

50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau
von Makro bis Nano /
Mechanical Engineering
from Macro to Nano**

Proceedings

Fakultät für Maschinenbau /
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Impressum

- Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
- Redaktion: Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten
Andrea Schneider
- Fakultät für Maschinenbau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz,
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß,
Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges,
Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer,
Dipl.-Ing. Silke Stauche
- Redaktionsschluss: 31. August 2005
(CD-Rom-Ausgabe)
- Technische Realisierung: Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau
(CD-Rom-Ausgabe) Dipl.-Ing. Christian Weigel
Dipl.-Ing. Helge Drumm
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
- Technische Realisierung: Universitätsbibliothek Ilmenau
(Online-Ausgabe) [ilmedia](#)
Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau
- Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.
Werner-von-Siemens-Str. 16
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe): 3-932633-98-9 (978-3-932633-98-0)
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-932633-99-7 (978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Dipl.-Ing. M. Kallenbach, Ilmenau

Magnetische Aktoren in Mikrosystemen

ABSTRACT

Magnetische Aktoren werden bisher in Mikrosystemen wenig eingesetzt. Als Ursache werden die ungünstigen Skalierungsverhältnisse, die im Mikrobereich nicht ausgereiften Fertigungstechnologien und der komplizierte Aufbau gegenüber Piezoaktoren und elektrostatischen Aktoren aufgeführt. Der Artikel beschäftigt sich mit dem Entwurf magnetischer Mikroaktoren nach der VDI 2206, wobei die Vorzüge und Nachteile des magnetischen Antriebsprinzips im Mikrobereich aufgezeigt werden. Dafür ist zu untersuchen, wie sich verschiedene neutrale und polarisierte Magnetkreise bei Verkleinerung in den Mikrobereich verhalten. Aus diesen Erkenntnissen werden Richtlinien abgeleitet, die bei der Realisierung von miniaturisierten magnetischen Aktoren im Mikrobereich berücksichtigt werden müssen. Zum Abschluss wird die Konstruktion eines stark miniaturisierten Ventils für Industriepneumatik (2.5 mm Anreihmaß) vorgestellt.

1 EINLEITUNG

Die Entwicklung mikromechanischer Antriebssysteme und deren erfolgreicher Einsatz in verschiedenen Industriebereichen nimmt immer mehr zu. Beispiele sind elektrostatische Spiegelarrays für Beamer, piezoelektrische Einspritzventile und magnetische Mikroaktuatoren zur Ventilsteuerung. Während im Makrobereich magnetische Antriebssysteme dominieren, werden magnetische Mikroantriebe nur in einem verhältnismäßig kleinen Umfang eingesetzt.

Ursachen dafür sind:

- der komplexe Aufbau magnetischer Antriebe aufgrund der Gesetzmäßigkeiten des magnetischen Felds, das als quellenfreies Wirbelfeld besondere Anforderungen an die Gestaltung des magnetischen Kreises stellt,
- die Besonderheiten der Strukturierung von weich- und hartmagnetischen Materialien und die Verkettung der Erregerspulen mit den magnetischen Flüssen,
- die Skalierungsgesetze für Magnetaktoren und
- die starke Abhängigkeit der Stromsteuerbarkeit von der Ankerstellung und der Durchflutung.

2 MECHATRONISCHER ENTWURF AUS SICHT DER MIKROMECHATRONIK

2.1 BESONDERHEITEN UND RESTRIKTIONEN DER MIKROTECHNIK IN DER ENTWICKLUNGSMETHODIK DER MECHATRONIK

Der effektive, methodengestützte Entwurf mechatronischer Systeme ist eine Voraussetzung für die Entwicklung innovativer mechatronischer Produkte. Die Definition und der Ablauf des Entwurfs mechatronischer Systeme wurden in der VDI-Richtlinie 2206 festgelegt [9]. Aus der Sicht des Mikrotechnikers sind eine ganze Reihe von Spezifika beim Entwurf von mikromechatronischen Systemen zu beachten.

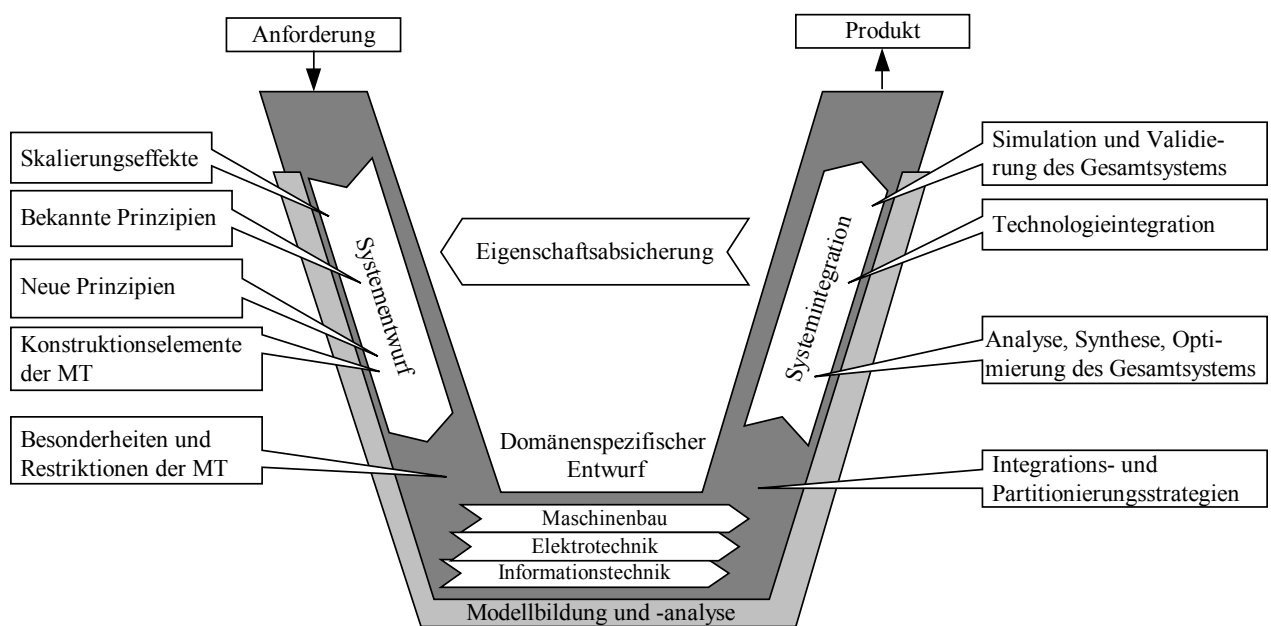


Bild 1 V-Modell für den Entwurf mikromechatronischer Systeme (MT Mikrotechnik).

Funktionsprinzipien im Mikrobereich können generell erarbeitet werden, indem:

- bekannte Funktionsprinzipien aus dem Makrobereich in den Mikrobereich durch Skalierung transferiert werden,
- bekannte Prinzipien genutzt werden, die nur für den Mikrobereich gelten und im Makrobereich keine Rolle spielen wie beispielsweise die Nutzung von thermodynamischen Effekten, die für den Makrobereich oft zu langsam sind, oder
- neue Prinzipien z.B. auf Basis von Funktionsmaterialien erarbeitet werden.

Während des Entwurfs von Systemen wird zum einen der Entwurf auf funktioneller Ebene durchgeführt. Das bedeutet, dass der Übergang von der Funktion zur Struktur so realisiert wird, dass das System die durch die Aufgabenstellung vorgegebenen Funktionen möglichst optimal erfüllen kann. Zum anderen reicht die Struktur des Systems allein nicht aus. Durch die

Konstruktion des Systems erfolgt die Realisierung der erarbeiteten Struktur auf geometrisch-stofflicher Ebene.

Prinzipiell ist auf der funktionellen Ebene die Vorgehensweise für Mikro- und Makrosysteme sehr ähnlich. Jedoch muss gerade im Bezug auf miniaturisierte Systeme die Wirkung physikalischer Gesetzmäßigkeiten unter dem Aspekt der Skalierung betrachtet werden. Im Gegensatz zur geometrisch-stofflichen Ebene sind bei der Betrachtung der funktionellen Ebene Kenntnisse über die Abmaße von Baugruppen nicht notwendig, wohl aber muss die Größenordnung bekannt sein, in welcher Geometrie die Funktion umgesetzt werden soll. Eine starke Skalierung von Systemen kann dazu führen, dass bestimmte Effekte im Mikrobereich besser oder auch schlechter wirken als im Makrobereich oder der physikalische Effekt durch die Skalierung eine völlig neue Qualität erreichen kann. Die Ursache dafür ist im unterschiedlichen Skalierungsverhalten von physikalischen Größen zu sehen. Die Oberfläche eines Körpers skaliert beispielsweise mit der zweiten Potenz, das Volumen hingegen mit der dritten Potenz des Skalierungsfaktors. Daher gewinnen Oberflächeneffekte durch Verkleinerung an Bedeutung während die Wirkung von Volumeneffekten deutlich abnimmt.

Die Effekte, die sich durch die Skalierung ergeben, spielen beim Entwurf eine entscheidende Rolle und werden zu den Besonderheiten der Mikrowelt gezählt, die beim Entwurf wie die Restriktionen beachtet werden müssen. Für die Aktorik gilt insbesondere:

- Massen- und Trägheitseffekte nehmen gegenüber Oberflächeneffekten deutlich ab; Reibungseffekte nehmen zu.
- Verschiedene Antriebsprinzipien skalieren unterschiedlich, je nach dem, ob es sich bei der Energiewandlung um Volumen- oder Oberflächeneffekte handelt.
- Um eine bestimmte Energiemenge in einem Leiter zu transportieren oder in einem Aktor zu wandeln, ist ein minimales Volumen und eine definierte Wandlerstruktur erforderlich.

2.2 SKALIERUNGSGESETZE FÜR MAGNETISCHE AKTOREN

Jedes Energiewandlungsprinzip hat aufgrund des speziellen Wirkprinzips eigene Skalierungsgesetze. Bei der Miniaturisierung von Baugruppen sind folglich diese Gesetzmäßigkeiten genau zu berücksichtigen.

Physikalische Größen skalieren je nach Abhängigkeit von geometrischen Größen unterschiedlich. Aufgrund dessen zeigen auch das elektrische und das magnetische Feld, die zur Krafterzeugung in elektrischen und magnetischen Aktoren genutzt werden, ein unterschiedliches Skalierungsverhalten. Bisher wurden Aktoren oftmals nur aufgrund der erzeugbaren Kraft

verglichen. Das ist jedoch nicht ausreichend, wenn ein optimaler Aktor für den gesuchten Anwendungsfall auszuwählen ist. Entscheidend ist die Magnetarbeit.

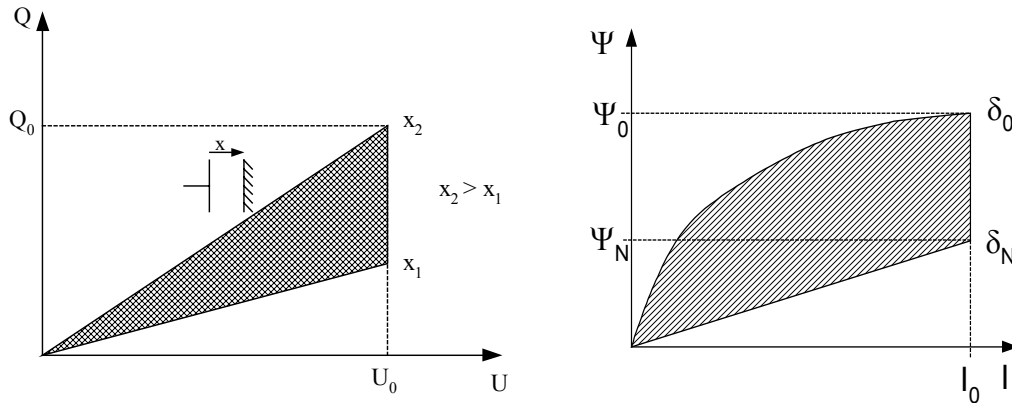


Bild 2 (a) Q-U-Kennlinienfeld eines Plattenkondensators, x Bewegungsordinate, (b) Ψ-I-Kennlinienfeld eines magnetischen Aktors, δ Bewegungsordinate.

Im Folgenden soll das Skalierungsverhalten der im Mikrobereich oft verwendeten elektrostatischen Aktoren mit dem Skalierungsverhalten der magnetischen Aktoren nach dem Reluktanzprinzip verglichen werden. Für die mechanische Arbeit eines elektrostatischen Aktors gilt

$$W_{\text{mech}} = \kappa_e Q_0 U_0, \quad (1)$$

wobei κ_e der elektrische Wirkungsgrad und Q_0 die Ladung bei einer bestimmten (stationären) Spannung U_0 ist. Der elektrostatische Aktor mit dem Dielektrikum Luft zeigt im Gegensatz zum magnetischen Aktor ein lineares Verhalten. Damit folgt unter Einbeziehung des Ausnutzungsgrads k für die Nutzarbeit W_N

$$W_N = \kappa_e k Q_0 U_0 \text{ mit } Q_0 = C U_0. \quad (2)$$

Für die Änderung der Kapazität eines Plattenkondensators bei isometrischer Änderung der Abmessungen gilt

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{x} \propto S^1. \quad (3)$$

Die Kapazität hängt folglich von der ersten Potenz des Skalierungsfaktors ab. Wird der Kondensator auf ein Zehntel der ursprünglichen Größe verkleinert ($S = 0.1$), sinkt die Kapazität ebenfalls auf ein Zehntel.

Für die im Kondensator erzeugte Nutzarbeit erhält man dann

$$W_N = \kappa_e k C U_0^2 \propto S^1 S^2 = S^3. \quad (4)$$

Für die volumenbezogene Nutzarbeit ergibt sich

$$W_{NV} = \frac{W_N}{V} \propto S^0. \quad (5)$$

Die volumenbezogene Nutzarbeit W_{NV} ist folglich unabhängig von der Veränderung der Geometrie. Dabei geht ein, dass die Durchschlagfeldstärke $E = 30 \text{ kV/cm}$ unabhängig von der Skalierung ist, aber nicht die Spannung U , die an den Kondensator maximal angelegt werden kann. Die Spannung skaliert wie der Plattenabstand d mit S^1 . Aus Gleichung (4) lässt sich für die Kraft ableiten

$$F = -\frac{\partial W_N}{\partial x} = -\kappa_e k U_0^2 \frac{dC}{dx} = \kappa_e k U_0^2 \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{x^2} \propto S^2 S^0 = S^2. \quad (6)$$

Beim elektrostatischen Prinzip ändert sich also die Kraft mit S^2 , die Nutzarbeit mit S^3 und die volumenbezogene Nutzarbeit mit S^0 .

Analoge Überlegungen können zum magnetischen Aktor angestellt werden. Für die bei der Ankerbewegung von δ_N bis δ_0 umgewandelte mechanische Energie W_{mech} gilt nach Bild 2(b)

$$W_{\text{mech}} = \kappa_M \Psi_0 I_0, \quad (7)$$

wobei κ_M den magnetischen Wirkungsgrad darstellt. Mit dem Ausnutzungsgrad k , der die Anpassung des Magnetaktors an den Belastungsfall beschreibt

$$k = \frac{W_N}{W_{\text{mech}}} \quad (8)$$

erhält man für die Nutzarbeit W_N bei Gewichtsbelastung

$$W_N = \kappa_M k \Psi_0 I_0, \quad (9)$$

wobei Ψ_0 der verkettete magnetische Fluss bei einem stationären Strom I_0 ist. Berücksichtigt man das nichtlineare Verhalten des magnetischen Materials mit Hilfe der BH-Kennlinie, die durch folgende Funktion approximiert wird, in der B_s die Sättigungsinduktion darstellt

$$B = B_s - \frac{\beta}{H}, \quad (10)$$

wobei β eine Approximationskonstante ist, dann gilt für den geschlossenen Magnetkreis

$$\Psi = w B A_{\text{Fe}} \quad \text{und} \quad \Theta = w I = H_{\text{Fe}} l_{\text{Fe}} = A_w k_{\text{Cu}} J. \quad (11)$$

Damit lässt sich Gleichung (9) wie folgt umformen

$$\frac{W_N}{\kappa_M k} = B_s k_{\text{Cu}} J A_{\text{Fe}} A_w - \beta l_{\text{Fe}} A_{\text{Fe}} \propto C_1 S^4 - C_2 S^3. \quad (12)$$

Die Nutzarbeit von Magnetaktoren nach dem Reluktanzprinzip ändert sich in erster Näherung mit S^4 . Der Überlegung wurde zugrunde gelegt, dass sich die Flächen mit S^2 und l_{Fe} mit S^1

ändern. J , B_s , k_{Cu} , β sowie k und κ_M bleiben hingegen konstant. Für die volumenbezogene Nutzarbeit W_{NV} ergibt sich somit folgende Gleichung

$$W_{NV} = \frac{W_N}{V} \propto C_3 S^1 - C_4. \quad (13)$$

Bei isometrischer Verkleinerung der geometrischen Abmessungen wird W_{NV} kleiner, wenn die Stromdichte J konstant bleibt ($J \propto S^0$).

Von großem Interesse ist nunmehr, wie sich die Nutzarbeit verändert, wenn auch die Stromdichte J skaliert wird. Folgende Fälle, die technisch realisierbar sind, werden zusätzlich betrachtet:

1. die Stromdichte wird so geändert, dass die Erwärmung des Magnetaktors konstant bleibt ($\vartheta_{\ddot{u}} = \text{konst.}$),
2. die Stromdichte ändert sich mit S^{-n} .

Zu Fall 1: Wie aus der Elektrotechnik bekannt, steigt die Stromdichte mit der isometrischen Verkleinerung, wenn die Übertemperatur konstant angenommen wird. Aus

$$\vartheta_{\ddot{u}} = \frac{P_v}{\alpha_G A_o} = \frac{I^2 R}{\alpha_G A_o} = \frac{A_w k_{Cu} J^2 l_m \rho}{\alpha_G A_o} \quad (14)$$

folgt

$$J = \sqrt{\frac{\vartheta_{\ddot{u}} \alpha_G A_o}{A_w k_{Cu} l_m \rho}} \propto \sqrt{\frac{S^0 S^2}{S^2 S^1}} = S^{-\frac{1}{2}}. \quad (15)$$

Zu Fall 2: Für Mikrosysteme gilt, dass sie bei optimaler Auslegung thermisch hoch belastet werden können [7]. Man kann dadurch J auch mit S^{-1} oder sogar S^{-2} skalieren.

Die Ähnlichkeitsuntersuchungen unter verschiedenen Annahmen können mit der Klammernotation von Trimmer übersichtlich in Form eines Skalierungsvektors \mathbf{S} beschrieben werden [3].

Der Vektor der Stromdichteskalierung \mathbf{S}_J wird nun nach der Klammernotation in Gleichung (13) eingesetzt. Daraus ergibt sich ein Skalierungsvektor der volumenbezogenen Nutzarbeit $\mathbf{S}_{W_{NV}}$ mit

$$W_{NV} \propto S^1 \mathbf{S}_J = \mathbf{S}_{W_{NV}} \quad (16)$$

$$\mathbf{S}_{W_{NV}} = S^1 \begin{pmatrix} S^0 \\ S^{-0.5} \\ S^{-1} \\ S^{-2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S^1 \\ S^{0.5} \\ S^0 \\ S^{-1} \end{pmatrix} \triangleq \begin{pmatrix} J = \text{konst.} \\ \vartheta_{\ddot{u}} = \text{konst.} \\ W_{NV} = \text{konst.} \\ W_{NV} \text{ steigt} \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Daraus können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Wird die Stromdichte konstant gehalten, ergibt sich der ungünstigste Fall. Die Skalierung der volumenbezogenen Nutzarbeit erfolgt mit S^1 . Wenn das System auf 1/10 seiner ursprünglichen Größe herunterskaliert wird, dann sinkt die Nutzarbeit auch auf 1/10.

Wird die Stromdichte bei der Skalierung so weit verändert, dass die Temperatur der Spule, die sich infolge der Verlustleistung der Spule einstellt, konstant bleibt, ändert sich die volumenbezogene Nutzarbeit um $S^{0.5}$.

Legt man zugrunde, dass die Wärmeleitung in Erregerspulen von Mikrosystemen sehr gut ist ([2], [6]), kann man die Stromdichte J mit S^{-1} verändern. Dann bleibt die volumenbezogene Nutzarbeit konstant.

Geht man an die physikalischen Grenzen und nutzt aus, dass Mikrosysteme beispielsweise hocheffizient gekühlt bzw. impulsförmig erregt werden können, ist es möglich die Stromdichte noch weiter zu erhöhen. So sind sogar Skalierungen der Stromdichte im Bereich von S^{-2} realisierbar, deren volumenbezogene Nutzarbeit trotz Verkleinerung steigt. In der Literatur wurden bereits Mikroaktoren mit Stromdichten im Bereich von $J = 10 \text{ kA/mm}^2$ beschrieben [2].

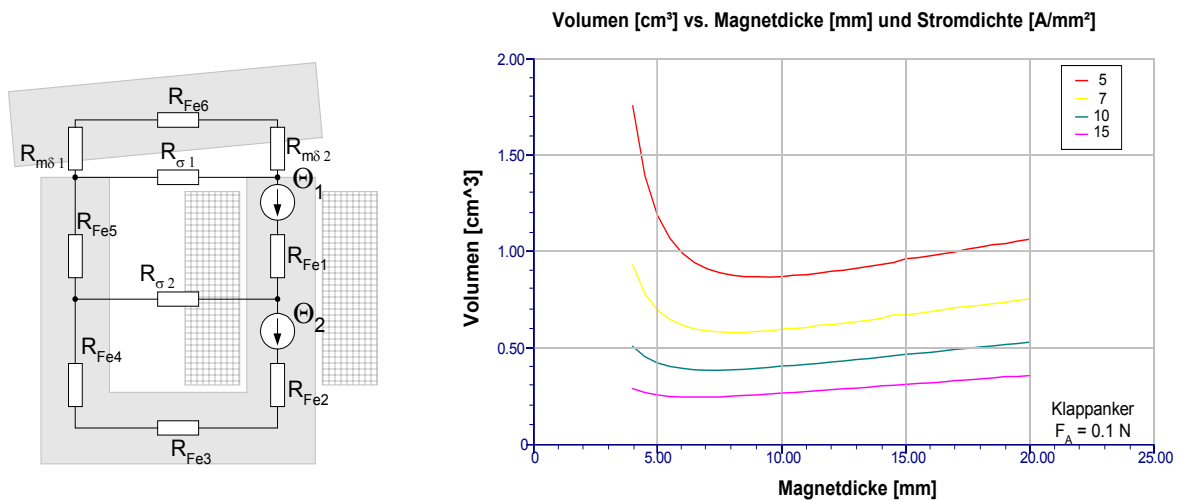
Betrachtet man im Vergleich zu den elektrostatischen Mikroaktoren die volumenbezogene Nutzarbeit eines Magnetaktors und berücksichtigt die Möglichkeit, dass sich die Stromdichte je nach der Dimensionierung mit $S^{-0.5}$ bis S^{-n} ändern kann, können bei einer Skalierung der Stromdichte mit S^{-2} leistungsfähigere magnetische Mikroaktoren aufgebaut werden. Bisher wurden magnetische und elektrostatische Aktoren unter diesem Aspekt nicht untersucht. Der Vergleich zeigt jedoch, dass es sehr günstig ist, magnetische Aktoren im Mikrobereich zu realisieren, wenn man für gute Wärmeleitung sorgt und den Aktor impulsförmig erregt (Aussetzbetrieb).

3 OPTIMIERUNG UND MINIATURISIERUNG MAGNETISCHER MIKROAKTOREN

Im Nachfolgenden soll nun ein stark miniaturisiertes Magnetventil kleiner Leistung für Industripneumatik entworfen werden, wobei der Anker in mindestens einer Position stromlos gehalten werden kann. Das Ventil soll im Vergleich zu bisher entworfenen Mikroventilen eine größere Nennweite ($NW = 0.3 \text{ mm}$) aufweisen und in Verbindung mit der Düsengeometrie einen deutlich größeren Durchsatz zulassen. Bedingt durch den relativ großen Hub und den zu erwartenden Kräften im 1-N-Bereich soll dieses System von einem magnetischen Reluktanzaktor betätigt werden.

Um magnetische Mikroaktoren nach dem Reluktanzprinzip aufzubauen, gibt es aus Sicht des Magnetkreises zwei Möglichkeiten. Der magnetische Kreis kann als neutraler oder polarisierter

Kreis ausgebildet sein. Nach der Bauform unterscheidet man zwischen U-, E- und Topfmagneten. Die polarisierten Manetkreise werden in Reihenkreise, Parallelkreise oder Brückenkreise eingeteilt.



(a) (b)
 Bild 3 (a) Einfaches Netzwerkmodell eines Klappanker-U-Magneten, (b) Abhängigkeit des Magnetvolumens von der Magnetdicke und der Stromdichte. Der zu berechnende Magnet soll bei 1 mm Hub eine Anfangskraft von 0.1 N und eine Haltekraft von 1 N erzeugen, Parameter Stromdichte.

Jeder dieser Magnetkreise weist ein unterschiedlich großes Miniaturisierungspotential auf, welches beim Entwurf berücksichtigt werden muss. Um das Miniaturisierungspotential zu untersuchen, wird die Netzwerkmethod angewandt, welche im Programmsystem SESAM[©] implementiert ist und die es zulässt, eine große Anzahl von Magnetkonfigurationen zu untersuchen und den optimalen Magnetkreis für den gesuchten Anwendungsfall zu ermitteln. In Bild 3(a) ist ein sehr einfaches Netzwerk als Ausgangspunkt für die Untersuchungen am Klappanker-U-Magneten dargestellt.

Es gibt für jeden Anwendungsfall (erforderliche Kräfte, mechanische Nutzarbeit, Hub, Schaltzeiten usw.) einen optimalen Magnetkreis. In Abhängigkeit von der Zielfunktion für die Optimierung lässt sich somit der Magnetkreis bestimmen, der beispielsweise für ein bestimmtes mechanisches Arbeitsvermögen ein minimales Volumen oder die kleinste Verlustleistung aufweist. Dieses Optimum kann erreicht werden, wenn beim Entwurf keine Beschränkungen der geometrischen Parameter vorgegeben werden.

Werden beim Entwurf die geometrischen Parameter eingeschränkt, z. B. durch die Vorgabe eines Maßes wie die Magnetdicke oder durch die Vorgabe eines maximalen Bauraums, kann das globale Optimum nicht mehr erreicht werden. Dieser Zusammenhang ist im Bild 3(b)

dargestellt. Die Grafik zeigt, wie sich das Magnetvolumen bei Vorgabe einer Magnetdicke verändert, während Höhe und Breite des Magneten nicht eingeschränkt sind. Es ergibt sich bei einer Magnetdicke von 8 mm ein Minimum des Volumens von 0.8 cm³ (Stromdichte $J = 5 \text{ A/mm}^2$). Wird die Magnetdicke weiter reduziert, nimmt das Volumen des Magneten wieder deutlich zu, da der Magnetkreis und die Spule immer ungünstiger in dem immer kleiner werdenden Volumen ausfallen. Das Volumen kann daher nur reduziert werden, indem beispielsweise die zulässige Stromdichte erhöht wird.

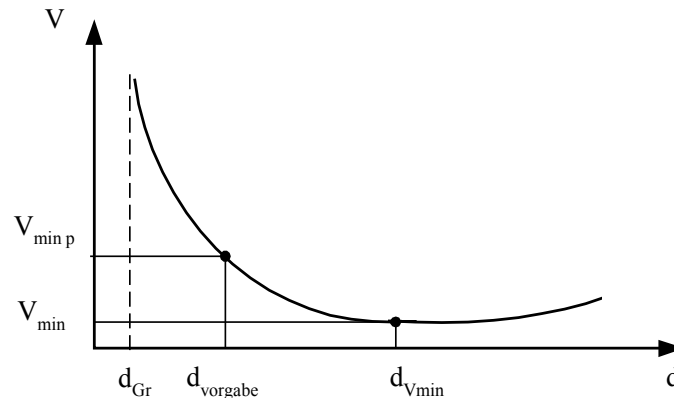


Bild 4 Darstellung des minimalen Magnetvolumens über der Magnetdicke d . Durch Vorgabe von Maßen wird nicht mehr die optimale Lösung gefunden.

Der Zusammenhang von Magnetvolumen und Beschränkung der geometrischen Freiheit beim Entwurf durch Vorgabe der Magnetdicke d ist im Bild 4 dargestellt. Für jedes vorgegebene Magnetvolumen können die Abmessungen eines Magneten bestimmt werden, der die maximale mechanische Arbeit (mechanisches Arbeitsvermögen) erzeugt. In diesem Fall liegt das globale Optimum (d_{vmin}) der Optimierungsrechnung vor.

Wird der Bauraum begrenzt, z. B. durch die Vorgabe der Magnetdicke $d = 4 \text{ mm}$, und ebenfalls der Magnet bestimmt, der bei gegebenem Volumen das Maximum an mechanischer Arbeit erzeugt, kann der Magnet im Vergleich zur Variante, bei der der Bauraum nicht beschränkt worden ist, nur eine geringere Arbeit bereitstellen. Es wird nur ein lokales Optimum erreicht.

Dieser Zusammenhang lässt sich sehr gut im Bild 5 erkennen [1]. Die Kennlinien der Magnete mit vorgegebener Magnetdicke liegen daher unter den Kennlinien der Magnete mit freier Gestaltung.

Das Bild 5 zeigt die mechanische Nutzenergie verschiedener optimierter, neutraler Magnetkreise in Abhängigkeit vom Magnetvolumen. Die Untersuchungen wurden an einem Klappanker-U-Magneten mit einer und mit zwei Spulen sowie an einem Klappanker-E-Magneten mit einer Spule durchgeführt [1]. Es zeigt sich, dass der E-Magnet die größte Magnetarbeit erzeugt. Auch der U-Magnet mit zwei Spulen, eine über jedem Joch, fällt günstiger aus, als der U-Magnet mit

einer Spule, da sich bei der Zweispulenlösung ein besseres Kupfer-Eisen-Verhältnis einstellen kann.

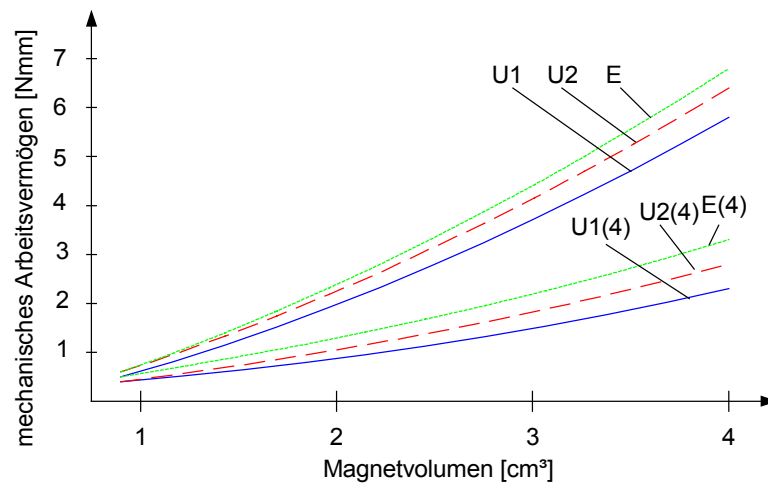


Bild 5 Mechanisches Arbeitsvermögen eines neutralen Klappanker-U-Magneten mit einer und mit zwei Spulen (U1, U2) und eines E-Magneten mit einer Spule (E) in zwei Varianten: Bauraum nicht eingeschränkt und eingeschränkter Bauraum durch die Vorgabe der Magnetdicke von 4 mm.

Betrachtet man unter den bisher aufgeführten Aspekten die Skalierung der neutralen Magnetkreise, kann festgestellt werden, dass durch die Verkleinerung die Nutzarbeit erwartungsgemäß stark sinkt. Eine Beschränkung des Bauraums z. B. durch die Vorgabe eines Anreihmaßes von Ventilen zur Konstruktion einer Ventilbatterie hat ebenfalls sehr starke Auswirkungen und führt meist dazu, dass aus dem Volumen nicht das mögliche Maximum an mechanischer Arbeit gewonnen werden kann.

4 MINIATURISIERUNG POLARISierter MAGNETKREISE

Polarisierte Kreise haben den Vorteil, dass der für die Krafterzeugung benötigte Fluss nur noch anteilig von der Spule erzeugt werden muss, da sich durch den Dauermagneten bereits ein flusserzeugendes Element im Eisenkreis befindet.

Bei einem polarisierten magnetischen Reihenkreis überlagern sich im Anzugsfall der Fluss des Dauermagneten und der Fluss der Spule. Um einen Abfall des Ankers hervorzurufen, muss der Spulenfluss den Fluss des Dauermagneten schwächen, damit die Rückstellfeder den Anker in die Anfangsposition zurückbewegen kann. In diesem Fall ist ein relativ großer Spulenfluss erforderlich.

Beim polarisierten Parallelkreis und Brückenkreis wird die Magnetkraft fast vollständig durch den Dauermagnetfluss erzeugt, der durch den Spulenfluss geschaltet werden kann. Derartige Magnetkreise können sehr stark verkleinert werden, weisen somit ein großes Miniaturisierungspotential auf und sind für stark miniaturisierte Systeme sehr interessant [5].

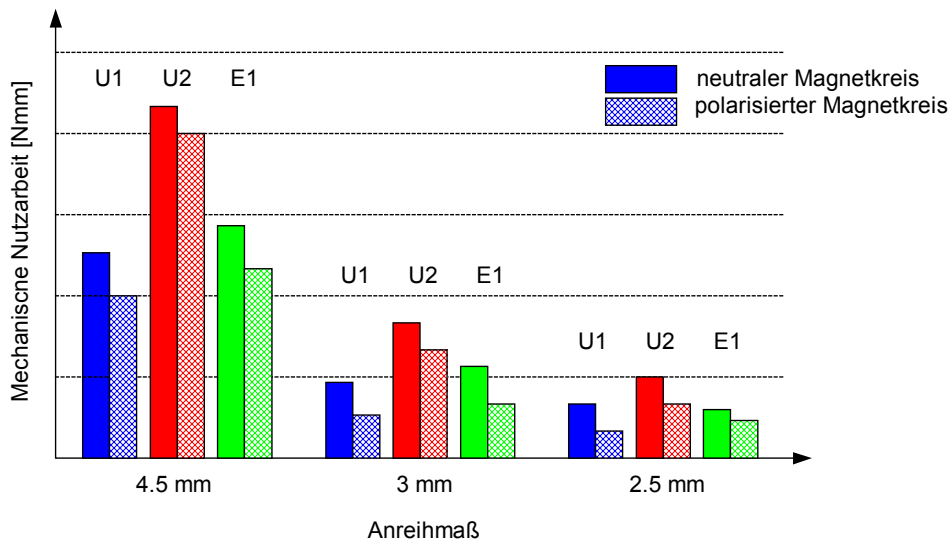


Bild 6 Nutzbares mechanisches Arbeitsvermögen von neutralen und polarisierten U und E-Kreisen mit einer und zwei Spulen in Abhängigkeit vom Anreihmaß [1].

Umfangreiche Untersuchungen zu polarisierten Magnetkreisen wurden in [1] und [6] vorgenommen. Es konnte gezeigt werden, dass mit polarisierten Magnetkreisen eine deutlich höhere Nutzarbeit umgesetzt werden kann als mit neutralen Kreisen. In Bild 6 ist die mechanische Nutzarbeit verschiedener neutraler und polarisierter Kreise (U-Magnet mit einer und zwei Spulen, E-Magnet mit einer Spule) bei gleicher Magnethöhe und Magnettiefe aber unterschiedlich vorgegebenen Anreihmaßen dargestellt. Das bedeutet aus Sicht des notwendigen Bauraums für den magnetischen Mikroaktor, dass es von Vorteil ist, polarisierte Magnetkreise zu verwenden und dass bei gleicher Nutzarbeit polarisierte Kreise kleiner als neutrale Kreise sind.

5 REALISIERUNG EINES MINIATUR-MAGNETVENTILS FÜR INDUSTRIEPNEUMATIK

In Bild 7 ist der prinzipielle Aufbau eines Magnetventils mit polarisiertem Parallelkreis dargestellt [8]. Dabei wurde der Parallelkreis zweimal aufgebaut, um den Anker durch einen kurzen Impuls von einer in die andere Endlage zu bewegen. In beiden Endlagen wird der Anker durch die durch den Dauermagnetfluss generierten Kräfte stromlos gehalten.

Im Normalfall benötigt man bei magnetischen Aktoren nach dem Reluktanzprinzip eine Rückstellfeder, um den Anker in die Hubanfangsposition zurückzustellen. Das muss beim Entwurf berücksichtigt werden, da der Aktor die gewünschte Hubarbeit und die Arbeit zur Überwindung der Rückstellfeder aufbringen muss. Wird der Aktor als Umkehrhubaktor konstruiert, so kann das Antriebssystem deutlich verkleinert werden [5].

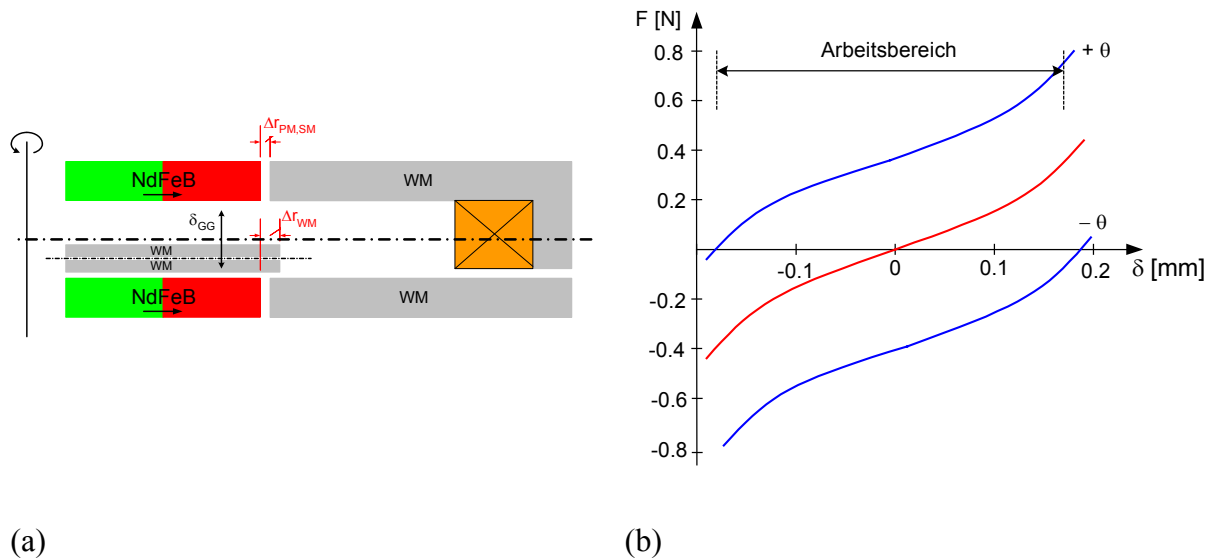


Bild 7 (a) Prinzipieller Aufbau eines Magnetventils mit polarisiertem Parallelkreis, (b) Magnetkraft-Hub-Kennlinien bei -200 , 0 und 200 A. Es ergibt sich ein maximaler Arbeitsbereich von mehr als 0.3 mm [8].

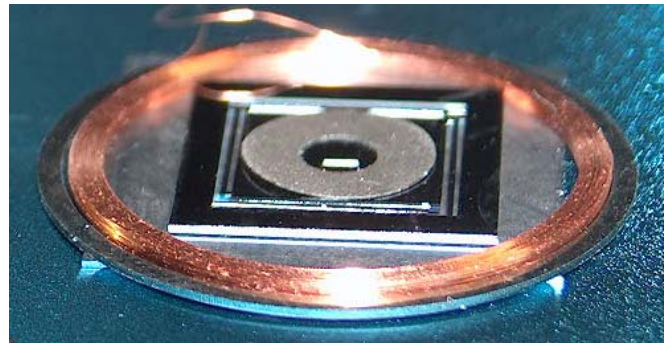
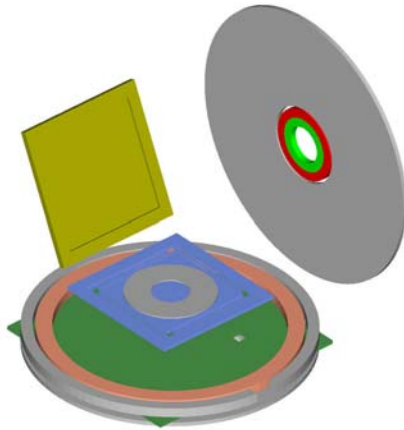
Das Ventilelement ist aufgrund der Verfügbarkeit aus mikrotechnischen Bauteilen aus Silizium aufgebaut, die durch Ätztechnologien realisiert wurden. Ein Einsatz von Bauteilen, die mit Hilfe anderer Mikrotechnologien hergestellt worden sind, wie beispielsweise Prägetechnologien, ist denkbar.

Aufgrund der benötigten Kräfte und dem durch das vorgegebene Anreihmaß stark eingeschränkten Bauraum wurden für die Herstellung der magnetischen Baugruppen klassische Materialien und Technologien verwendet. Auf mögliche Mikrotechnologien und auf Dünnschichttechnologien wurde verzichtet, da mit klassischen Materialien wesentlich bessere magnetische Parameter zu erreichen sind [5].

Die weichmagnetischen Teile bestehen aus Vacuflux und wurden mit Hilfe von Lasertechnologien ausgeschnitten. Die hartmagnetischen Teile bestehen aus NdFeB und wurden ebenfalls mit Lasertechnologie hergestellt.

Die Spulen wurden kernlos gewickelt. Eine Ausführung als Dickschichtspule auf Keramik oder als Siliziumplanarspule benötigt aufgrund des schlechteren Kupferfüllfaktors mehr Bauraum und ist daher ungünstig.

Mit diesem Ventil können Drücke bis 10 bar bei einer Nennweite von 0.3 mm geschaltet werden. Im Vergleich zu bisher realisierten Mikroventilen konnte mit Hilfe des mechanischen Entwurfs eine Konstruktion realisiert werden, die bisherigen Mikroventilen an erreichbarer Nennweite und erreichbarem Druckbereich überlegen ist.



(a)

(b)

Bild 8 (a) Explosionszeichnung des Ventils [8], (b) Blick in den realisierten Aufbau mit weichmagnetischen Teilen, mikrotechnischem Ventilelement und Spule. (Der Aufbau des abgebildeten Funktionsmusters wurde aus Gründen der Verfügbarkeit und der technologischen Erfahrung in Silizium hergestellt. Eine Realisierung in anderen Technologien wird z. Z. vorgenommen.)

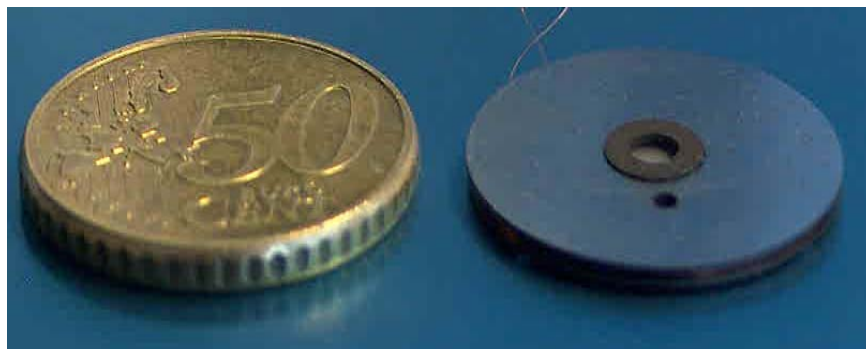


Bild 9 Größenvergleich des Industripneumatikventils mit 2.5 mm Anreihmaß für 10 bar mit einer Nennweite von 0.3 mm.

6 ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag werden Grundlagen für den Entwurf von magnetischen Aktoren in Mikrosystemen unter dem Aspekt der Skalierung, der optimalen Energie- und Bauraumausnutzung dargestellt. Ein Vergleich der Skalierungsgesetzmäßigkeiten von elektrostatischen und elektromagnetischen Aktoren unter dem Aspekt der volumenbezogenen Nutzarbeit zeigt, dass es sinnvoll ist, im Mikrobereich magnetische Mikroaktoren trotz der unbestritten aufwendigeren Konstruktion zu realisieren, da aufgrund der vielfältigen Skalierungsmöglichkeiten der Stromdichte sehr leistungsfähige magnetische Mikroaktoren aufgebaut werden können. Dass die Magnetkreisgrundformen bei Verkleinerung unterschiedlich skalieren, muss beim Entwurf beachtet werden. Vor allem Einschränkungen durch Vorgabe von Abmessungen z. B. durch die Vorgabe eines Anreihmaßes, ist beim Entwurf ungünstig und führt nicht zu einer optimalen Lösung. Polarisierter Magnetkreise weisen ein größeres Miniaturisierungspotential auf als neutrale Kreise. Es ist daher günstig, in stark miniaturisierten Systemen polarisierte Magnetkreise einzusetzen.

Am Ende des Beitrags wird die Konstruktion eines neuartigen Miniaturventils für Industriepneumatik als polarisierter Parallelkreis nach dem Umkehrhubprinzip vorgestellt. Trotz kleiner Abmaße ist das Ventil in der Lage, bei einer Nennweite von 0.3 mm einen Druck von 10 bar zu schalten und in beiden Endlagen den Anker stromlos zu halten. Die Realisierung des Funktionsmusters erfolgte durch den Einsatz von Mikro- und Feinwerktechnologien. Der Lösungsansatz für dieses Ventils eröffnet einen neuen Weg zur Konstruktion leistungsfähiger, miniaturisierter Ventile.

Literatur- bzw. Quellhinweise

- [1] Bußinger, F.: Entwicklung eines stark miniaturisierten, polarisierten Magnetventils mit vorgegebenen Anreihmaß. Diplomarbeit, FG Mikrotechnik, Fak. f. Maschinenbau, TU Ilmenau, 2005
- [2] Frank, T.: Untersuchungen zum Einsatz magnetischer Mikroaktuatoren. Dissertation, TU Ilmenau, 2002
- [3] Gad-el-Hak, M. (ed.): The MEMS handbook. CRC Press LLC, 2002. ISBN 0-8493-0077-0
- [4] Kallenbach, M.: Kapitel 10 Magnetische Mikroaktuatoren. In Kallenbach, E. (Hrsg): Elektromagnete. Teubner Verlag Stuttgart, 2003
- [5] Kallenbach, M.: Entwurf von magnetischen Mini- und Mikroaktoren mit stark nichtlinearem Magnetkreis. Forschungsbericht (unveröffentlicht), TU Ilmenau, 2004
- [6] Kallenbach, M.; Wurmus, H.; Albrecht, A.; Frank, T.; Kallenbach, E.: State and Trends in the Development of Magnetic Microactuators. VDI microtec-Tagung, Proceedings, Hannover, Okt. 2000
- [7] Pagel, L.: Mikrosysteme. J. Schlembach Fachverlag, Weil der Stadt, 2001
- [8] Schröter, B.: Entwurf und Umsetzung eines Mikroventils mit magnetischem Antrieb. Diplomarbeit, FG Mikrotechnik, Fak. f. Maschinenbau, TU Ilmenau, 2005
- [9] VDI-Richtlinie 2206, VDI Verlag 2004

Autorenabgaben

Dipl.-Ing. Matthias Kallenbach
TU Ilmenau, PF 100565
D-98684 Ilmenau
Tel: (49) 03677 693424
Fax: (49) 03677 693360
E-Mail: mk@mkalle.com