

**Großes Vorbild:**  
MIT-Forscher Alan  
Epstein will Flugzeug-  
technik auf winzige  
Siliziumchips bringen

## Die Liliput-Maschinen

**Winzige Gasturbinen-Motoren könnten bald den Strom für tragbare elektronische Geräte liefern – und irgendwann Batterien komplett überflüssig machen**

VON DAVID H. FREEMAN; KATHLEEN DOOHER (FOTOS)

**E**s ist nicht schwer zu erraten, womit sich Alan Epstein beschäftigt: In seinem Arbeitszimmer liegen überall Einzelteile von Flugzeugturbinen herum, und in einem Museum im Erdgeschoss seines Labors steht ein deutsches Triebwerk aus dem Jahr 1944, eine jener Maschinen, die das Zeitalter der Düsenflugzeuge eingeleitet hatten. Für den Direktor des Gasturbinen-Labors am MIT hat die Faszination mit roher Kraft zu tun. „Die Triebwerke einer Boeing 747 bewegen Luft bei Mach 1 mit einer Kraft von über 530 000 Newton“, sagt Epstein. „Die Triebwerke von drei 747-Maschinen zusammen stoßen so viel Leistung aus wie ein Atomkraftwerk.“

**Gasturbinen haben viele Technologien** des 20. Jahrhunderts angetrieben, von kommerziellen und militärischen Flugzeugen bis zu den großen gasbefeuerten Kraftwerken für die Stromversorgung. Doch heute sind es nicht klobige Maschinen wie jene im Museum des Labors, die Epsteins Enthusiasmus beflügeln. Stattdessen begeistert er sich für eine auf die Größe eines Mantelknopfes geschrumpfte Turbine, die vor ihm auf dem Schreibtisch liegt – quasi eine Liliputversion von jenen tonnenschweren Triebwerken, die einst die Luftfahrt revolutionierten. Geht es nach Epstein, könnte sie der Schlüssel für die Energieversorgung von Technologie des 21. Jahrhunderts sein.



Obwohl die Rotorblätter der Turbinen bloß eine Fläche von der Größe eines 10-Cent-Stücks einnehmen, bringen sie es auf über eine Million Umdrehungen pro Minute und produzieren genügend Strom, um damit kleine elektronische Geräte zu betreiben. In absehbarer Zeit, so erwartet Epstein, werden seine winzigen Turbinen als Ersatz für Batterien verwendet werden, vorerst von Soldaten, dann auch von gewöhnlichen Konsumenten. Doch er hat sogar eine noch ehrgeizigere Vision: Kleine Motoren-Cluster könnten als Heimkraftwerke dienen, die Verbraucher vom störungsanfälligen Stromnetz unabhängig machen. Die Technologie könnte sich als besonders nützlich in armen Ländern und abgelegenen Gegenden erweisen, wo es an flächendeckenden und zuverlässigen Netzen für die Stromversorgung mangelt. Ein Vergleich damit, wie die stetige Miniaturisierung integrierter Schaltkreise die mikroelektronische Revolution vorangebracht hat, liegt nahe: „So wie PCs die Rechner-Infrastruktur zu den Nutzern gebracht haben, könnten Mikromotoren in Zukunft die Energie-Infrastruktur der Gesellschaft zu den Nutzern bringen“, sagt Epstein.

Zunächst einmal aber möchte er die Miniatur-Motoren als billige und effiziente Alternative zu Batterien in Mobiltelefonen, Digitalkameras, PDAs, Laptops und anderen tragbaren elektronischen Geräte einsetzen. Die Motivation ist simpel:

Batterien sind schwer und teuer und erfordern häufiges Aufladen. Und trotz ihrer Größe und ihres Gewichts produzieren sie nicht gerade viel Strom.

Diese Schwächen schränken nicht nur den Komfort des Konsumenten ein. Soldaten etwa müssen heute ziegelgroße Batterien herumschleppen, um ihre High-tech-Ausrüstung am Laufen zu halten. Und gehemmt durch die kurzlebige Energieversorgung, sind die Entwickler von Elektronik der nächsten Generation häufig gezwungen, auf energiehungrige Verbesserungen und Features wie größere, hellere Bildschirme und leistungsfähigere Prozessoren zu verzichten. Ein Beispiel ist der „ultimate PDA“ von Frog Design, einem Unternehmen mit Sitz in Sunnyvale, Kalifornien, das auf Industriedesign spezialisiert ist. Das Gerät verbindet verschiedene Mobiltelefon- und WLAN-Funkprotokolle, GPS, einen Projektionsschirm, die Funktionalität eines Laptops sowie die Fähigkeit, in Video-Bibliotheken zu suchen und Filme in voller Länge abzuspielen. Doch bislang existiert es lediglich als Modell – es würde jede Batterie binnen einer halben Stunde leersaugen. Mit Funktionen wie GPS und Funkkommunikation „frisst man sich geradezu durch die Batterien“, sagt Valerie Casey von Frog Design.

**Eine Mikro-Gasturbine hingegen** könnte zehn Stunden oder länger laufen, mit einem winzigen Kanister Dieseltreibstoff, kaum größer als eine D-Batterie – und wenn die Treibstoff-Patrone leer ist, tauscht man sie einfach gegen eine neue. Jede Patrone könnte so viel Energie liefern wie mehrere Hand voll Lithium-Ionen-Batterien. Letztlich könnte man mit einer kleinen Packung von billigen und leichten Patronen einen PDA oder ein Mobiltelefon mehrere Tage lang intensiv nutzen, ohne jemals zum Aufladen eine Steckdose zu benötigen – ein höchst attraktives Feature für Soldaten oder Reisende an abgelegenen Orten. Mehr noch, die Mini-Turbine braucht nur ein Viertel des Volumens einer typischen Handy-Batterie.

Ein Mikro-Motor hat allerdings auch Schwächen. So erzeugt er einen winzigen, heißen Abgasstrom und eignet sich deshalb eher für Geräte, die man am Gürtel oder in der Aktentasche trägt als für solche, die man in die Taschen steckt. Der Motor selbst wird heiß, obwohl man mittels Abgasableitung leicht verhindern könnte, dass die Geräte wesentlich wärmer werden als heute. Doch für viele energiehungrige Anwendungen, sagt Epstein, würde der bemerkenswerte Energie-Output einer kleinen Turbine alle Nachteile weit überwiegen. „Man braucht nicht mal einen besonders guten Düsenmotor, um Batterien zu übertreffen.“

Schon vor fast einem Jahrzehnt begann Epstein damit, über die Idee eines Düsenmotors auf einem Chip nachzudenken. Damals nahmen mikroelektromechanische Systeme (MEMS) gerade Fahrt auf. Man hatte Techniken entwickelt, um neue Arten von Eigenschaften in die Oberflächen von Silizium-Plättchen zu meißeln, etwa Kammern und Rohre sowie bewegliche Teile wie drehende Räder – die meisten der Teile, die man für einen Gasturbinen-Motor braucht. Weniger klar schien zu Beginn, was man mit einem Miniatur-Verbren-

## HEUTE MÜSSEN ENTWICKLER VON TRAGBAREN GERÄTEN ENERGIEHUNGRIGE FUNKTIONEN VERMEIDEN. MIKROTURBINEN SOLLEN DAS ÄNDERN

nungsmotor anfangen sollte. „Wir dachten, wir könnten die Kosten runterbringen, wenn wir bloß eine Massenanwendung für diese Dinger fänden“, sagt Epstein: „Aber scheinbar das Einzige, was wir mit winzigen Motoren tun könnten, war, winzige Flugzeuge zu bauen, und das kam uns bescheuert vor. Aber natürlich hatten wir nicht mit dem Pentagon gerechnet.“

Die US-Militärs waren plötzlich völlig hingerissen von der Idee 15 Zentimeter langer Flugzeuge mit kleinen Überwachungskameras. Die Ingenieure in Epsteins Labor waren weniger begeistert: Sie fürchteten, es könnte Jahrzehnte dauern, solche Düsen-Chips in die Luft zu bringen. Dann griff Epstein ein unmittelbarer Bedarf der Militärs auf: die Soldaten von den Batterien zu befreien, die viele von ihnen herumschleppen müssen, um Funkgeräte, GPS-Empfänger, Nachtsichtgeräte und andere Ausrüstung mit Energie zu versorgen. Und im Unterschied zu einem miniaturisierten Flugzeugmotor hätte ein solcher Jet-Chip als Batterie-Ersatz enormes kommerzielles Potenzial.

Andere Materialwissenschaftler und Ingenieure hatten bereits mit der Arbeit an neuen Methoden begonnen, stromproduzierende Maschinen so weit zu schrumpfen, dass sie Batterien ergänzen oder ersetzen können – ein neues Forschungsfeld namens „Power MEMs“ entstand. Der verbreitetste Ansatz zielte auf das Verkleinern von Brennstoffzellen ab. Doch Epstein war davon überzeugt, dass Gasturbinen der bessere Ansatz seien, vor allem wegen ihrer unübertroffenen Fähigkeit, Energie aus Kohlenwasserstoff-Treibstoffen herauszuholen. Die Technologie ist noch attraktiver, wo die Minimierung von Gewicht und Volumen entscheidend ist, etwa bei tragbaren Geräten. Ein Düsen-Chip ist gerade mal halb so groß wie eine

### kurz gefasst

**Miniaturisierte Motoren** nach Flugzeugvorbild sollen als Ersatz für Batterien in tragbaren elektronischen Geräten wie PDAs und Laptops dienen.

**Winzige Gasturbinen** auf Silizium-Basis konkurrieren mit miniaturisierten Brennstoffzellen, die bereits jetzt auf den Markt kommen.

**Mikroturbinen** liefern zwar mehr Leistung als Mini-Brennstoffzellen. Bis zur Marktreife sind aber noch technische Probleme zu lösen.

## Winziger Wankelmotor

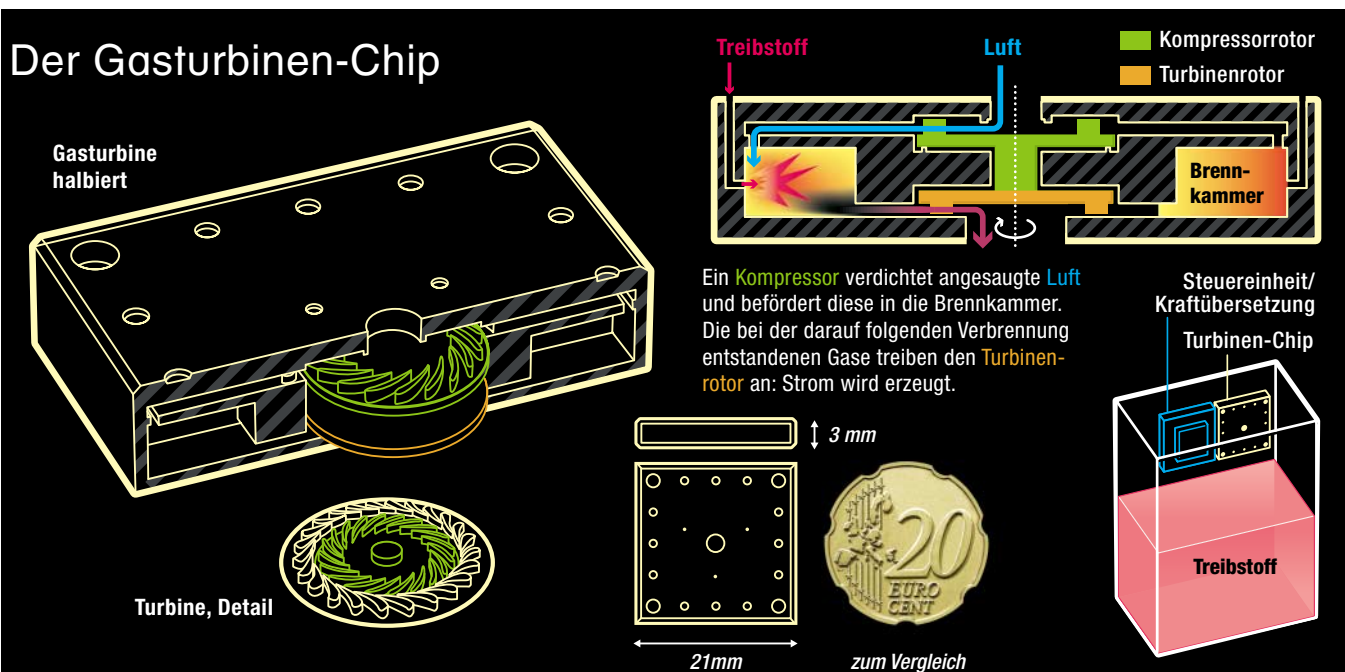
**Forscher auf der ganzen Welt** arbeiten zurzeit an der Entwicklung neuer „Low Energy“-Technologien für die Stromversorgung tragbarer Geräte – ein riesiger Zukunftsmarkt lockt. Neben miniaturisierten Brennstoffzellen gelten vor allem winzige Verbrennungsmotoren aufgrund ihres hohen Wirkungsgrades als viel versprechend. Statt auf Gasturbinen nach Flugzeugvorbild, wie sie am MIT und an der Katholischen Universität von Leuven (Belgien) entwickelt werden, setzen Forscher um Carlos Fernandez-Pello an der University of California in Berkeley auf ein Konzept aus dem Automobilbau. Ihr miniaturisierter Wankelmotor hat einen Durchmesser von gerade mal einem Zentimeter. Das Kernstück bildet eine Kammer mit einem dreieckigen, beweglichen Rotor, in die der Treibstoff einströmt. Die Eckpunkte des Rotors berühren immer die Kammerwand. Durch die Drehung des Rotors wird der Treibstoff – ein Wasserstoff-Luft-Gemisch – in Kammern verdichtet und gezündet. Die Expansion im Zuge der Verbrennung hält den Rotor in Bewegung. Eines der Probleme lag dabei darin, überhaupt einen Verbrennungsvorgang in derart winzigen Brennkammern zustande zu bringen. Trifft die Mini-Flamme auf eine kalte Oberfläche, erlischt sie leicht. Die Berkeley-Forscher mussten daher eine Methode entwickeln, um die Wände der Brennkammern zu isolieren und Wärmeverlust zu verhindern. Ein Prototyp eines Mini-Wankelmotor-Systems konnte bereits eine Leistung von 10 Watt erzeugen, das Ziel der Forscher liegt bei 30 bis 60 Watt. **Thomas Vašek**

Mikro-Brennstoffzelle, die gleich viel Energie liefert. Eine Gasturbine sollte auch relativ einfach herzustellen sein, dachte Epstein, da man sie mit Standardmethoden komplett aus Silizium fertigen könnte.

Obwohl sich Epstein das Funktionsprinzip seiner Mikro-Turbine praktisch gleich vorstellte wie das einer konventionellen Turbine, gab es viele offene Fragen. Würde das Silizium bei Temperaturen von 1300 Grad Celsius zerkrümeln? Könnten mikroskopisch kleine Achsen mehr als eine Million Umdrehungen pro Minute aushalten? Mit Geld vom US-Militär bediente sich Epstein der Expertise benachbarter MIT-Labore in Strömungslehre, Materialwissenschaft, Statik und Mikrofabrikation. Das Projektteam wuchs schließlich auf dutzende Forscher an, darunter Mark Spearing, ein Materialwissenschaftler, der Methoden entwickeln sollte, um die Silizium-Mikrostrukturen unter höllischer Hitze und Druck intakt zu halten. „Bei vielen MEM-Chips ätzt man kleine Strukturen bis zu 10 Mikrometer hoch ein“, sagt Spearing: „Wir hatten es mit Teilen zu tun, die hunderte Mikrometer hoch sind.“

**Anfang dieses Jahres schlossen Epstein** und seine Mitarbeiter die Entwicklung von Motoren ab, bei denen jeder einzelne Teil funktioniert: Die Brennkammer verbrennt Treibstoff, und die Rotorblätter drehen sich. Das Gerät ist rundherum abgeschlossen, mit Löchern an der Ober- und Unterseite für die Zuführung von Luft und Treibstoff und für den Auslass von Abgasen. Einen Mangel hat es allerdings: Es arbeitet noch nicht kontinuierlich. Das liegt laut Epstein an Ungenauigkeiten, die die Rotorblätter aus dem Gleichgewicht und damit zum Flattern bringen können. „Wir glauben zu wissen, wie wir das korrigieren können“, sagt er: „Das Problem ist, dass es drei Monate braucht, um neue Teile zu bekommen, wenn man Änderungen haben möchte. Jetzt also warten auf

## Der Gasturbinen-Chip



**Winziger Gasturbinen-Motor:** Die Prototypen liefern 15 bis 20 Watt Leistung – mehr als genug für kleine elektronische Geräte



die neuen Teile.“ Innerhalb von Monaten werde der Düsen-Chip wirklich funktionieren, kündigt Epstein an – ein wenig früher als geplant. Spearing schätzt, dass eine Version, die genügend Energie zum Betreiben von Geräten liefern könnte, noch zwei oder drei Jahre Entwicklungsarbeit brauchen wird; ein bis zwei weitere Jahre werde es dauern, eine marktfähige Version herzustellen.

Für Epstein und sein Team läuft das darauf hinaus, die frühe Führung bei „Power MEMS“ an die Brennstoffzellen abzugeben, die bereits jetzt auf den Markt kommen. Das US-Unternehmen MTI Micro Fuel Cells bereitet gerade die Vermarktung einer Brennstoffzelle von der Größe eines Kartenspiels vor, die in tragbaren Industrie-Anwendungen wie etwa RFID-Lesegeräten zum Einsatz kommen soll; eine etwas kleinere Version für Mobiltelefone, PDAs und Digitalkameras soll folgen. Medis Technologies aus New York will nächstes Jahr eine nicht wiederverwendbare Mikro-Brennstoffzelle für 20 Dollar auf den Markt bringen.

„Unsere Konkurrenz sind mit Sicherheit Brennstoffzellen“, sagt Epstein. Doch er beharrt darauf, dass Turbinen-Chips den verlorenen Boden wieder gutmachen können. „Bis jetzt wur-

## CLUSTER VON MIKROTURBINEN ALS HEIMKRAFTWERKE KÖNNTEN VOM STROMNETZ UNABHÄNGIG MACHEN

den gerade mal ein paar Millionen Dollar in Mikroturbinen investiert, verglichen mit Milliarden bei Brennstoffzellen“, argumentiert er. Epsteins Zuversicht ist begründet in den grundsätzlichen Vorteilen, die er in den Turbinen sieht. Selbst Mikro-Brennstoffzellen sind größer, und sie sind viel heikler beim Treibstoff als ein Turbinenmotor. Und letztlich kommt alles auf die Leistung an. Die meisten Mikro-Brennstoffzellen stoßen mit Mühe ein oder zwei Watt aus, während Epsteins Prototypen 15 bis 20 Watt liefern können, mehr als genug, um ein energiehungriges tragbares Gerät zu betreiben. Laptop-Computer benötigen bis zu 50 Watt, doch ein paar Turbinen zusammen können leicht so viel Energie erzeugen. Ebenso glaubt Epstein, dass ein Cluster von kleinen Motoren, von denen jeder bis zu hundert Watt produziert, als effiziente und zuverlässige Stromquelle für ein Haus dienen könnte.

**Der Übergang wird sicherlich Zeit brauchen.** Doch Epstein sieht ihn als natürliche Erweiterung des bemerkenswerten Fortschrittes bei Düsentriebwerken in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts, von den neuartigen Kampfflugzeugen im Zweiten Weltkrieg bis zu den riesigen Triebwerken in modernen Jumbojets. Epstein geht davon aus, dass die Leistung seiner winzigen Turbinen erst einmal eher den Pionier-Flugzeugen der 40er Jahre gleichen wird als den heutigen super-effizienten Gasturbinen. Doch er ist überzeugt davon, dass ihr gewaltiges Potenzial noch zur Geltung kommen wird. Und die alten Flugzeug-Turbinen im Museum seines Labors erinnern ihn ständig daran, wie viel Kraft in der Technologie steckt. ■

**David H. Freedman** ist freier Autor der US-Ausgabe von Technology Review und lebt in Boston, Massachusetts

### links

[www.web.mit.edu/aeroastro/www/labs/GTL](http://www.web.mit.edu/aeroastro/www/labs/GTL) Gasturbinen-Labor am MIT

[www.asme.org/igti/resources/articles/scholar\\_gt-2003-38866.pdf](http://www.asme.org/igti/resources/articles/scholar_gt-2003-38866.pdf) Fachartikel von Alan Epstein über die Entwicklung von Miniatur-Gasturbinen

[www.mtl.mit.edu/mtlhome/mems/power\\_mems.html](http://www.mtl.mit.edu/mtlhome/mems/power_mems.html) Seite mit Informationen über Power MEMS

<http://media.eurekaalert.org/aaasnewsroom/2004/Pisano-Background-Paper.pdf> Paper über den Mini-Wankelmotor



Jetzt 3 Ausgaben zum Preis von nur 12 €  
testen + ein Geschenk aussuchen:

[www.die-chancen-frueher-begreifen.de](http://www.die-chancen-frueher-begreifen.de)



Deutschlands Technologiema-gazin.