Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 108 (1990)
Heft: 35

Artikel: Pumpen und Motoren - extrem mikrominiaturisiert
Autor: Aschmoneit, F.-K.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-77493

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Geometriemodell

9 von 10 Systemen sind heute 3D-fähig. Immer mehr Systeme ermöglichen eine interaktive Modellbearbeitung direkt in Axonometrie oder Perspektive (Bild 24). Leider nur noch 2 von 3 Systemen verfügen über eine reine 2D-Datenstruktur für eine effiziente Planbearbeitung (Bild 23). Seit 1987 kann jedes zehnte System auch Bewegungen in Echtzeit darstellen (4D) (Bild 23).

Hardware

Rechner

Für CAD-Anwendungen im Bauwesen am meisten verbreitet sind vernetzte Arbeitsstationen mit einer 32-bit-Architektur. Heutige CAD-Programme erfordern bereits einen doppelt so grossen Arbeitsspeicher wie vor 4 Jahren. Die Grenzen der Personal-Computer rükken damit immer näher.

Bildschirm

Professionelle CAD-Arbeitsplätze werden heute meist mit farbigen Bildschirmen in einer Grösse von 19 bis 20 Zoll und einer Auflösung von etwa 1000×1200 Bildpunkten ausgerüstet.

Plotter

Die mechanischen Stiftplotter haben vorläufig noch nicht ausgedient. Für Netzwerke ab drei CAD-Arbeitsplätzen sind aber auch monochrome Elektrostaten-Plotter durchaus schon wirtschaftlich einsetzbar.

Ausblick

Für die kommenden Jahre zeichnet sich eine Integration der CAD-Anwendungen in zwei Richtungen ab:

Integration von Raster- und Vektordaten

Strukturierte Geometrie und unstrukturierte Bilder werden vermehrt gemeinsam verarbeitet und ineinander übergeführt. Zusammen mit benachbarten Techniken wie Scannen, Video und Bildbearbeitung werden rund um CAD neue Anwendungsbereiche für die Datenerfassung, die Ergebnisdarstellung und die Kommunikation erschlossen.

Integration von Grafik und Alphanumerik über Datenbanken

Neben dem zweidimensionalen Plan und dem dreidimensionalen Modell werden in zunehmendem Masse auch administrative und technische Daten mit der CAD-Bearbeitung verknüpft. Auch CAD-Daten werden mehr und mehr über ausgelagerte Datenbanken verwaltet. Darauf können die interdisziplinären Planungsdisziplinen wie auf ein Informationssystem mit ihren eigenen CAD-Anwendungen zugreifen. Und die Bauherren bzw. Verwalter und Bewirtschafter von Bauobjekten verlangen von ihren Planern die entsprechenden Informationen für ein projektübergreifendes Facility Management.

Wie die vergangenen 5 Jahre werden auch die kommenden 5 Jahre revolutionäre Weiterentwicklungen in der Arbeitswelt mit sich bringen. Zur Freude all derer, die bereits heute auf dem Zug der Zeit mitfahren. Und zum Leidwesen jener, für die es immer schwieriger wird, auf den fahrenden Zug aufzuspringen.

Adresse des Verfassers: *Jürg Bernet*, Dipl. Arch. ETH/SIA, Bernet CAD-Consult, Metallstrasse 4, 6300 Zug

Überarbeiteter Beitrag aus SIA-Dokumentation D048 «Mit CAD in die 90er Jahre», Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich 1990.

Pumpen und Motoren – extrem mikrominiaturisiert

Mit den in der Halbleiterindustrie bewährten Methoden der Herstellung hoch- und höchstintegrierter Schaltungen – vor allem der Lithographie-, Maskier- und Ätztechniken – werden inzwischen mehr und mehr mechanische, überwiegend dreidimensional ausgelegte Elemente mit Abmessungen im Millimeter- und Submillimeter-Bereich zu Versuchszwecken, aber auch bereits für erste Anwendungen erzeugt.

Als Material für solche «Mikromotoren» dient zumeist Silicium, das einkristallin zwar recht spröde, aber härter als viele Metalle und gegenüber mechanischer Belastung erstaunlich widerstandsfähig ist. Für Zug und Druck übersteigt seine Elastizitätsgrenze die von Stahl, weshalb es selbst nach vielfach wiederholten Beanspruchungen erheblich geringere Ermüdung zeigt.

An mikromechanischen Elementen sind von verschiedenen Instituten und Entwicklungslabors unter anderem Spinndüsen, Ventile, Zungenresonatoren, Mikrokontakte, Mikrospulen für Magnetfeld-, Bewegungs- und Positions-Sensoren, Elektronen-Vervielfältiger, Strahlungsdetektoren (Bolometer) und Lichtmodulatoren vorgestellt worden, ferner Ultraschall-, Kraft-, Druck-, Strömungs-, Gas-, Vibrations- und Beschleunigungs-Sensoren (Bild 1), aber auch Strömungsverstärker und aktive Miniatur-Kühlsysteme, Tinten- und Thermodruckerköpfe, Beugungsgitter für Wellenlängen-Multiplexer/Demultiplexer in optoelektronischen Systemen, Mikrokanel-Platten zur Bildverstärkung sowie Fresnel-Zonenplatten zur Fokussierung von Röntgenstrahlung.

Ohne eine vollständige Aufzählung der vorgeschlagenen und teilweise ausgeführten Elemente geben zu können, seien noch Trenndüsen zur Urananreicherung, Feinstfilter für Blutplasma-Trennvorrichtungen sowie vollständige Mess- und Regelsysteme genannt, für die ein kompletter Gaschromatograph als Beispiel stehen mag. Sein immerhin 1,5 m langes, von den Probengasen durchströmtes Kapillarröhrchen ist spiralförmig in einem Silicium-Wafer von nur 5 cm Durchmesser untergebracht.

Schlüsseltechnik: anisotropes Ätzen

Als günstig erwies es sich, dass die physikalischen, mechanischen und chemischen Eigenschaften sowie die Materialkonstanten der meisten Kristalle, darunter insbesondere hochreine Silicium-Einkristalle, anisotrop – also richtungsabhängig – sind. Das trifft auch auf die Wachstums- und Auflösungsgeschwindigkeiten entlang der verschiedenen Kristallflächen zu. Bei abwechselndem Einsatz anisotroper und isotroper Ätzmittel lassen sich durch das richtungsabhängig unterschiedlich

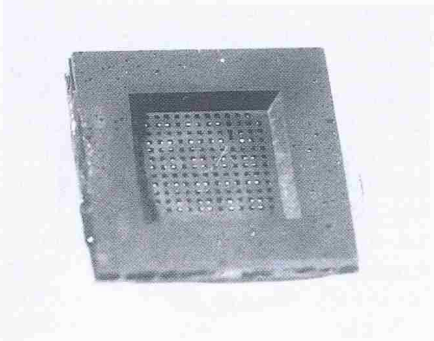

Bild 2. Mikropumpe im Silicium-Chip; durch das deutlich erkennbare Gitter strömt die geförderte Flüssigkeit

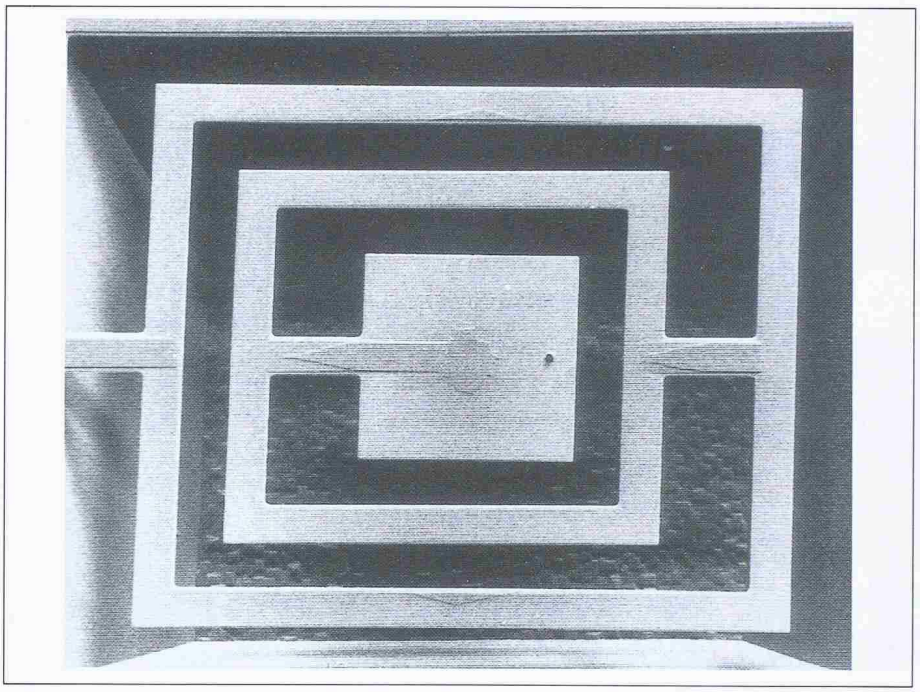

Bild 1. Beschleunigungssensor mit frei über einer Grube schwebender, mehrfach ineinander verschachtelter Zungenspirale in Mikrostruktur

schnelle Abtragen von Material aus dem Kristall dreidimensionale Mikrostrukturen herausarbeiten, wie Lamellen, Nuten, Zungen, Gitter, Brücken, Pyramiden, Halbkugeln, Membranen, Gräben, Federn und Stecker sowie frei über der Ätzgrube stehende, ein- oder zweiseitig verankerte Stege oder Spiralen, ingesamt fast beliebig komplizierte Mikrostrukturen.

Wenn anisotrope Ätzmittel auf das Gitter anisotroper Kristalle in einer bestimmten, von deren Struktur abhängigen Richtung treffen, dann bauen sie wesentlich – sogar bis zu hundertmal – mehr Material ab, als beim Angriff aus anderen Richtungen. Dabei schreitet der Ätzvorgang zwar verhältnismässig schnell vertikal, aber sehr langsam lateral voran, so dass er in die Tiefe des Kristalls und nur geringfügig parallel zu seiner Oberfläche vordringt. Auf dieses Weise entsteht eine Grube, deren Wände im Winkel von 55° gegenüber der Oberfläche geneigt sind.

Dagegen wirken isotrope Ätzmittel aus allen Richtungen mit gleicher Geschwindigkeit auf den bearbeiteten Kristall ein und erzeugen weiche, abgerundete Formen. Während alkalische Lösungen (Basen oder Laugen), wie Kaliumhydroxid (Ätzkali, KOH), wässriges Natriumhydroxid (Ätznatron, NaOH) oder eine Lösung aus Äthylendiamin und Brenzkatechin (ethylenediamine und pyrocatechol, EDP) anisotrop wirken, kommen für isotropes Ätzen meist Mischungen aus Fluss-, Salpeter- und Essigsäure, nach der englischen Bezeichnung «hydrofluoric, nitric and acetic acis etchants» kurz HNA genannt, in Betracht.

Pumpen, kleiner als ein Reissnagel

Unter Ausnutzung der Kristall-Anisotropie gelang es Dipl.-Ing. Axel Richter und Dr.-Ing. Hermann Sandmeier im Münchner Fraunhofer-Institut für Festkörpertechnologie (IFT), die mit Abmessungen von 5 mm × 5 mm × 0,7 mm vermutlich kleinsten, aber durchaus leistungsfähigen Pumpen der Welt herzustellen. Sie arbeiten nach dem elektrohydrodynamischen (EHD) Prinzip, also ohne bewegte Teile. In den sechziger Jahren begonnene Versuche, auf dem EHD-Prinzip beruhende Makropumpen zu entwickeln, blieben erfolglos, weil sie für den Betrieb eine unvertretbar hohe Spannung erforderten. Infolge der Makrominiaturisierung des Pumpensystems genügt nunmehr eine niedrige, von Steuersystemen leicht aufzubringende Spannung.

In den EHD-Mikropumpen des IFT (Bild 2) befinden sich im Abstand von knapp 0,4 mm zwei quadratische, 30 µm dicke und gegeneinander isolierte Gitter als Elektroden (Bild 3). Sie sind aus einem kaum fingernagelgrossen Silicium-Chip anisotrop herausgeätzt. Ihr lediglich 3 mm × 3 mm grosser Gitterbereich weist konische Durchbrüche mit etwa 70 oder 140 µm Kantenlänge auf. Sobald man an die Gitter eine Spannung von 40 bis 700 V legt, ent-

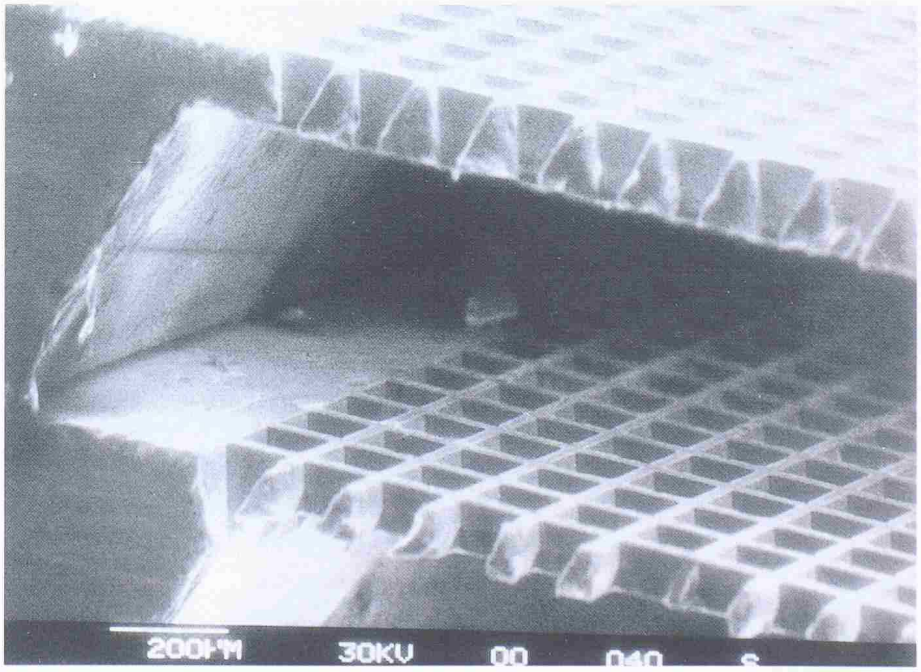

Bild 3. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines Querschnitts durch die Gitter des Pumpensystems (Bilder 1–3: FhG-IFT)

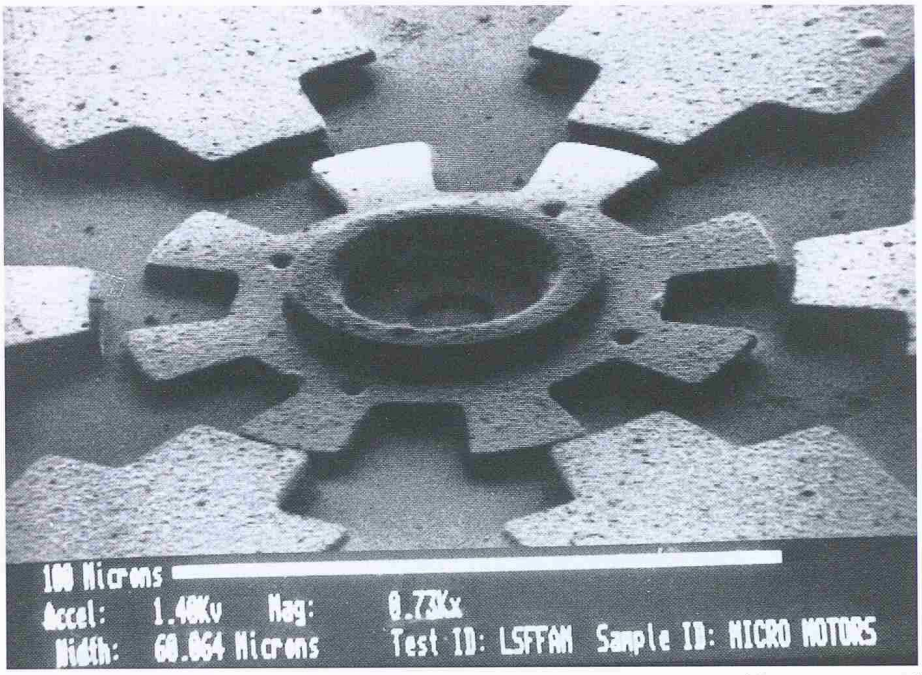

Bild 4. Zu Versuchszwecken im Labor hergestellter Mikromotor (Bild: University of Berkeley und MIT)

steht zwischen ihnen ein inhomogenes elektrisches Feld, das die in der anstehenden Flüssigkeit enthaltenen Dipole bzw. Ionen beschleunigt. Sie reissen infolge innerer Reibung die Flüssigkeits-Moleküle mit und lösen dadurch eine Strömung aus. Das EHD-Prinzip erlaubt es, alle polaren Flüssigkeiten, wie Äthenol, Propanol, Aceton und Freon, ferner die meisten organischen Lösungsmittel zu fördern.

Mit ihrem ausserordentlich kleinen Volumen von 3 µl können die Mikropumpen einen statischen Druck bis zu 2,5 kPa (125 mbar oder 32 cm Wassersäule) erzeugen und pro Sekunde 250 µl, also gut das Achtzigfache ihres Volumens an Flüssigkeit fördern. Damit übertreffen sie die Leistung bisher benutzter, thermisch oder piezoelektrisch erregter, mit bewegten Teilen arbeitende und weitaus grössere Mikropumpen um das Tausendfache. Druck und Flussrate lassen sich durch entsprechende Wahl der Gittergrösse, des Gitterabstands und der Betriebsspannung den Erfordernissen des jeweiligen Anwendungsfalls in weiten Grenzen anpassen. Zur Bereitstellung grösserer Drücke ist es zudem möglich, mehrere Pumpen hintereinanderzuschalten.

Für die Mikropumpen ist wegen des Fehlens bewegter Teile ein sehr einfacher Aufbau kennzeichnend, der eine unkomplizierte, hochpräzise Fertigung mit hohen Stückzahlen erleichtert. Das gewährleistet zugleich grosse Verschleissfestigkeit und Betriebszuverlässigkeit. Nicht zuletzt deshalb erschliesst sich ihnen ein weites Anwendungsfeld, etwa beim genau regelbaren Fördern und Dosieren kleinster Flüssigkeitsmengen in Bereichen von der Medizin über die Chemie bis zur Optik und Robotik. Eine andere Aufgabe könnte darin bestehen, die Erhitzung elektronischer Komponenten mit einem miniaturisierten, wärmeabführenden Kühlsystem in Grenzen zu halten. Das gilt insbesondere für den Fall, dass es den IFT-Forschern noch gelingt, die Funktion der EHD-Mikropumpen auch auf wässrige Flüssigkeiten auszudehnen.

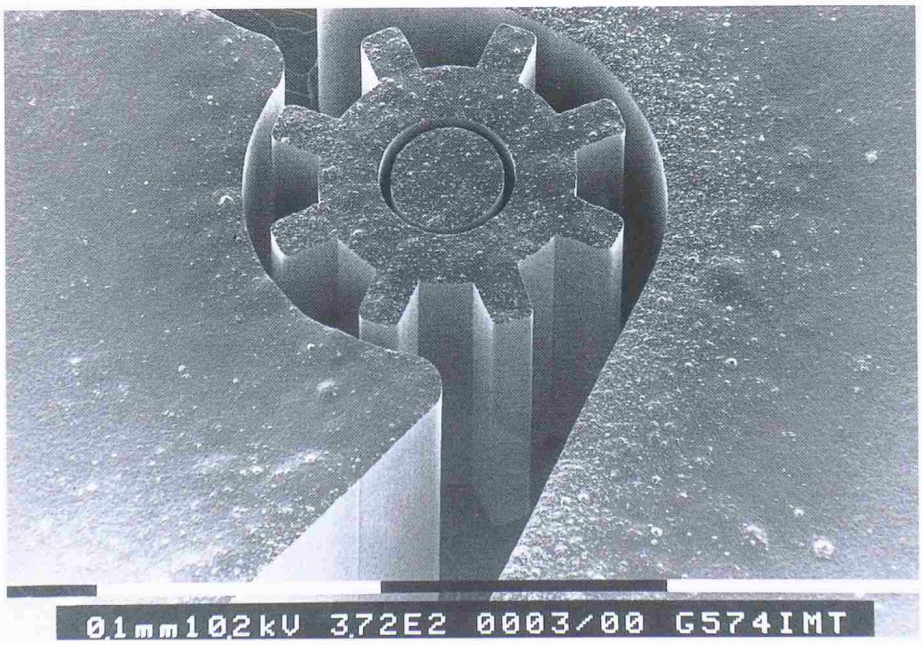

Bild 5. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Mikroturbine, deren Rotor nur 0,13 mm Durchmesser aufweist, aber 0,15 mm hoch ist (der weisse Balken links unten ist 0,1 mm lang) (Bild: KfK)

Motoren unter dem Mikroskop

Fast spektakulär mutet das Ergebnis einer extremen, von amerikanischen Forschern im Sensor and Actuator Center der kalifornischen Universität von Berkeley, in den AT&T Bell Laboratories sowie in den Microsystems Technology Laboratories and Laboratory for Electromagnetic and Electronic Systems am Massachusetts Institute of Technology (MIT) vorgenommenen Mikrostrukturierung an. Sie stellten in mehreren Prozessschritten – abwechselndes Oxidieren, epitaktisches Aufwachsen von Silicium und Ätzen – aus Silicium-Einkristallen winzige Turbinen her, die es luftgetrieben auf 15 000 Umdrehungen pro Minute brachten, ausserdem Elektromotoren (Bild 4), deren Rotor einen Durchmesser in der Grössenordnung von 50 µm hat. Sie sind winzig genug, um in einem ausgehöhlten Haar oder in dünnen Kapillar-Blutadern Platz zu finden. An den ersten Mustern dieser mit blossem Auge kaum wahrnehmbaren Maschinchen wollen die Entwickler Erfahrungen in bezug auf die Achslagerung und -führung, auf die Abriebfestigkeit von Silicium und Siliciumdioxid und auf Möglichkeiten der «Schmierung» oder der Härtung mikromechanischer Getriebe sammeln.

Obgleich diese in der Grösse einer Blutzelle entsprechenden Mikro-Antriebselemente sicher nur wenig belastbar sind, hofft man doch, sie für Aufgaben der Medizin einsetzen zu können, beispielsweise als ferngesteuertes, schnell rotierendes Mikroskalpell zum Freilegen verfetteter oder verkalkter Adern sowie zum Auflösen von Blutgerinnseln an Infarktherzen. Vielleicht könnten sie auch als «intelligente» Immunkörper im Körper patroullieren, wo sie Viren oder Krebszellen aufspüren und vernichten, ferner implantierte Mikrodosierpumpen antreiben, die dem Blut-

kreislauf Medikamente in therapeutisch genau bemessenen Mengen zuführen.

Während die Mikromotoren wegen ihrer verschwindend geringen Höhe fast als zweidimensional zu bezeichnen sind, gelang es im Institut für Mikrostrukturtechnik des Kernforschungszentrums Karlsruhe (KfK), unter Anwendung des ursprünglich für die Produktion von Trenndüsen zur Uran-Anreicherung entwickelten LIGA-Verfahrens Mikroturbinen mit hohem Aspektverhältnis herzustellen. Prototypen der Mikroturbinen haben Rotoren mit 0,1 bis 0,3 mm Durchmesser und sind demnach kaum dicker als ein Menschenhaar (Bild 5). Sie konnten sich bereits als im Probelauf Mikroströmungsmesser bewähren, wobei ein durch den Kanal fliessendes Medium ihren zahnradförmigen Rotor in Drehung versetzt. Derart ist es bei optischer Abtastung dieser Bewegung möglich, kleinste Gas- oder Flüssigkeitsströme zu messen.

Das Kürzel LIGA steht für die aufeinanderfolgenden Verfahrensschritte Röntgentiefen*li*thografie, *G*alvanoformung und *A*bformtechnik. Nach Belichtung einer dicken Schicht aus röntgenempfindlichem Kunststoff mit durchdringender und extrem paralleler Synchrotronstrahlung durch die bildgebende Maske folgt nasschemisches Herauslösen der belichteten Stellen sowie galvanoplastisches Ausfüllen des entstandenen Kunststoffreliefs mit Metall, das zu dem angestrebten Formkörper erstarrt. Seine Struktur kann wenige Mikrometer breit und mehrere hundert Mikrometer hoch sein. Mit dieser Mikrogalvanik lassen sich aber auch Metallformen für kostengünstige Massenproduktion durch Kunststoffabformung gewinnen. Es bedurfte einer Kombination von LIGA- und lichtoptischen Prozessschritten, um auch bewegliche Strukturen herzustellen. Sie werden auf einer «Opferschicht» aufgebaut und diese nach der Galvanoformung selektiv entfernt.

Kombinationen von Mikromechanik und -elektronik

Da die mikromechanischen Elemente aus dem Halbleiter-Werkstoff Silicium bestehen, ist es ohne grundsätzliche Schwierigkeiten möglich, in deren Körper zugleich elektronische Auswerte- und Ansteuerschaltungen zu integrieren. Diese «Mikrosystemtechnik» soll es gestatten, auf einem einzigen Chip Mikrosysteme anzuordnen, in denen Sensoren, Aktuatoren und Elektronikstufen miteinander verknüpft sind und sich gegenseitig steuernd komplexe Aufgaben lösen, die mit klassischen Methoden nicht oder nur mit erheblichem Aufwand zu bewältigen wären. Nicht nur in der Mikroelektronik, sondern auch in der Mikromechanik geht die weitere Entwicklung in Richtung auf immer kleinere Strukturabmessungen. Es ist abzusehen, dass man bald die Schwelle von 1 µm unterschreiten wird, um dann wahrscheinlich von «Submikro- oder Nanomechanik» zu sprechen. Unter Laborbedingungen ist es schon heute möglich, mechanische Strukturen mit Abmessungen unter 0,1 µm zu erzeugen.

E.-K. Aschmoneit, Mölln

Stromrationierung – was dann?

In der polarisiert geführten Risiko- und Akzeptanzdiskussion um die Kernenergie wird der Aspekt der Versorgungssicherheit stark vernachlässigt. Die moderne Industrie-, Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft ist jedoch gegenüber Stromversorgungsstörungen in fundamentaler Weise verletzbar. Der folgende Beitrag zeigt anhand eines Krisenszenarios auf, welche Probleme und Konsequenzen von einer Strommangellage zu erwarten sind.

Wachsende Auslandabhängigkeit und Verletzbarkeit

Die schweizerische Elektrizitätspolitik befindet sich nach wie vor in einem ungelösten Dilemma: Der Stromver-

VON ERNST WIDRIG, ZÜRICH

brauch steigt rascher als die inländische Stromproduktion. Die energiepolitischen Fronten verlaufen weiterhin entlang eines tiefen Grabens, der Befürworter und Gegner der Kernenergie in unversönliche Lager spaltet. Bei einem Andauern des Status quo sind wachsende inländische Versorgungsdefizite unweigerlich vorprogrammiert. Zurzeit decken wir den Verbrauchsanstieg durch wachsende Importe aus französischen Kernkraftwerken. Bis ins Jahr 2000 werden aufgrund der heute vorliegenden Verträge rund 2250 Megawatt (MW) aus Frankreich bezogen. Das sind dannzumal rund 20% unseres Stromkonsums. Damit nimmt unsere Auslandabhängigkeit beim kardinalen Produktionsfaktor Elektrizität unter sicherheitspolitischen Gesichtspunkten zunehmend fragwürdige Dimensionen an.

Zieht man in Betracht, dass Frankreich sich vorbehalten hat, die Stromlieferungen zu drosseln, wenn es den Strom notfalls selbst braucht, so könnte dies eines Tages fatale Folgen für uns haben. Mit Blick auf die Klimafolgen der fossilen Energien oder etwa im Rahmen einer überraschenden Energiekrise kann dieser Fall nicht ausgeschlossen werden. In einer HSG-Dissertation [1] wurde anhand von über 70 schweizerischen Fallstudien und ausländischen Erfahrungen ausführlich dargelegt, was hierzulande geschähe, wenn der Stromverbrauch aufgrund einer akuten Strommangellage rationiert werden müsste. Im folgenden sollen in Form einiger kurzer Schlaglichter ein paar wesentliche Ergebnisse der über 700seitigen Studie vorgestellt werden.

Krisenszenario

Ausgangspunkt der Studie bildet eine plausible Energie-Krisensituation, aus der sich eine hypothetische Stromversorgungslücke von 20% während des versorgungskritischen Winterhalbjahrs ableiten lässt. Im einzelnen besteht das Krisenszenario aus folgenden Parametern:

- Überraschende Ölimportverringerung zu Winterbeginn um 20% mit einer Vorwarnzeit von nur wenigen Wochen
- Im Gefolge dieser Ölkrise (Dauer 1 Jahr) sind nur noch reduzierte Stromimporte möglich
- Ein kalter Winter nach einem trockenen Sommer sorgt für einen höheren