bleibt im praktischen Bereich noch viel zu tun. Hier werden Verbesserungen in Fertigungstechnologien für den Bau von Prototypen, beispielsweise von Komponenten für Turbinen und Brennstoffzellen, für die Funktionsprüfung usw. eine entscheidende Rolle spielen.

Parallel zu anderen Aktivitäten versucht ABB in Zusammenarbeit mit der Stanford University, das bisher im Zuge der Miniaturisierung gesammelte Wissen nutzbringend umzusetzen und Möglichkeiten zu suchen, es für industrielle Mess- und Erfassungsaufgaben einzusetzen.

Adressen der Autoren

Sangkyun Kang

Rapid Prototyping Laboratory
Stanford, CA 94305-3030, USA
kangsk@stanford.edu

Sang-Joon John Lee

PO Box 19760
Stanford, CA 94309, USA
sang-joon.lee@stanford.edu

Fritz B. Prinz

Rapid Prototyping Laboratory
Stanford, CA 94305-3030, USA
fbp@cdr.stanford.edu

ABB arbeitet eng mit der Stanford University zusammen. Im vorliegenden «Gast»-Artikel berichten Prof. Prinz, R. H. Adams, Professor of Engineering im Department of Mechanical Engineering and Materials Science bzw. im Department of Engineering, und seine Kollegen über neue Fertigungsverfahren in der Mikrosystemtechnik. Diese Verfahren sind für die Produktentwicklung bei ABB bedeutsam; so sind Gemeinschaftsprojekte mit dem Ziel in Angriff genommen worden, die Stanford-Technologien für Mess- und Erfassungsaufgaben in der Industrie zu nutzen.

Literaturhinweise

- [1] **G. T. Casanady:** Theory of Turbomachines. McGraw Hill, New York, 1965.
- [2] <http://www.pratt-whitney.com/engines/commercial.html>
- [3] **A. G. Cooper, et al:** Fabrication of structural ceramic parts using Mold SDM. Proceedings of the American Ceramics Society meeting, Cocoa Beach, Florida, USA, Jan 2000.
- [4] **S. Kang, et al:** Application of the Mold SDM process to the fabrication of ceramic parts for a micro gas turbine engine. Proceedings Ceramic Materials and Components for Engines, edited by J. G. Heinrich, Germany, June 2000.
- [5] **N. Q. Minh:** Ceramic Fuel Cells. Journal of the American Ceramic Society. 76, 3 (1993).