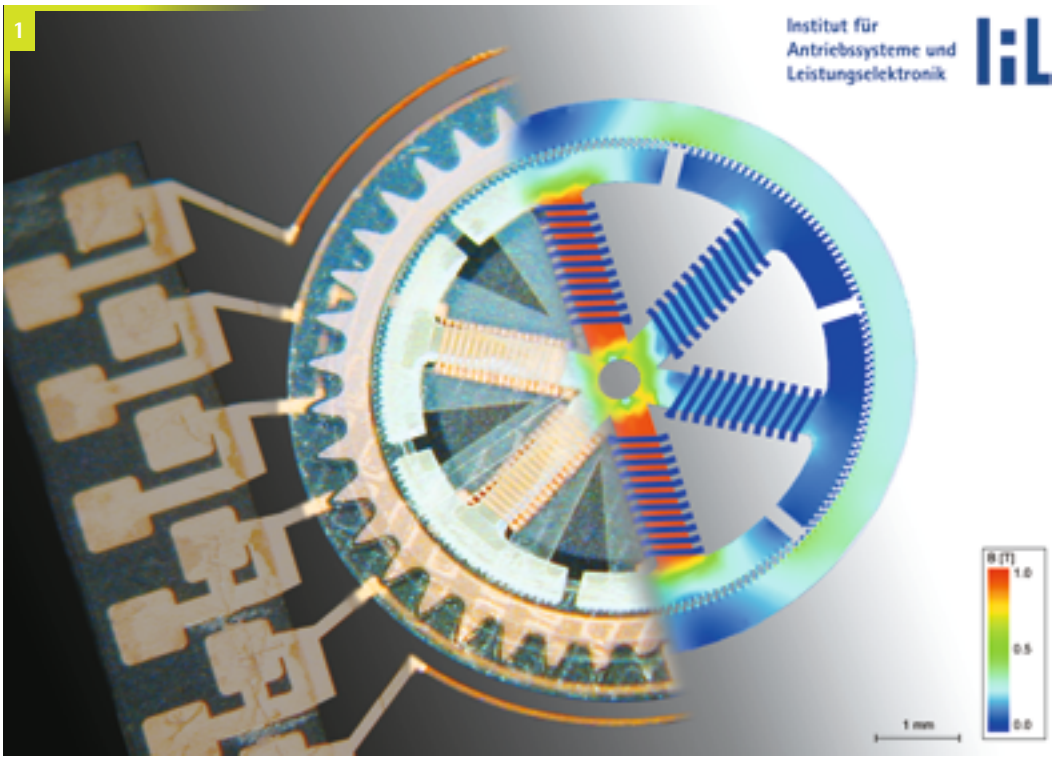
Kleine Motoren, große Möglichkeiten

ELEKTROMAGNETISCHE MIKRO- UND NANOANTRIEBE

In den vergangenen Jahren ist ein wachsender Trend zur Miniaturisierung von Funktionsbaugruppen zu beobachten. Nicht nur im kommerziellen Bereich werden verschiedenste Produkte immer kleiner, kompakter und leistungsfähiger, sondern auch in der Medizintechnik, im Bereich der Optik und in der industriellen Automatisierung steigt der Bedarf nach miniaturisierten Funktionsbaugruppen und Antriebssystemen. Zwei Wissenschaftler vom Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik erläutern, wie auch elektromagnetische Mikro- und Nanoantriebe in der industriellen Praxis eingesetzt werden können.



Die Anforderungen an solche Antriebssysteme können je nach Verwendungszweck ganz unterschiedlich sein. Im kommerziellen Bereich werden beispielsweise Mikroaktoren für Druckerköpfe eingesetzt. In der Medizintechnik sind Mikro- und Nanoantriebe für die minimal invasive Chirurgie oder für Implantate wie Blutpumpen oder Systeme zur Dosierung von Medikamenten gefragt. Ein weiteres Einsatzgebiet für Mikromotoren sind optische Systeme, bei denen sehr kleine Spiegel bewegt und mit hoher Präzision ausgerichtet werden müssen. Auch für die Montage von Komponenten mit sehr geringen Abmessungen können Mikro- und Nanoantriebe einen hohen Beitrag zur Erhöhung der Automatisierungstiefe bieten.

Viele Forschungsgebiete der Mikrosystemtechnik basieren auf elektrostatischen Antriebskonzepten, bei denen die Bewegung durch eine Kraft hervorgerufen wird, die mithilfe von elektrischen Feldern auf elektrische Ladungen wirkt. Elektrostatische Kräfte entstehen dadurch, dass elektrische Ladungen gleichen Vorzeichens sich abstoßen und sich bei ungleichem Vorzeichen anziehen. Allerdings befinden sich diese Systeme auf Grund verschiedener Probleme (schlechter Wirkungsgrad, geringe Kraftdichte und hohe Versorgungsspannung) kaum im alltäglichen Einsatz. Mikroantriebe, die auf der Grundlage des inversen piezoelektrischen Effekts basieren, haben im Laufe der vergangenen Jahre hingegen schnell bestimmte Marktsegmente erobert. Wenn ein elektrisches Feld auf piezoelektrisches Material einwirkt, entsteht eine Formänderung des Materials. Durch ein gesteuertes elektri-

sches Feld kann mithilfe einer schrittweisen Veränderung der Form beispielsweise eine lineare Bewegung erzeugt werden. Weiterhin sind Mikroantriebe bekannt, die auf Formgedächtnislegierung oder thermischen Effekten basieren.

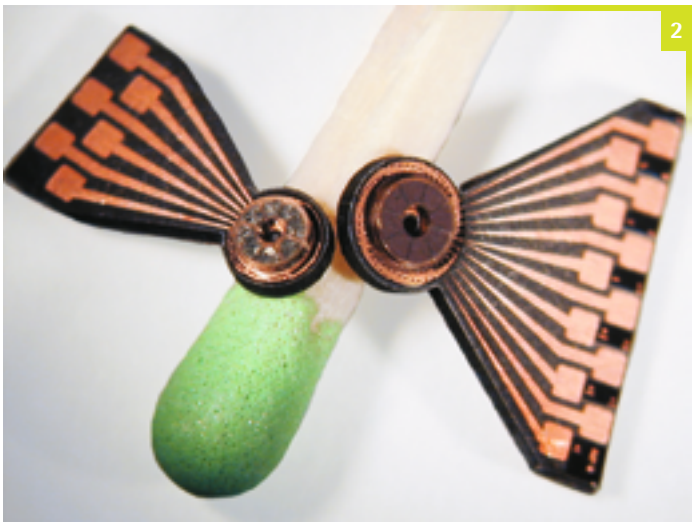
Noch relativ neu sind elektromagnetische Mikro- und Nanoantriebe, obwohl praktisch alle konventionellen elektrischen Antriebe auf der Kraftwirkung im elektromagnetischen Feld beruhen. Die Ursache für die späte Nutzung des elektromagnetischen Prinzips in Mikroantrieben liegt sicher auch an der komplexeren Struktur, die beispielsweise im Vergleich zu elektrostatischen Antriebssystemen dreidimensionale Formen aus unterschiedlichen Materialien erfordert. Die komplexen Strukturen mit Abmessungen im Mikrometerbereich stellen besondere Herausforderung an das Fertigungsverfahren.

Damit ein elektromagnetischer Motor funktioniert, muss ein elektromagnetisches Feld durch einen Strom, der durch eine Spule fließt, erzeugt werden. Mit anderen Worten hat jeder Elektromotor in irgendeiner Form eine Spule, vorzugsweise aus Kupferdraht. Weiterhin wird mindestens ein weich- oder hartmagnetisches Material benötigt. Material, das magnetisch leitfähig ist und durch Anlegen eines äußeren magnetischen Feldes sich leicht ummagnetisieren lässt, wird als weichmagnetisch bezeichnet. Dazu gehören ferromagnetische Materialien aus Eisen, Nickel und Kobalt. Materialien, aus denen Permanentmagnete hergestellt werden, bezeichnet man als hartmagnetisch. Jeder elektromagnetische Motor besteht aus einem fest stehenden Teil, dem Ständer beziehungsweise Stator, und aus einem bewegten Teil, dem Läufer beziehungsweise Rotor.

Das Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik (IAL) forscht seit vielen Jahren auf dem Gebiet der elektromagnetischen Motoren mit Abmessungen im Mikrometerbereich. Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 516 »Konstruktion und Fertigung aktiver Mikrosysteme« war das Institut für den elektromagnetischen Entwurf, die Speisung, Steuerung, Regelung sowie Berechnung und Simulation von elektromagnetischen Mikroantrieben verantwortlich.

Da feinwerktechnische Fertigungsverfahren, insbesondere bei der Herstellung von Kupferspulen aus Draht, nicht beliebig miniaturisierbar sind, wurden die Möglichkeiten dünnfilmtechnischer Fertigungsverfahren, wie der Lithografie und Galvanik, genutzt. Die Entwicklung der Mikromotoren geschieht in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Mikroproduktionstechnik (IMPT) der Leibniz Universität Hannover und dem Institut für Mikrotechnik (IMT) der TU Braunschweig, die entsprechende dünnfilmtechnische Fertigungsverfahren beherrschen und weiter entwickeln.

Die Eigenschaften der mikrotechnologisch hergestellten Materialien, die sich deutlich von denen konventioneller Materialien mit gleicher chemischer Zusammensetzung unterscheiden können, bilden die Grundlage für den elektromagnetischen Entwurf der Motoren. Untersuchungen zeigen, dass insbesondere die weichmagnetischen Materialeigenschaften der Mikrosysteme nicht nur von der Legierung, sondern auch von der geometrischen Struktur sowie vom Herstellungsprozess abhängig sind, was wiederum die stete Weiterentwicklung der eingesetzten Technologien wie Galvanik oder Gasflusssputtern antreibt. Die technologischen



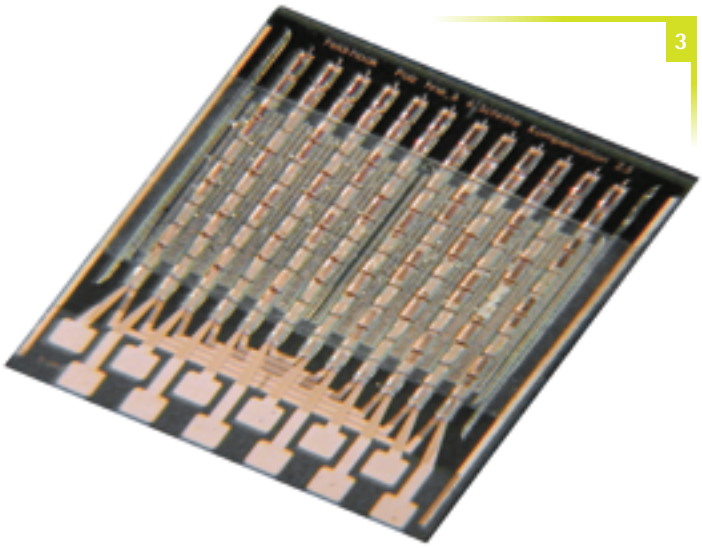


Abbildung 1
Kombination aus einem simulierten und einem gefertigten Mikroreluktanzschrittmotor

Abbildung 2
Zwei Mikromotoren mit Permanentmagnet erregtem Synchronprinzip mit einem Streichholz als Größenreferenz

Abbildung 3
Linearer Mikroreluktanzschrittmotor

Prof. Dr.-Ing. Bernd Ponick
Jahrgang 1964, ist seit 2003 Professor am Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik an der Leibniz Universität Hannover. Sein Fachgebiet sind elektrische Maschinen und Antriebssysteme. Ferner fungiert er als Chairman des IEC.TC2, dem verantwortlichen Gremium für die internationale Normung rotierender elektrischer Maschinen. Kontakt: ponick@ial.uni-hannover.de

M.Sc. Dipl.-Ing. Gerd Janssen
Jahrgang 1977, ist seit 2007 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik an der Leibniz Universität Hannover tätig. Sein Fachgebiet sind elektrische Maschinen und Antriebssysteme. Kontakt: janssen@ial.uni-hannover.de

Grenzen, die durch die prozessabhängigen Größen wie Auflösungsvermögen, Aspektverhältnis und Flankensteilheit bestimmt werden, begrenzen allerdings die ausführbare Geometrie der Mikroantriebe. Die besonderen Materialeigenschaften und Fertigungsverfahren der dünnfilmtechnisch hergestellten Mikroaktoren müssen somit schon in der Konzept- und Entwurfsphase berücksichtigt werden.

Ein allgemeines Ziel des elektromagnetischen Entwurfs ist es, unter Berücksichtigung von fertigungstechnischen Gesichtspunkten, eine möglichst große Kraftwirkung des Antriebsteils auf kleinstem Raum zu erreichen. Aber auch die Positioniergenauigkeit oder eine möglichst einfache Fertigung der Mikroaktoren sind anwendungsspezifische Anforderungen, die bei der Konstruktion des jeweiligen Mikroaktors berücksichtigt werden müssen. Die Untersuchung elektromagnetischer, thermischer und strukturmechanischer Effekte ermöglicht eine umfassende Analyse. Neben analytischen Berechnungsmethoden mittels magnetischer und thermischer Ersatzschaltbildelemente werden zur Auslegung und Berechnung der Mikroantriebe numerische Simulationen mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) eingesetzt.

Die untersuchten elektromagnetischen Mikroantriebe beruhen im Wesentlichen auf drei Wirkprinzipien. Hierzu gehört das Reluktanzprinzip, das Permanentmagnet erregte Synchronprinzip und das Hybridprinzip, eine Kombination aus den beiden vorgenannten Funktionsprinzipien. Die Wirkprinzipien sind für drehende und lineare Bewegungen einsetzbar. Gleichstrommotoren sind für Mikrosysteme eher ungeeignet, da diese einen Kommutator mit Schleifkontakten benötigen. Eine große Vielfalt von ausführbaren Mikroantrieben entsteht nicht nur durch die Wahl des Wirkprinzips und die sehr flexible Gestaltung der Abmessungen, sondern auch durch verschiedene Spulenformen und Flussführungen.

Neben dem Entwurf des Aktivteils spielt die Lagerung des Läufers eine bedeutende Rolle. Um die Reibungsverluste zu minimieren, können verschiedene Lagerungs- und Führungskonzepte eingesetzt werden. Auch aktive und passive magnetische Lagerungen wurden bereits untersucht.

Beim Reluktanzprinzip entsteht die Bewegung des Rotors beziehungsweise Läufers auf Grund der naturgesetzlichen Minimierung des magnetischen Widerstands. Maxwellsche Grenzflächenkräfte bewirken somit eine Vorzugsstellung zwischen Ständer und Läufer. Diese Eigenschaft wird bei Schrittmotoren, die am Luftspalt zwischen Ständer und Läufer mit Zähnen aus weichmagnetschem Material ausgestattet sind, ausgenutzt. Fließt in einem Wicklungsstrang Strom, bewirkt das magnetische Feld im Luftspalt eine Bewegung des Läufers in die Vorzugsstellung mit dem geringsten magnetischen Widerstand, bei der sich die Zähne im Ständer und im Läufer gerade gegenüberstehen. Für eine Bewegung mit definierter Richtung sind bei Reluktanzschrittmotoren mindestens drei Wicklungsstränge erforderlich. Mit mindestens zwei Wicklungssträngen kommen Hybridschrittmotoren aus, da durch die Anordnung der Permanentmagnete bereits die Richtung des magnetischen Flusses festgelegt wird. Hierfür ist jedoch eine bipolare Ansteuerung (eine Ansteuerung, bei der Strom in beide Richtungen fließen kann) notwendig.

Mikroantriebe mit Permanentmagnet erregtem Synchronprinzip besitzen ein magnetisches Feld, das durch die im Läufer angeordneten Permanentmagnete hervorgerufen wird. Im Ständer befindet sich die stromdurchflossene Wicklung, deren Spulen zeitlich versetzt mit Strom versorgt werden. Damit eine konstante Kraft entsteht, muss die Bestromung so erfolgen, dass sie synchron mit der Bewegung des Läufers mitwandert. Bei Mikromotoren mit Permanentmagnet erregtem Synchronprinzip kann auf Grund der geringen Abmessungen gegebenenfalls auf die Verwendung weichmagnetischer Materialien verzichtet werden, was die zur Herstellung erforderliche mikrotechnische Prozesskette wesentlich vereinfacht. Die Ausführung ohne weichmagnetischen Rückschluss besteht dann lediglich aus Spulen im Ständer und Permanentmagneten im Läufer und ist daher auf einfache Weise auch in großen Stückzahlen zu fertigen.

Die Technologien für Entwurf und Fertigung derartiger Mikroantriebe haben inzwischen einen Stand erreicht, der auch eine Umsetzung in die industrielle Praxis erlaubt.