

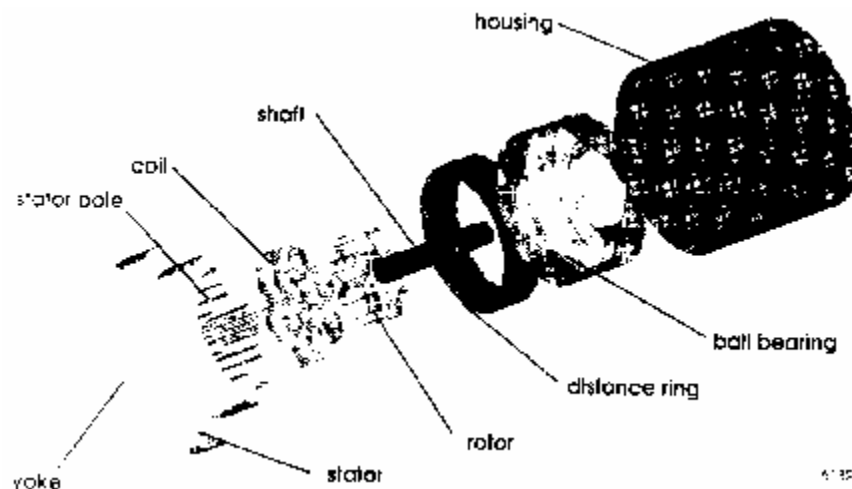
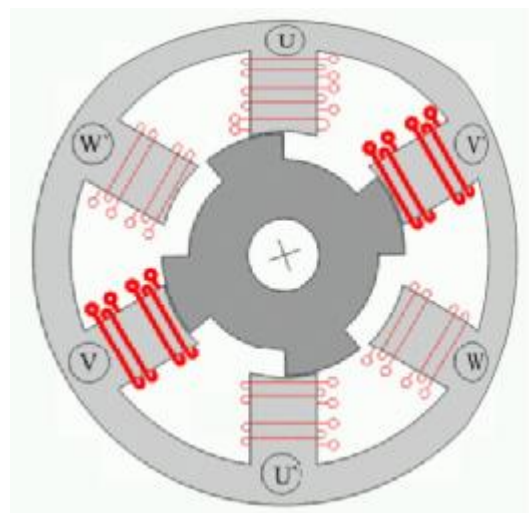
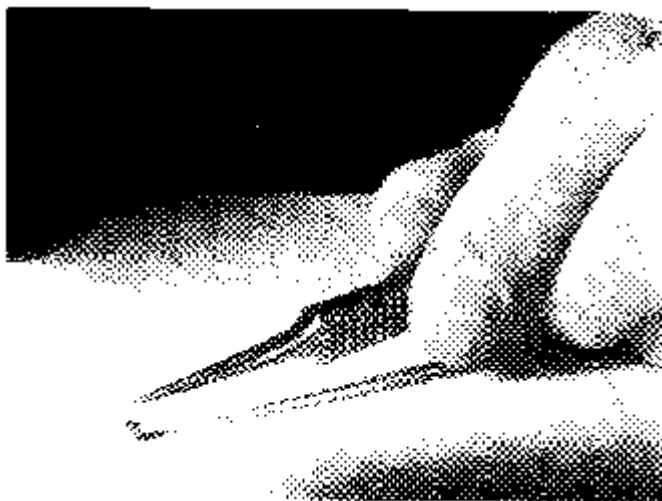
## Mikromechanische Aktoren - Aktoren in der Mikrosystemtechnik

Mikroaktoren werden benötigt, z.B. für

- Mikropumpen (Medikamentendosierung, ...)
- optische Systeme (Nachrichtenübertragung, ...)
- miniaturisierte analytische Geräte (Luftschadstoffmessung, ...)
- Datenspeicher (Schreib-/Leseköpfen, ...)

Quelle: Benecke, Universität Bremen

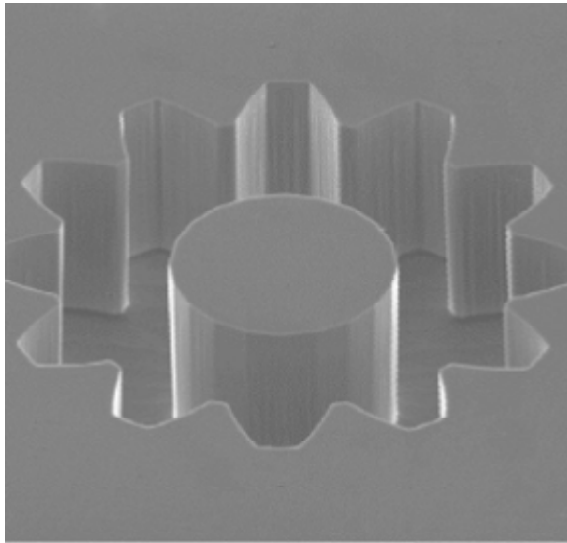
## Mikromotoren



Elektromagnetischer Mikromotor (Reluktanzprinzip, Außendurchmesser 2 mm) a) Größenvergleich; b) Darstellung der Komponenten: Rotor, Stator, Mikrokugellager, Hülse, Welle, Distanzring (Werkbild: Institut für Mikrotechnik (IMM), Mainz) Quelle: D. J. Jendritza, Technischer Einsatz neuer Aktoren; <http://www.unibw-hamburg.de/EWEB/EMA/Bewegtbilder/Reluktanzmotor/reluktanzmotor.html>

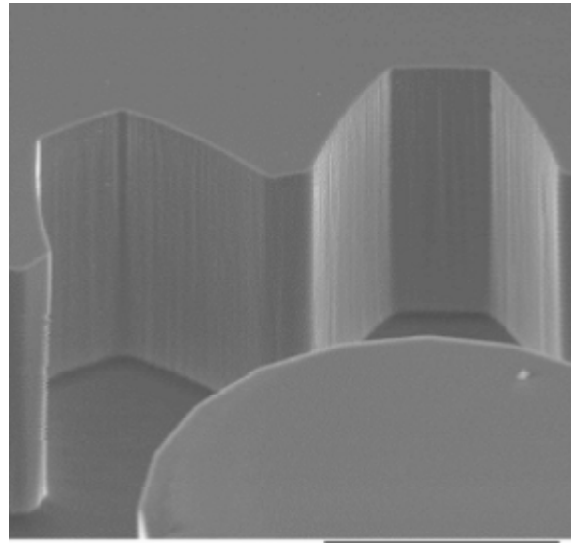
Konstruktive Elemente – Beispiel: Mikroabformung

Silizium Urform [ Advanced Silicon Etching (ASE) ] > 100 Abformungen mit Hartmetallpulver (WC-Co)



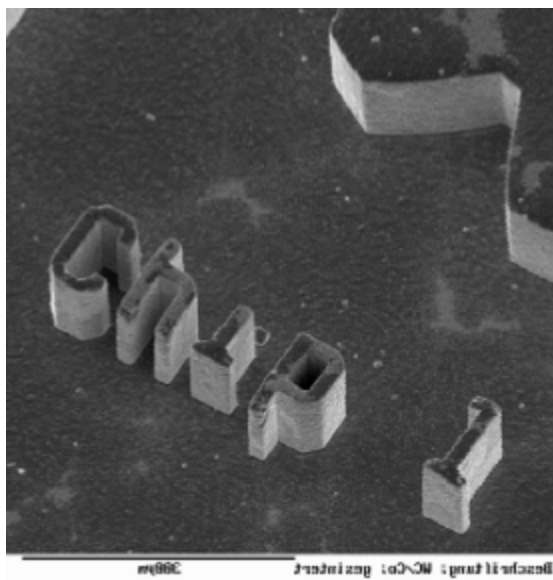
Zahnradform: nach über 100 Abformungen

100µm



Zahnradform: nach über 100 Abformungen

100µm



100µm

Zahnradform: nach über 100 Abformungen

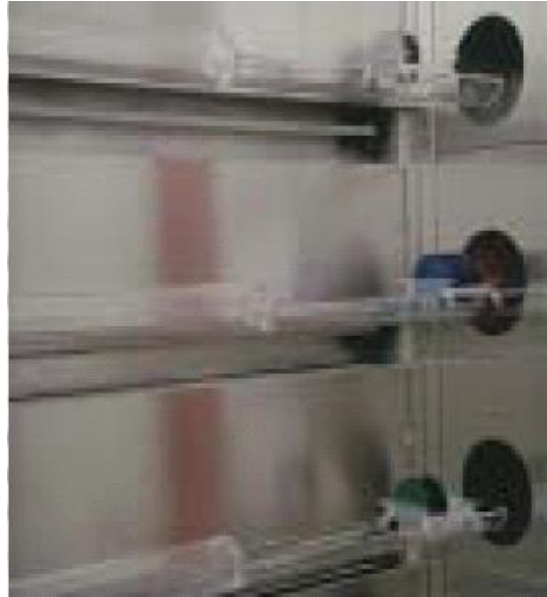
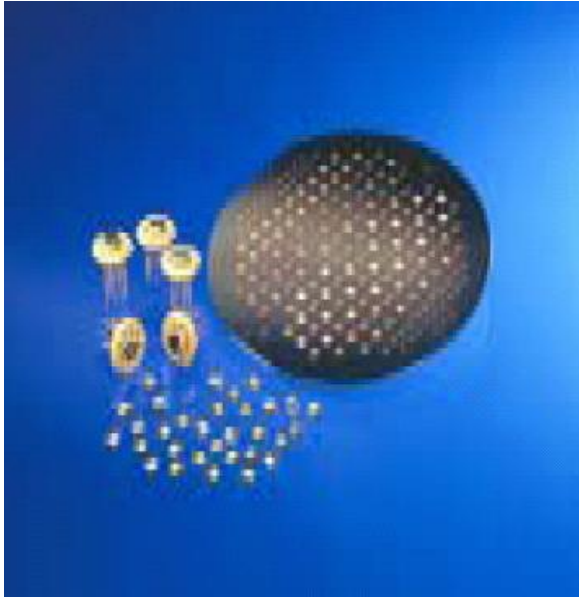


Abgeformte Strukturen aus WC/Co-gesintert 160µm Zahnrad (Fe-gesintert) Vergleich mit 0,5 Bleistiftmine Höhe - Aspektverhältnis 8:1

## Herstellung

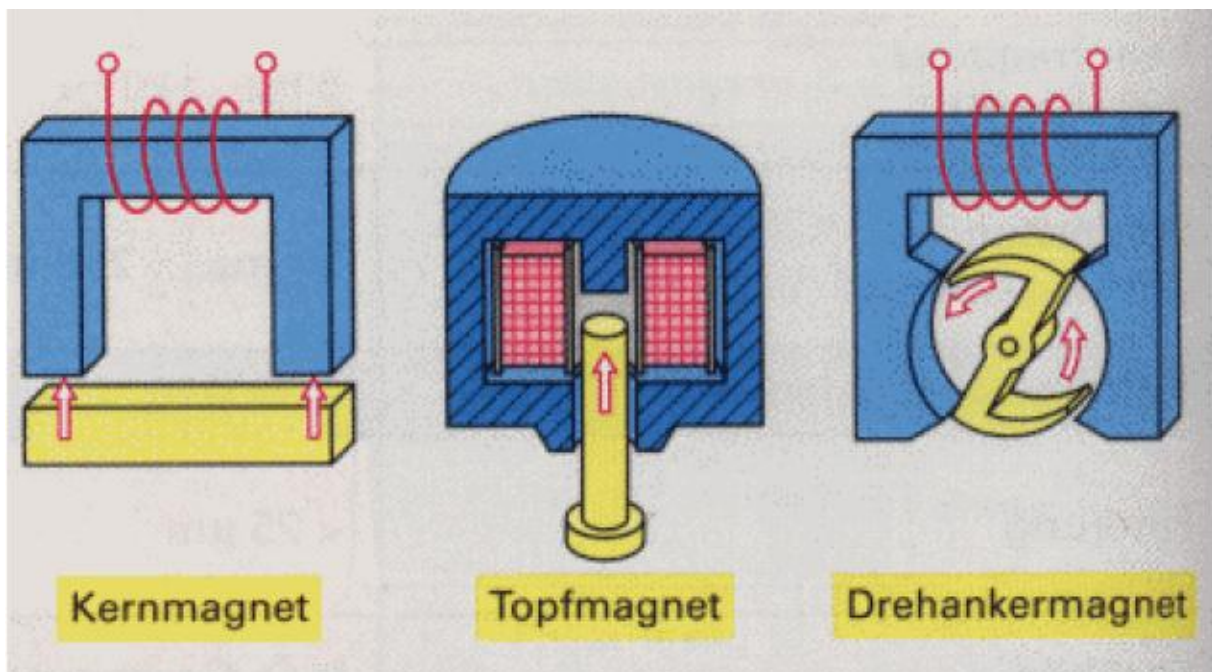


Die Herstellung erfolgt in staubfreien Räumen (Reinraum) Außenluft: ca. 1 000 000 Partikel/cft; Reinraum Klasse 1: ca. 1 Partikel/cft. Der Mensch "erzeugt" beim Sitzen ohne Bewegung ca. 300 000 Partikel/Minute. Quelle: Benecke, Universität Bremen



Es werden nicht einzelne Sensoren sondern Wafer (=Platten mit 10-25 cm Durchmesser) aus Silizium bearbeitet. Es werden viele, typ. 25 Stck., in einem Arbeitsgang bearbeitet (Batch-Prozessierung). Es entstehen viele identische Bauteile während eines Prozessdurchlaufes: große Stückzahlen + geringe Kosten/Bauteil Beispiel: Drucksensor 6000 Stück auf einem 150 mm Wafer.

### Elektromagnet



Ausführungsformen von Elektromagneten als Stellglied. Topfmagnet = Solenoid; Gelb: Weicheisenkern (= (Dreh-)Anker); Beim Drehankermagnet wird der drehbar gelagerte Weicheisenkern durch eine Biegefeder in Mittelstellung gehalten. Quelle: Prof. Dr. W. Höger, Mechatronik, FH München; [1]

Der Elektromagnet stellt für hochdynamische Positionieraufgaben bei niedrigen Gegenkräften zurzeit das kostengünstigste Antriebskonzept ("Kurzhubelement") dar. Der einfache Aufbau ermöglicht dabei in Verbindung mit der elektrischen Hilfsenergie die

Realisierung schneller Steuerstrecken (z.B. Einspritzsysteme). Bei kleinen Stellwegen lassen sich mit den sog. Betätigungsmagneten hohe Zugspannungen bei einem kompakten Bauvolumen bewerkstelligen. Diese Eigenschaften sind insbesondere bei der Stellung hydraulischer und pneumatischer Fluidströme erforderlich, wo der Magnet im Allgemeinen kontinuierliche Stellbewegungen ausführen soll. Die prinzipbedingte, nichtlineare Magnetkraft-Kennlinie muss dazu linearisiert werden, was üblicherweise durch eine geeignete geometrische Formgebung des Magnetkreises erfolgt. Die Sättigungserscheinungen der Magnetmaterialien begrenzen dabei die elektromagnetische Kraftwirkung und damit den Stellbereich des Aktors auf 10 - 25 mm.

#### Vorteile

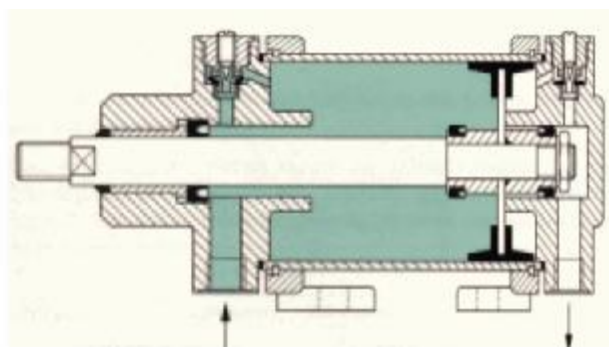
- einfacher, kompakter und kostengünstiger Aufbau
- direkte Erzeugung von Linearbewegungen
- sehr hohe Stelldynamik

#### Nachteile

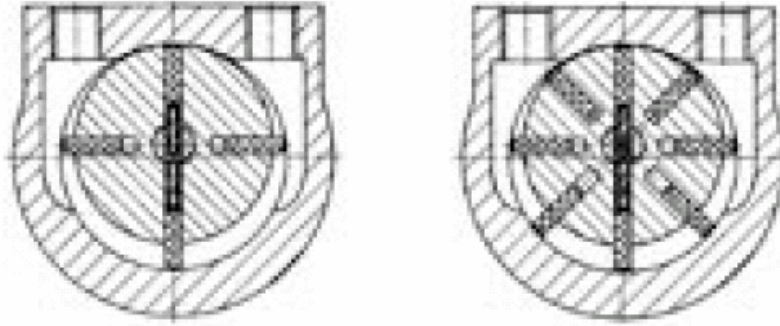
- nichtlineares Verhalten
- geringe Leistungsdichte
- Reibung und magnetische Hysterese
- großer Ruhestrom

### *Pneumatische Stellantriebe*

Pneumatische Stelleinrichtungen nutzen die physikalischen Eigenschaften der Druckluft. Die hohe Kompressibilität und Energiespeicherfähigkeit, als auch die geringe Viskosität dieses Übertragungsmediums ermöglichen den Aufbau leistungsfähiger und dynamisch schneller Stellantriebe. Bei einem einfachen und robusten Aufbau (eine Zuleitung) sind pneumatische Antriebe dazu geeignet, mittlere Stellkräfte von einigen kN aufbringen, wobei gleichzeitig hohe Arbeitsgeschwindigkeiten und große Gesamtwege durchfahren werden können. Neben diesen Eigenschaften zeichnen sie sich durch eine hohe Betriebssicherheit bei extremen Umgebungsbedingungen (Temperatur-, Schmutzbeständigkeit, Überlastungsfestigkeit, Explosionsschutz) aus. Die Störsicherheit gegenüber elektrischen und magnetischen Feldern sowie Strahlungen ist gewährleistet. Die Umformung der pneumatischen in mechanische Energie wird zum einen in Druckluftzylindern oder -membranen zur Erzeugung translatorischer Bewegungen, zum anderen in Druckluftmotoren zur Erzeugung rotatorischer Bewegungen durchgeführt.



*Pneumatikzylinder. Quelle: Prof. Dr. W. Höger, Mechatronik, FH München*



Die mit hoher Präzision gefertigten Druckluftlamellenmotoren bestehen im wesentlichen aus Rotor mit Rotorwelle, Gehäuse, Lagerdeckel, Lamellen, Wälzlager und Dichtring. Der Rotor ist auf die Rotorwelle aufgeschraubt. Die vier oder acht Lamellen sind frei beweglich in den mit hoher Genauigkeit gefertigten Gleitschlitzen des Rotors geführt und stützen sich auf der gehonten Gehäusebohrung ab. Die Lamellenanpressung während des Anfahrens und bei geringen Drehzahlen ist verschieden gelöst: Durch Lamellenstützringe, Federn oder rückseitiger Druckbeaufschlagung. Bei höheren Drehzahlen unterstützt zusätzlich die Fliehkraft die Lamellenabdichtung. In Abhängigkeit der Drehzahl, des Druckluftzustandes und des Betriebsdruckes erreichen die Lamellen eine Lebensdauer von vielen tausend Betriebsstunden. Die Lamellen stellen sich bei Verschleiß automatisch nach. Der Rotor ist bis zur Größe 8AM in Wälzlagern, die in den Lagerdeckeln fixiert sind, schwimmend gelagert, während die Lagerung des 16AM-Druckluftmotors nach dem Fest-Loslagerprinzip gelöst ist. Die zulässige axiale Belastung der Rotorwelle ist bei der schwimmenden Lagerung durch den Wälzlagerpassungssitz vorgegeben und begrenzt. Um die Vorteile der schwimmenden Lagerung nicht zu gefährden, ist eine axiale Belastung der Rotorwelle zu vermeiden. Die Zu- und Abluftversorgung erfolgt über je ein Anschlussgewinde im Gehäuse. Durch Vertauschen von Ein- und Auslass kann bei den umsteuerbaren Druckluftmotoren die Drehrichtung umgekehrt werden. Die Rotorwelle wird zur Atmosphäre hin mit einem Dichtring abgedichtet. Um eine einwandfreie Funktion des Druckluftmotors zu gewährleisten, muss die Druckluft dem Stand der Technik entsprechend gefiltert und geölt zur Verfügung stehen. Bei ölfreiem Druckluftmotor ist eine Schmierung nicht erforderlich. Der Druckluftlamellenmotor arbeitet nach dem Flügelzellenprinzip. Die für beide Drehrichtungen geeigneten Druckluftmotoren sind symmetrisch aufgebaut. Über den Druckluftanschluss werden während der Rotation die Kammern nacheinander mit Druckluft gefüllt. Durch den symmetrischen Aufbau ist das Kammervolumen bei Einlass-Schließen und Auslass-Öffnen gleich groß. Die Druckenergie, die theoretisch in mechanische Energie umgewandelt werden kann, berechnet sich aus dem Differenzdruck (Luftdruck auf der Einlassseite minus Luftdruck auf der Auslassseite) mal Kammervolumen. Schon geringe Druckabfälle auf der Zuluftseite oder Drosselstellen auf der Abluftseite verringern Differenzdruck und Volumenstrom und damit Drehmoment, Drehzahl und Leistung. Durch die polytrope Expansion der Druckluft auf der Auslassseite sinkt die Lufttemperatur. Bei zu starker Expansion kann es zur Vereisung kommen. Das Startdrehmoment ist geringer als das Drehmoment nach dem Anlaufen. Verantwortlich hierfür ist die Lage der Lamellen in Bezug auf die Einlassöffnung. Quelle: <http://www.specken-drumag.com/html/share/pdfdrumag/Druckluftmotoren.pdf>

Der Aufbau von schnellen als auch positioniergenauen Stelleinrichtungen ist mit pneumatischen Aktoren durch reine Steuerung im Allgemeinen kaum zu erreichen. Prinzipbedingte Eigenschaften wie die geringe und positionsabhängige Steifigkeit, eine relativ große Kolben-Buchsenreibung sowie nichtlineare Eigenschaften der Servoventile erfordern anspruchsvolle Regelungen. Im Zusammenhang mit dem Trend zur Miniaturisierung der pneumatischen Komponenten und der steigenden Mikrorechnerkompatibilität ist deshalb ein verstärkter Einsatz zu erwarten.

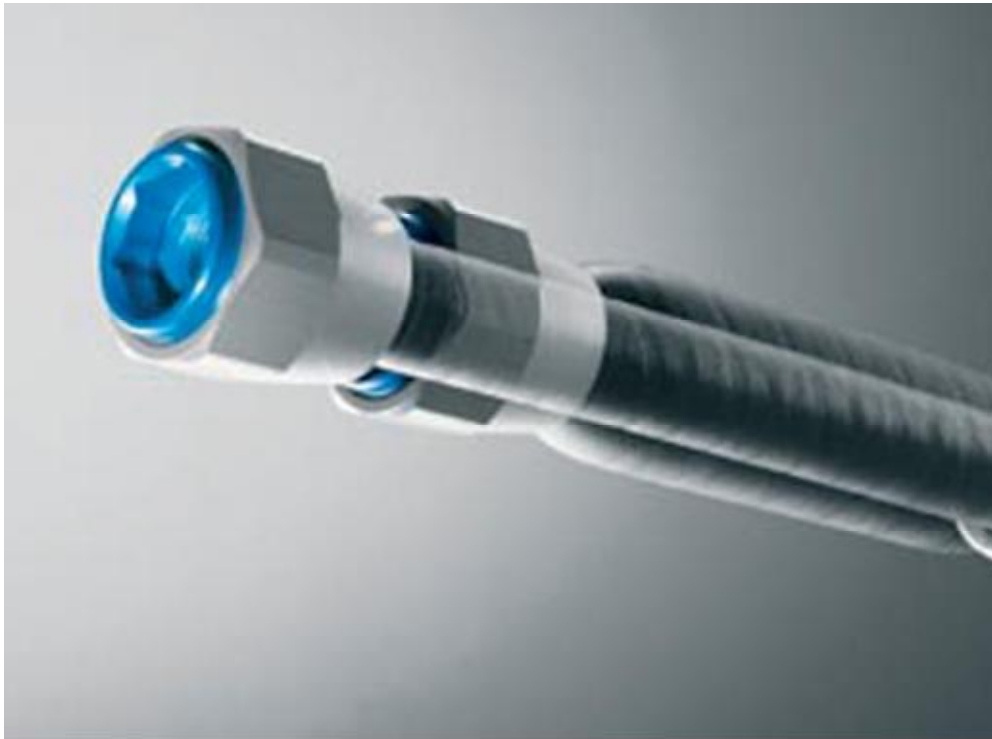
#### Vorteile

- großes Arbeitsvermögen
- großer thermischer Betriebsbereich
- günstiges Leistungsgewicht
- hohe Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit
- gutes Preis/Leistungsverhältnis

#### Nachteile

- Druckluftaufbereitung notwendig
- zum Teil große Abmessungen
- Reibung und Kompressibilität erschweren Regelung
- Beschränkte Positioniergenauigkeit

Pneumatische Stellelemente, meist per Luftdruck betätigte Zylinder für die Bewegung zwischen zwei Endlagen, gehören immer noch zu den weit verbreitetsten Aktoren im Maschinenbau.



*Der pneumatische Muskel eignet sich wegen seiner hohen Anfangskraft für Einsatzfelder mit großer Dynamik und hoher Taktfrequenz. (Bild: Festo) Quelle:*

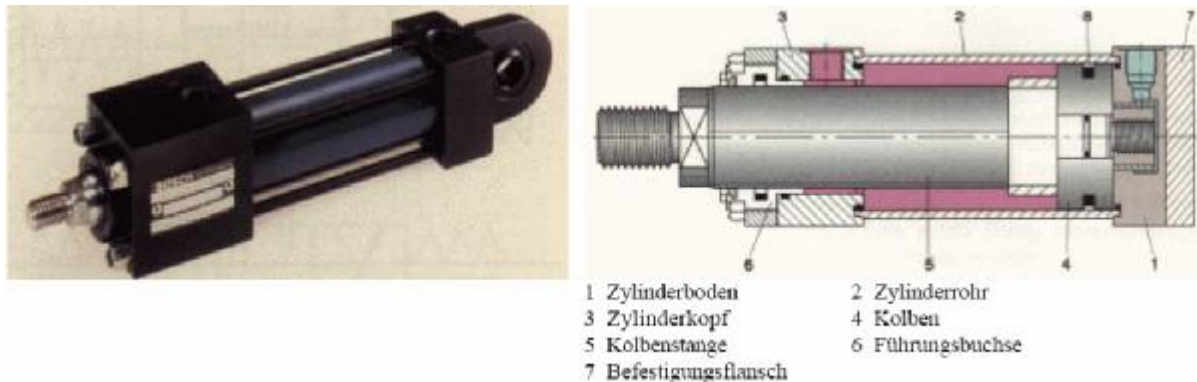
*[http://www.elektroniknet.de/topics/automatisieren/fachthemen/2003/0007/index\\_c.htm](http://www.elektroniknet.de/topics/automatisieren/fachthemen/2003/0007/index_c.htm)*

Ein neues pneumatisches Bauelement ist der pneumatische Muskel (siehe Bild), ein Schlauch, dessen Länge über seinen Innendruck veränderbar ist. Die Innovation besteht in der Kombination eines luftdichten, flexiblen Schlauchmaterials und einer Umspinnung mit festen Fasern in Rautenform. Wird der Druck erhöht, so vergrößert sich der Umfang des Schlauchs und er verkürzt sich, dabei begrenzt die Gitterstruktur die Verkürzung des Schlauches bei steigendem Innendruck bis zum "neutralen Winkel" der Raute. Der Ausdruck "pneumatischer Muskel" ist durchaus richtig gewählt, denn auch die Fibrillen eines natürlichen Muskels können sich nur zusammenziehen und müssen durch eine äußere Kraft wieder in die Ausgangsstellung gebracht werden. Die künstliche Variante kann sich bis zu 25 % verkürzen (ein natürlicher Muskel schafft 30 bis 40 %), sie stellt die zehnfache Kraft eines herkömmlichen pneumatischen Antriebs zur Verfügung. Wegen der geringen künstlichen "Muskelmasse" lassen sich hochdynamische Systeme realisieren, die, verglichen mit anderen pneumatischen Systemen, sehr schnelle Taktfrequenzen ermöglichen.

### *Hydraulische Stellantriebe*

Hydraulische Stelleinrichtungen werden bevorzugt dort eingesetzt, wo hohe Kräfte bzw. Beschleunigungen bei gleichzeitig kleinem Bauraum verlangt sind. Da sie trotz großer Kraftaufbringung nur geringe Eigenmassen bewegen, ist eine dynamisch schnelle Positionierung möglich. Weitere Vorteile gegenüber pneumatischen Systemen sind die hohe Steifigkeit und Stoßfestigkeit. Die Komponenten der hydraulisch mechanischen Umformung sind Stellzylinder und Hydromotoren. Im Gegensatz zur Pneumatik, kommt hier dem Rotationsmotor eine größere Bedeutung zu, da er große Antriebsmomente bei kleinen Abmessungen (Leistungsdichteverhältnis Hydraulik-/Elektromotor ungefähr 10 bis 25) und geringem Massenträgheitsmoment aufweist. Es ergeben sich dadurch sehr kleine

Zeitkonstanten und damit eine Möglichkeit der hochdynamischen Drehzahlstellung. Kleine Drehzahlen lassen sich allerdings prinzipbedingt nur mit relativ ungleichförmigen Drehbewegungen realisieren. Die Erzeugung translatorischer Bewegungen erfolgt in hydraulischen Stellzylindern, die je nach Art der Kolbenlagerung, in Zylinder mit reibungsarmen Berührungsdichtelementen und Zylindern mit hydrostatischer Lagerung unterteilt sind. Ein Großteil der Anwendungen kann durch den Einsatz von Servozylindern mit speziellen Berührungsdichtungen erfüllt werden. Voraussetzung dafür sind allerdings sehr hohe Anforderungen an die Oberflächengüte von Zylinderrohr, Kolbenstange und -führung.



Hydraulischer Stellzylinder. Quelle: Prof. Dr. W. Höger, Mechatronik, FH München

Das dynamische Verhalten hydraulischer Stellantriebe ist vor allem durch die schwache Dämpfung charakterisiert, die zudem vom Kolbenhub als auch von der Belastung abhängig ist. In Verbindung mit modernen Regelungskonzepten können dennoch servohydraulische Stellantriebe realisiert werden, die hohe Positioniergenauigkeiten bei einem guten dynamischen Verhalten aufweisen.

#### Vorteile

- kleine Abmessungen
- hohe Dynamik und Leistungsdichte
- hohe Steifigkeit
- großes Arbeitsvermögen

#### Nachteile

- ggf. hohe Systemkosten
- Zweileitungssystem
- ggf. Ölaufbereitung notwendig
- Reibung und komplexe Dynamik erschweren Regelung

### Thermobimetalle

Quelle: D. J. Jendritza, Technischer Einsatz neuer Aktoren.

Thermobimetalle sind Schichtverbundwerkstoffe, die aus mindestens zwei Komponenten mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten bestehen. Da sich bei Erwärmung die eine Komponente stärker ausdehnt als die andere, entsteht eine temperaturabhängige Krümmung des Thermobimetalls. Thermobimetalle sind seit mehr als 200 Jahren bekannt. Sie werden als einfache und preiswerte Bauelemente für temperaturabhängige Steuer-, Mess- und Regelaufgaben eingesetzt. Das wichtigste Kriterium für die Auswahl der Komponenten von Thermobimetallen ist die thermische Dehnung. Bei Thermobimetallen wird die Komponente mit der kleineren Wärmeausdehnung als passive Komponente und die Komponente mit der größeren Wärmeausdehnung als die aktive Komponente bezeichnet. Besonders hohe thermische Ausdehnungskoeffizienten zeigen Legierungen des Mangans mit Kupfer- und Nickelzusätzen, austenitstabilisierten Eisen-Nickel-Legierungen mit Zusätzen an Mangan, Chrom und Molybdän sowie rostfreie

austenitische Chrom-Nickel-Stähle. Zu den Werkstoffen mit geringem Ausdehnungskoeffizienten zählt vor allem die Eisen-Nickel-Legierung mit 36% Nickel, die unter dem Namen Invar bekannt ist. Desweiteren haben beispielsweise Eisen-Nickel-Legierungen mit 42% und 46% Nickel sowie nichtrostende Stähle als passive Komponenten in der Praxis große Bedeutung erlangt.

Als Kenngröße für die thermische Empfindlichkeit von Thermobimetallen gilt die sog. spezifische thermische Krümmung  $k$ , die nach den Vorgaben gemäß DIN 1715 ermittelt wird. Die spezifische thermische Krümmung  $k$  ist keine Konstante. Die Temperaturabhängigkeit der Ausbiegung eines Streifens verläuft daher nicht streng linear, sondern entsprechend einem polynomförmigen Kurvenzugs. Der Nennwert der spezifischen thermischen Krümmung  $k$  gilt für den Temperaturbereich von 20 °C bis 130 °C. Als Anwendungsgrenze wird diejenige Temperatur bezeichnet, bei der die Eigenschaften des Thermobimetalls gerade noch nicht bleibend verändert werden. Diese Temperatur entspricht der Rekristallisationstemperatur des Thermobimetalls bei langzeitiger Beanspruchung und dem üblichen Kaltumformgrad von 20 bis 30 %. Die Vielzahl möglicher Werkstoff-Kombinationen hat weltweit zu über 100 verschiedenen Thermobimetallen geführt. Thermobimetalle werden u.a. in der Elektrotechnik, der Automobilindustrie und der Heizungstechnik als einfache und preiswerte Bauelemente für temperaturabhängige Steuer- und Regelaufgaben eingesetzt. Thermobimetall-Schnappscheiben finden beispielsweise in einer Vielzahl von Geräten als thermische Auslöse oder Schaltelemente im Bereich der Elektrotechnik und der Automobilindustrie Verwendung.

Die besonderen Eigenschaften von Thermobimetallen lassen sich wie folgt zusammenfassen.

- Vorgebbare lineare Temperatur-Stellweg-Abhängigkeit,
- Linearitätsbereich bis etwa 600 °C erzielbar,
- Anwendungsgrenze ca. 650 °C,
- Hohe Stabilität des Formänderungseffektes bis ca. 20 Millionen Zyklen.

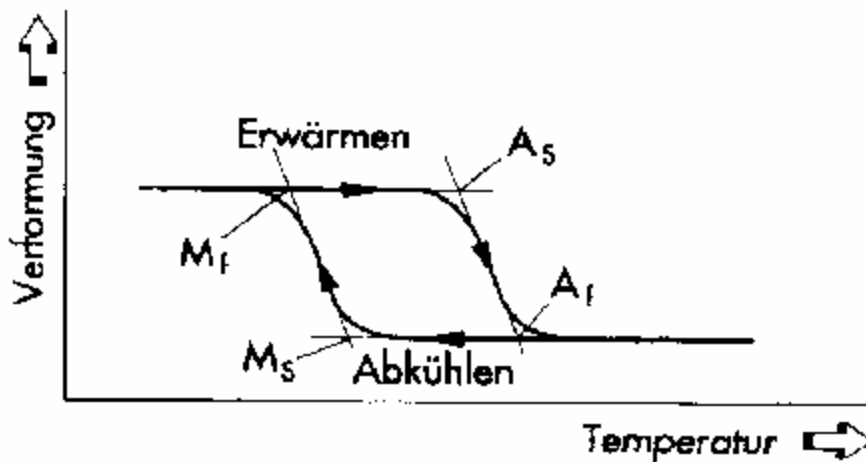
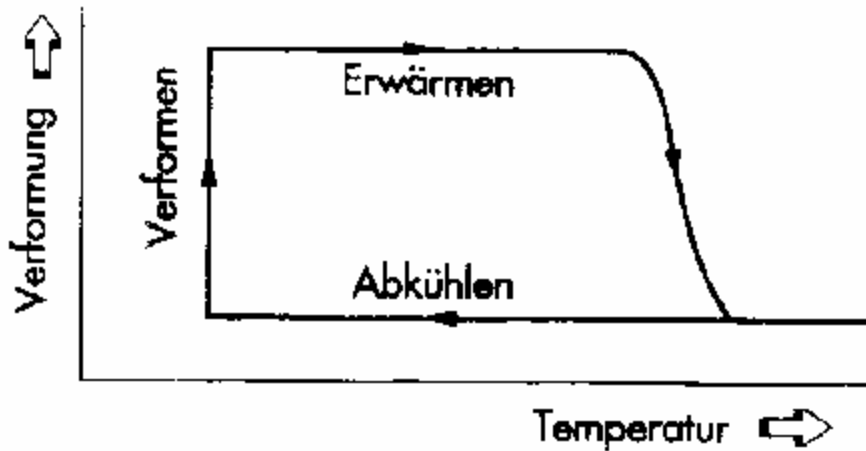
### *Formgedächtnislegierungen (Shape Memory Alloys = SMA)*

Formgedächtnislegierungen sind Werkstoffe die ihre ursprüngliche Form unter Einfluss von Temperaturänderungen wieder herstellen. Wohl die erste der zu Beginn der 60er Jahre gefundenen Legierungen mit Formgedächtnis (SMA – Shape Memory Alloy) war Nickel-Titan, dessen Handelsname Nitinol (Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory) auf den Arbeitgeber seines Entdeckers hinweist. William J. Buehler hatte dort die spezielle Eigenschaft dieser Legierung durch Zufall im Forschungslabor der Navy gefunden. Ein aus Nitinol hergestellter Draht oder Blechstreifen kann zwar verbogen – also plastisch verformt – werden, nimmt aber durch Erwärmung wieder seine ursprüngliche Form an. Daneben gibt es noch die Kupfer-Zink-Aluminium (CuZnAl)-Legierung.

Eigenschaften	Legierung	
	NiTi	CuZnTi
Bruchdehnung [%]	40 .. 50	10 .. 15
max. $T_1$ [°C]	90 .. 150	120
max. Einmaleffekt [%] *	6	4 .. 5
max. wiederholbarer Effekt [%] *	4,5	0,5 .. 1
Hysteresebreite [%]	15 .. 25	10 .. 20
Langzeitstabilität	gut	weniger gut

Eigenschaften der beiden heute kommerziell erhältlichen SMAs Quelle: [http://www.wags.informatik.uni-kl.de/lehre/ws03-04/ES/Folien\\_dir/Aktuatoren.pdf](http://www.wags.informatik.uni-kl.de/lehre/ws03-04/ES/Folien_dir/Aktuatoren.pdf) - Vorlesung: Eingebettete Systeme, Bernd Schürmann, TU Kaiserslautern

Memory-Metalle können zwei verschiedene Effekte aufweisen. Zum einen den „Einweg-Effekt“ und zum anderen den „Zweiweg-Effekt“ der durch thermomechanische Vorbehandlung einen reversiblen Betrieb ermöglichen kann. Das bedeutet, dass das Bauelement im warmen und im kalten Zustand jeweils eine unterschiedliche, vorher definierte Form einnehmen kann. Arbeit leistet es beim Aufwärmen. Eine Temperaturänderung des Materials bewirkt bei beiden Effekten eine Austenit-Martensit-Umwandlung (2 unterschiedliche Phasen, d.h. Kristallstrukturen der Legierung), die für die geometrische Rückbildung verantwortlich ist. Das Anwendungsgebiet solcher SMA liegt vorwiegend in der Luft- und Raumfahrttechnik.

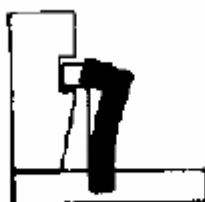


Verhalten einer Gedächtnislegierung nach dem Einweg- (oben) und Zweiwegeeffekt (unten): Breite der Hysterese: obere Umwandlungstemperatur: 120°C, 10-30 K, max. Verformung: 5% bis 8%. A<sub>S</sub> bzw. A<sub>F</sub>: Austenit Start bzw. Finish, M<sub>S</sub> bzw. M<sub>F</sub>: Martensit Start bzw. Finish Quelle: Heinz Nixdorf Institut, Universität-GH Paderborn, Mechatronik und Dynamik, Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek; Quelle: D. J. Jendritza, Technischer Einsatz neuer Aktoren, S. 348f

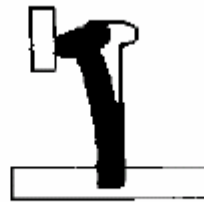
In der Medizintechnik hat das Material weite Verbreitung gefunden, chirurgische Instrumente aus diesem Werkstoff sind biologisch "inert" und wegen ihrer besonderen Eigenschaft zudem knicksicher.



**Spannen**



**Lösen**

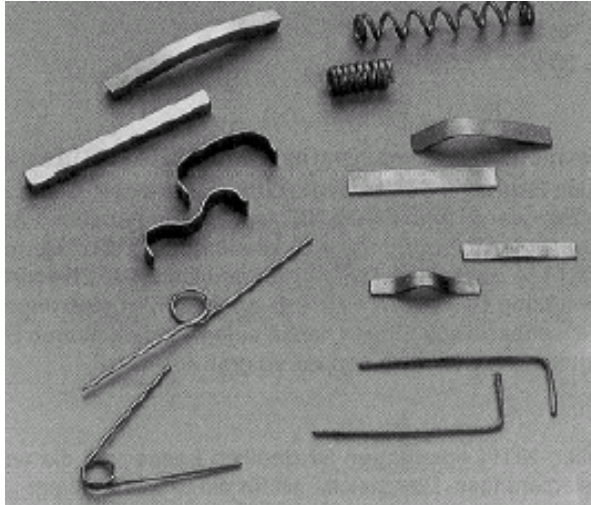


**Schalten**



**Antreiben**

Anwendungsbeispiele für SMA. Quelle: <http://www.wags.informatik.uni-kl.de/lehre/ws03-04/ES/Folien.dir/Aktuatoren.pdf> - Vorlesung: Eingebettete Systeme, Bernd Schürmann, TU Kaiserslautern



*Beispielformen (links) und Anwendungsbeispiel (rechts): Mit einem elektronisch gesteuerten Bausatz für knapp 20 \$, dem "Space Wings Kit", bei dem die Nickel-Titan-Drähte zwei Flügel in Bewegung setzen, demonstriert Mondo-tronics die Einsatzmöglichkeiten von Nitinol (Nickel-Titanium Naval Ordnance Laboratory (Laborname, in dem der Effekt an Nickel-Titan entdeckt wurde). Der "Space Wings Kit" ist 15 cm hoch und schlägt bis zu 36 Mal pro Minute mit den "Flügeln". (Bild: Mondo-tronics) Quelle: [http://www.elektroniknet.de/topics/automatisieren/fachthemen/2003/0007/index\\_c.htm](http://www.elektroniknet.de/topics/automatisieren/fachthemen/2003/0007/index_c.htm)*

### *Beispiel eines selbstangetriebenen Rades - Robotic wheels that just keep rolling*

*Quelle: New Scientist 19:00 30 June 04, Will Knight*

A gaggle of miniature robots are falling over themselves in a Japanese lab. But they are not malfunctioning: it is the way they have been designed to move.

The wheel-shaped robots, which are just 4 centimetres in diameter and 1 centimetre thick, were built by Shinichi Hirai and Yuuta Sugiyama at Ritsumeikan University in Kusatsu. The robots propel themselves along by continuously altering their shape.

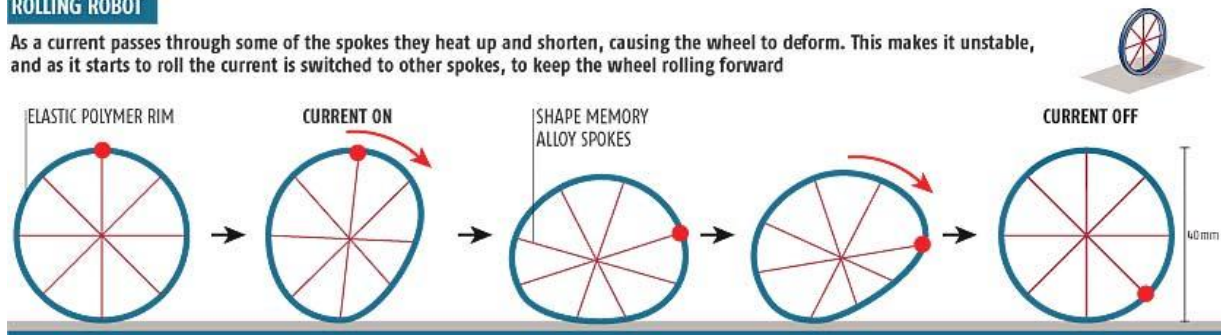
The rim of the wheel is made of an elastic polymer, while the spokes are made of a smart material known as a shape memory alloy, which becomes shorter when heated.

Shortening the spokes towards the front of the wheel changes its shape, causing the rim's point of contact with the ground to move backwards, behind the centre of gravity. As the wheel then tips forwards, other spokes are heated to deform the rim again and keep the robot rolling along (see diagram).

Shape memory alloys store energy in the form of stresses in their crystalline structure. Passing an electric current through the spokes heats them up, releasing this energy and making them shorter. Allowing them to cool then returns the spokes to their original state.

## ROLLING ROBOT

As a current passes through some of the spokes they heat up and shorten, causing the wheel to deform. This makes it unstable, and as it starts to roll the current is switched to other spokes, to keep the wheel rolling forward



### Rolling robot

High jump: The rolling robots perform well on flat surfaces and can even scale 20-degree slopes. By flattening itself as much as possible and then ping-ponging back to a circular shape - driven by the elasticity of the outer rim - a robot can leap 8 centimetres into the air. The engineers say that by combining three wheels in a mutually perpendicular arrangement, it should be possible to build a ball-shaped, steerable robot.

The electricity to power the robots is sent down lightweight copper wires. Eventually the developers plan to build in a rechargeable battery.

Hirai and Sugiyama do not yet know what applications their idea might have, but Robert Richardson, a robotics expert at the University of Manchester in the UK, thinks they have potential as military scouts.

"They would be lightweight and difficult to damage, so I would imagine a good application would be to drop them from a plane into remote areas," he says. The rolling rovers could then perhaps be programmed to roll in a particular direction, bouncing over obstacles, perhaps to deliver cameras to remote locations.

But Richardson warns that such rolling robots would be extremely difficult to control accurately. "They would not be able to stop rolling quickly."

For now, the Japanese team is happy to have demonstrated deformability as a new form of robot locomotion. Their main aim was to show that you do not need rigid bodied crawler robots or wheeled vehicles to move over rough ground.

### Vorteile der SMA

große Formänderung

hohe Energiedichte

gut konfigurierbar

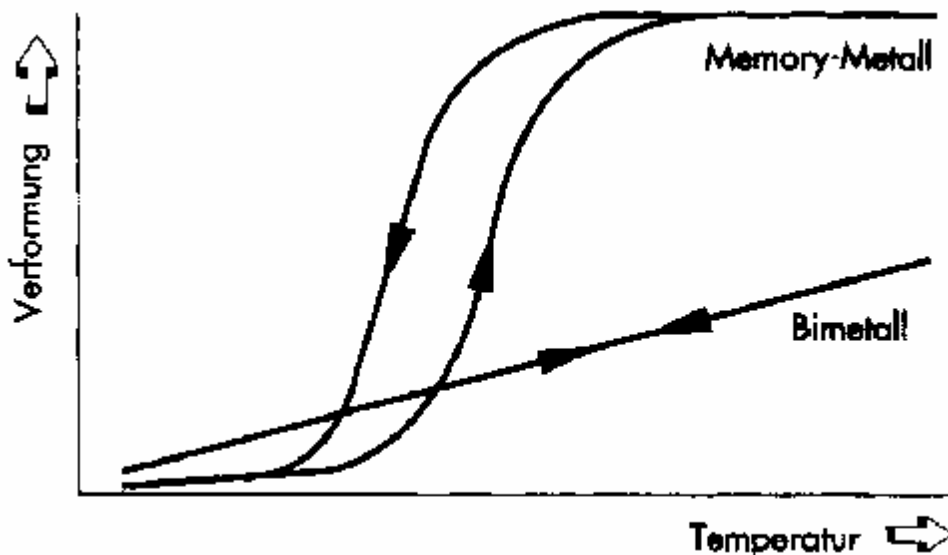
### Nachteile der SMA

Stabilität

thermische Bereiche

hoher Preis

Kühlung oder Beheizung notwendig



### Bi-Metall

**Verformung proportional zur Temperatur**

**Praktisch keine Hysterese**

**Einschränkung der Formgebung durch Schichtverbundwerkstoff**

**Nur Biege-Formänderung möglich**

**Kleineres Arbeitsvermögen pro Volumeneinheit bei Erwärmen und Abkühlen**

**Niedriger Preis**

### Memory-Metall

**Verformung in einem Temperaturintervall von ca. 10K**

**Große Hysterese (ca. 10-30 K)**

**Große Gestaltungsvielfalt (Blech, Draht)**

**Biege-, Zug-, Druck-, Torsions-Formänderung möglich**

**Großes Arbeitsvermögen pro Volumeneinheit nur bei Erwärmen, große Kräfte realisierbar**

**Hoher Preis**

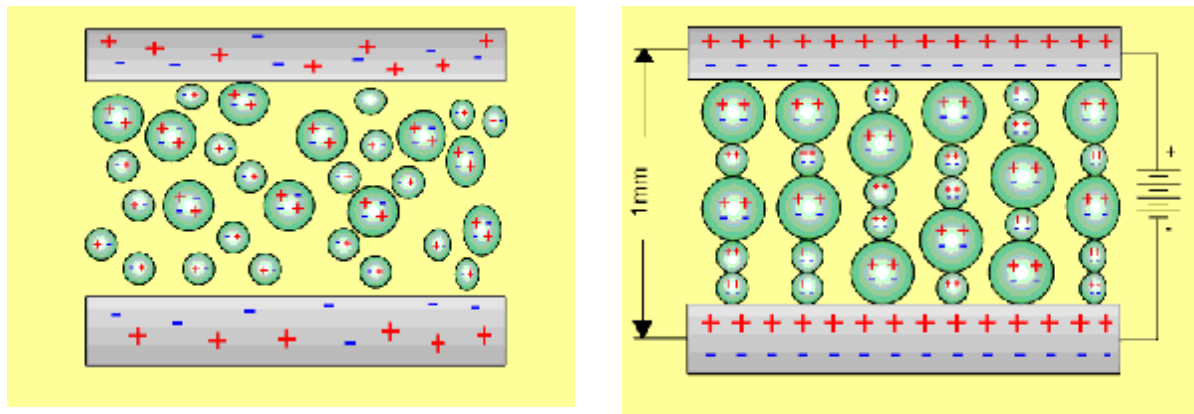
*Unterschied Bi-Metall/Memory-Metall. Quelle: D. J. Jendritza, Technischer Einsatz neuer Aktoren, S. 351*

### Elektrorheologische Flüssigkeiten (ERFs)

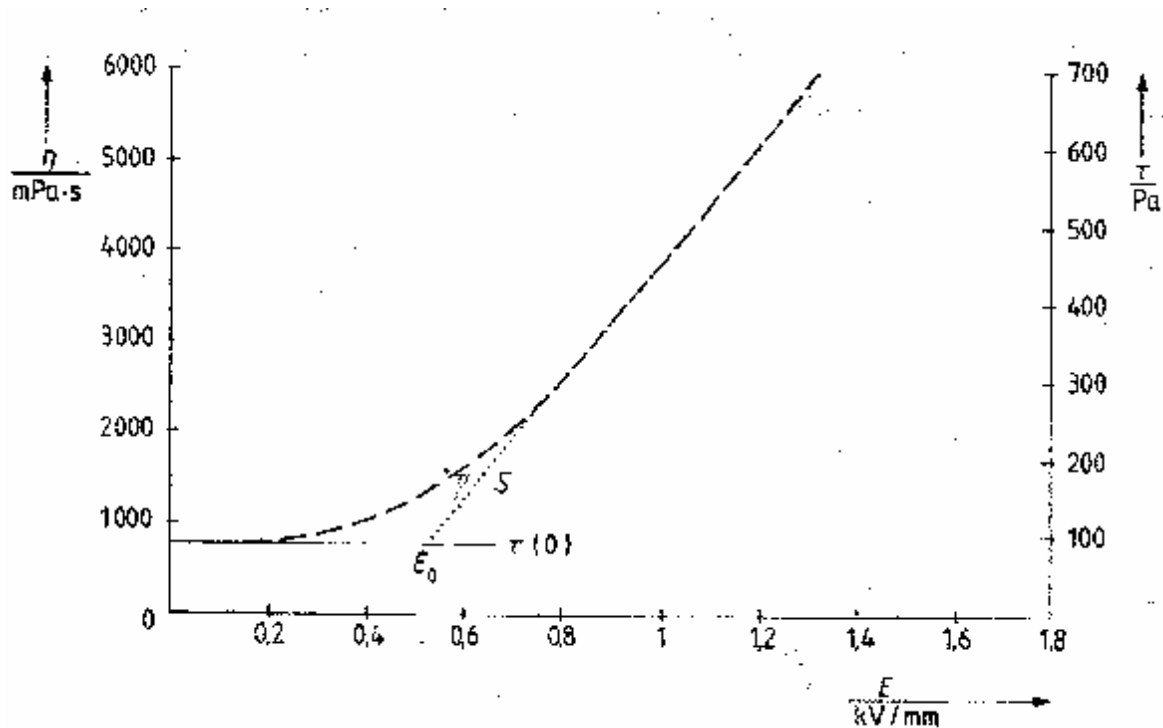
Elektrorheologische Flüssigkeiten oder Suspensionen verändern ihre Viskosität in einem elektrischen Feld. Nichtpolare Trägerflüssigkeit mit geringer elektrischer Leitfähigkeit (niedriger Permittivitätszahl  $\epsilon_r$ : Leichte Öle, Silikonöle, Kohlenwasserstoffe), in die polarisierbare Feststoffteilchen (1  $\mu\text{m}$  - 100  $\mu\text{m}$ ) mit hoher Dielektrizitätszahl dispergiert sind (Metalloxide, Kieselsäure-Anhydride oder Polymere mit in ihnen gelösten Metallionen zur Anwendung). Ohne elektrisches Steuerfeld liegt die typische Viskosität dieser elektrorheologischen Suspensionen im Bereich von einigen 100 mPa/s, bei hohen elektrischen Feldern erstarrt die Suspension dagegen.

Unter Einfluss eines äußeren elektrischen Feldes erfolgt eine Polarisierung der suspendierten Teilchen mit dem Resultat, dass diese sich entsprechend dem induzierten Dipolmoment innerhalb der Flüssigkeit entlang der Feldlinien ausrichten und zu mechanisch

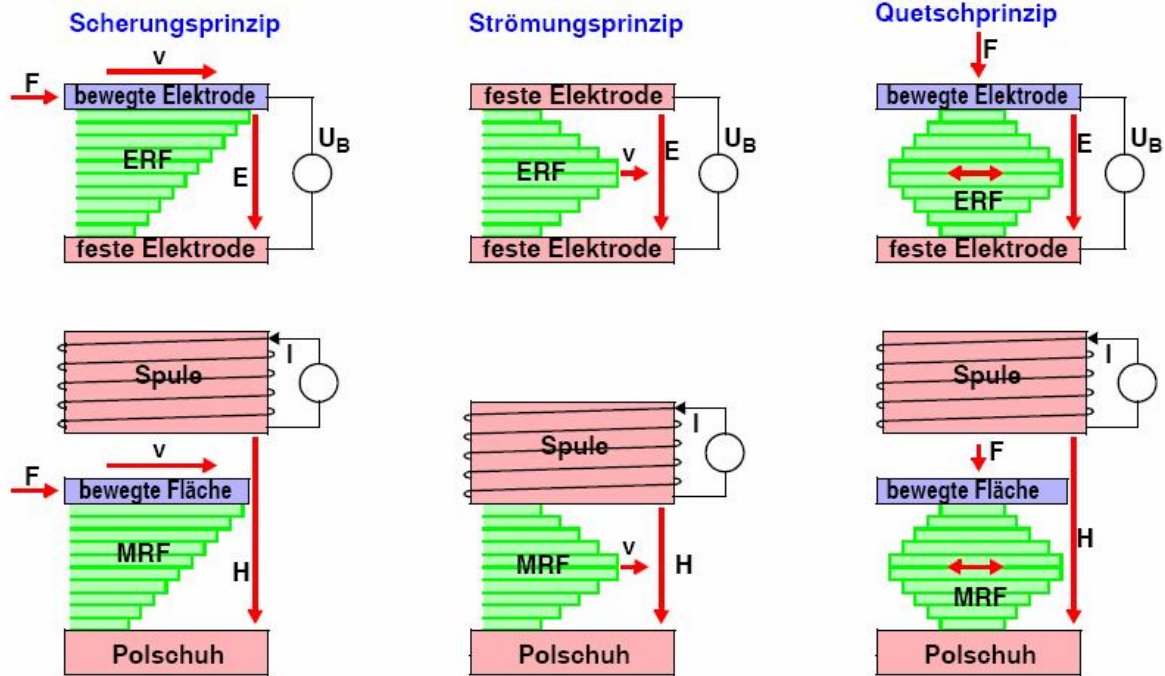
belastbaren Ketten agglomerieren. Die hierdurch hervorgerufenen Strukturveränderungen auf *mikroskopischer Ebene* stellen die Ursache für das veränderte rheologische Verhalten der Flüssigkeit auf *makroskopischer Ebene* dar. Für hinreichende hohe Feldstärken und Partikelkonzentrationen erstrecken sich die Ketten schließlich über den gesamten Strömungsquerschnitt und die "Flüssigkeit" erstarrt zu einem elastischen Körper, der bei Schubspannungen unterhalb seiner Fließgrenze nur deformiert wird, aber nicht mehr strömt.



Kettenbildung einer ERF beim Anlegen eines elektrischen Feldes (mehrere kV/mm). Quelle: <http://www.tu-harburg.de/mec/erf/Unterseiten/Besch.htm#Effekt>



Änderung der Viskosität  $\eta$  bzw. der Schubspannung  $\tau$  einer elektrorheologischen Flüssigkeit unter Einfluss eines elektrischen Feldes  $E$ . Quelle: Urban, Freiburg

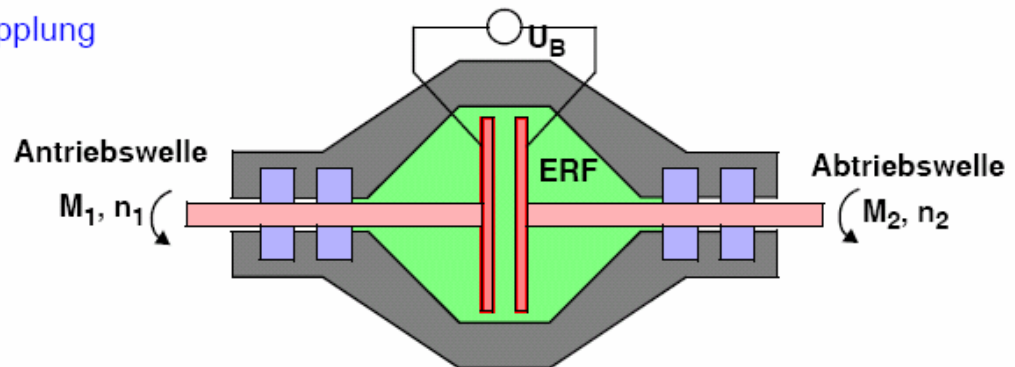


Grundprinzipien von ERF/MRF-Energiewandlern. Quelle: <http://www.wags.informatik.uni-kl.de/lehre/ws03-04/ES/Folien.dir/Aktuatoren.pdf> - Vorlesung: Eingebettete Systeme, Bernd Schürmann, TU Kaiserslautern

- Im Allgemeinen nimmt der Fließwiderstand mit wachsender elektr. Feldstärke zu.
- Der Effekt tritt bei Gleich- und Wechselfeldern auf.
- Die Reaktionszeit beträgt wenige Millisekunden
- Nach Abschalten des Feldes kehren die ursprünglichen Eigenschaften zurück
- Größenordnung: - heutige Steuerfeldstärken: einige kV/mm
- Scherungsspalt: 0,5 mm ... 2 mm

Anwendungen: Kupplungen, Getriebe, Ventile, Stoßdämpfer, rotierende Bremscheibe ...

### Scheibenkupplung



Hochspannung an Kupplungsscheiben über Schleifringe, Kraftschluss über ERF, übertragenes Drehmoment und Übersetzungsverhältnis der Kupplung durch elektrisches Feld steuerbar; Einschränkung: durch Basisviskosität auch ohne elektr. Feld; Mindestmoment (kein vollständiges Abkoppeln) Quelle: <http://www.wags.informatik.uni-kl.de/lehre/ws03-04/ES/Folien.dir/Aktuatoren.pdf> - Vorlesung: Eingebettete Systeme, Bernd Schürmann, TU Kaiserslautern

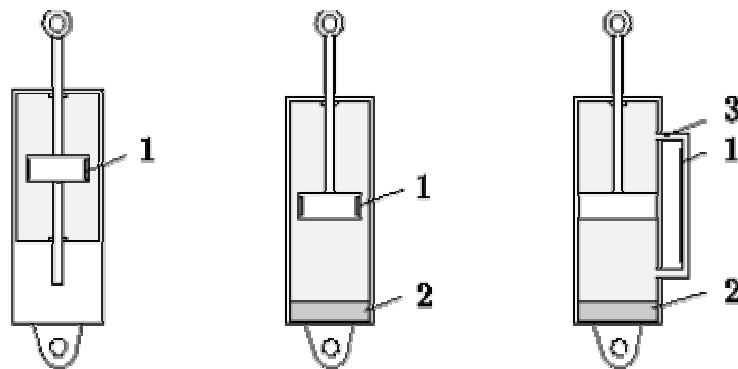
## Magnetorheologische Flüssigkeiten (MRFs)

Quelle: Jendritza, *Technischer Einsatz neuer Aktoren*, S. 108ff

Wie die elektrorheologischen Flüssigkeiten reagieren magnetorheologische Flüssigkeiten mit einer Änderung ihrer Viskosität, hier allerdings nicht auf das Anlegen eines äußeren elektrischen sondern eines magnetischen Feldes. Magnetorheologische Flüssigkeiten (MRF) sind stabile Suspensionen sehr feiner ferromagnetischer Partikel in einem isolierenden Trägermedium. Zur Verhinderung der Koagulation der Partikel sind diese mit einem Stabilisator beschichtet. MRF besitzen durch magnetische Felder steuerbare rheologische Eigenschaften.

Ohne Feldeinwirkung sind MRF stets flüssig. Unter Feldeinfluss können sie bei Nichtüberschreitung der feldstärkeabhängigen Grenzscherspannung als Festkörper betrachtet werden. Im flüssigen Zustand lässt sich die übertragene Schubspannung durch Größe und Richtung eines magnetischen Feldes beeinflussen. Für die Erhöhung der scheinbaren Viskosität ist die Ausbildung von verzweigten Ketten der Feststoffpartikel verantwortlich. Sie werden durch magnetische Wechselwirkungskräfte zwischen den Partikeln zusammengehalten. Eine Scherung des Fluides bewirkt zuerst eine Dehnung und bei höheren Schubspannungen den Abriss der Ketten. Da sich die Kettenbruchstücke aber weiterhin entlang der magnetischen Feldlinien ausrichten, setzen sie der Schergeschwindigkeit des Fluides einen erheblichen Widerstand entgegen. Ein weiterer Beitrag zur erhöhten Schubspannung im flüssigen MRF-Zustand resultiert aus der ständigen Rekombination von Kettenbruchstücken.

Quelle: [http://www.donnerflug.de/diss/Diss\\_no\\_print.pdf](http://www.donnerflug.de/diss/Diss_no_print.pdf)



**(1 - Magnetstreifen/Elektroden, 2 - Ausgleichsbehälter, 3 - Überbrückung)**

Einstellung der Stoßdämpfereigenschaften über magnetorheologische Flüssigkeiten. Quelle: [http://www-m2.ma.tum.de/Drittmittel/DFG/SFB-438/C4/Bericht\\_1999/node8.html](http://www-m2.ma.tum.de/Drittmittel/DFG/SFB-438/C4/Bericht_1999/node8.html)

## Dilatante Flüssigkeiten

Dilatante Flüssigkeiten zeigen einen reversiblen Sprung der Viskosität bei einer kritischen Schergeschwindigkeit. Anwendungsmöglichkeit: Differenzialgetriebe zur Verhinderung des Durchdrehen eines Autorades.

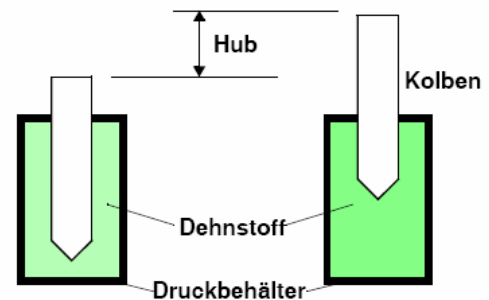
Quelle: <http://www.elektroniknet.de/topics/automatisieren/fachthemen/2003/0007/index.htm>

## Dehnstoffelemente

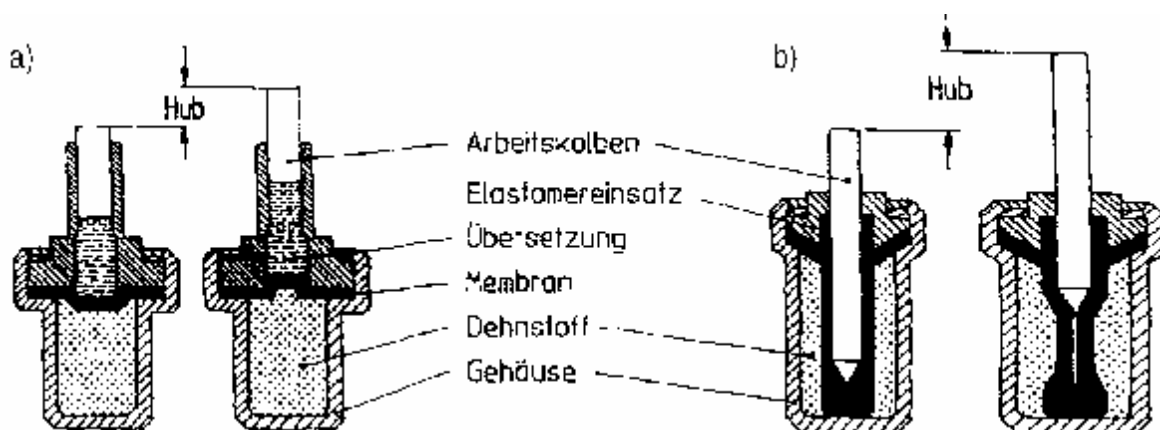
Dehnstoffelemente bestehen aus einem druckfesten Behälter, in dem sich eine Dehnstofffüllung (Wachs) befindet, die bei Erwärmung schmilzt. Die dabei entstehende Volumenzunahme wird auf einen Arbeitskolben übertragen und zur Arbeitsleistung genutzt. Bei Abkühlung wird die Kolbenrückführung durch eine äußere Rückstellfeder bewirkt [2.1, 2.8]. Dehnstoffelemente für Proportionalregelung zeigen im Regelbereich eine lineare Temperatur-Hub-Kennlinie mit geringen Hystereseverlusten (z. B. einige Kelvin). Je nach Elementart wird der Hub im Regelbereich entweder in einem engen Temperaturintervall, z. B. 15 K, durchfahren oder er wird über einen größeren Temperaturbereich von beispielsweise ca. 150 K zurückgelegt. Im letzteren Fall liegt ein geringer Hub pro Temperatureinheit vor. Neben dem Hub im Regelbereich ist noch ein bestimmter Überhub zulässig, wenn die Temperatur über den Regelbereich hinausgeht. Den möglichen Aufbau eines Dehnstoffelementes zeigt folgendes Bild.

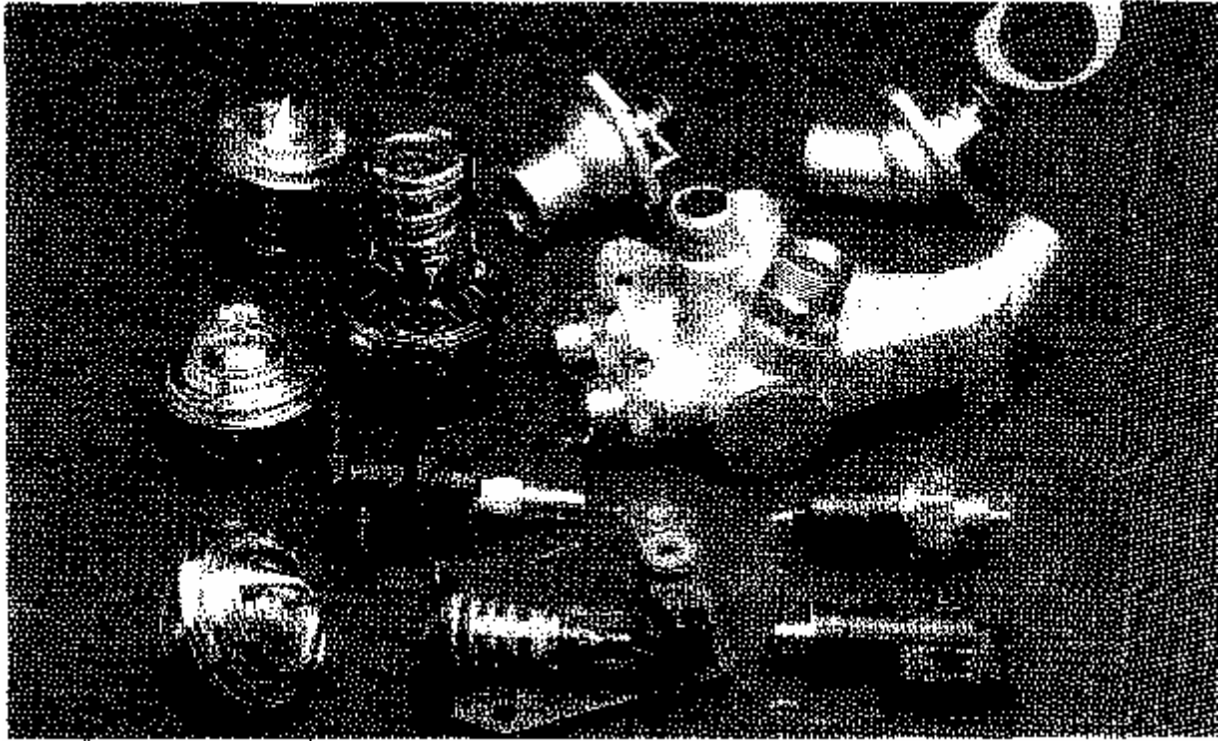
### Dehnstoffelemente

- Aufbau: mit Dehnstoff (Wachs) gefüllter Druckbehälter
- Bei Erwärmung schmilzt der Dehnstoff und nimmt an Volumen zu  
→ Volumenzunahme wird auf einen Kolben übertragen
- Kolbenrückführung bei Abkühlung durch Rückholfeder
- **Dehnstoffe für Proportionalregelung:** lineare Temperatur-Hub-Kennlinie im Regelbereich  
*(kleine und große Regel-Temperaturbereiche möglich [z.B. 15<sup>o</sup> / 150<sup>o</sup>])*
- **Dehnstoffe mit nichtlinearer Temperatur-Hub-Kennlinie:**  
Großteil des Hubs „sprunghaft“ in einem engen Temperaturbereich (z.B. 1<sup>o</sup> .. 2<sup>o</sup>)
- Einsatzbeispiel: Kühl-/Ölkreislauf in KFZ-Motoren



Quelle: <http://www.wags.informatik.uni-kl.de/lehre/ws03-04/ES/Folien.dir/Aktuatoren.pdf> - Vorlesung: Eingebettete Systeme, Bernd Schürmann, TU Kaiserslautern





*Möglicher mechanischer Aufbau eines Dehnstoffelementes. a) Ausführung mit Membran b) Ausführung mit Elastomereinsatz c) Produktbeispiele (nach [2.8], Werkbild: BEHR GmbH, Stuttgart). Quelle: D. J. Jendritza, Technischer Einsatz neuer Aktoren*

Neben der erwähnten Proportionalregelung kann je nach Elementtyp und Anwendung auch eine lineare Temperatur-Hub-Kennlinie erzeugt werden, wobei der überwiegende Teil des Hubes in einem engen Temperaturbereich von beispielsweise 1 bis 2 K nahezu sprungartig erfolgt. Auch bei dieser Kennlinie liegt eine Hysterese vor.

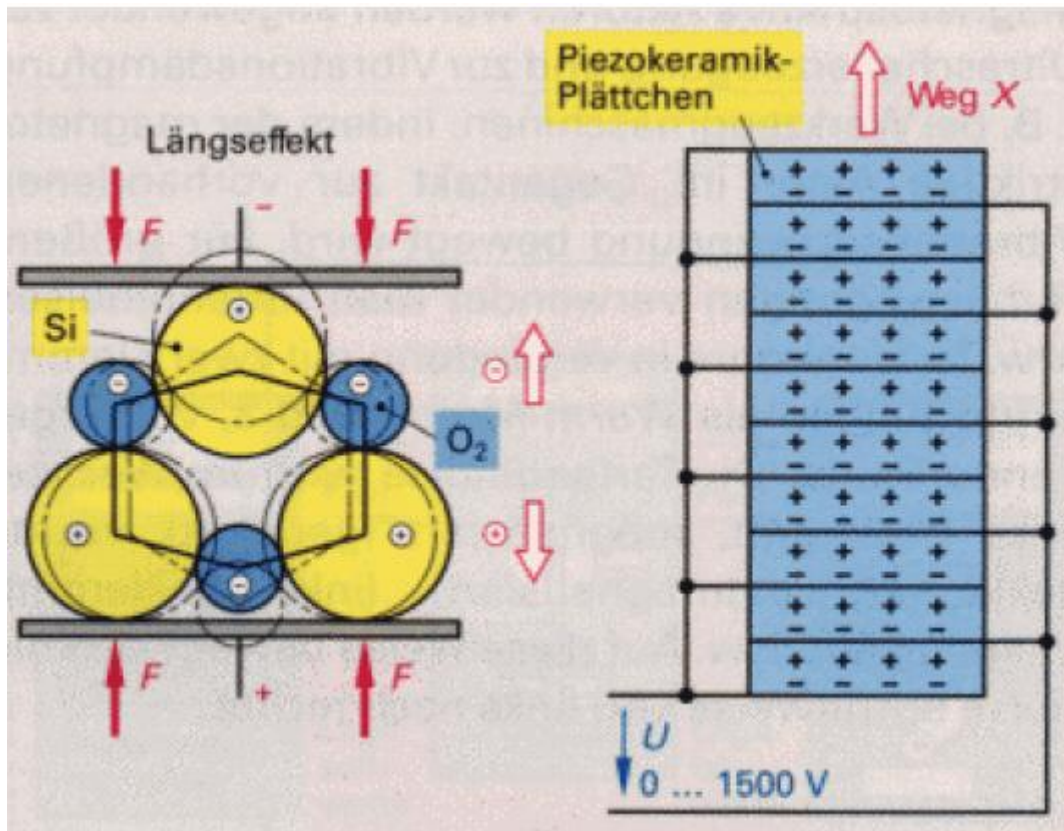
Die Einsatzmöglichkeiten von Dehnstoffelementen erstrecken sich über einen Temperaturbereich von etwa  $-40\text{ °C}$  bis  $+180\text{ °C}$ . Die Temperatur für den Beginn der Hubentfaltung wird durch die verwendete Dehnstofffüllung vorgegeben. Je nach Bauart und -größe können der Hub und die maximale zulässige Belastung in weiten Bereichen variiert werden. Die äußeren Rückstellkräfte für die Kolbenrückführung betragen in der Regel ca. 20 bis 30 % der maximal zulässigen Belastung. Als Beispiele für Abmessungen und Arbeitsvermögen von Dehnstoffelementen sind ausgewählte Daten in Tabelle 2.2 aufgeführt.

Während sich Shape-Memory-Elemente (Kapitel 13) und Thermobimetalle auch direkt durch hindurchfließenden elektrischen Strom erwärmen lassen, können Dehnstoffelemente nur durch das Umgebungsmedium erwärmt werden. Die Arbeitsweise der Dehnstoffelemente ist naturgemäß mit einer erhöhten Trägheit verknüpft. Da der Dehnstoff im erwärmten Zustand flüssig ist, kann ein Ausfließen der Füllung infolge Undichtheit nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden. Die wichtigsten Anwendungen von Dehnstoffelementen liegen im Bereich der Regelemente für Kühl- und Ölkreisläufe von (Kfz-)Motoren sowie für Heizungsventile.

### *Piezoelektrische Stapelaktoren*

Piezoelektrische Wandler besitzen die Fähigkeit sowohl mechanische in elektrische, als auch elektrische in mechanische Größen umzuformen. Diese bidirektionale Wandlungsfähigkeit lässt sich unter anderem für Stellaufgaben nutzen. Die technische Nutzung des Effektes ist dabei nur über den Einsatz geeigneter Piezokeramiken möglich. In

Verbindung mit elektrischen Feldern im kV/m- Bereich lassen sich dann Längenänderungen im  $\mu\text{m}$ -Bereich erzielen. Die Stellbewegung ist dabei über die anliegende Spannung steuerbar. Ihre Ausführung erfolgt in wenigen  $\mu\text{s}$  mit der Möglichkeit hohe Gegenkräfte zu überwinden. Grundsätzlich neue Antriebslösungen sind Wanderwellenmotoren. Diese nutzen die piezoelektrische Längendehnung indirekt zur Erzeugung von Translations- bzw. Rotationsbewegungen.



Prinzip und Aufbau eines Piezoaktors. Quelle: Prof. Dr. W. Höger, Mechatronik, FH München

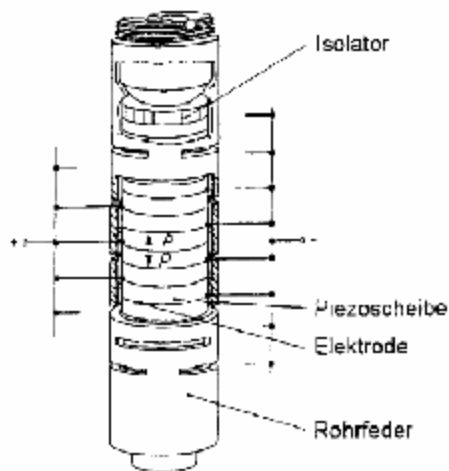
Die Anwendung piezoelektrischer Aktoren sollte unter besonderer Berücksichtigung der thermischen und mechanischen Einsatzbedingungen erfolgen. Die Keramikmasse ist in ihrer Grundform ein sehr dünner, brüchiger Werkstoff, der temperatur- und alterungsabhängige Eigenschaften aufweist. Extreme Beanspruchungen führen daher leicht zu Depolarisationserscheinungen des Materials und damit zu einer Abschwächung des piezoelektrischen Effekts. Außerdem muss beachtet werden, dass thermisch bedingte Längenänderungen bereits in der Größenordnung des Aktorstellbereiches liegen können.

#### Vorteile

- große Stellkräfte bei sehr hoher Stelldynamik
- im statischen Betrieb geringe elektrische Leistungsaufnahme
- gute Verfügbarkeit der Keramikmaterialien
- hohe Leistungsdichte
- praktisch kein Verschleiß

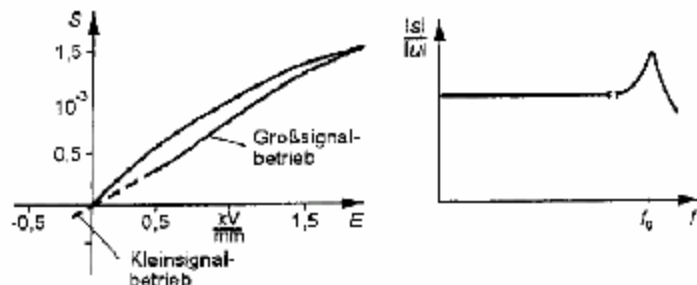
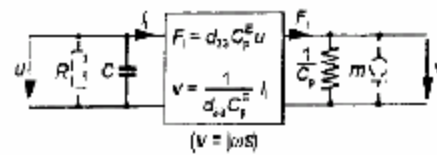
#### Nachteile

- nur sehr kleine Stellbereiche
- starke Erwärmung bei hohen Schaltfrequenzen
- temperatur- und alterungsabhängige Materialeigenschaften
- ggf. Hochspannungsnetzteil zur Ansteuerung notwendig
- Hysterese



a

a) Aufbau



b

b) Elektromechanisches Ersatzschaltbild und Kennlinien

Bauform					
typ. Stellwege	20 .. 200 $\mu\text{m}$	$\leq 2 \text{ mm}$	$\leq 50 \mu\text{m}$	$\leq 1 \text{ mm}$	$\leq 500 \mu\text{m}$
typ. Stellkraft	30.000 N	3.500 N	1.000 N	5 N	40 N
typ. Betriebsspannungen	60 .. 200 V 200 .. 500 V 500 .. 1.000 V	60 .. 200 V 200 .. 500 V 500 .. 1.000 V	60 .. 500 V	10 .. 400 V	10 .. 500 V

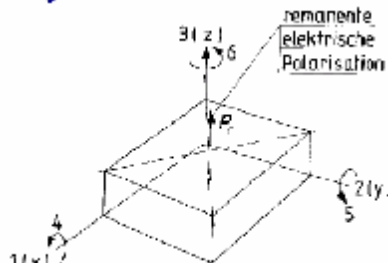
Bauformen. Quelle: [http://www.wags.informatik.uni-kl.de/lehre/ws03-04/ES/Folien\\_dir/Aktuatoren.pdf](http://www.wags.informatik.uni-kl.de/lehre/ws03-04/ES/Folien_dir/Aktuatoren.pdf) - Vorlesung: Eingebettete Systeme, Bernd Schürmann, TU Kaiserslautern

### Größen und Gleichungen

$D = d \cdot T + \epsilon^T \cdot E$   $D$  – elektr. Verschiebungsichte  $d$  piezoelektrische Konstante  $T$  mechanische Spannung  
 $\epsilon$  Dielektrizitätskonstante ( $\epsilon^T = \text{const}$ )  $E$  – elektrische Feldstärke  
 $S = s^E \cdot T + d_i \cdot E$   $S$  mechan. Dehnung  $s$  Elastizitätskonstante ( $s^E = s$  bei  $E = \text{const}$ )

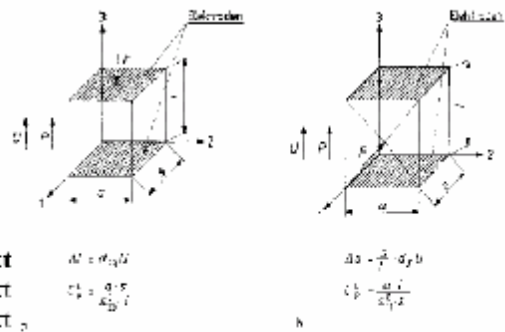
$k_{33} = \frac{d_{33}}{\sqrt{s_{33}^E \cdot \epsilon_{33}^T}}$   $k_{33}$  – Kopplungsfaktor des Longitudinaleffektes

### Physikalischer Effekt



**Achsenrichtungen in Piezomaterialien**  
 Ziffern 4, 5 und 6 kennzeichnen Scherungen an 1, 2 und 3

**Reziproker Piezoeffekt**  
 a) Längseffekt  
 b) Quereffekt



(Quelle: H. Janocha: Aktoren. Grundlagen und Anwendungen, Springer-Verlag Berlin 1992, S. 258, S. 263)

Typische Einsatzgebiete der piezoelektrischen Kristalle sind die mechanische Positionierung z.B. beim Rastertunnelmikroskop, die Formveränderung in adaptiven Strukturen oder die Ventilsteuerung in Dieselmotoren. Industriell eingesetzt werden die Piezo-Aktoren in Dieselmotoren mittlerweile im großen Stil: Die Siemens VDO Automotive AG berichtete auf der Bremer Messe "Aktuator" im Juni 2002, dass in rund 200 000 Motoren der Firmen Peugeot und Ford Einspritzsysteme mit Siemens-Piezo-Elementen arbeiten. Vorteile bieten die Piezo-Injektoren durch ihre kurzen Reaktionszeiten: Der Kraftstoff wird in bis zu sieben Portionen von jeweils  $1,5 \text{ mm}^3$  eingespritzt, im Gegensatz zum "Common Rail"-Verfahren, das global mit Drücken bis zu  $0,16 \text{ MPa}$  ( $1600 \text{ bar}$ ) arbeitet. Der Verbrennungsvorgang lässt sich auf diese Weise präziser steuern und es lassen sich nicht nur die Verbrauchswerte reduzieren, sondern auch mit einem Hitzestoß die Dieselruß-Partikel verbrennen. Siemens VDO setzt als Piezokristalle Blei-Zink-Titan-Keramiken ein, die in mehr als 100 Lagen bis zu einer Länge von  $30 \text{ mm}$  übereinander gestapelt werden; der Hubweg beträgt dann  $0,4 \text{ mm}$ .

Piezoelektrische Aktoren für die aktive Schwingungsdämpfung finden ihre Anwendung heute u.a. in Flugzeugen und Helikoptern. Das Prinzip besteht darin, dass ein Piezokristall durch einen elektronischen Verstärker zum Schwingen angeregt wird; dabei erzeugt der Kristall in enger Kopplung mit der Masse der zu dämpfenden Konstruktion einen definierten zeitlichen Kraftverlauf. Bei gegenphasiger Einleitung dieser Kraft können störende Vibrationen neutralisiert oder vermindert werden (Unterdrückung hochfrequenter mechanischer Vibrationen bei Maschinen). Diese Technik eignet sich besonders gut bei Motoren und Antriebsaggregaten, bei denen mit konstanter Drehzahl gearbeitet wird.

Quelle: [http://www.elektroniknet.de/topics/automatisieren/fachthemen/2003/0007/index\\_b.htm](http://www.elektroniknet.de/topics/automatisieren/fachthemen/2003/0007/index_b.htm)

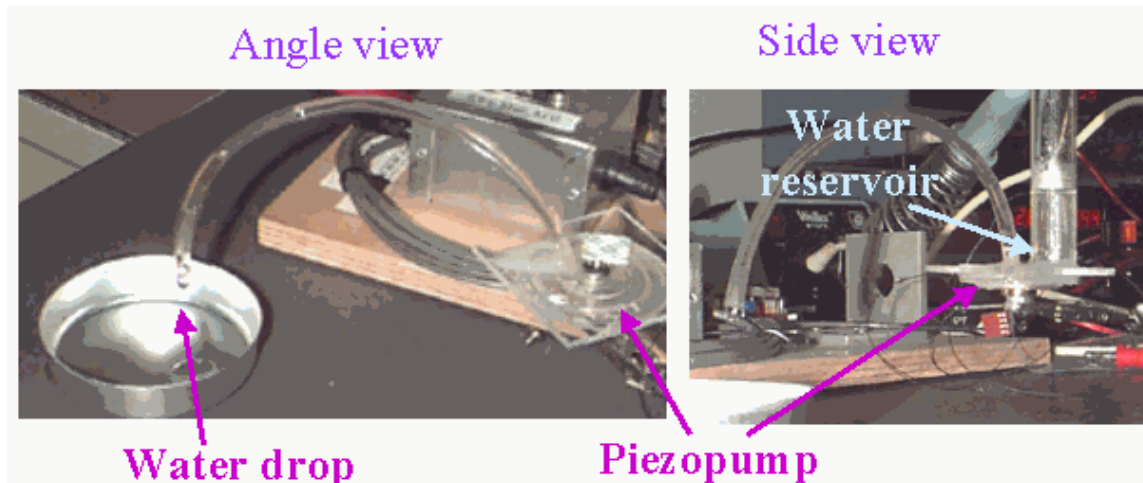
<b>Optik</b>	<b>Medizin / Biologie</b>
Laserabstimmssysteme und -modulatoren Interferometrie, Holografie Positionierung von Lichtleitfasern Adaptive Optik, z. B. Spiegelarrays Spiegelnachführungen und Strahlableitung Röntgen- und Mikrolithografie Autofokus-Systeme	Mikromanipulation von biolog. Material Braille-Aktoren (Blindenlesegeräte) Dosiereinrichtungen, Mikrodüsen Schockwellenerzeugung Nierensteinzertrümmerung  Abscannen von Organen mit Ultraschall Ultraschallschneid- und -reinigungsgeräte
<b>Feinwerktechnik</b>	<b>Maschinenbau</b>
Mikromanipulatoren (Tunnelmikroskopie) Linear- und Rotationsmotoren (Inch-worm, Mikrostoßantriebe, Ultraschall- Wanderwellenmotor) Videokopfnachführung (VCR) Dosiersysteme Antriebe für Tintenstrahl- und Nadeldrucker Adaptronik-Anwendungen Ultraschallerzeuger wie Reinigungsgeräte, Tongeber und Vibrationsförderer Schnelle Einspritzventile (Kl. Motoren) Senkerodier- und Gravieranlagen Schalter, Relais und Klemmverrichtungen	Feinstvorschub in Dreh- und Fräsmaschinen Steuerung von Extrudierdüsen und Gießlinealen zur Folienherstellung und -beschichtung Vibrationsförderer Unrunddrehen, -bohren, -schleifen Schnelle Steuerung von Bremsen, Klemm- mungen und Spannwerkzeugen Nachstellen von Werkzeugen zur Ver- schleißkompensation Aktive Schwingungsdämpfung und Schallkompensation Dynamische Schwingerreger (Shaker)

Auswahl einiger wichtiger Einsatzgebiete für Piezoaktoren. Quelle: Jendritza, Technischer Einsatz neuer Aktoren, S.148

### The NDEAA's piezoelectric peristaltic pump

Quelle: Dr. Yoseph Bar-Cohen and Dr. Zensheu Chang, JPL, Section 354, NASA Webpage





There is a range of NASA experiments, instruments and applications where miniature pumps are needed. To address such needs, a piezoelectrically actuated miniature pump is being developed under a NASA Code S PIDDP task. This pump employs a novel volume displacing mechanism using flexural traveling waves that acts peristaltically and eliminates the need for valves or physically moving parts. This pump is being developed for planetary instruments and space applications. Finite element model was developed using ANSYS for the purpose of prediction of the resonance frequency of the vibrating mode for the piezopump driving stator. The model is used to determine simultaneously the mode shapes that are associated with the various resonance frequencies. This capability is essential for designing the pump size and geometry. To predict and optimize the pump efficiency that is determined by the volume of pumping chambers the model was modified to perform harmonic analysis. Current capability allows for the determination of the effect of such design parameters as pump geometry, construction materials and operating modes on the volume of the chambers that are formed between the peaks and valleys of the waves. Experiments were made using a breadboard of the pump and showed water-pumping rate of about 3.0 cc/min. The pump is continually being modified to enhance the performance and efficiency.

### *Magnetostruktive Aktoren*

Verschiedene ferromagnetische Werkstoffe erfahren unter der Wirkung äußerer Magnetfelder eine Veränderung der Atomabstände. Der wichtigste Anteil der Magnetostruktion ist der 1842 entdeckte Joule- Effekt. Er basiert darauf, dass die sogenannten Weisschen Bezirke sich in die Magnetisierungsrichtung drehen und ihre Grenzen verschieben. Hierdurch erfolgt eine Formänderung des ferromagnetischen Körpers, wobei sein Volumen konstant bleibt. Mit steuerbaren magnetischen Feldstärken lassen sich dadurch Längenänderungen erzeugen (magnetostruktiver Effekt) die bei hochmagnetostruktiven Metalllegierungen 1 - 2 mm pro Meter Materiallänge betragen. Die erzielbaren Stellkräfte sind höher als bei vergleichbaren Piezoaktoren und liegen bei ungefähr 500 N/mm Materialstärke. Magnetostruktive Aktoren befinden sich noch im Entwicklungsstadium. Die Verfügbarkeit der Metalllegierungen ist stark begrenzt und der Werkstoffpreis entsprechend hoch.

Der magnetostruktive Effekt, der bei Legierungen mit den Bestandteilen Eisen, Nickel oder Kobalt Dehnungen im Bereich von 10 bis 30  $\mu\text{m}/\text{m}$  verursacht, erreicht in hochmagnetostruktiven Werkstoffen aus Seltenerdmetall-Eisen-Legierungen Werte bis zu 2000  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Ab Anfang der sechziger Jahre wurden in den USA hochmagnetostruktive Werkstoffe für den Einsatz in Unterwassersonaren entwickelt. Das dort später gefundene Material, Terfenol-D, hat eine vielfach höhere Energiedichte als piezoelektrische Werkstoffe. Terfenol-D ist der Name für die Verbindung  $\text{Tb}_{0,3}\text{Dy}_{0,7}\text{Fe}_2$ . Die beiden ersten

Silben stehen für Terbium und für Ferrum, die dritte erinnert an den Ort der Werkstoff-Entwicklung: Naval Ordnance Laboratory. Das D sagt aus, dass zur Minimierung der Anisotropieenergie das Element Dysprosium benutzt wird.

Quelle: [http://www.lpa.uni-saarland.de/pdf/EMSA\\_2000\\_deutsch.pdf](http://www.lpa.uni-saarland.de/pdf/EMSA_2000_deutsch.pdf)

Die wichtigste technische Ausführung sind magnetostruktive Linearaktoren, die hochpräzise Stellbewegungen über einen maximalen Stellbereich von 50 - 200 µm verrichten und dabei Stellkräfte bis zu 20 kN aufbringen. Der Feldaufbau kann z.B. über eine leistungsfähige Stromsteuerung erfolgen.

### Magnetostruktive Aktuatoren

- magnetostruktive Werkstoffe erfahren Längenänderung im magnetischen Feld  
(Volumen bleibt konstant; vgl. piezoelekt. Effekt)  
Beispiel: Terfenol-D (= **T**erbium-**F**errum-**D**ysprosium [ $Tb_x Dy_{1-x} Fe_y$ ,  $x = 0,27 \dots 0,3$ ;  $y = 1,9 \dots 2,0$ ])  
entwickelt am **N**aval **O**rdnance **L**aboratory)
- **Eigenschaften:**
  - Ausdehnung: typ.  $s = 1,2 \text{ mm/m}$  ( $\Rightarrow$  Promillebereich)
  - sehr hohe Stellgenauigkeit
  - sehr kurze Reaktionszeiten ( $\mu\text{s}$ -Bereich)
  - Koppelfaktor: ca. 3/4 der magn. Energie wird in mechanische Energie umgeformt  
(teilweise aber sehr hohe Verluste im Leistungsverstärker)
- **Unterschiede zu Piezo-Kristallen:**
  - **Vorteile:**
    - Effekt bei höheren Temperaturen (bis ca.  $400^\circ\text{C}$ ) ausnutzbar
    - Dehnungshysterese ist geringer
    - keine bewegte Elektrode
  - **Nachteil:** - ohmsche Verluste durch Magnetisierungsstrom
- **technisches Problem:** Einkoppeln des magnetischen Feldes wegen niedriger Permeabilität von Terfenol-D schwierig.

Quelle: <http://www.wags.informatik.uni-kl.de/lehre/ws03-04/ES/Folien.dir/Aktuatoren.pdf> - Vorlesung: Eingebettete Systeme, Bernd Schürmann, TU Kaiserslautern

#### Vorteile

- große Stellkräfte
- sehr hohe Stelldynamik bzw. Schaltfrequenz
- großer thermischer Einsatzbereich
- robuster Aufbau
- praktisch kein Verschleiß

#### Nachteile

- teure und schlecht verfügbare Werkstoffe
- Hysterese
- elektrische Leistungsaufnahme im statischen Betrieb
- ggf. voluminöser Aufbau
- starke Erwärmung bei hohen Schaltfrequenzen

## Größen und Gleichungen

$$B = d \cdot T + \mu^T \cdot H \quad B - \text{magnetische Induktion}$$

$d$  – magnetostruktive Konstante

$T$  – mechanische Spannung

$\mu^T$  Permeabilität ( $\mu^T = \mu$  bei  $T = \text{const}$ )

$H$  – magnetische Erregung

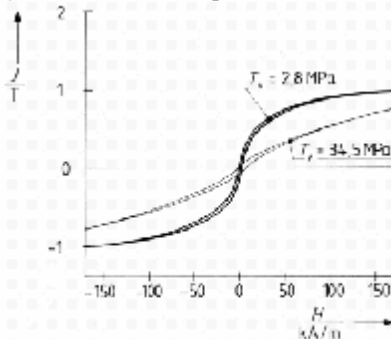
$$S = \frac{\Delta l}{l} = s^H \cdot T + d_T \cdot H \quad S - \text{mech. Dehnung} \quad s - \text{Elastizitätskonstante} \quad (s^H = s \text{ bei } H = \text{const})$$

$l$  – Länge

$\Delta$  – Längenänderung

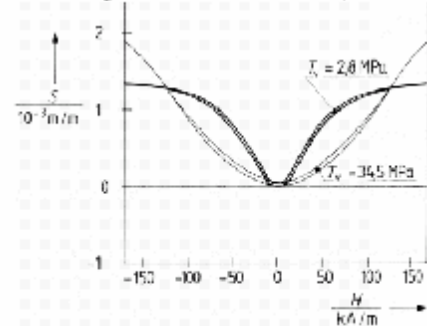
$l$

(Im Unterschied zu piezoelektrischen Größen sind  $d$ ,  $\mu$  und  $s$  skalare Größen es gibt nur den 33-Effekt.)



Kennlinienverläufe für TERFF-NOI-D bei unterschiedlicher mechanischer Vorspannung

© H. Janoch: Aktoren, Springer 1992



## Elektrochemische Aktoren

Elektrochemische Aktoren (ECA) nutzen z.B. den Druckaufbau bei der Abgabe von Gasen wie Wasserstoff, chemomechanische Aktoren (CMA) basieren auf Volumenänderungen bei kontinuierlich oder sprunghaft ablaufende Phasenübergängen.

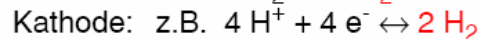
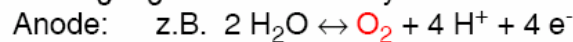
## Elektrochemische Aktuatoren

- elektrochemische Reaktionen durch Übergang von Elektronen bestimmt/gesteuert  
(bisherige Anwendungen: Reinigen von Metallen, Korrosionsschutz)
  - Aktuatorik durch elektrochemische Reaktionen: **Erzeugung/Umsetzung von Gasen**  
(vgl. Elektrolyse)
    - mechan. Arbeit durch Druckaufbau bei Gaserzeugung  
(entspr. pneumatischen Aktuatoren ohne aufwändiges Leitungssystem)
    - Druckabbau bei Umpolung
- Faradaysches Gesetz:** entwickelte Gasmenge ist proportional zur (steuerbaren) Ladungsträgermenge

- drei Reaktionstypen:

### a) Brennstoffzellenreaktion

Gaserzeugung aus der Elektrolyse eines wässrigen Elektrolyten:



### b) Sauerstoffpumpenreaktion

Kathode (Arbeitselektrode):  $O_2 + 2 H_2O + 4 e^- \leftrightarrow 4 OH^-$

Anode (Gegenelektrode):  $4 OH^- \leftrightarrow O_2 + 2 H_2O + 4 e^-$

System einseitig offen: - Arbeitselektrode reduziert Luftsauerstoff

- Anode oxidiert Hydroxidionen zu Sauerstoff

⇒  $O_2$ -Transport aus Umgebung über Flüssigkeit zur Anode (→ im Druckraum)

→ Rückreaktion gibt Sauerstoff wieder an Umgebung ab

### c) Festkörper-Gasreaktion

ähnlich zur Elektrolyse,

wobei sekundäre Gasentwicklung durch Oxidation der Elektrode (z.B. Silber)

ersetzt wird:

Anode:  $Ag + 2 OH^- \leftrightarrow AgO + H_2O + 2 e^-$

Kathode:  $2 e^- + 2 H_2O \leftrightarrow 2 OH^- + H_2$

### • elektrochemische Aktuatoren:

- langsame Reaktion bei niedrigen Spannungen

⇒ **Langzeitanwendungen**, z.B. automatische Schmiermittelförderung

- Brennstoffzellenaktuatoren und Sauerstoffpumpen bisher nur als Prototypen

- Festkörperreaktion: kommerziell u.a. in Einzelraum-Heizungsregelung

→ Ersatz der mechanischen Ventile

### Chemomechanische Aktuatoren

• Umsetzung chemischer Energie in mechanische Arbeit (→ Muskeln);  
elektr. Steuerung des Prozesses : **elektrochemomechanische Aktuatoren**

• Materialien, die chemische in mechanische Energie umwandeln können:

- gummiartige Materialien: schwellen in verdünnter Säure

- vernetzte Collagene: Collagenfasern kontrahieren in einer Salzlösung

- polyelektrolytische Gele: dehnen sich in wässriger Lösung aus

- **leitfähige Polymere:** **Verformung im elektrischen Feld**

- hohe Kräfte (> 100x biolog. Muskelfasern bei gleichem Querschnitt)

- geringe Verformung (ca. 1 .. 10%)

→ nur letztere Reaktionen sind elektrisch steuerbar und daher für Aktuatoren geeignet

(evtl. zukünftige Relevanz bei Mikroaktuatorik/Mikrosystemtechnik)

Quelle: <http://www.wags.informatik.uni-kl.de/lehre/ws03-04/ES/Folien.dir/Aktuatoren.pdf> - Vorlesung: Eingebettete Systeme, Bernd Schürmann, TU Kaiserslautern



Parameter	SK 5/300	SK 16/3000	Einheit
Stellweg $x_{max}$	5	16	mm
Stellkraft $F_{max}$	300	3000	N
Stellzeit $t_s(F_{max})$	150 ( $t_{max}$ )	100 ( $t_{max}$ )	s
Stellgeschw. $v_s(F_{max})$	0.033 ( $t_{max}$ )	0.16 ( $t_{max}$ )	mm/s
Versorgungsspannung $U_B$	12	36	V(DC)
max. Betriebsstrom $I_{max}$	300	1000	mA
Einsatztemperatur	-5 - +60	-5 - +60	°C
Lagertemperatur	-30 - +80	-30 - +80	°C
Gewicht	50	275	g
Lebensdauer	100000	10000	Hübe
Hubstabilität	> 90	> 90	%/h
Volumen	32	170	cm <sup>3</sup>
Mech.Energie/Volumen	47	280	mJ/cm <sup>3</sup>

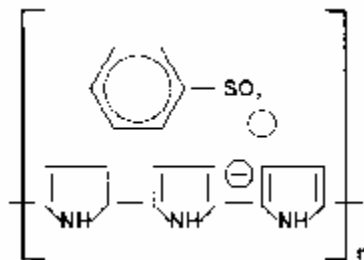
Bauformen der ECA: elektrisch steuerbare Druckquelle bzw. -senke; Dehnung eines metallenen und gasdichten Faltenbalgs, in dem durch den elektrochemischen Prozess Gas erzeugt oder rekombiniert wird. Das Gas als Arbeitsmedium leistet eine Volumenarbeit gegen die auf den Faltenbalg wirkende äußere Kraft. Linke Tabelle: Eigenschaften solcher Faltenbälge. Quelle: Jendritza, Technischer Einsatz neuer Aktoren, S. 383ff.

### Leitfähige Polymere – Electroactive/Electroconductive Polymers

Leitfähige Polymere, eine Klasse von Polymeren, die vor allem in der Sensortechnik zum Einsatz kommt, werden erst seit relativ kurzer Zeit auf ihre Eignung als Aktoren untersucht. Es hat sich dabei gezeigt, daß vor allem p-elektron-konjugierte Polymere, so z. B. Polypyrrol und Polyanilin außerordentlich große Kräfte, etwa das Hundertfache derer biologischer Muskeln vergleichbaren Querschnitts, aufbringen können. Dabei erreichen leitfähige Polymere bei Anregung durch ein elektrisches Feld jedoch deutlich geringere Verformungen (1...10%) als polyelektrolyte Gele, wenn auch bedeutend größere Verformungen als piezoelektrische oder elektrostriktive Wandler.

#### Physikalische Eigenschaften:

Dichte: 1,4 g/cm<sup>3</sup>  
 spez. Gewicht (Folienform): 50 g/m<sup>2</sup>  
 Zugfestigkeit: 85 N/mm<sup>2</sup>  
 Elastizitätsmodulus: 1500 N/mm<sup>2</sup>  
 spez. elektrische Leitfähigkeit: 15 S/mm

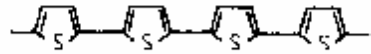


Polypyrrol: Eigenschaften und Struktur.

Polyazetylen



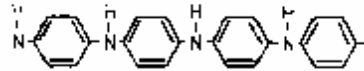
Polythiophen



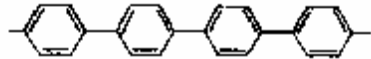
Poly(phenylenvinylen)



Polyanilin

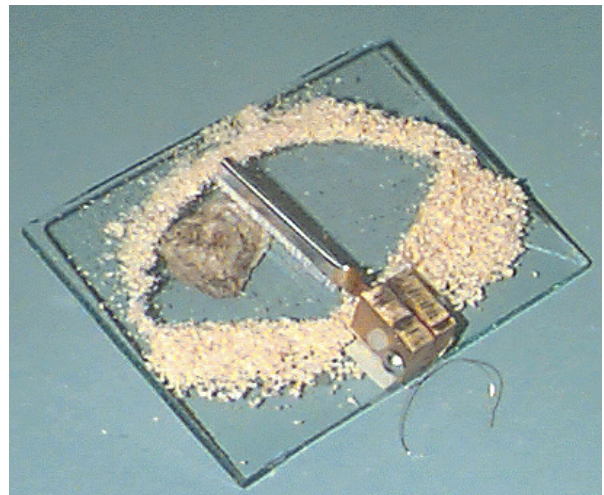
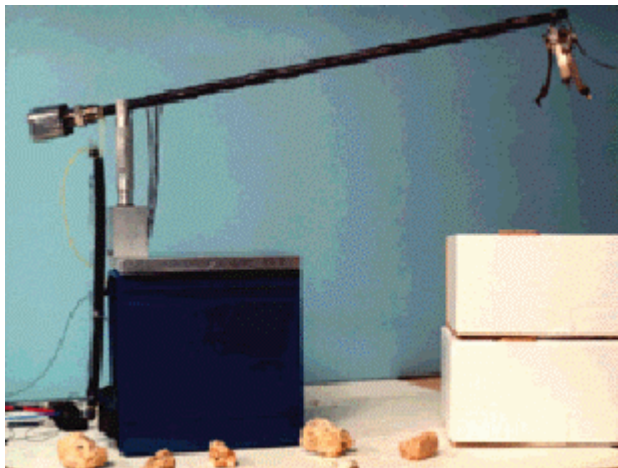


Polyphenylen



Beispiele für weitere leitfähige Polymere. Quelle: Jendritza, Technischer Einsatz neuer Aktoren, S. 398ff.

Electroactive polymers (EAP) are being developed to enable effective, miniature, inexpensive, light and miser actuators for planetary applications. Various EAP materials, also called artificial muscles, are being investigated and new methods of characterizing them are being developed. A series of applications were demonstrated and can be seen on the [EAP-in-Action homepage \(video clippings\)](#). These applications include surface wiper, robotic arm components (lifter and gripper) and haptic interface. The surface wiper was demonstrated to be effective in removing minute dust particles and it was selected in 1999 as a baseline technology for the [MUSES-CN mission](#). Initial plans involved the use of a pair of EAP surface wipers for dust removal from the visual/IR window of the [Nanorover](#). The material that was used for bending the surface wiper is known as IPMC (Ion-exchange Polymer Metal Composite)



Robotic arm with 4-finger EAP gripper that is lifted/dropped by an EAP actuator. The EAP robotic arm with the 4-finger gripper (shown above) was constructed by the graduate students: Cinkiat Abidin, Brian Lucky, Harry Mashhoud and Marlene Turner, under the guidance of Dr. Bar-Cohen. This robotic arm was constructed in FY'97 as the students' research project meeting the academic requirements at the Integrated Manufacturing Engineering (IME) Dep

Dust wiper using an ESLI blade actuated by a bending-EAP Li+/Gold IPMC (courtesy of Dr. Oguro, ONRI)



**Conductive polymers at JPL (produced by Drs. Olazabal and Sansiñena)**

Quelle: NASA webpage

### *Electroactive Polymers as Artificial Muscles*



For many, the idea of a human with bionic muscles immediately conjures up images of science fiction — a superhuman character in a TV series. With bionic muscles, the hero is portrayed with strength and speed far superior to any normal human. As fantastic as that idea may seem, recent developments in electroactive polymers (EAP) may one day make such bionics possible.

Meanwhile, as this technology evolves, novel mechanisms that are biologically inspired are expected to emerge. EAP materials can potentially provide actuation with lifelike response and more flexible configurations. And while further improvements in power and robustness will be necessary, there have been already several reported successes. This lecture will provide an overview of current developments, and discuss future possibilities for EAP technology.

Quelle: <http://www.jpl.nasa.gov/events/lectures/feb02.html>