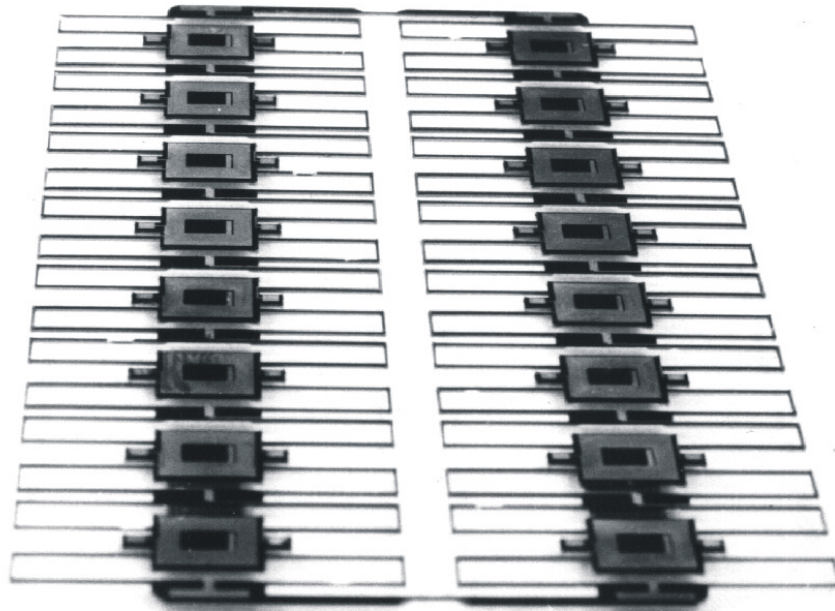


Thomas Frank

Untersuchungen zum Einsatz elektromagnetischer Mikroaktoren



Ilmenau 2003

Untersuchungen zum Einsatz elektromagnetischer Mikroaktoren

von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität
genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
(Dr. -Ing.)

Dipl. -Ing. Thomas Frank
Hannover

Tag der wissenschaftlichen Aussprache
26. Juni 2002

Gutachter: 1. Prof. Dr. -Ing. habil. H. Wurmus
2. Prof. Dr. -Ing. habil. E. Kallenbach
3. Prof. Dr.-Ing. N. Schwesinger

Ver.-Nr.: MB-59

Thomas Frank

**Untersuchungen zum Einsatz elektromagnetischer
Mikroaktoren**

Ilmenau 2003

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meines Promotionsstudiums und meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Mikrosystemtechnik der Technischen Universität Ilmenau in der Zeit vom April 1997 bis November 2000.

Sehr herzlich möchte ich mich beim Leiter des Fachgebiets Herrn Prof. Dr. -Ing. habil. H. Wurmus für die Betreuung dieser Arbeit, sowie die großzügigen Förderungen und die wertvollen Anregungen bedanken.

Darüber hinaus richtet sich mein Dank an:

- Herrn Prof. Dr. -Ing. habil. E. Kallenbach, dem Leiter des Instituts für Mikrosystemtechnik, Mechatronik und Mechanik, für die wissenschaftlichen Anregungen.
- Herrn Dipl. -Ing. L. Dressler aus dem Fachgebiet Mikrosystemtechnik für den Bau vielfältiger elektronischer Steuergeräte,
- Herrn Dr. rer. nat. C. Schilling aus dem Fachgebiet Mikrosystemtechnik für die konstruktive Diskussion über die Einsatzgebiete und die Vorteile kaskadierter Mikroaktoren,
- die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Fachgebiets Mikrosystemtechnik der TU-Ilmenau für die vielfältige und umfangreiche Unterstützung dieser Arbeit.

Ilmenau, November 2000

Thomas Frank

Inhaltsverzeichnis

VERZEICHNIS VERWENDETER SYMBOLE.....	III
1 EINLEITUNG	1
1.1 Stand der Technik	3
1.1.1 Überblick über realisierte Mikroaktoren	3
1.1.2 Vergleich von Antriebsprinzipien.....	10
1.2 Ableitung der Aufgabenstellung	11
2 VERGLEICH VERSCHIEDENER ENERGIEWANDLUNGSPRINZIPIEN.....	13
2.1 Bestimmung der stationären Betriebskennlinie	13
2.1.1 Ableiten eines Modells zur Ermittlung von stationären Betriebskennlinien.....	13
2.1.2 Elektrodynamische Energiewandlung	16
2.1.3 Elektro-magneto-mechanische Energiewandlung	18
2.1.4 Elektrostatische Energiewandlung.....	22
2.2 Bewertung der Antriebsprinzipien.....	26
2.2.1 Die stationären Betriebskennlinien.....	26
2.2.2 Begrenzungen	28
2.2.3 Mögliche Leistungsbereiche.....	29
2.3 Anpassung der Antriebe an die benötigten Betriebsparameter.....	31
2.3.1 Elektrodynamische Antriebe.....	33
2.3.2 Elektro-magneto-mechanische Antriebe.....	37
2.3.3 Anpassung elektrostatischer Antriebe	37
2.3.4 Skalierungsverhalten.....	37
2.4 Zusammenfassender Vergleich der Antriebsprinzipien.....	38
3 ANWENDUNGEN UND AUFBAU DER MIKROANTRIEBE	41
3.1 Anwendungsfelder und Einteilung von Mikroaktoren.....	41
3.2 Allgemeiner Aufbau magnetischer Mikroantriebe.....	44
3.2.1 Führungen und Lager.....	45
3.2.2 Felderzeugung.....	49
3.3 Ermittlung des Arbeitspunktes bei periodischen Bewegungen.....	50
3.3.1 Einfaches Modell federgeführter Antriebe	50
3.3.2 Benötigte Kraft-Zeit-Funktion und der Leistungsumsatz der Schwingung.....	52
3.3.3 Betriebsfälle und Wirkungsgrad des schwingenden Systems.....	54
3.4 Möglichkeiten zur Erhöhung des Wirkungsgrades durch Nutzung der Blindleistung... 58	
3.4.1 Mechanische Maßnahmen zur Verminderung der Blindleistung	59
3.4.2 Elektrische Zwischenspeicherung der Blindleistung.....	59
4 HERSTELLUNG VON ELEKTRODYNAMISCHEN MIKROAKTOREN	63
4.1 Herstellung des Magnetkreises	63
4.1.1 Dünne hartmagnetische Nd/Fe/B - Schichten.....	64
4.1.2 Galvanische Abscheidung weichmagnetischer Ni/Fe-Legierungen.....	64
4.2 Die Herstellung der Strompfade	67
4.2.1 Verfahren zur Herstellung der Hauptebene	68
4.2.2 Herstellung der Kontaktierungsebenen.....	75
4.2.3 Einseitig strukturierte Substrate.....	81
4.3 Bewertung	84
4.4 Realisierung der Führung.....	84

5 BEISPIELE FÜR ELEKTRODYNAMISCHE MIKROAKTOREN	87
5.1 Wechselsinnige Bewegungen mit Rast	87
5.1.1 Erzeugung von getrennt steuerbaren Antriebskräften für zwei Koordinatenrichtungen	87
5.1.2 Aufbau eines Aktors mit bewegtem Magneten.....	89
5.1.3 Antriebe mit bewegten Strompfaden.....	93
5.1.4 Energetische Betrachtung	95
5.1.5 Bestimmung der umgesetzten Leistung.....	99
5.2 Dynamischer Betriebsfall.....	102
5.2.1 Ausführungsbeispiel eines kaskadierten Scanners	106
5.2.2 Dynamische Messungen	108
5.2.3 Energetische Betrachtung	110
5.3 Kaskadierte elektrodynamische Antriebe.....	110
5.3.1 Ausführungsbeispiel	114
6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	117
7 LITERATUR	120

Verzeichnis verwendeter Symbole

A	Fläche, Polfläche	l_{Feder}	Federlänge
$Area$	Querschnittsfläche	m	Masse
B	magnetischen Induktion	M_A	Anzugsmoment
b	Breite	M_r	magnetisches Moment bei $H = 0$
$(BH)_{max}$	Energieprodukt (Permanentmagnet)	M_s	magnetisches Sättigungsmoment
BH_C	koerzitive Feldstärke im B-Feld	n	Faktor
$B_n(r)$	Feldlinien	n_F	Multiplikator für die Länge der Torsionsfeder
B_r	Remanenzinduktionen	n_S	Multiplikator für den Spiegeldurchmesser
C	elektrische Kapazität	Ω	Kreisfrequenz
c	mechanische Steifigkeit	ω	Winkelgeschwindigkeit
d	magnetostriktive Modul,	ω_0	Eigenkreisfrequenz
d	Dämpfungskonstante	π	Kreiszahl
D	Durchmesser	P_2, P_1	Arbeitspunkt
δ	Luftspalt, Polabstand	P_B	Blindleistung
d_t	piezoelektrischer Spannungsmodul	P_{el}	elektrische Leistung
d_t	piezoelektrischer Spannungsmodul	P_{mech}	mechanischer Leistung
E	elektrischen Feldstärke	$P_{n.mech}$	nicht-mechanische Leistung
ε_0	elektrischen Feldkonstanten	P_W	Wirkleistung
F	Kraft	R	elektrischer Widerstand
f	Gelenkfreiheitsgrad.	r	Radius
$f\phi,$	Drehrichtung	R_m	elektrischer Motorwiderstand
$f(t)$	Funkton der Zeit	R_{ml}	magnetischen Widerstand
F_a	Anzugskraft	S	Dehnung
F_g	Gegenkraft	s_b	Weg in Bewegungsrichtung
F_G	Gewichtskraft	s^E	mechanische Nachgiebigkeit bei konstanter elektrischer Feldstärke
f_h	Hebelarm der Rollreibung	s^H	mechanische Nachgiebigkeit bei konstanter magnetischer Feldstärke
F_m	Motorkraft	s_s	Bewegung in der gesperrten Richtung
F_N	Normalkraft	T	mechanische Spannung
F_R	die Rollreibungskraft	T_C	CURIE-Temperatur
F_T	Tangentialkraft	t	Zeit
F_{xn}	Nebenkomponenten der Kraft F_x	Ψ	Verketteter magnetischer Fluß
F_{yn}	Nebenkomponenten der Kraft F_y	$\tau_{t,zul}$	zulässige Torsionsspannung
$f_{z,qzul}$	zulässiger Drehwinkel	U	elektrische Spannung
G	Schubmodul	U_C	elektrische Spannung am Kondensator
γ	Drehrichtung	U_{ind}	induzierten Spannung
H	magnetischen Feldstärke	v	Geschwindigkeit
h	Tiefe, Höhe	V	Volumen
η	Drehrichtung	v_0	Leerlaufgeschwindigkeit
$\eta.$	Wirkungsgrad	Vol	Volumen
η_B	Wirkungsgrad für Blindleistung	W	Arbeit
H_c	Koerzitivfeldstärke	w	Anzahl der Windungen
h_{mag}	Höhe in Richtung der Magnetisierung	W_{em}	magnetischen Feld gespeicherten Energie
η_W	Wirkungsgrad für Wirkleistung	W_m	mechanische Energie
I	elektrische Stromstärke	x	Weg, Dimensionslose Richtung
i	elektrischer Strom zeitvariabel	y	Bewegungsrichtung
$I_a.$	elektrischer Anzugsstrom	\hat{y}	Amplitude
I_m	elektrischer Motorstrom	z	Bewegungsrichtung
i_m	elektrischer Motorstrom zeitvariabel		
J	Stromdichte		
J_{mag}	Polarisation		
k	Koppelfaktor		
K_C	Konstante für elektrostatische Aktoren		
K_L	Konstante für magnetische Aktoren		
L	Induktivität		
l	Länge		
λ	Frequenzverhältnis		

1 Einleitung

Die Mikrosystemtechnik stellt eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts dar. In ihr vereint sind eine Vielzahl unterschiedlicher Disziplinen, von denen der Mikroelektronik, der Informationstechnik, der Mikrosensorik, der Mikromechanik und der Mikroaktorik beim momentanen Entwicklungsstand die größte Bedeutung beigemessen wird. Forciert durch massive staatliche Förderung wurden in kurzer Zeit viele neue Technologien, z.B. die Röntgentiefenlithographie, das LIGA-Verfahren (Lithographie & Galvanoformung), Beschichtungs- und Ätztechnologien neu entwickelt oder die vorhandenen Technologien aus der Mikroelektronik an die neuen Bedürfnisse angepaßt.

Diese Arbeit widmet sich der Mikroaktorik. Mikroaktoren sind die bewegungserzeugenden Elemente in Mikrosystemen. Sie dienen zum Antreiben von:

- Resonanzsensoren,
- Mikrospiegeln für die LASER-Ablenkung,
- Lichtwellenleitern in optischen Schaltern,
- Schneidwerkzeugen an mikrochirurgischen Instrumenten,
- Mikropumpen und Mikroventilen in der Mikrofluidik.

Im technischen Sinn ist „Antreiben“ das zeitliche und räumliche Bewegen eines Körpers unter Überwindung der entgegenwirkenden Kräfte, wie z. B. Reibung und Trägheit. Hierbei wird grundsätzlich mechanische Arbeit verrichtet. Die erforderliche Energie wird einer geeigneten Quelle entnommen. Der Mikroaktor, das Antriebselement, wandelt diese Energie in die erforderliche Bewegungsenergie um. Für die Energiewandlung stehen eine Reihe von Prinzipien zur Verfügung. Die elektrische Energieform hat sich, da sie leicht zu transportieren und zu steuern ist, als Eingangsenergie in der Mikroaktorik durchgesetzt. Meist sind mehrere Energiewandlungsstufen erforderlich, um die elektrische in die mechanische Energie zu wandeln. Zu den wichtigsten Prinzipien gehören die elektro-magneto-mechanische, die elektro-thermo-mechanische, die elektrodynamische und die elektrostatische Energiewandlung. Hinzu kommen die auf Festkörpereffekten beruhenden Prinzipien, wie unter anderem der indirekte piezoelektrische Effekt, der magnetostriktive und der elektrostriktive Effekt sowie Energiewandlung durch Formgedächtnislegierungen und intrinsisch leitfähigen Polymeren.

Die mechanische Energie wird häufig durch Übertragungselemente z.B. Wellen, Getriebe oder Hebel an die benötigte Bewegungsform angepaßt und auf das Wirkelement übertragen. Der erforderliche Bewegungsablauf wird durch Steuerung des Leistungsflusses über ein Steuerungselement erreicht. Das System aus Antriebs-, Übertragungs-, Wirk- und Steuerungselement wird nach [Kal91] als Antriebssystem bezeichnet.

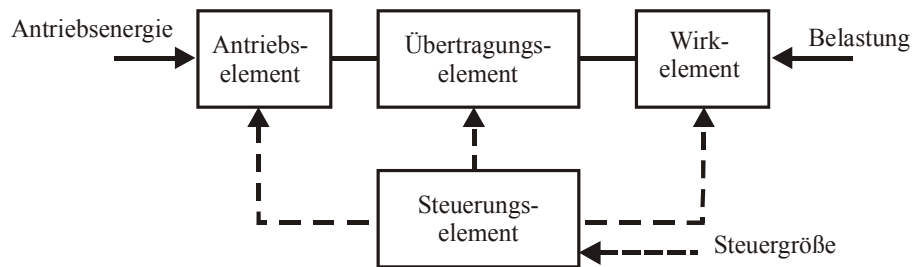


Abb. 1.1: Grundaufbau eines Antriebssystems [Kal91].

Die Abb. 1.1 zeigt den Grundaufbau eines Antriebssystems. Es bestehen drei Möglichkeiten zur Einflußnahme. Es kann die zugeführte Energie zum Antriebselement, der Leistungsfluß am Übertragungselement oder der Bewegungswiderstand am Wirkelement gesteuert werden. In der Mikrosystemtechnik wird man der ersten Variante den Vorzug geben. Die Möglichkeiten der Informationstechnik erlauben eine an den Bewegungsablauf angepaßte Zufuhr von Antriebsenergie und so eine exakte Steuerung des Bewegungsablaufs.

In dieser Arbeit wird nur das Antriebselement betrachtet und im Folgenden als „Mikroaktor“ oder „Mikromotor“ bezeichnet.

Die Anzahl der Antriebselemente in technischen Systemen steigt seit geraumer Zeit stark an. Zentralantriebe werden zunehmend durch dezentral und wirkstellennah angeordnete Direktantriebe ersetzt. Einen weiteren Schritt in diese Richtung stellen die kaskadierten Antriebssysteme, bestehend aus einer Vielzahl von Mikroaktoren, dar. Für den Aufbau dieser Mikrosysteme werden in zunehmendem Maße Mikroaktoren benötigt, welche nach [Kal95] unter Beachtung der physikalischen, technologischen und anwendungstechnischen Gesichtspunkte als System in seiner Gesamtheit optimiert sein müssen.

Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der verschiedenen anwendbaren Energiewandlungsprinzipien ist es erforderlich, für die zu lösenden Antriebsaufgaben die speziellen Eigenschaften dieser Prinzipien zu berücksichtigen.

1.1 Stand der Technik

1.1.1 Überblick über realisierte Mikroaktoren

In der Makrotechnik dominieren elektrodynamische und elektromagnetische Antriebe, unter Nutzung des magnetischen Feldes zur Energiewandlung. Durch die dreidimensionale Verknüpfung von Strom-, Feld- und Krafrichtung ist ein dreidimensionaler Aufbau notwendig. Infolge der Quellfreiheit und des Auftretens von Wirbeln im magnetischen Feld ist dieses nicht auf den Raum zwischen den Polen begrenzt, da die magnetischen Feldlinien immer in sich geschlossen sind. Daraus folgt die Notwendigkeit eines geschlossen geführten Magnetkreises. Dieser besteht in der Regel mindestens aus dem Erreger des magnetischen Flusses, den Flußleitstücken mit geringem magnetischen Widerstand und dem Arbeitsluftspalt. Die benötigten dreidimensionalen Strukturen lassen sich mit den Fertigungstechnologien der Mikrotechnik, welche die Photolithographie mit einschließt, nur unter großem Aufwand herstellen. Dieser erschwert die Entwicklung leistungsfähiger magnetisch wirkender Mikroaktoren.

Die elektrostatische Energiewandlung spielt hingegen in der Makrotechnik wegen der geringen Energiedichte im elektrostatischen Feld keine Rolle, obwohl die ersten elektrischen Antriebe dieses Prinzip nutzten [Moo72], [Ben98]. In der Mikroaktorik werden sie aber aufgrund ihres einfachen Aufbaus favorisiert. Ihr wesentlicher Vorteil ist die Tatsache, daß sich das elektrische Feld nur zwischen den Polen als sogenanntes Quellenfeld ausbildet. Hierdurch vereinfacht sich die Herstellung erheblich. 2 ½ Dimensionen sind für funktionstüchtige Strukturen ausreichend. Zur Herstellung werden zum Teil die Standardverfahren der Mikroelektronik mit verwendet. Neben der einfachen Herstellung steigt im elektrostatischen Feld im Mikrobereich die erreichbare Energiedichte und so die Leistungsfähigkeit elektrostatischer Antriebe [Tri89]. Auf dieser Grundlage erlangten besonders im Mikrobereich die elektrostatischen Aktoren Bedeutung.

Durch die rasche Technologieentwicklung stehen immer leistungsfähigere Verfahren zur Verfügung, die besonders die Herstellung magnetisch wirkender Mikroaktoren erleichtern. Für Mikroaktoren finden neben den konventionellen Energiewandlungsprinzipien, wie sie in der Makrotechnik eingesetzt werden, auch Prinzipien Anwendung, welche für Makroantriebe keine Bedeutung haben, da ihre Eigenschaften erst in den vorherrschenden Mikrodimensionen nutzbar sind. Nach [Jen95] zählen sie zu den „Neuen Aktoren“; diese werden in der vorliegenden Arbeit nach einer Vorstellung der konventionellen Energiewandlungsprinzipien zusammenfassend aufgeführt.

Allgemein haben sich im Design der immer komplexer werdenden Mikroaktoren einige prinzipielle Konstruktionen für die verschiedenen Energiewandlungsprinzipien durchgesetzt. Die folgende Zusammenfassung einiger realisierter Mikroaktoren der relevanten Wandlungsprinzipien gibt einen kleinen Überblick.

Magnetische Grundprinzipien

Die magnetischen Grundprinzipien teilen sich in die elektro-magneto-mechanische und die elektrodynamische Energiewandlung auf.

Die elektro-magneto-mechanische Energiewandlung, die Kraftwirkung auf Grenzflächen zwischen Materialien unterschiedlicher Permeabilität im magnetischen Feld wird für zahlreiche gerätetechnische Antriebe verwendet [Kal91]. Zur Generierung mechanischer Energie wird ein elektrisch erregter Magnetkreis mit einem beweglichen Läufer (oder Anker) benötigt. Die Bewegung des Läufers führt infolge der magnetischen Kräfte zu einer Verringerung des magnetischen Widerstandes bzw. zu einer Vergrößerung der Induktivität L für den linearen Fall.

$$F = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL(x)}{dx} \quad (1.1)$$

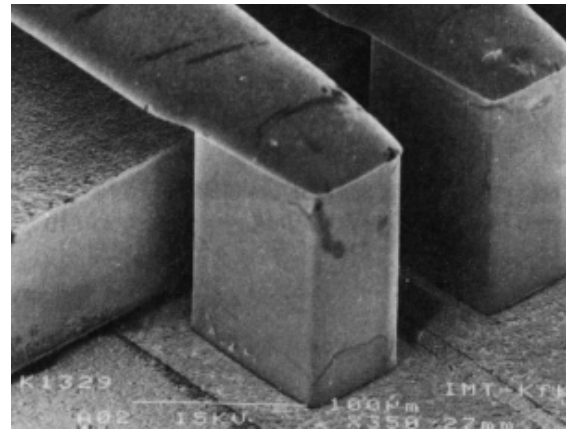
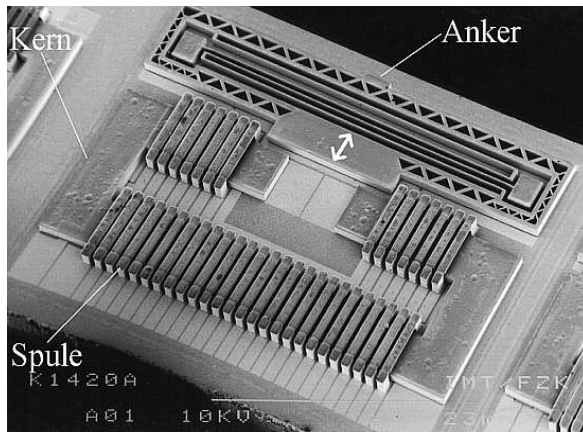
Die Kraft wird demnach durch Vergrößerung der vom Weg x abhängigen Induktivität generiert.

Die größte technische Herausforderung bei der Herstellung der elektro-magneto-mechanischen Aktoren besteht in der mikrotechnischen Realisierung eines geschlossenen Eisenkreises mit einer den Eisenkreis umschlingenden Spule zur Generierung des magnetischen Flusses. Klassische Anordnungen einiger Magnetkreise sind in den Abb. 1.2 bis Abb. 1.4a aufgeführt. Die Abb. 1.2 bis Abb. 1.3 sind wie folgt zu kommentieren:

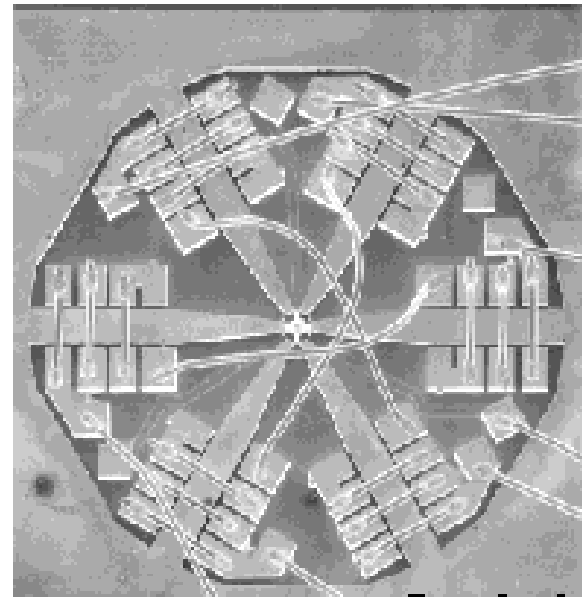
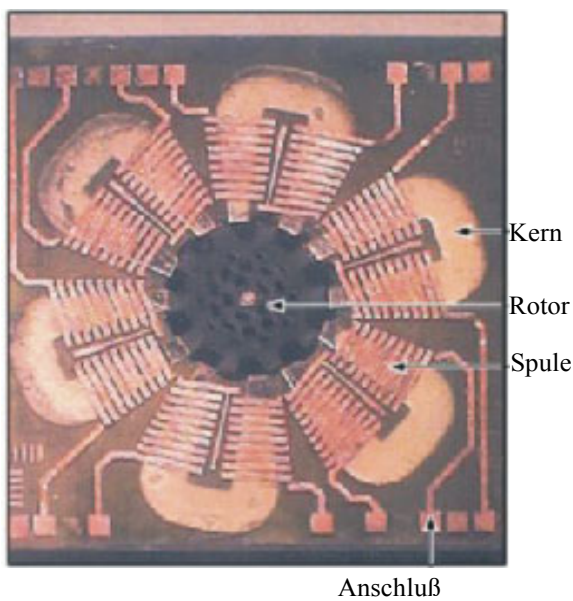
Die integrierte Spule um den Kern kann hergestellt werden

- mit Hilfe der LIGA-Technik, wie der Elektromagnet mit Anker von [Scu96] (Abb. 1.2),
- mit der galvanischen Abformung lithographisch geformter Strukturen in hochaufragenden Photoresisten, wie in [Sul99] (Abb. 1.3a),
- oder wie beim Rotationsmotor von [Guc99] durch einfaches Drahtbonden (Abb. 1.3b).

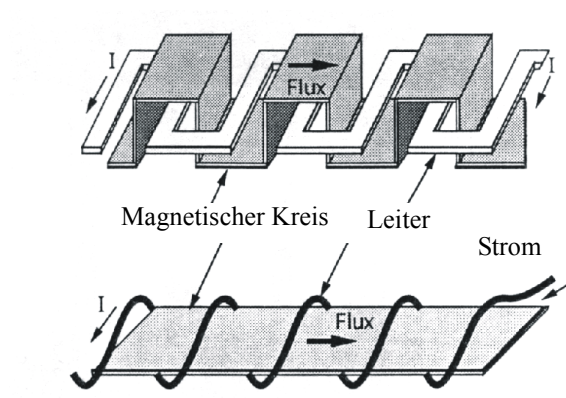
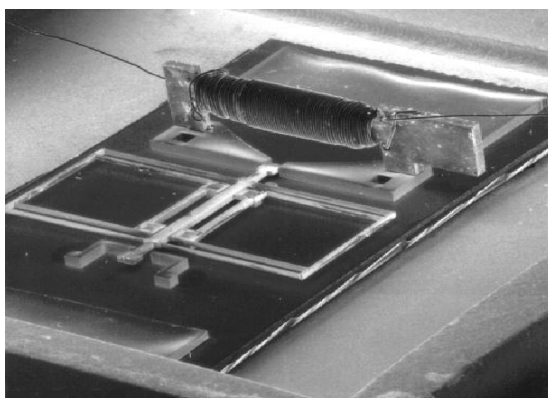
Eine andere Gruppe enthält per Hand montierte und gewickelte Spulen zur Flußerzeugung, wie der in [Guc96] vorgestellte, in LIGA gefertigte Aktor (Abb. 1.4a), das Ventil von [Yan95] oder das Relais von [Hos94].



(a) (b)
Abb. 1.2: In LIGA-Technik hergestellter Elektromagnet [Scu96].



(a) (b)
Abb. 1.3: a) Rotationsmotor [Sul99] und b) [Guc99].



(a) (b)
Abb. 1.4: a) Magnetischer Aktor mit handgewickelter Spule [Guc96], [Wis00],
b) Vergleich zwischen einem konventionellen Eisenkreis (unten) und mit einem mäanderförmigen Strompfad (oben) [Cho93].

In [Nam96] und [Cho93] wird ein unkonventioneller Aufbau verwendet. Ein wellenförmiger Eisenkreis umschließt einen mäanderförmigen Strompfad (Abb. 1.4b).

Die Energiewandlung der elektrodynamischen Mikroaktoren basiert auf der Kraftwirkung stromdurchflossener Leiter in einem Magnetfeld. Die generierte Kraft \vec{F} wird beschrieben durch den Strom I und das Kreuzprodukt aus der Leiterlänge \vec{l} und der magnetischen Induktion \vec{B} .

$$\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B}) \quad (1.2)$$

In elektrodynamischen Mikroaktoren werden ausschließlich Permanentmagnete zur Felderzeugung verwendet, wie die von [Krä96] und [Bec97] vorgestellten Mikromotoren oder die von [Feu96] vorgestellte Mikropumpe.

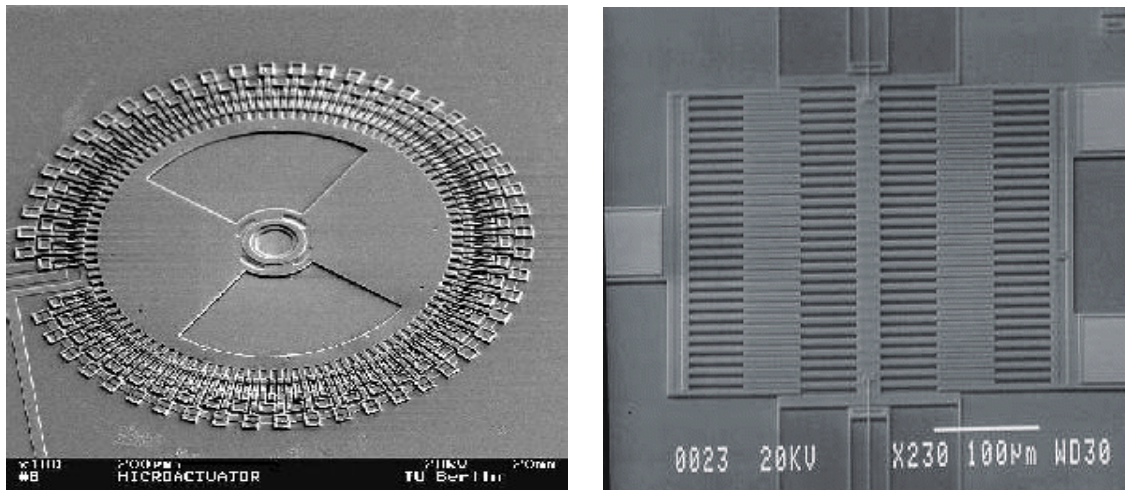
Elektrostatische Grundprinzipien

Elektrostatische Mikroaktoren nutzen die elektrostatischen Feldkräfte, die Kraftwirkung auf Grenzflächen zwischen Materialien mit unterschiedlicher Permittivität bei konstanter Spannung U . Zur Kraft- und Weggenerierung wird ein Kondensator mit beweglichen Elektroden benötigt. Die Bewegung der Elektroden führt infolge der elektrostatischen Kräfte zu einer Vergrößerung der Kapazität C .

$$F = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC(x)}{dx} \quad (1.3)$$

Die Kraft wird demnach durch Vergrößerung der vom Weg x abhängigen Kapazität generiert. Bei elektrostatischen Mikroaktoren sind zwei Bewegungsrichtungen, senkrecht und parallel in Bezug auf die Elektroden, möglich. Die Herstellung wird in vielen Fällen durch die Oberflächenmikromechanik realisiert. In Abb. 1.5 sind zwei Beispiele für eine Bewegung parallel zu den Elektroden dargestellt. Die verbreitetsten Vertreter sind die sogenannten Wobble-Motoren und die Cumb-Drives.

Wobble-Motoren beziehen ihren Namen durch den auf den Stator abrollenden Läufer [Ban99]. Bei dieser Art von Motor hat der Rotor die Form einer kreisförmigen Scheibe. Im Betrieb werden die Elektroden nacheinander an- und abgeschaltet, so daß der Rotor der Reihe nach von den jeweils erregten Elektroden angezogen wird; es entsteht eine Rotationsbewegung des Rotors. Nachteile dieser Konstruktionsart liegen in der Möglichkeit der schnellen Abnutzung der Isolierstoffe auf den Statorelektroden.



(a)

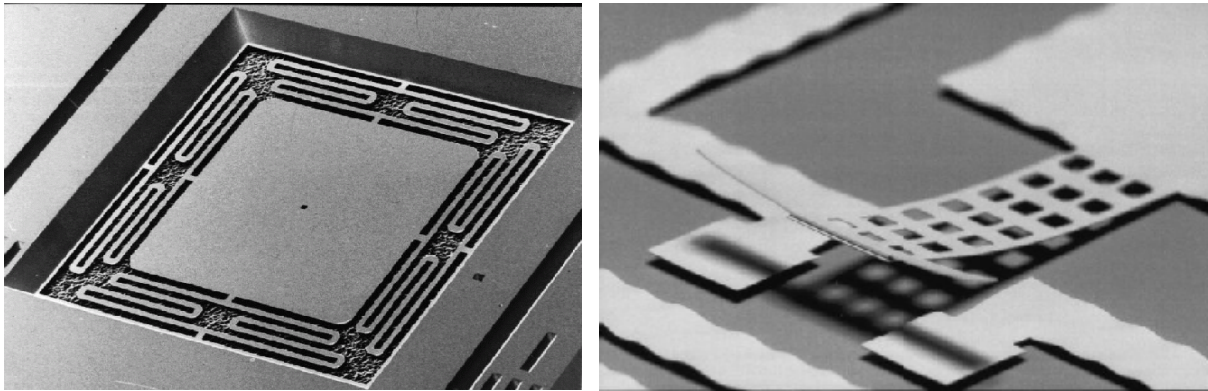
(b)

Abb. 1.5: a) Beispiel für einen rotierenden Aktor (Wobble-Motor), b) Beispiel für einen Linearaktor (Comb drive) [Vdi00].

Diese Bauform konnte sich aufgrund der überwiegenden Nachteile nicht durchsetzen. Die nachteiligen Eigenschaften liegen vor allem in den notwendigen hohen Drehzahlen, die zum Erreichen hoher mechanischer Leistungsdichten benötigt werden, einer zu geringen Lebensdauer des Aktors und der schwierigen Kraftauskopplung. Im Gegensatz dazu haben sich die einfacher aufgebauten Comb drive-Aktoren für Antriebssysteme und Sensoren durchgesetzt [Leg96]. Ein wesentlicher Vorteil ist die reibungsfreie Führung des Ankers.

Die Comb drive-Aktoren werden bevorzugt mit Hilfe der Oberflächenmikromechanik hergestellt. Sie bestehen aus vielen ineinandergreifenden Fingern (Interdigitation). Wird eine Spannung angelegt, entsteht eine Kraft zwischen den Fingern und diese bewegen sich ineinander. Die Zunahme der Kapazität und somit der Kraft ist der Anzahl der Finger proportional. Bei diesen beiden Ausführungen ist der Elektrodenabstand während der Bewegung konstant. Folglich ist die elektrostatische Kraft nahezu unabhängig von der relativen Position von Läufer und Stator.

Eine völlig anderer Aufbau ergibt sich bei einer Bewegung senkrecht zu den Elektroden. Der Elektrodenabstand ist über den Bewegungsbereich nicht konstant und die elektrostatische Kraft ist bei konstanter Spannung von der Position der Elektroden abhängig. In [Bre92] und [Ges98] werden sie als Antrieb für Schwingspiegel zur Lichtablenkung verwendet (Abb. 1.6a). Problematisch erweisen sich der geringe Bewegungsbereich und die benötigten hohen elektrischen Spannungen.



(a) Zweidimensionaler Schwenkspiegel nach [Ges98], (b) Elektrostatisches Relais nach [Rug99].

Der zurückgelegte Weg und die benötigte Spannung lassen sich durch einen sogenannten Wanderkeil vergrößern bzw. verkleinern, dadurch entstehen allerdings erheblichen Kräfteinbußen. In [Sci97], [Sch97] und [Rug99] wird dieses Prinzip zum Aufbau von Mikrorelais verwendet (Abb. 1.6b).

Energiewandlung durch Magnetostriktion

Die Magnetostriktion nutzt die Änderung der geometrischen Abmessungen eines Körpers unter Einfluß eines Magnetfeldes (JOULE-Effekt). Die magnetischen und mechanischen Eigenschaften sind eng gekoppelt. Der Effekt läßt sich im Kleinsignal-Bereich mit einer einfachen Beziehung beschreiben:

$$S = s^H \cdot T + d \cdot H \quad (1.4)$$

Der Parameter d ist der magnetostriktive Modul, der das Verhältnis zwischen der Dehnung S und der magnetischen Feldstärke H beschreibt. s^H ist die mechanische Nachgiebigkeit bei konstanter magnetischer Feldstärke und T die mechanische Spannung. In [Jen95] wird dieser Effekt genauer beschrieben. Die unter Einwirkung der magnetischen Feldstärke im magnetostriktiven Material gespeicherte mechanische Energie W_m ist über einen Koppelfaktor k mit der im magnetischen Feld gespeicherten Energie W_{em} gekoppelt. Der Koppelfaktor ist kleiner 1. Der Effekt ist umkehrbar.

$$\frac{W_m}{W_{em}} = k^2 \quad (1.5)$$

Piezelektrische Antriebe

Zur Energiewandlung im Aktor wird der inverse piezelektrische Effekt genutzt. Wird ein ferroelektrischer Körper elektrisch polarisiert, so tritt abhängig von der elektrischen Feldstärke

eine Formänderung des Körpers auf, die als inverser piezoelektrischer Effekt bezeichnet wird. Es ist eine elektromechanische Wechselwirkung zwischen dem geometrischen und dem elektrischen Zustand in Kristallen, die kein Symmetriezentrum besitzen. Für den Kleinsignal-Bereich gilt:

$$S = s^E \cdot T + d_t \cdot E \quad (1.6)$$

Der Parameter d_t wird piezoelektrischer Spannungsmodul genannt. Er beschreibt das Verhältnis zwischen der Dehnung S und der elektrischen Feldstärke E . s^E ist die mechanische Nachgiebigkeit bei konstanter elektrischer Feldstärke und T die mechanische Spannung. In [Jen95] wird dieser Effekt genauer beschrieben. Ähnlich wie bei dem magnetostruktiven Effekt ist die im Material gespeicherte mechanische Energie über einen Koppelfaktor mit der im elektrischen Feld gespeicherten Energie verbunden.

Für den Aufbau piezoelektrischer Mikroaktoren wird meist makrotechnisch hergestellte Piezokeramik verwendet, dabei findet PZT-Keramik (Blei-Zirkonat-Titanat) aufgrund seiner hohen Energiedichte den Vorzug. In [Vis96] wird ein Mikroaktor nach dem Wanderwellenprinzip vorgestellt. Aber auch als Bimorph finden sie Anwendung, wie beispielsweise in Tintenstrahldruckköpfen [Sch93]. Zunehmend wird PZT in Dickschichttechnik hergestellt, aber auch als Dünnschicht entstehen erste Aktoren wie in [Sak96].

Elektro-thermo-mechanische Energiewandlung

Für diese Form der Energiewandlung wird hauptsächlich die thermische Ausdehnung verschiedener Materialien oder die thermisch induzierte Gefügeumwandlung genutzt. Beispiele hierfür sind Bimetalle bzw. Formgedächtnislegierungen. Die Energiedichten dieser Mikroaktoren liegen auf einem sehr hohen Niveau, der Wirkungsgrad ist dagegen aber mit ca. 1 bis 2 % [Mem99] vergleichsweise gering. Aus diesem Grund sollen diese Prinzipien hier nicht weiter betrachtet werden.

Sonstige Energiewandlungsprinzipien

Beispiele für weitere Wandlungsprinzipien sind Aktoren auf Basis intrinsisch leitfähiger Polymere und andere Festkörpereffekte wie die Elektrostriktion. Da sie zur Zeit aber in der Mikrotechnik eine sehr untergeordnete Rolle spielen, sollen sie hier keine weitere Beachtung finden.

1.1.2 Vergleich von Antriebsprinzipien

In [Tri89] werden elektrostatische und magnetische Antriebsprinzipien auf ihr Skalierungsverhalten untersucht, mit dem Ergebnis, daß elektrostatische Aktoren ein besseres Skalierungsverhalten als magnetische Antriebe aufweisen. Hauptkriterium ist die steigende elektrische Durchbruchfeldstärke bei Verkleinerung des Elektrodenabstandes in den Mikrometerbereich. Bei einem Elektrodenabstand von 5 bis 25 μm werden nach [Rie96] Feldstärken bis $300 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$ erreicht, im Gegensatz zum Makrobereich, in dem nur $3 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$ üblich sind. In [Sch96] werden sogar Feldstärken bis zu $3800 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$ für elektrostatische Mikroaktoren für möglich gehalten, werden aber dort als unrealistisch eingestuft. Daraus folgt, daß der Einsatz elektrostatischer Antriebe im Mikrobereich sinnvoller als im Makrobereich ist. Die benötigten sehr hohen Spannungen werden außer acht gelassen. Der Vorteil elektrostatischer Aktoren wird nur mit der Verbesserung der Leistungsparameter im Mikrobereich begründet. Magnetische Antriebe erreichen im Makrobereich wie auch im Mikrobereich hohe Energiedichten. Sinnvoller ist es, mit der Kenntnis der Betriebskennlinien und der Antriebsaufgabe das jeweils geeignetste Prinzip auszuwählen.

Dieser Aussage über die Vorteile elektrostatischer Antriebe steht entgegen, daß in letzter Zeit die Entwicklung in Richtung magnetischer Antriebe geht und das elektrostatische Prinzip überwiegend für sensorische Anwendungen genutzt wird. Übliche Methoden zum Vergleich von Energiewandlungsprinzipien gehen von den Energiedichten der pro Volumen gespeicherten Energie aus [Jen95]. Außer acht gelassen werden die erreichbaren Leistungen, der Verlauf der Leistung in Abhängigkeit von der Motorkraft und der Geschwindigkeit, die Kraft-Geschwindigkeits-Kennlinien und der Wirkungsgrad.

In [Flu96] werden elektrostatische und nach dem Reluktanzprinzip arbeitende magnetische Aktoren untersucht. Dabei weisen elektrostatische Aktoren einen einfacheren Aufbau und größere Energiedichten im Mikrobereich auf. Die magnetischen Aktoren sind hingegen in der Herstellung wesentlich aufwendiger, aber lassen sich aufgrund der geringeren Spannung bei ähnlichen Energiedichten einfacher handhaben.

Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt ist der bisher wenig beachtete Wirkungsgrad der zahlreichen Mikroaktoren. Aus Sicht einzelner in einem Mikrosystem integrierter Mikroaktoren ist der Wirkungsgrad in Hinblick auf die Erwärmung weitgehend zu vernachlässigen. Hingegen wird er bei wachsender Packungsdichte von Mikroaktoren einen zunehmend begrenzenden Faktor darstellen. Die Verlustleistung wird in der Regel über die Oberfläche abgeführt. Ist

der Wirkungsgrad gering, muß genügend Kühlfläche zur Verfügung gestellt werden. Ist dies nicht möglich, kann der Aktor nicht so stark belastet werden. Dies limitiert seine Leistung. Wird nur ein Aktor verwendet, trifft dies weniger zu, als wenn eine 2- oder 3-dimensionale Matrix aus kaskadierten Aktoren besteht. Hier ist die Wärmeabfuhr im Gegensatz zu Einzelantrieben wesentlich erschwert. Zur Entwicklung mehrdimensional kaskadierter Mikroaktoren ist die Beachtung des Wirkungsgrades von entscheidender Bedeutung.

Bei nahezu allen realisierten Mikroaktoren tritt infolge der Miniaturisierung folgendes Problem hinzu: sie erzeugen relativ zu ihren Abmessungen geringe Anzugskräfte und erreichen sehr hohe Leerlaufgeschwindigkeiten [Mem99].

Eine genaue Beurteilung der Eigenschaften der Antriebsprinzipien ist nur unter Berücksichtigung der verschiedenen stationären Kennlinien (Geschwindigkeit, Wirkungsgrad, Leistung) in Abhängigkeit der Motorkraft möglich. Diese Kennlinien werden als stationäre Betriebskennlinien bezeichnet. Für die Prinzipien kann so die Geschwindigkeit, der Wirkungsgrad und die Leistung in Abhängigkeit von der Motorkraft abgelesen werden. Die zur Berechnung notwendigen Gleichungen ermöglichen eine exakte Beurteilung der Energiewandlungsprinzipien und unterstützen die Auswahl bestimmter Prinzipien und somit eine Anpassung des Aktoraufbaus an die Bewegungsaufgabe.

1.2 Ableitung der Aufgabenstellung

Trotz der Vielzahl der realisierter Prototypen auf den Gebieten der Mikroaktorik haben die umfangreichen Forschungsarbeiten im Vergleich zu den Mikrosensoren erst zu einer geringen Anzahl industrieller Anwendungen geführt. Dies mag an den fehlenden Applikationen für Mikroaktoren oder an den unzureichenden Leistungsmerkmalen der existierenden Antriebe liegen. In vielen Arbeiten werden Aktoren ohne Anwendungen vorgestellt, ein geeignetes Antriebsprinzip für eine spezielle Anwendung gesucht oder die Eignung eines Antriebsprinzips für eine konkrete Aufgabe untersucht.

In dieser Arbeit soll das bisher für Mikroaktoren wenig untersuchte elektrodynamische Prinzip mit denen in der Mikroaktorik dominierenden verglichen und die Eigenschaften dieses Prinzips herausgearbeitet werden, um somit besonders für dieses Prinzip geeignete Anwendungen zu finden. Die Lösung dieser Aufgabe teilt sich in folgende Teilaufgaben:

1. Die verbreitetsten Energiewandlungsprinzipien für Mikroaktoren, das elektromagnetische, das elektrodynamische und das elektrostatische Prinzip sollen auf Grundlage der stationären Betriebskennlinien miteinander verglichen werden. Hierzu werden auf Ba-

sis linearer Ansätze die stationären Betriebskennlinien bestimmt, die Unterschiede herausgearbeitet und geeignete Arbeitspunkte abgeleitet. Das Ziel ist nicht eine exakte quantitative Beschreibung der Prinzipien, sondern eine qualitative Darstellung, aus welcher das Verhalten in ausgewählten Arbeitspunkten abgeleitet werden kann.

2. Auf Basis der Betriebskennlinien werden für das elektrodynamische Prinzip besonders in Hinblick auf den Wirkungsgrad geeignete Anwendungen gesucht.
3. Die Möglichkeiten zur Herstellung von elektrodynamischen Mikroaktoren werden diskutiert und notwendige Modifizierungen der Herstellungstechnologien vorgenommen.
4. Basierend auf den Ergebnissen der Untersuchungen werden einige Mikroaktoren konstruiert und Demonstratoren aufgebaut.

2 Vergleich verschiedener Energiewandlungsprinzipien

2.1 Bestimmung der stationären Betriebskennlinie

2.1.1 Ableiten eines Modells zur Ermittlung von stationären Betriebskennlinien

Werden nur sehr langsame Änderungen der Betriebszustände, wie Geschwindigkeit oder Motorkraft zugelassen, bzw. ist die Beschleunigungsphase abgeschlossen, so können die Eingangsgrößen, Motorstrom und Eingangsspannung, als konstant angesehen werden. Dieser Betriebszustand wird als stationär bezeichnet.

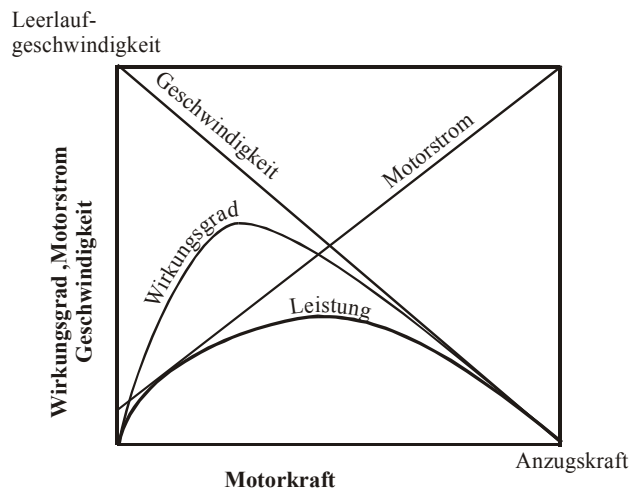


Abb. 2.1: Typische Darstellung von stationären Betriebskennlinien eines Gleichstrommotors.

Beschleunigungsabhängige Kräfte oder Momente werden vernachlässigt. Die stationären Betriebskennlinien beschreiben das Verhalten des Motors für verschiedene Belastungszustände. Besondere Aufmerksamkeit wird der Abhängigkeit

- der Geschwindigkeit,
- des Wirkungsgrades,
- der Leistung und
- des Motorstroms

von der Motorkraft bei konstanter Eingangsspannung gewidmet. Die Abb. 2.1 zeigt ein Beispiel verschiedenerer Betriebskennlinien eines Gleichstrommotors. Das Verhalten beim An-

zug und im Leerlauf sind wichtige diskrete Punkte auf den Kennlinien. Im ersten Fall wird eine Kraft, bei der die Geschwindigkeit Null ist, d.h. die Anzugskraft erzeugt. Im zweiten Fall wird der Motor ohne äußere Gegenkraft betrieben, die Motorkraft ist nahe Null und wird nur zur Überwindung der Reibungskräfte aufgebracht. Die dabei erreichte Geschwindigkeit wird als Leerlaufgeschwindigkeit bezeichnet. In beiden Fällen wird keine mechanische Arbeit W geleistet.

Wie sich zwischen diesen Extremwerten die mechanische Leistung und der Wirkungsgrad als Funktion der Motorkraft verhält, ist abhängig von den verwendeten Energiewandlungsprinzipien. Wichtig für die Klassifizierung der Prinzipien ist zudem der Punkt der maximalen Leistung, der Wirkungsgrad in diesem Punkt und der maximale Wirkungsgrad.

Im allgemeinen werden die untersuchten Antriebsprinzipien in der Mikrotechnik für nicht-kontinuierliche Antriebsaufgaben verwendet. Die Betrachtungen vereinfachen sich erheblich, wenn nur kontinuierliche Bewegungen berücksichtigt werden, da für die Berechnung die beschleunigungsabhängigen Kräfte vernachlässigt werden. Dies trägt zu anschaulicheren Ergebnissen bei und demonstriert gut die Charakteristik der Energiewandlungsprinzipien.

Die Abb. 2.2 zeigt ein mögliches Modell. Es besteht aus dem festen Stator und dem beweglichen Läufer. Die Generierung der Kraft findet an den sowohl im Stator als auch im Läufer geformten Polen statt. Über die Pole wird entsprechend der Energiewandlungsprinzipien Kraft auf den Läufer ausgeübt. Die generierte Kraft bewirkt eine Zentrierung des aktiven Pols.

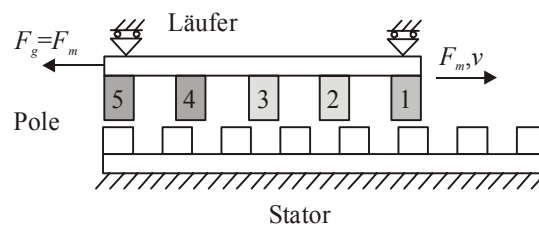


Abb. 2.2: Modell zur Bestimmung der stationären Betriebskennlinien.

Werden die Pole periodisch entsprechend der Numerierung aktiviert und deaktiviert, setzt sich der Läufer in Bewegung. Nachdem die Beschleunigungsphase abgeschlossen ist, da die Motorkraft F_m gleich der Gegenkraft F_g ist, setzt eine kontinuierliche Bewegung mit der Geschwindigkeit v ein. Es wird eine konstante mechanische Leistung erzeugt. Sie wird gebildet aus dem Produkt der Motorkraft und der Geschwindigkeit. Nach dem Energieerhaltungssatz muß bei elektrischen Antrieben die benötigte elektrische Eingangsleistung bei konstanter Verlustleistung, welche sich aus dem Produkt Spannung U und Stromstärke I zusammensetzt,

ebenfalls konstant sein. Es ist bei Konstanz der mechanischen Leistung als Produkt konstanter Motorkraft und Geschwindigkeit, ein konstanter Stromfluß bei konstanter Spannung zu erwarten. So ist es möglich, alle Aktoren als Vierpol zu verstehen, der die elektrische in mechanische Leistung umwandelt (Abb. 2.3).



Abb. 2.3: Ersatzschaltbild des Energiewandlers.

Die Eingangsspannung U soll für die verschiedenen Belastungen konstant sein; die Geschwindigkeit stellt sich in Abhängigkeit der Belastung ein.

Zur Darstellung der Kennlinien sollen im Folgenden bestimmt werden:

- die Anzugskraft,
- der Motorstrom,
- die Leerlaufgeschwindigkeit,
- der Punkt der maximalen Leistung
- und der Wirkungsgrad in den betreffenden Punkten.

Die Effektivität der Energiewandlung als Verhältnis von ausgekoppelter mechanischer Leistung P_{mech} und eingespeister elektrischer Leistung ist der Wirkungsgrad η .

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_{el}} \quad (2.1)$$

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_{n.mech} + P_{mech}} \quad (2.2)$$

Die elektrische Leistung P_{el} wird in mechanische Leistung P_{mech} und nicht-mechanische $P_{n.mech}$, z.B. thermische oder Feldenergie, umgewandelt. Den Ausgangspunkt für die Berechnung der stationären Betriebskennlinien ist der Satz der Erhaltung der Gesamtenergie oder der Gesamtleistung.

$$P_{el} = P_{n.mech} + P_{mech} \quad (2.3)$$

Die elektrische Leistung ergibt sich aus:

$$P_{el} = U \cdot I, \quad (2.4)$$

die mechanische Leistung aus der Motorkraft F_m und der Geschwindigkeit v :

$$P_{mech} = F_m \cdot v. \quad (2.5)$$

Die Verlustleistung setzt sich aus elektrischen (JOULE'sche Wärme, verursacht durch den OHM'schen Widerstand, $I^2 R^{-1}$) und mechanischen Verlusten (Reibungswärme) zusammen. Bei den Betrachtungen sollen die mechanischen Verluste vernachlässigt werden. Diese lassen sich leicht über den Energieverbrauch im Leerlauf bestimmen, bei dem keine mechanische Leistung vom Antrieb abgenommen wird. Die Energie wird benötigt, um die inneren Verluste zu decken. Diese Verluste werden Leerlaufverluste genannt. Sie steigen nur geringfügig bei höherer mechanischer Last an. Im Folgenden werden drei häufig angewendete Energiewandlungsprinzipien untersucht. Um qualitative Aussagen treffen zu können, werden einfache linearen Beziehungen zugrunde gelegt. Die Aussagekraft des vorliegenden Vergleichs wird hierdurch nicht verfälscht. Werden quantitative Aussagen insbesondere über die Leistungsdichte benötigt, sind diese Untersuchungen auf den nicht-linearen Bereich auszudehnen. Dies trifft vornehmlich auf das elektro-magneto-mechanische Energiewandlungsprinzip aufgrund der verwendeten nicht-linearen magnetischen Materialien zu.

2.1.2 Elektrodynamische Energiewandlung

Analog dem elektrodynamischen Kraftgesetz wirkt auf jeden vom Strom I_m durchflossenen Leiter in einem Magnetfeld B eine Kraft. Für eine rechtwinklige Anordnung in einem konstanten und homogenen Magnetfeld gilt für die Motorkraft F_m :

$$F_m = B \cdot l \cdot I_m. \quad (2.6)$$

Durch die Bewegung des stromführenden Leiters im Magnetfeld wird eine Gegenspannung induziert. Der Zusammenhang zwischen der Eingangsspannung U , der induzierten Spannung U_{ind} und dem Motorwiderstand R_m ist dem Ersatzschaltbild in Abb. 2.4 zu entnehmen. Es wird ein konstantes magnetisches Erregerfeld angenommen

$$U \cdot I_m = I_m^2 \cdot R_m + v \cdot B \cdot l \cdot I_m. \quad (2.7)$$

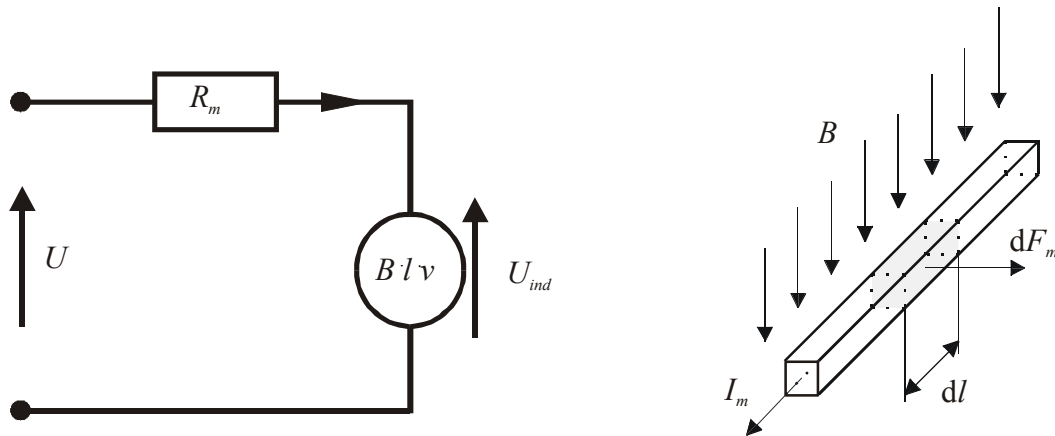


Abb. 2.4: Ersatzschaltbild eines elektrodynamischen Antriebs und Prinzip der elektrodynamischen Energiewandlung.

Aus der Leistungsbetrachtung aus (2.7) wird ersichtlich, daß sich die vom Motor aufgenommene elektrische Leistung im Wesentlichen in die Verlustleistung und die abgegebene mechanische Leistung aufteilt. Mechanische Verluste werden nicht berücksichtigt.

Für die induzierte Spannung gilt:

$$U_{ind} = v \cdot B \cdot l. \tag{2.8}$$

Hieraus berechnet sich mit (2.6) die Geschwindigkeit

$$v = \frac{U}{l \cdot B} - \frac{F_m \cdot R_m}{l^2 \cdot B^2} \tag{2.9}$$

des Motors in Abhängigkeit von der Motorkraft. Die Anzugskraft ergibt sich bei $v = 0$ wie folgt:

$$F_a = \frac{U \cdot l \cdot B}{R_m}. \tag{2.10}$$

Da durch den Stillstand keine Spannung induziert wird, entspricht in diesem Fall der Quotient aus U und R_m dem Anzugsstrom I_a . Wird der Motorstrom durch die Stromdichte und den Leiterquerschnitt ersetzt, ergibt sich eine vom Volumen abhängige Anzugskraft

$$F_a = V \cdot J \cdot B. \tag{2.11}$$

Der Motorstrom I_m wird durch die Motorkraft bestimmt, berechnet aus (2.6)

$$I_m = \frac{F_m}{l \cdot B}. \tag{2.12}$$

Die Leerlaufgeschwindigkeit v_0 wird erreicht bei $F_m=0$

$$v_0 = \frac{U}{l \cdot B}. \quad (2.13)$$

Aus dem Verhältnis der elektrischen Eingangsleistung und der mechanischen Ausgangsleistung ergibt sich der Wirkungsgrad

$$\eta(F_m) = 1 - \frac{F_m}{F_a} \quad (2.14)$$

in Abhängigkeit von der Motorkraft oder, nach [Lun88], aus dem Verhältnis von induzierter Spannung und Eingangsspannung

$$\eta = \frac{U_{ind}}{U}. \quad (2.15)$$

Das Maximum der mechanischen Leistung

$$P_{mech}(F_m) = F_m \cdot v_0 \cdot \left(1 - \frac{F_m}{F_a}\right) \quad (2.16)$$

findet man durch die erste Ableitung der mechanischen Leistung nach der Motorkraft

$$\frac{dP_{mech}(F_m)}{dF_m} = 0. \quad (2.17)$$

Hieraus ergibt sich:

$$F_m = \frac{F_a}{2}. \quad (2.18)$$

Der Wirkungsgrad in diesem Punkt liegt bei 50 %, er ergibt sich aus (2.18) in (2.14).

Wie (2.9) und [Kal91] zeigen, eignen sich besonders die Änderungen der Eingangsspannung U und der magnetischen Induktion B zur verlustfreien Variation der Geschwindigkeit der Aktoren.

2.1.3 Elektro-magneto-mechanische Energiewandlung

Bei der elektro-magneto-mechanischen Energiewandlung werden die Kräfte zwischen Stoffen verschiedener Permeabilität im magnetischen Feld ausgenutzt. Die Feldlinien sind bestrebt, sich einerseits zu verkürzen und sich andererseits möglichst weit voneinander zu entfernen. Beide Tendenzen bewirken eine Verringerung des magnetischen Widerstandes bzw. eine Ver-

größerung der Induktivität. Voraussetzung für die Erzeugung einer Bewegung und Wandlung von magnetischer in mechanische Energie ist die Abhängigkeit des Energiezustandes des steuerbaren Magnetfeldes von der Bewegungsrichtung. Beschrieben wird die generierte Kraft durch den Motorstrom und der Ableitung der Induktivität L nach der Bewegungsrichtung

$$F_m = \frac{I_m^2}{2} \cdot \frac{dL(x)}{dx}. \quad (2.19)$$

Die Induktivität für einen linearen Magnetkreis ist durch

$$L = \frac{w^2}{R_{ml}} \quad (2.20)$$

mit dem magnetischen Widerstand R_{ml} und der Anzahl der Windungen w definiert. Der magnetische Widerstand

$$R_{ml} = \frac{\delta}{\mu_0 \cdot A} \quad (2.21)$$

kann durch Verringerung des Luftspaltes δ oder Vergrößerung der Fläche des Luftspaltes A ($A = h \cdot x$, h : Tiefe der Luftspaltfläche) vermindert werden. Entsprechend ergibt sich für die Induktivität

$$L = \frac{w^2 \cdot h \cdot x}{\delta} \cdot \mu_0. \quad (2.22)$$

Aus (2.19) und (2.22) wird für eine Bewegung senkrecht zu den Polflächen, also in δ -Richtung

$$F_N = - \frac{(I \cdot w)^2 \cdot \mu_0 \cdot h \cdot x_0}{2 \cdot \delta^2}, \quad (2.23)$$

bzw. tangential zu den Polflächen, in x -Richtung

$$F_T = \frac{(I \cdot w)^2 \cdot \mu_0 \cdot h}{2 \cdot \delta_0}. \quad (2.24)$$

Als Antriebsrichtung sind beide Bewegungsrichtungen möglich. Die senkrechte Bewegung (2.23) wird häufig für Magnete mit begrenztem Bewegungsbereich verwendet, z.B. für Hub-/Zugmagnete oder Ventilmagnete. Die tangential Bewegung (2.24) findet bei Schrittmotoren Anwendung. Durch den konstruktiven Aufbau und die diskontinuierlich bewegten magnetischen Felder entsteht eine schrittförmige (intermittierende) Bewegung. Bei der maximalen Betriebsfrequenz ist eine quasi-kontinuierliche Bewegung möglich. In der Abb. 2.5 ist eine

einfache Anordnung für eine tangentielle Bewegung dargestellt. Sie besitzt den Vorteil, daß der Luftspalt δ konstant ist und so eine konstante Kraft und eine kontinuierliche Bewegung ermöglicht wird. Die Tangentialkräfte können bei nahezu konstanten Normalkräften dadurch erhöht werden, daß bei gleicher Luftspaltfläche Läufer und Stator gezahnt werden.

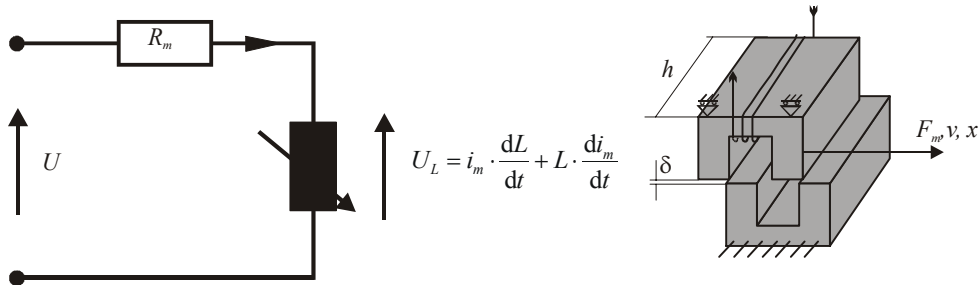


Abb. 2.5: Elektrisches Ersatzschaltbild, mechanisches Modell.

Zur Berechnung der stationären Betriebskennlinie wird von der anliegenden Eingangsspannung U ausgegangen:

$$U = i_m \cdot R_m + \frac{d\psi(i_m, x)}{dt} \quad (2.25)$$

(Ψ : Verketteter Fluß),

erweitert mit di/di bzw. mit dx/dx ,

$$U = i_m \cdot R_m + \frac{d\psi(i_m, x)}{di} \frac{di}{dt} + \frac{d\psi(i_m, x)}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (2.26)$$

und mit

$$\psi = L(x) \cdot i_m \quad (2.27)$$

folgt

$$U = i_m \cdot R_m + L(x) \frac{di}{dt} + i_m \frac{dL(x)}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (2.28)$$

Wird (2.28) multipliziert mit i_m , ergibt sich die elektrische Eingangsleistung

$$P_{el} = i_m \cdot U = i_m^2 \cdot R_m + i_m \cdot L(x) \frac{di}{dt} + I_m^2 \frac{dL(x)}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (2.29)$$

Mit der Motorkraft [Lun88]

$$F_m = \frac{i_m^2}{2} \frac{dL(x)}{dx} \quad (2.30)$$

vereinfacht sich die elektrische Eingangsleistung

$$P_{el} = i_m^2 \cdot R_m + i_m \cdot L(x) \frac{di}{dt} + F_m \frac{dx}{dt}. \quad (2.31)$$

Bei einer kontinuierlichen Bewegung kann aufgrund der Energiebilanz ein konstanter Stromfluß angenommen werden. In diesem Fall wird der Ausdruck $i_m \cdot L(x) \frac{di}{dt}$ für $i = \text{konstant}$ gleich 0 und (2.31) wird mit $i_m = I_m$ zu

$$P_{el} = U \cdot I_m = I_m^2 \cdot R_m + 2 \cdot F_m \cdot v. \quad (2.32)$$

Der erste Teil der Beziehung gibt die thermische Verlustleistung wieder, der zweite Teil beinhaltet die mechanische und die magnetische Leistung. Im Fall eines linearen Magnetkreises sind beide Leistungen bzw. Energien gleich groß

$$F_m \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{I_m^2}{2} \cdot \frac{dL(x)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt}. \quad (2.33)$$

Bei nicht-linearen Magnetkreisen kann die gewandelte mechanische Energie größer sein als die magnetische Feldenergie. Dieser Fall wird hier nicht betrachtet, da hierdurch die qualitativen Aussagen der resultierenden Betriebskennlinien nicht beeinflusst werden.

Für den vorliegenden Fall erhält man bei konstantem Luftspalt und einer tangentialen Bewegung zwischen Läufer und Stator eine lineare Abhängigkeit der Induktivität L von der Bewegungsrichtung x :

$$L = K_L \cdot x, \quad (2.34)$$

berechnet mit

$$K_L = \frac{w^2 \cdot \mu_0 \cdot h}{\delta} \quad (2.35)$$

und der Windungszahl w , Plattenabstand δ , der magnetischen Feldkonstanten μ_0 und der Breite h .

Aus (2.32) ergibt sich in für diesen Fall die Geschwindigkeits-Kraft-Kennlinie

$$v = \frac{U}{\sqrt{2 \cdot K_L \cdot F_m}} - \frac{R_m}{K_L}. \quad (2.36)$$

Die Anzugskraft wird bei $v = 0$ erreicht

$$F_a = \frac{K_L \cdot U^2}{2 \cdot R_m^2} \quad \text{oder} \quad (2.37)$$

$$F_a = \frac{\mu_0 \cdot h \cdot (I_w)^2}{2\delta}. \quad (2.38)$$

Der Quotient aus U und R_m entspricht dem Anzugsstrom. Der Motorstrom I_m wird durch die Motorkraft bestimmt

$$I_m = \sqrt{\frac{2 \cdot F_m}{K_L}}. \quad (2.39)$$

Das Maximum der mechanischen Leistung liegt bei $F_m = 1/4 F_a$, berechnet nach (2.17)

$$F_m = \frac{K_L \cdot U^2}{8 \cdot R_m^2}. \quad (2.40)$$

Der Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Motorkraft berechnet sich nach (2.2)

$$\eta(F_m) = \frac{1}{2} - \frac{R_m}{U} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot F_m}{K_L}}, \quad (F_m \leq F_a). \quad (2.41)$$

Im Leistungsmaximum liegt der Wirkungsgrad bei 25 %.

2.1.4 Elektrostatistische Energiewandlung

Basis der elektrostatistischen Energiewandlung sind die Kräfte, die auf die geladenen Elektroden wirken. Anziehende Kräfte entstehen bei ungleichnamig geladenen Elektroden, abstoßende bei gleichnamigen Ladungen. Die Elektroden sind meist als leitende Oberflächen Trennflächen, die an einen Nichtleiter grenzen. Es werden sich gegenüberstehende, ungleichnamig geladene Elektroden anziehen, dagegen die Ladungen auf jeder Elektrode sich abstoßen, d.h. eine möglichst große Fläche einzunehmen bestrebt sein. Könnte die Elektrodenfläche sich elastisch vergrößern, so würde sie gedehnt. Diese Kräfte haben im Feld auf die gedachten Feldlinien zwei Wirkungsrichtungen:

Die Feldlinien suchen sich sowohl zu verkürzen und als auch möglichst weit voneinander zu entfernen. Sie unterliegen einem Längszug und einem Querdruck. Voraussetzung für die Be-

wegung und die Energiewandlung elektrischer in mechanische Energie ist die Abhängigkeit des Energiezustandes des elektrostatischen Feldes von einer Bewegungsrichtung. Die gespeicherte Energie wird durch eine Erhöhung der Kapazität gesteigert (Abb. 2.6). Das kann durch eine Verringerung des Elektrodenabstandes δ oder eine Zunahme der Fläche A erfolgen.

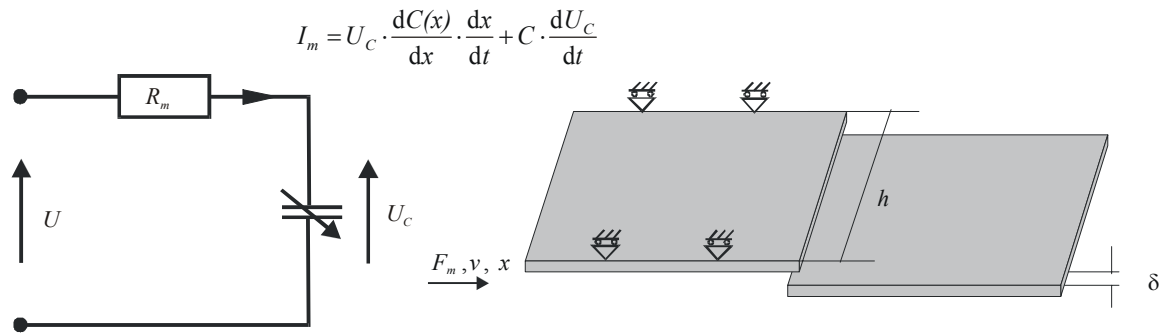


Abb. 2.6: Elektrisches Ersatzschaltbild, mechanisches Modell.

So wird bei beweglichen Elektroden infolge der erzeugten Kraft eine Bewegung normal bzw. tangential zu den Elektroden erreicht. Die folgende Beziehung beschreibt diesen Sachverhalt. Die Motorkraft F wird aus der Spannung und der Ableitung der Kapazität C nach der Bewegungsrichtung berechnet

$$F = \frac{U_c}{2} \cdot \frac{dC(x)}{dx} \tag{2.42}$$

Für Antriebe werden beide Bewegungsrichtungen verwendet. Die Abhängigkeit der Kraft von der Bewegungskordinate ergibt sich durch Einsetzen der wegabhängigen Dimensionierungsgleichung

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot h \cdot x}{\delta} \text{ mit } h \cdot x = A \tag{2.43}$$

für einen Kondensator im homogenen Feld in (2.42). Abgeleitet wird je nach Bewegungsrichtung nach x oder δ . Das Ergebnis für die eine Tangential- bzw. Normalbewegung erzeugende Kraft ist

$$F_T = \frac{U^2 \cdot \epsilon_0 \cdot h}{2 \cdot \delta_0} \text{ bzw.} \tag{2.44}$$

$$F_N = \frac{U^2 \cdot \epsilon_0 \cdot x_0 \cdot h}{2 \cdot \delta^2} \tag{2.45}$$

Im Gegensatz zur Normalkraft F_N ist die Tangentialkraft F_T nicht vom Weg abhängig und so über den gesamten Bewegungsbereich konstant. Für die nachfolgenden Betrachtungen wird nur die Tangentialbewegung herangezogen. Sie ermöglicht durch eine serielle Anordnung einer Vielzahl von Elektroden eine nahezu kontinuierliche Bewegung [Mem99].

Durch eine geeignete Wahl der Elektrodenbreite und des Polabstandes kann die Tangentialkraft soweit gesteigert werden, bis sie bei gleicher Polfläche mit der Normalkraft vergleichbar ist. Der konstruktiv günstige Fall gleich großer maximaler Normalkräfte und Tangentialkräfte tritt ein, wenn die Elektrodenbreite h dem Elektrodenabstand δ entspricht. Dies wird durch Gleichsetzen von (2.44) und (2.45) nachgewiesen. Die Abb. 2.7 zeigt einen Vergleich der Kraft-Weg-Kennlinien für die senkrechte und parallele Bewegung der Elektroden.

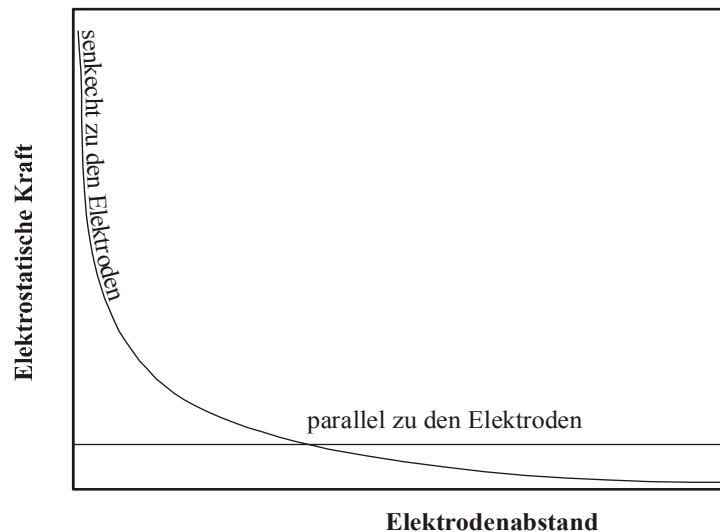


Abb. 2.7: Quantitative Kraft-Weg-Kennlinie bei senkrechter und paralleler Bewegung der Elektroden.

Zur Berechnung der stationären Betriebskennlinie wird von der Leistungsbilanz ausgegangen. Die eingespeiste elektrische Leistung wird in Wärmeleistung, mechanische Leistung und Feldleistung umgewandelt

$$P_{el} = P_{th} + P_m + P_{es} \quad (2.46)$$

Mit

$$P_{es} = \frac{U_C^2}{2} \frac{dC}{dt} \quad (2.47)$$

folgt:

$$U \cdot I_m = R_m \cdot I_m^2 + F \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{dC}{dt}. \quad (2.48)$$

Der Motorstrom, hier auch als Kondensatorstrom, setzt sich zusammen aus dem Strom durch die zeitliche Änderung der Kapazität und der Kondensatorspannung

$$I_m = U_c \cdot \frac{dC(x)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} + C \cdot \frac{dU_c}{dt}. \quad (2.49)$$

Bei konstanter Motorkraft und Geschwindigkeit ist die Kondensatorspannung ebenfalls konstant und (2.49) vereinfacht sich zu

$$I_m = U_c \cdot \frac{dC}{dx}. \quad (2.50)$$

Die Kapazität C kann in Abhängigkeit von der Bewegungsrichtung x durch

$$C = K_c \cdot x \quad (2.51)$$

beschrieben werden. Die Konstante K_c mit der elektrischen Feldkonstanten ϵ_0 ergibt sich aus:

$$K_c = \frac{\epsilon_0 \cdot h}{\delta}. \quad (2.52)$$

Nach [Lun88] wird, ohne daß thermische Verluste berücksichtigt werden, die Hälfte der eingespeisten Energie zur Erhöhung der Feldenergie benötigt. Die andere Hälfte wird in mechanische Arbeit umgeformt:

$$F \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{dC}{dt}. \quad (2.53)$$

So wird aus (2.48) mit (2.50) und (2.51)

$$U = R_m \cdot U_c \cdot K_c \cdot v + \frac{2 \cdot F}{U_c \cdot K_c}. \quad (2.54)$$

Durch Umstellen nach der Geschwindigkeit berechnet sich die Geschwindigkeits-Kraft-Kennlinie

$$v = \frac{U}{\sqrt{2 \cdot K_c \cdot F_m}} - \frac{R_m}{K_c}, \quad (2.55)$$

sowie die Anzugskraft bei $v = 0$

$$\text{aus } F_a = \frac{K_c \cdot U^2}{2}. \quad (2.56)$$

Da im Anzugsfall die Geschwindigkeit gleich Null ist, also kein Strom fließt und so auch am Motorwiderstand keine Spannung abfällt, wird in diesem Fall die Eingangsspannung U gleich U_c , der Spannung am Kondensator. Im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Prinzipien läßt sich hier nicht der Strom, sondern die Kondensatorspannung U_c durch die Motorkraft einfach bestimmen:

$$U_c = \sqrt{\frac{2 \cdot F_m}{K_C}}. \quad (2.57)$$

Der Motorstrom in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit folgt aus (2.50) und (2.57)

$$I_m = U_c \cdot K_C \cdot v = \sqrt{2 \cdot F_m \cdot K_C} \cdot v. \quad (2.58)$$

Dadurch, daß der Motorstrom proportional der Geschwindigkeit ist und durch den Motorwiderstand begrenzt wird, bestimmt letzterer die Leerlaufgeschwindigkeit.

Das Maximum der mechanischen Leistung liegt, wie beim elektro-magneto-mechanischen Antrieb, bei $F_m = \frac{1}{4}F_a$, berechnet nach (2.17).

Der Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Motorkraft berechnet sich nach (2.2).

$$\eta(F_m) = \frac{1}{2 \cdot U} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot F_m}{K_C}}, \quad (F_m \leq F_a). \quad (2.59)$$

Der Wirkungsgrad im Leistungsmaximum liegt bei 25 %.

2.2 Bewertung der Antriebsprinzipien

2.2.1 Die stationären Betriebskennlinien

Mit den hergeleiteten Gleichungen sind in der Abb. 2.8 die Geschwindigkeit v , die Leistung P und der Wirkungsgrad η in Abhängigkeit von der Motorkraft F_m aufgetragen. Die Reibung bzw. die Leerlaufverluste wurden bei der Darstellung vernachlässigt. Dies führt zu einer geringen Verschiebung der Kennlinien in Richtung größerer Wirkungsgrade und erklärt den hohen Wirkungsgrad der magnetisch wirkenden Aktoren bei der Leerlaufgeschwindigkeit. Im Gegensatz hierzu sind in der Abb. 2.11 im Abschnitt 2.3.1 die Betriebskennlinien realer Aktoren dargestellt.

Folgende Unterschiede sind bei den untersuchten Energiewandlungsprinzipien bemerkenswert:

- Bei elektro-magneto-mechanischen und elektrostatischen Aktoren kann ein *Wirkungsgrad* von maximal 50% erreicht werden.
- Da der *Wirkungsgrad* immer vom *Stromfluß* und vom *Motorwiderstand* abhängt, wird der höchste Wirkungsgrad bei vernachlässigbarem Stromfluß erreicht. Dies ist bei elektrodynamischen und bei elektro-magneto-mechanischen Aktoren bei der Leerlaufgeschwindigkeit der Fall, bei den elektrostatischen Aktoren dagegen bei der vollen Anzugskraft.
- Elektrodynamische Antriebe besitzen durch die induzierte Spannung eine leicht zu bestimmende Leerlaufgeschwindigkeit.
- Die theoretische Leerlaufgeschwindigkeit läßt sich bei elektro-magneto-mechanischen Aktoren nicht bestimmen.
- Bei elektrostatischen Aktoren wird die Leerlaufgeschwindigkeit durch den Spannungsabfall am Motorwiderstand bestimmt. Da in diesem Fall die Motorkraft Null ist, liegt am Motor keine Spannung U_c an. Die gesamte Spannung U fällt am Motorwiderstand infolge des Motorstromes ab.

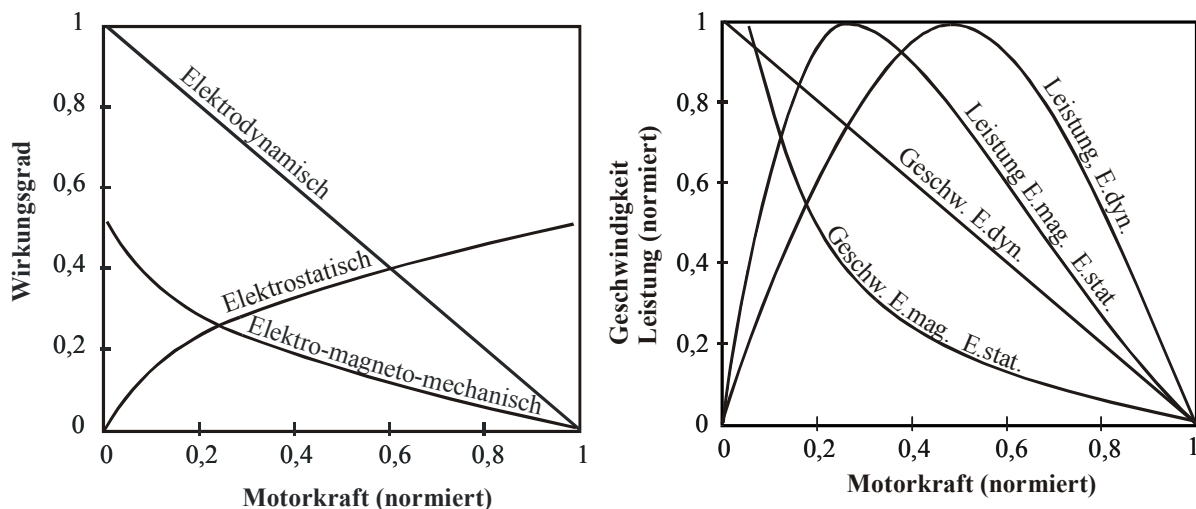


Abb. 2.8: Stationäre Betriebskennlinien. (Für elektrostatische und elektro-magneto-mechanische Antriebe existiert keine Leerlaufgeschwindigkeit. Um diese auch bei dem normierten Verlauf nicht anzudeuten, ist die Kurve nicht bis $F_m = 0$ gezeichnet.)

Mit Hilfe der Kennlinien können zweckmäßige Einsatzbereiche ermittelt werden. Diese Einsatzbereiche sollen sich durch eine hohe ausgekoppelte mechanische Leistung und einen hohen Wirkungsgrad auszeichnen. Im Rahmen dieser Arbeit soll der Punkt der maximalen Leistung und die Punkte, in denen der Wirkungsgrad höher als im Punkt der maximalen Leistung ist, als „sinnvolle Arbeitspunkte“ definiert werden.

Bei den magnetischen Aktoren ist dies der Bereich vor dem Leistungsmaximum; bei elektrostatischen Aktoren dagegen nach diesem Punkt.

Unter Berücksichtigung der Anwendungsgebiete makrotechnischer Antriebssysteme ergeben sich für die untersuchten Prinzipien folgende zwei Haupteinsatzgebiete:

1. die Kraft- und Geschwindigkeitserzeugung für das elektrodynamische Energiewandlungsprinzip und
2. die Krafterzeugung bei geringer oder vernachlässigbarer Geschwindigkeit für das elektromagneto-mechanische und das elektrostatische Energiewandlungsprinzip.

2.2.2 Begrenzungen

In Abb. 2.8 sind der Wirkungsgrad, die mechanische Leistung und die Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Motorkraft aufgetragen. Die maximale umwandelbare elektrische Leistung wird in der Regel durch die thermische Belastbarkeit des Antriebs begrenzt. Die Parameter wie Anzugskraft oder Leerlaufgeschwindigkeit werden durch die prinzipispezifischen Eigenschaften bestimmt. Grundsätzlich liegen die Ursachen in der endlichen Stärke des magnetischen oder elektrostatischen Feldes. Das magnetische Feld wird durch die Sättigungsinduktion des magnetischen Kreises begrenzt und das elektrostatische Feld durch die Durchschlagsfeldstärke. Im Falle des elektrodynamischen Prinzips kommt der Einfluß des Motorstroms auf den Magnetkreis hinzu. Ein zu starker Motorstrom ist in der Lage, die magnetische Anordnung zu entmagnetisieren und somit eine dauerhafte Schädigung des Aktors hervorzurufen. Durch den Einsatz der neuen hochenergiereichen Dauermagnetmaterialien, wie z.B. Nd/Fe/B [Vak98], kann diese Schädigung minimiert werden.

Die maximale mechanische Leistung bei maximaler thermischer Belastung ist im Gegensatz zu den prinzipispezifischen Grenzen von den erreichbaren Feldstärken, wie der magnetischen Induktion, der Sättigungsinduktion oder der elektrischen Feldstärke unabhängig. Bei Verringerung der betreffenden Feldstärken sinkt die Motorkraft, wogegen die Geschwindigkeit steigt und somit das Produkt aus beiden konstant bleibt. Leicht nachzuvollziehen ist dieser Umstand bei der verlustfreien Drehzahlstellung durch Feldschwächung bei Gleichstrommotoren [Mül94]. In diesem Fall steigt die Geschwindigkeit, das Drehmoment sinkt und die Leistung bleibt im Idealfall konstant.

Zur Bestimmung der Leistungsdichte wird der Umstand genutzt, daß im Punkt der maximalen Leistung die Verlustleistung gleich der mechanischen Leistung ist. Obwohl sich die Wir-

kungsgrade der Antriebsprinzipien im Arbeitspunkt unterscheiden, weisen doch alle theoretisch bei gleicher Baugröße die gleiche mechanische Leistungsdichte auf.

Im Fall der elektro-magneto-mechanischen und elektrostatischen Energiewandlung teilt sich die Verlustleistung in Wärmeverluste infolge des Motorstroms und Verluste durch den Auf- und Abbau der Felder auf. Diese Verluste führen zwar nicht zu einer Erwärmung des Antriebs, wohl aber zu einer Erwärmung der Ansteuerung. Die Folge ist, daß die Aktoren so stark belastet werden können, daß in diesem Arbeitspunkt die mechanische Leistung der Wärmeverlustleistung entspricht. Nur die im Antrieb realisierten Wärmeverluste dürfen hier betrachtet werden. Über die zulässige Wärmeverlustleistung ist so leicht die maximale mechanische Leistung zu bestimmen.

Aus der Wärmeverlustleistung

$$P_{th} = I_m^2 \cdot R_m \quad (2.60)$$

wird durch Einsetzen der zulässigen Stromdichte und des spezifischen elektrischen Widerstandes die Leistungsdichte

$$\frac{P_{mech.}}{V} = \eta_u \cdot \rho \cdot J(\rho, V)^2. \quad (2.61)$$

Enthalten ist in (2.61) der Volumenausnutzungsgrad η_u des Aktors, der angibt, welcher Anteil des Antriebsvolumens an der Energiewandlung beteiligt ist. Diese Gleichung ist nur gültig für den Punkt der maximalen mechanischen Leistung. Wie hier ersichtlich, ist die zulässige Stromdichte vom Volumen und dem spezifischen elektrischen Widerstand abhängig. Dieser Zusammenhang wird im nächsten Abschnitt näher behandelt.

2.2.3 Mögliche Leistungsbereiche

Infolge der Gegebenheit, daß die maximale Stromdichte bei konstanter Übertemperatur umgekehrt proportional dem spezifischen Widerstand und dem Volumen ist [Tim89], erhöht sich bei einer Verkleinerung des Aktors die Leistungsdichte. In [Jen95] werden für sehr kleine Volumina Stromdichten bis 10^4 Amm^{-2} erreicht. Dies ergibt einen Anstieg der Leistungsdichte bei Verkleinerung.

Die verwendbare Stromdichte steigt mit dem Maß der Verkleinerung. Nach [Tri89] ist bei konstanter Übertemperatur die Stromdichte umgekehrt proportional einer charakteristischen Längeneinheit. Diese Längeneinheit kann aus der Kubikwurzel des Volumens bzw. aus der

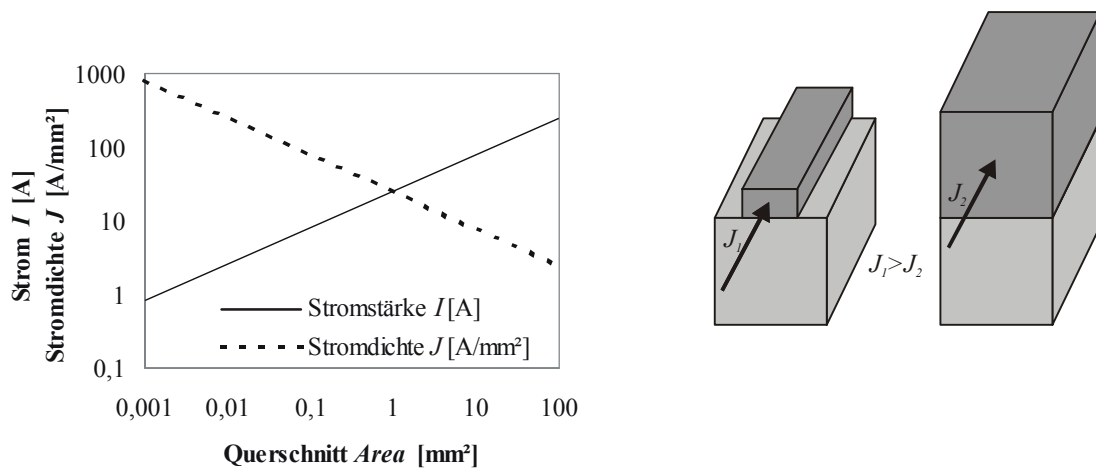
Quadratwurzel der Querschnittsfläche bestimmt werden. Durch eine einfache Umstellung erhält man folgende Gleichung:

$$J \cdot \sqrt[3]{Vol.} = const. \quad (a)$$

oder (2.62)

$$J \cdot \sqrt[2]{Area} = const. \quad (b)$$

Bei konstanter Übertemperatur ist das Produkt aus der Stromdichte und der Kubikwurzel des Volumens (*Vol.*) bei geometrisch ähnlichen Ausführungen konstant. Bei zweidimensionaler Betrachtung ist das Produkt aus der Stromdichte und der Quadratwurzel der Querschnittsfläche (*Area*) konstant. Nachgewiesen werden kann diese Abhängigkeit durch die nach [Els92] zulässigen Stromdichten verschiedener Leiterquerschnitte, recherchierter Stromdichten realisierter Mikroaktoren [Jen95] und experimentell ermittelter Stromdichten an den im Rahmen der Arbeit gefertigten Demonstratoren. In Abb. 2.9a sind diese Werte für zulässige Strombelastungen verschiedener Leiterquerschnitte dargestellt.



(a)

(b)

Abb. 2.9: a) Abhängigkeit der Stromstärke und der Stromdichte vom Querschnitt. Tabellenwerte aus [Els92].
b) Verhältnis der Stromdichten bei unterschiedlichem Volumenausnutzungsgrad.

Wird nach (2.62a) die Stromdichte mit der Quadratwurzel aus dem Leiterquerschnitt multipliziert, ergibt sich für alle Querschnitte ein relativ konstanter Wert von ca. 25 Am⁻¹.

$$J \cdot \sqrt[2]{Area} = 25 \frac{A}{mm} \quad (2.63)$$

Folglich kann für beliebige Querschnitte einfach die zulässige Stromdichte abgeschätzt werden:

$$J = \frac{25 \left[\frac{A}{mm} \right]}{\sqrt[2]{Area}}. \quad (2.64)$$

Bei geometrisch nicht-ähnlichen Ausführungen können sich starke Abweichungen zu (2.64) ergeben. Ein weiteres Kriterium ist der Volumenausnutzungsgrad. Wird der Ausnutzungsgrad kleiner, steigt das passive Volumen und die Wärmeabfuhr verbessert sich (Abb. 2.9b), da sowohl die Wärmekapazität als auch die passive Oberfläche ansteigt.

Die Anzugskraft bzw. die Motorkraft wird bei elektro-magneto-mechanischen und elektrostatischen Aktoren durch die maximale Feldstärke, also durch die Energiedichte bestimmt. Dagegen ergibt sie sich bei elektrodynamischen Aktoren durch die Stromdichte und Feldstärke.

Die bereitgestellte Geschwindigkeit und die Motorkraft bei den Antriebsprinzipien unterscheiden sich je nach geometrischer Größe stark. Im Folgenden soll gezeigt werden, welche Möglichkeiten bestehen, Aktoren an die jeweilige Bewegungsaufgabe anzupassen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird zwischen zwei Arten der Anpassung unterschieden:

- die Leistungsanpassung durch Verschiebung des Punktes der maximalen Leistung in den Arbeitspunkt des Aktors (dieses Verfahren wird z.B. in der Elektrotechnik verwendet, um Generatoren an den Verbraucher anzupassen) und
- eine Anpassung unter Einschränkung des Wirkungsbereiches.

Generell ist eine Anpassung in Richtung höherer Wirkungsgrade sinnvoll. Elektrodynamische Motoren werden in der Makrotechnik in Richtung höherer Geschwindigkeiten angepaßt. Elektro-magneto-mechanische und elektrostatischen Aktoren hingegen werden in der Regel in Richtung höherer Anzugskräfte eingestellt.

2.3 Anpassung der Antriebe an die benötigten Betriebsparameter

Neben der absoluten Größen der Leistungsparameter interessieren die Möglichkeiten der Anpassung der Parameter an eine definierte Bewegungsaufgabe. Die Bewegungsaufgabe ist bestimmt durch die benötigte Kraft und die Geschwindigkeit. Es ist nun notwendig, diese beiden Komponenten bei konstanter mechanischer Leistung unabhängig voneinander variieren zu können. Eine Möglichkeit ist die Verwendung von mechanischen Drehmoment- oder Kraftwandlern (d.h. Getrieben), welche das vom Antrieb generierte Produkt aus Kraft und Geschwindigkeit an die speziellen Antriebsaufgaben anpassen. Diese Art der Anpassung oder Wandlung wird nicht betrachtet, sondern es wird nur kurz auf die Möglichkeiten der unmittel-

baren Anpassung der Aktoren eingegangen. Die Problemstellung besteht darin, bei gleichen Abmessungen und elektrischen Eingangsgrößen die mechanischen Ausgangsgrößen zu variieren. In der Regel sind die mechanischen Ausgangsgrößen relativ fest mit dem physikalischen Energiewandlungsprinzip und der geometrischen Größe verknüpft.

In der Elektrotechnik ist die Leistungsanpassung ein eingeführter Begriff. Er beschreibt den Umstand, daß der Arbeitspunkt einer Spannungs- oder Stromquelle in den Punkt der maximalen Leistung gelegt wird. Dieser Punkt wird erreicht, wenn der Lastwiderstand mit dem vorgegebenen Innenwiderstand des Generators übereinstimmt. In dieser Analogie soll unter Leistungsanpassung die Konstruktion des Aktors verstanden werden, bei der der Arbeitspunkt im Punkt seiner maximalen Leistung liegt.

Eine andere Form der Anpassung ist die Einschränkung des Wirkungsbereichs. Ein Antrieb kann so ausgelegt werden, daß alle Arbeitspunkte auf der Betriebskennlinie erreicht werden können, ohne daß er im Dauerbetrieb überlastet wird. Dies ist aber nicht immer zweckmäßig. So werden Gleichstrommotoren prinzipiell nicht dauerhaft mit dem Anzugsmoment oder der Anzugskraft belastet. Der Arbeitspunkt befindet sich vielmehr links des Leistungsmaximums bei höheren Wirkungsgraden. Der Leiterquerschnitt kann dabei derart vermindert werden, daß die maximal zulässige Stromdichte (thermische Belastungsgrenze) wesentlich früher erreicht wird. Eine längere Belastung mit der Anzugskraft ist nicht mehr zulässig. Bei verminderter Motorkraft wird die Eingangsspannung soweit erhöht, bis die zulässige Stromdichte erreicht ist. Um die Grenzen dieser Anpassung zu erfassen, kann die Reibung (Festkörper-, Luft-, Gleit-, Roll-, und Flüssigkeitsreibung) nicht mehr vernachlässigt werden. Die Reibung stellt eine konstante oder eine mit der Geschwindigkeit steigende Gegenkraft dar. In Bezug auf die Anwendungsgebiete sind diese Anpassungen nur bei elektrodynamischen Aktoren möglich.

Bei allen Prinzipien besteht außerdem mehr oder weniger die Möglichkeit der Anpassung der elektrischen Eingangsgrößen bei konstanten mechanischen Parametern.

Wie aus den Bemessungsgleichungen ersichtlich, ist die Aufteilung der Parameter der mechanischen Leistung (Kraft und Geschwindigkeit) im Punkt der maximalen Leistung unabhängig von der Aufteilung der Parameter der elektrischen Eingangsleistung (Strom und Spannung). Das heißt, eine bestimmte elektrische Eingangsleistung führt zu konkreten Parametern der mechanischen Leistung im Punkt der maximalen Leistung.

2.3.1 Elektrodynamische Antriebe

Die vorherigen Betrachtungen und die Zahl der realisierten elektrodynamischen Mikroantriebe zeigten, daß die Verwendung von Permanentmagneten zur Felderzeugung am effektivsten ist. Mit Hilfe der Seltenerd-Dauermagnetwerkstoffe wie z.B. Sm/Co und Nd/Fe/B werden sehr hohe Energiedichten $(BH)_{max}$ und hohe Remanenzinduktionen B_r erreicht. Bei geringem Materialeinsatz ermöglichen diese Werkstoffe eine leistungslose Generierung starker magnetischer Felder. Aus diesem Grund soll hier nur diese Art der Feldgenerierung berücksichtigt werden. Die Betrachtung beginnt mit der Feldgenerierung und dem Verhalten bei Verkleinerung, legt die Parameter für die maximale mechanische Leistung dar und stellt einen Vergleich mit realen Kleinaktoren an.

Magnetfeldberechnung

Das Magnetfeld von reinen Permanentmagnet-Anordnungen ohne Eisenkreis kann in einfacher Weise mit Hilfe der Elementarstromtheorie berechnet werden [Phi84], [Sim71]. Es ist bekannt, daß ein homogener Magnetzylinder ein Magnetfeld hervorruft, welches völlig jenem einer geometrisch gleichgeformten Röhrensule mit konstantem Strombelag gleicht. Das RUTHERFORD-BOHR'sche Atommodell erklärt diese molekularen Elementarströme durch die Vorstellung, daß um sich selbst rotierende Elektronen die einzelnen Atomkerne umlaufen. Denkt man sich diese elementaren Kreisströme kontinuierlich aneinandergereiht, so erkennt man, daß sie sich im Inneren der Materie gegenseitig kompensieren; an der Manteloberfläche des Magneten hingegen verbleibt ein Elementarstrombelag [Cas89].

Zur Berechnung wird der Permanentmagnet durch die mit dem Ersatzstrom

$$I_{er} = \frac{J_{mag}}{\mu_0} \cdot h_{mag} \quad (2.65)$$

(J_{mag} : Polarisierung [T], h_{mag} : Höhe in Richtung der Magnetisierung)

durchflossenen Strompfade ersetzt, welche das gleiche Magnetfeld wie der eingesetzte Permanentmagnet erzeugen. Die Elementarstromtheorie kann nur angewendet werden, wenn die relative Permeabilität des Werkstoffs 1 und keine weichmagnetischen Werkstoffe zur Flußleitung verwendet werden. Für die neuen hartmagnetischen Werkstoffe ist dies der Fall. Aufgrund der einfachen Möglichkeit der Berechnung wird hier auf einen Eisenkreis zur Flußlei-

tung verzichtet. Bei einem realen Magnetkreis ist hingegen, neben dem permanentmagnetischen Material, Eisen zur Flußleitung unabkömmlich.

Mit Hilfe der magnetischen Induktion um einen linienförmigen Leiter

$$B(r) = \frac{I_{er}}{2\pi r} \cdot \mu_0 \quad (2.66)$$

kann die magnetische Induktion um jeden Strompfad berechnet werden. Die Überlagerung der Felder der einzelnen Strompfade führt zum Magnetfeld der Anordnung.

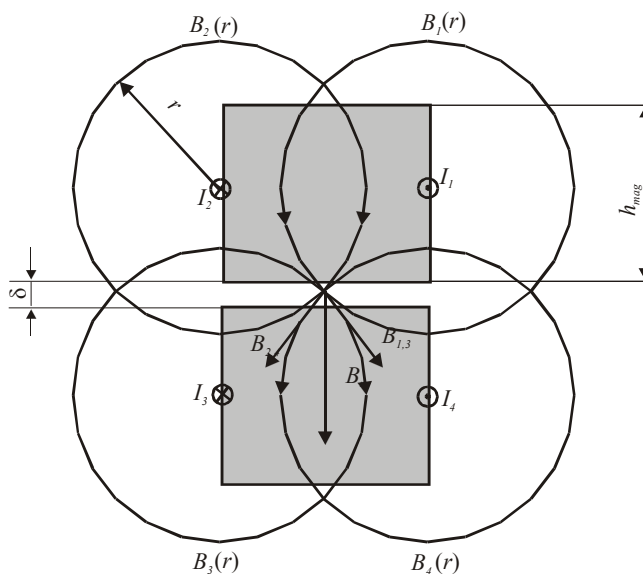


Abb. 2.10: Modell zweier Permanentmagneten nach der Elementarstromtheorie.

In der Abb. 2.10 ist ein einfaches Modell dargestellt. Es besteht aus zwei Permanentmagneten gleicher Magnetisierung. Diese werden durch den Ersatzstrom nachgebildet. Für eine einfache Abschätzung sind pro Magnet zwei Strompfade ausreichend. Im Luftspalt zwischen den Magneten befinden sich die bewegungserzeugenden Strompfade, sie sind nicht eingezeichnet. Bei geometrisch ähnlicher Verkleinerung oder Vergrößerung bleibt das Magnetfeld im Luftspalt konstant. Dies kann nachgewiesen werden, wenn nur der Punkt betrachtet wird, bei dem sich in der Abb. 2.10 die vier Feldlinien $B_1(r)$, $B_2(r)$, $B_3(r)$, $B_4(r)$, schneiden. Bei geometrisch ähnlicher Veränderung ist der Radius r proportional der Höhe des Magneten h_{mag} :

$$r = \frac{3}{4} h. \quad (2.67)$$

Durch Einsetzen von (2.65) und (2.67) in (2.66) ergibt sich eine von der Größe unabhängige Beziehung:

$$B\left(\frac{3}{4}h_{mag}\right) = \frac{J_{mag}}{2\pi \frac{3}{4}}, \quad B(n \cdot h_{mag}) = \frac{J_{mag}}{2\pi \cdot n}. \quad (2.68)$$

Die magnetische Induktion im Luftspalt ist also bei geometrisch ähnlicher Veränderung konstant, so daß für alle elektrodynamischen Antriebe die gleiche magnetische Induktion angenommen werden kann.

Parameter bei maximaler Leistung

Aus der maximalen Leistungsdichte (2.61), der Gleichung für die Anzugskraft (2.11) und der Gleichung für die Motorkraft im Arbeitspunkt (2.18) ergibt sich bei vorgegebener Stromdichte J die Geschwindigkeit

$$v = \frac{2 \cdot \rho \cdot J(\rho, \eta_u)}{B} \quad (2.69)$$

und die vom Volumen abhängige Motorkraft im Arbeitspunkt

$$F_m = \frac{V \cdot \eta_u \cdot J(\rho, \eta_u) \cdot B}{2}. \quad (2.70)$$

Die Motorkraft und die Geschwindigkeit können so allein aus geometrischen Größen berechnet werden. Die Parameter für verschiedene Stromdichten und Volumina sind in Abb. 2.9 dargestellt.

Leistungsanpassung

Wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben wurde, gibt es für jede maximale Stromdichte ein konkretes Kraft-Geschwindigkeits-Paar, so daß die freie Wahl dieser Parameter nicht möglich ist. Demzufolge muß das mechanische System über ein geeignetes Getriebe an den Antrieb angepaßt werden.

Durch die zweite Anpassung, Einschränkung des Wirkungsbereiches, wird der Aktor so ausgelegt, daß er nur einen Teil der Betriebskennlinie nutzt. Ist die benötigte Motorkraft kleiner als im Punkt der maximalen Leistung, kann die Eingangsspannung so lange erhöht werden, bis der Motorstrom infolge Motorkraft, bestehend aus Gegenkraft und Reibkraft, auf den maximal zulässigen Wert angestiegen ist. Die Verlustleistung bleibt dabei konstant. Bei den zuvor beschriebenen idealen Aktoren mit vernachlässigten Leerlaufverlusten kann die Ge-

schwindigkeit durch Erhöhung der Eingangsspannung theoretisch beliebig hochgetrieben werden. Durch die Leerlaufverluste wird dies jedoch begrenzt. Unter dieser Voraussetzung ergibt sich bei bekannter maximal zulässiger Verlustleistung unter Einbeziehung des Wirkungsgrades sowie der Motor- und Reibkraft die Geschwindigkeit

$$v = \frac{\eta \cdot P_v}{(F_m + F_R)(1 - \eta)}, \quad (2.71)$$

η ist dabei der Wirkungsgrad im gewählten Arbeitspunkt, bestimmt durch F_m und F_R .

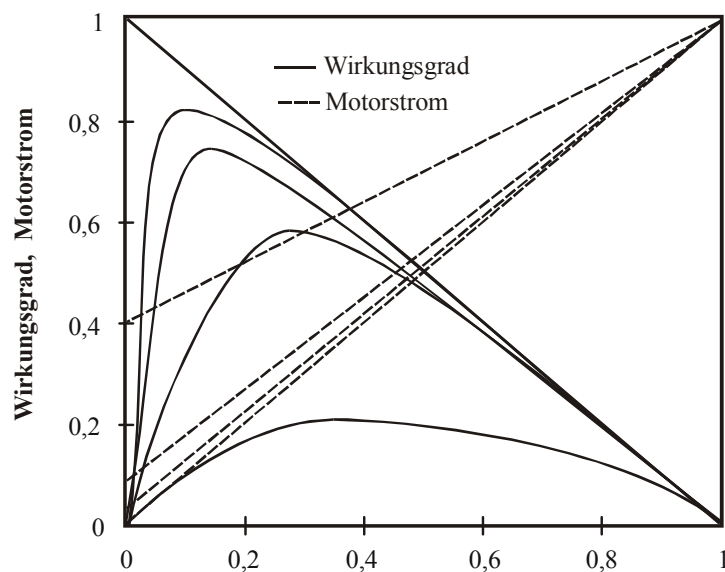


Abb. 2.11 Stationäre Betriebskennlinie realer Kleingleichstrommotoren.

Der Verlauf des Wirkungsgrades in Abhängigkeit von der Motorkraft realer Maschinen ist in der Abb. 2.11 aufgetragen. Zu sehen ist auch, daß mit geometrischer Verkleinerung der maximale Wirkungsgrad stark abnimmt und zu höheren Motorkräften wandert.

Tabelle 2.1: Kennwerte ausgewählter Hochleistungs-Gleichstrommotoren von Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG [Fau98].

Motortyp	Masse	Maximaler Wirkungsgrad	Punkt des maximalen Wirkungsgrades, bezogen auf das Anzugsmoment M_A	Leerlaufstrom, bezogen auf den Maximalstrom I_A
BL 1900	91 mg	16 %	37 % von M_A	40 % von I_A
1516 006 SR	13 g	58%	27 % von M_A	8,2% von I_A
1524 006 SR	21 g	77%	13 % von M_A	3,3 % von I_A
2224 006 SR	46 g	82%	10 % von M_A	2,5 % von I_A

Des weiteren steigt der Leerlaufstrom infolge der Leerlaufverluste an. Die Tabelle 2.1 zeigt weitere Kennwerte existierender Hochleistungs-Gleichstrommotoren. Da in diesem Fall ein Strom fließt, ohne daß eine mechanische Leistung ausgekoppelt werden kann, ist der Wir-

kungsgrad im Anfangsbereich gleich Null. Nach [Kal91] berechnet sich der Punkt des maximalen Wirkungsgrades nach:

$$\eta_{max} = \frac{1 - \sqrt{\frac{F_R}{F_a}}}{1 + \sqrt{\frac{F_R}{F_a}}} \quad (2.72)$$

Dies begrenzt die maximale Geschwindigkeit. Der ideale Antrieb ohne Reibung würde eine Begrenzung der Geschwindigkeit durch die Verlustleistung nicht zulassen, da bei der Leerlaufdrehzahl der Motorstrom zu Null wird. Für die Betrachtungen ist dies jedoch unkritisch, da die Reibungsarbeit mit zur mechanischen Arbeit gerechnet und ausschließlich der Fall der maximalen mechanischen Leistung betrachtet wurde.

2.3.2 Elektro-magneto-mechanische Antriebe

Bei elektro-magneto-mechanischen Aktoren ist eine konstruktive Anpassung an hohe Geschwindigkeiten nicht notwendig. Wie aus den stationären Betriebskennlinien ersichtlich, ist die Leerlaufgeschwindigkeit nicht begrenzt und die Momentangeschwindigkeit wird nur durch die Gegenkraft begrenzt. Diese Aktoren werden in der Regel so ausgelegt, daß sie hohe Anzugskräfte erreichen. Zur Anpassung der elektrischen Eingangsparameter wird die Windungszahl bei konstantem Füllfaktor variiert.

2.3.3 Anpassung elektrostatischer Antriebe

Bei elektrostatischen Aktoren ist keine Anpassung möglich. Sie werden im Bereich der Anzugskraft betrieben. Hier ist der Wirkungsgrad maximal und der Stromfluß minimal.

2.3.4 Skalierungsverhalten

In der Mikroaktorik ist die Frage interessant, in welcher Weise die pro Volumeneinheit umsetzbare mechanische Leistung und Energie von der geometrischen Größe des Aktors selbst abhängig ist. Diese auf das Volumen bezogenen Größen werden Leistungsdichte bzw. Energiedichte genannt. Wie die Untersuchungen gezeigt haben, steigen bei Miniaturisierung die Leistungsdichten wegen der besseren Wärmeabfuhr (Verhältnis von Oberfläche zu Volumen wird größer). Dies geschieht unabhängig vom Wandlungsprinzip. Interessant ist das Verhältnis von Motorkraft und zugehöriger Geschwindigkeit.

Bei der Bewertung des Skalierungsverhaltens kann im Fall elektro-magneto-mechanischer und elektrostatischer Aktoren auf veröffentlichte Untersuchungen in [Kal94] und [Flu96] zurückgegriffen werden. Die Kriterien sind die Energiedichten im magnetischem bzw. elektrostatischem Feld. In der Abb. 2.12 ist der Verlauf der Energiedichten von magnetischen und elektrostatischen Aktoren in Abhängigkeit der geometrischen Größe aufgetragen.

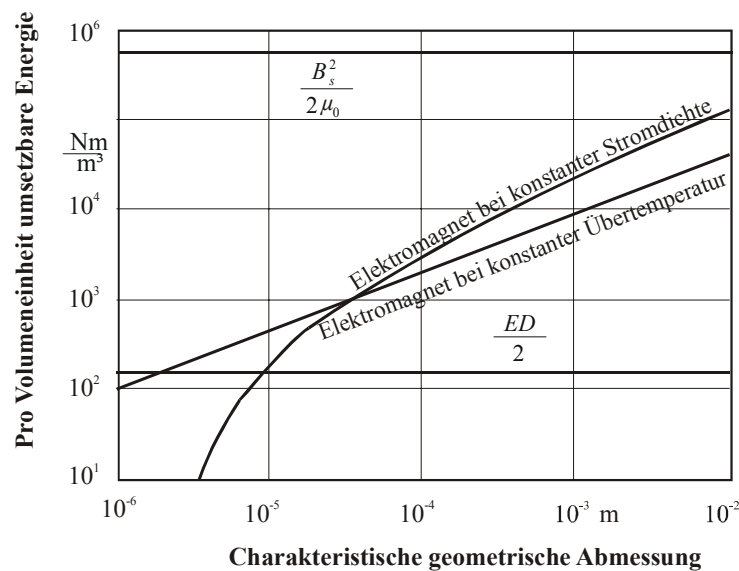


Abb. 2.12: Vergleich elektro-magneto-mechanischer und elektrostatischer Aktoren: Energiedichte im magnetischen bzw. im elektrischen Feld; wandelbare Energie eines Topfmagneten bei konstanter Stromdichte bzw. konstanter Übertemperatur [Kal94].

Für elektrodynamische Aktoren kann keine Energiedichte angegeben werden. Es können aber die Gleichungen (2.69) und (2.70) für die volumenabhängige Motorkraft und die Geschwindigkeit im Punkt der maximalen Leistung verwendet werden. Im Abschnitt 2.3.1 wurde nachgewiesen, daß die magnetische Induktion einer Permanentmagnet-Anordnung bei geometrisch ähnlicher Variation von der Größe unabhängig ist. Durch das Ansteigen der maximalen Stromdichte bei geometrisch ähnlicher Volumenreduzierung steigt auch die volumenbezogene Motorkraft elektrodynamischer Aktoren.

2.4 Zusammenfassender Vergleich der Antriebsprinzipien

Ein objektiver Vergleich des Skalierungsverhaltens der Antriebsprinzipien anhand der Energie- oder Leistungsdichten ist nur schwer möglich. Aufgrund der Energiedichte nach Abb. 2.12 besitzt die elektro-magneto-mechanische Energiewandlung Vorteile im oberen Mikrometerbereich, elektrostatische hingegen im unteren Mikrometer- bis hin zum Nanometerbe-

reich. Permanentmagneterregte Aktoren sind nach Abschnitt 2.3.1 sowohl in der Mikro- als auch in der Makrodimension sinnvoll einzusetzen.

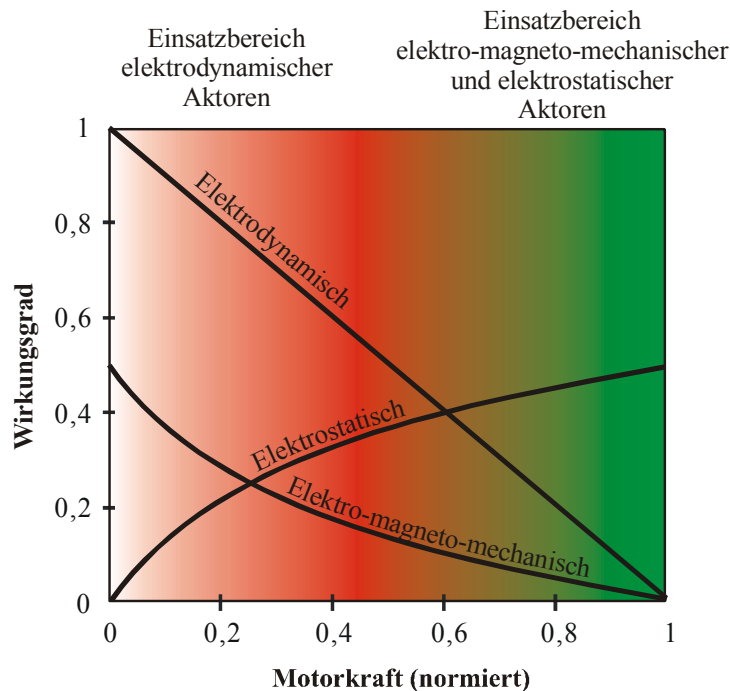


Abb. 2.13: Einsatzbereiche magnetisch und elektrostatisch wirkender Aktoren.

Ausschlaggebend für die objektive Wahl eines Energiewandlungsprinzips für eine spezielle Anwendung können nur die stationären Betriebskennlinien sein. Fertigungstechnische Aspekte sollen zur Zeit noch unberücksichtigt bleiben. In der Abb. 2.13 sind die Einsatzbereiche in Abhängigkeit von der Motorkraft dargestellt. Unter Berücksichtigung der stationären Betriebskennlinien gilt für die untersuchten Prinzipien:

- Elektrostatische Aktoren werden effizient im Bereich der Anzugskraft eingesetzt. Der Wirkungsgrad ist hier maximal.
- Elektro-magneto-mechanische Aktoren wären, in Bezug auf den Wirkungsgrad, effektiv im unteren Drittel der Anzugskraft einzusetzen. Aufgrund der hohen Anzugskraft werden sie aber bevorzugt im oberen Drittel der Anzugskraft eingesetzt, z.B. als Schrittmotor oder Haltemagnet. Der geringe Wirkungsgrad kann nach [Kal94] durch polarisierte Magnete erhöht werden.
- Unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades und der erreichbaren Motorkraft und der Geschwindigkeit liegt der energetisch günstigste Einsatzbereich elektrodynamischer Aktoren ebenfalls im unteren Drittel der Anzugskraft. Ein dauerhafter Einsatz im Bereich der An-

zugskraft ist möglich, aber die beiden anderen Energiewandlungsprinzipien sind, in Abhängigkeit der geometrischen Größe infolge der größeren Kräfte bzw. des höheren Wirkungsgrades, vorzuziehen.

3 Anwendungen und Aufbau der Mikroantriebe

Die Antriebsaufgabe kann durch die benötigte Kraft-Weg-Kennlinie und dem Arbeitspunkt auf den dargestellten Betriebskennlinien charakterisiert werden. Die Auswahl eines Energie-wandlungsprinzips ist so neben den erreichbaren leistungsbestimmenden Parametern (Kraft und Geschwindigkeit) auch abhängig von der Lage des Arbeitspunktes auf der Betriebskennlinie. Nach den Aussagen unter Abschnitt 2.2 unterscheiden sich die Lagen günstiger Arbeitspunkte dieser betrachteten Prinzipien stark. So ist es notwendig, die Antriebsaufgaben nach der Lage des Arbeitspunktes und den Leistungsparametern aufzugliedern.

3.1 Anwendungsfelder und Einteilung von Mikroaktoren

Bei der Suche nach Anwendungen für Mikroantriebe können zwei Felder untersucht werden. Zum einen sind dies konventionelle Anwendungen, bei denen die derzeit verwendeten Makroaktoren oft überdimensioniert sind. In diesen Fällen können an die Bewegungsaufgabe angepasste Mikroaktoren verwendet werden. Zum anderen erschließen sich durch die neuen Eigenschaften der Mikroaktoren neue Anwendungsfelder.

Die Vielfalt der derzeit existierenden Mikroaktoren mit den bisher dafür vorgesehenen Anwendungen lassen sich nach der Art, wie sie mit ihrer Umgebung wechselwirken, einteilen. Aufgrund des filigranen Aufbaus der meisten Aktoren werden Anwendungen bevorzugt, die keine mechanische Kopplung nach außen besitzen; die gesamte mechanische Arbeit wird im Mikrosystem verrichtet, wie bei optischen Scannern und elektrischen oder optischen Schaltern. Bei Anwendungen, die es erfordern, mechanische Leistung über die Systemgrenzen zu verrichten, sind die mechanischen Störgrößen zu berücksichtigen.

Mikroantriebe		
Starke Wechselwirkung mit der Umgebung	Geringe Wechselwirkung mit der Umgebung	Keine Wechselwirkung mit der Umgebung
Manipulatoren (Greifer) Pumpen Ventile	Tintenstrahl-druckkopf	Scanner Schalter (Relais) Signalelemente (Uhrenantriebe)

Abb. 3.1: Einteilung der Mikroaktoren nach der Stärke der Wechselwirkung mit der Umgebung.

Sie sind in der Regel sehr gering oder exakt definiert und begrenzt. Beispiele sind Tintenstrahldrucker, Pumpen und Manipulationswerkzeuge. In der Abb. 3.1 ist eine zusammenfassende Darstellung mit einigen Beispielen aufgeführt, die nach dem heutigen Stand der Wissenschaft und Technik sinnvoll erscheinen.

In der Tabelle 3.1 sind einige mögliche Anwendungen, bei denen Mikroantriebe konventionelle Antriebe ersetzen können, zusammenfassend aufgeführt. Viele Antriebslösungen für konventionelle Anwendungen sind überdimensioniert. In den konkreten Fällen übersteigen die erzeugten Kräfte die benötigten um ein Vielfaches. Durch die größeren zu bewegenden Massen ist die Dynamik erheblich eingeschränkt. Als Beispiele sind insbesondere die optischen Schalter in der Informationsübertragung zu nennen. Auch zahlreiche Relais sind für Anwendungen in der Informationstechnik überdimensioniert.

Tabelle 3.1: Antriebsaufgaben, die auch mit konventionellen Aktoren gelöst werden können.

Konventionelle Anwendung und Lösungen	Mikrotechnische Lösung und ihre Vorteile
Tintenstrahldruckköpfe	Piezoelektrischer Druckkopf (höhere Auflösung, schnelleres und sauberes Drucken)
Ablenken von Laserstrahlen Galvanometer-Scanner	elektrostatische oder elektrodynamische Schwenkspiegel (höhere Dynamik)
Schalter für elektrischen Strom	Mikrorelais (sinnvoll für geringe Ströme, kleinere Leistung, geringerer Platzbedarf)
Schalter in der Optoelektronik	Positionierungsantrieb für Lichtwellenleiter, Linsen oder andere optische Elemente (kleinere Leistung, geringerer Platzbedarf)

Neue Anwendungen eröffnen sich in der Minimal-Invasiven Chirurgie [Wag99]. Hier werden Mikroaktoren benötigt, welche die chirurgischen Werkzeuge betätigen und für ihren Vortrieb sorgen.

Ein weiteres neues Feld sind kaskadierte Mikroaktoren. Kaskadierte Mikroaktoren sollen hier als eine 2- oder 3-dimensionale, serielle und parallele mechanische Verkopplung von Mikroaktoren definiert werden. Die Kopplung kann sowohl elastisch als auch starr sein. Nach [Mei99] wird, um die Dynamik zu erhöhen, in Kraft- oder Wirkrichtung eher eine steife Kopplung verwendet. Um eine Überbestimmtheit und gegenseitige Behinderung zu vermeiden, besteht in den anderen Richtungen eine elastische Kopplung (Fremdkraft-Toleranz). Die von den verschiedenen realisierten Mikroaktoren erreichten Wirkgrößen liegen im Mikrobeereich. Die geringen Kräfte und Wege lassen wiederum nur Anwendungsgebiete im Mikrobeereich zu. Durch eine Kaskadierung vieler Mikroaktoren zu einem komplexen makroskopischen Antrieb ist eine Vervielfachung dieser Wirkgrößen möglich. Allein durch die lineare Vergrößerung der Wirkgrößen werden keine neuen Anwendungsfelder, welche nicht schon

durch herkömmliche Antriebe besetzt sind, geschaffen. In diesem Fall ist der Einsatz eines Antriebs, der aus einer einzelnen Energiewandlungseinheit besteht, sicherlich ökonomisch günstiger. Jedoch läßt sich beim genauen Studium biologischer Systeme ein sinnvolles Nutzungsgebiet für kaskadierte Mikroaktoren erkennen. Einen Einblick, welche Möglichkeiten diese im Gegensatz zu kompakten Makroaktoren bieten, gibt der Aufbau und die Ansteuerung des biologischen Antriebs - des Skelettmuskels. Muskuläre Antriebe sind hochgradig strukturell hierarchisiert, da eine große Anzahl kraftgenerierender Elemente jeweils zu einer höheren Einheit mechanisch verkoppelt ist [Fra98]. Neben der Ansteuerung der muskulären Antriebe bestehen noch weitere mikrotechnisch relevante Aspekte:

- Die translatorische Bewegungsform ist der nachgiebigen kinematischen Struktur monolithischer Mikromechanismen kompatibel.
- Die intrinsische Elastizität ermöglicht eine Tolerierung von Fremdkräften bei Sperrstellung.

Eine dezentrale und wirkstellennahe Anordnung wird bevorzugt, um Transmissionsstrecken zu minimieren (Direktantriebs-Netze). Durch die Verknüpfung kaskadierter Mikroantriebe mit den Ansteuerstrategien muskulärer Antriebe wird eine neue Generation von Aktoren mit neuen Anwendungsfeldern geschaffen. Eine technisch besonders interessante Eigenschaft ist die ruck- und stoßfreie Ausführung komplizierter Bewegungen. Dies läßt sich darauf zurückführen, daß der Muskelantrieb sowohl für die Geschwindigkeitserzeugung als auch für die Kraftgenerierung bei geringer Gegenkraft bzw. bei geringer Geschwindigkeit optimal ausgelegt ist. Er ist zudem in der Lage, als Dämpfungselement mit einstellbarer Kennlinie die Bewegungen des Gesamtsystems zu bremsen. Nach [Mei99] benötigen Lebewesen zur Erhaltung stabiler Zustände, zum Beispiel bei der Lokomotion, erheblich weniger Regelaufwand als technische Laufmaschinen mit wenigen Einzelaktoren. Diese Eigenschaft ist durch das Feder-Dämpfer-Verhalten des Muskelgewebes mit aktiven Muskel- und passiven Bindegewebsfasern begründet. Diese Vorteile können auf Maschinen, die kaskadierte Mikroantriebe enthalten, übertragen werden.

Zur Auswahl geeigneter Antriebsprinzipien sind die Arbeitspunkte der einzelnen Anwendungen auf der Betriebskennlinie zu beachten. Einige wichtige zusätzliche Kriterien sind:

- die Größe des Antriebs, welcher die geforderten Kraft- und Geschwindigkeitsparameter erfüllt,
- die Anpassbarkeit des Antriebs ohne mechanische Getriebe an die geforderten Parameter,
- und die elektrischen Eingangsparameter.

In der Tabelle 3.2 sind verschiedene Anwendungen bestimmter Punkte auf der Betriebskennlinie zugeordnet. Die Art der Bewegung bestimmt den Arbeitspunkt. So muß bei federgeführten Aktoren zwischen einer harmonischen (mit der Resonanzfrequenz) und den sonstigen Bewegungsformen unterschieden werden. Für erstere kann der Arbeitspunkt in Abhängigkeit von der Belastung, in diesem Fall als Dämpfung wirkend, alle Positionen auf der Betriebskennlinie annehmen. Bei schwacher Dämpfung liegt der Arbeitspunkt im Bereich der Leerlaufgeschwindigkeit, bei sehr starker Dämpfung hingegen im Bereich der Anzugskraft.

Tabelle 3.2: Einteilung nach Position des Arbeitspunktes, Unterscheidungsmerkmale in Bezug auf die Betriebskennlinie.

Anzugskraft	Leerlaufgeschwindigkeit	Leistungsoptimum
Antriebe, die gegen eine Gegenkraft eine feste Position halten	Kontinuierlich laufende Antriebe, die translatorische oder rotatorische Bewegungen ausführen	Kontinuierlich laufende Antriebe, die translatorische oder rotatorische Bewegungen ausführen
Federgeführte Antriebe, die nicht mit der Resonanzfrequenz betrieben werden	Federgeführte Antriebe, die harmonisch mit der Resonanzfrequenz betrieben werden	Federgeführte Antriebe, die harmonisch mit der Resonanzfrequenz betrieben werden
Halte-Magnete Ventile Positionierantriebe Schwingspiegel CD-Lese-/Schreibköpfe	Rotations-Scanner Uhrenantriebe Schwingspiegel Ventilatoren	

3.2 Allgemeiner Aufbau magnetischer Mikroantriebe

Der Aktor besteht hauptsächlich aus dem Energiewandlungselement, welches einen magnetischen Kreis und eine steuerbare Quelle für den magnetischen Fluss beinhaltet. In der Regel findet die Energiewandlung zwischen Läufer und Stator statt. Infolge der generierten Kräfte bewegt sich der Läufer relativ zum Stator, dabei können drei Schiebungen (x , y , z) und drei Drehungen (α , β , γ) auftreten. Besitzt der Antrieb nur ein steuerbares Energiewandlungselement, kann er den Freiheitsgrad 1 bedienen. Die restliche Freiheiten müssen durch Lager oder Führungen gesperrt werden. In den meisten Fällen nehmen diese Lager nicht nur die inneren, sondern auch die äußeren Kräfte auf, die durch Wechselwirkungen mit der Umgebung entstehen. Der Aktor sollte derart konstruiert werden, daß die Antriebsrichtung mit der größten erzeugten Kraft zusammenfällt, dies ist aber nicht immer möglich. Neben der optimalen Nutzung der Antriebsenergie wird der Aufwand für die Lagerung somit gering gehalten. Bei Mikroaktoren können die beschriebenen Bestandteile wegen der zunehmenden Funktionsintegration oft nicht eindeutig voneinander getrennt werden.

3.2.1 Führungen und Lager

Ein wesentlicher Bestandteil von elektrischen Aktoren ist die Lagerung, die den Läufer relativ zum feststehenden Stator führt. Die Führung bzw. das Lager hat grundsätzlich die Aufgabe, alle nicht gewünschten Freiheiten zu sperren. Ein freibeweglicher Körper kann bezüglich der drei Raumkoordinaten sechs Einzelbewegungen (drei Drehungen und drei Schiebungen) ausführen. Die Anzahl der in einem Gelenk unabhängig voneinander möglichen relativen Einzelbewegungen ist der Gelenkfreiheitsgrad f . Gelenke werden u.a. nach ihrem Gelenkfreiheitsgrad unterschieden, wobei f mindestens 1 und höchstens 5 betragen kann. Gelenke mit $f=1$ ermöglichen entweder eine Rotationsbewegung (Drehgelenk) oder eine Translationsbewegung (Schubgelenk). Die Drehgelenke werden in ihrer konstruktiven Ausführung als Lager und Schubgelenke als Führungen bezeichnet [Kra89]. Die Aufgabe der Lager und Führungen, die zu bewegenden Teile (hier Läufer und Stator) abzustützen und die vorgeschriebene Lage im Raum sichern, soll möglichst verlustfrei und mit hoher Zuverlässigkeit erfolgen - dem stehen Reibung und Verschleiß entgegen. Im Folgenden soll hauptsächlich von Führungen gesprochen werden. Für einen elektrodynamischen Mikroaktor lautet, wie für jeden anderen Antrieb auch, die Aufgabe der Führung:

- den Läufer in der Bewegungsrichtung möglichst wenig zu behindern;
- die vom Läufer erzeugten Kräfte, welche nicht in Bewegungsrichtung wirken, aufzunehmen und
- die entstehenden Fremdkräfte bei Belastung des Läufers zu kompensieren.

Bei der Auswahl der Führung bei Mikroaktoren kann nicht auf den gleichen Lösungsraum zurückgegriffen werden wie bei feinwerktechnischen Aktoren. Zum einen existieren nicht die Fertigungsverfahren, um alle bekannten Lösungen zu miniaturisieren, zum anderen ergeben sich aus der Verkleinerung physikalische Randbedingungen, welche den Einsatz nicht mehr sinnvoll erscheinen lassen. Hierbei sind besonders oberflächenabhängige Effekte zu berücksichtigen. Bei geometrisch ähnlicher Miniaturisierung verkleinert sich das Verhältnis von Volumen zu Oberfläche proportional dem Maßstab der Verkleinerung (Allometrie). So verlieren volumenabhängige Größen wie die Gewichtskraft an Bedeutung und oberflächenabhängige treten in den Vordergrund, wie zum Beispiel Adhäsionskräfte. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Möglichkeit der integrierten Herstellung von Führungs- und Antriebselementen. Zur Zeit werden für Kleinst- und Mikroantriebe Wälz-, Gleit-, Luft- oder Magnetlager und Federführungen verwendet. Bei der Auswahl einer geeigneten Führungskonstruktion ist

1. die Bewegungsaufgabe (translatorische oder rotatorische, kontinuierliche oder periodische Bewegung) und
2. der Energieaufwand für die Führung (Wirkungsgrad der Führung, gekennzeichnet durch die Reibung im Wälzlager oder im Gleitlager, die Volumenänderungsarbeit im Luftlager und die elektrische Energie bei einem Magnetlager)

zu berücksichtigen.

Die Eigenschaften der in Frage kommenden Lager und Führungsarten werden im Folgenden dargestellt.

Gleitlager

Bei Gleitlagern mindert die Reibung den Wirkungsgrad. Sie sind einfach in der Herstellung und besitzen bei miniaturisierten Ausführungen einen höheren Wirkungsgrad als Wälzlager (in der Makrotechnik sind die Verhältnisse umgekehrt). Ausschlaggebend für die Anwendung in Mikroaktoren ist die Änderung des Wirkungsgrades bei Verkleinerung. Da die Reibungskraft bei maßstabsgerechter Verkleinerung im allgemeinen nur abhängig von der Normalkraft und diese proportional dem Gewicht oder dem Volumen angesehen werden kann, ist der Wirkungsgrad unabhängig von der geometrischen Größe. Aus diesem Grund und wegen der einfachen Herstellung haben sich die Gleitlager bei Miniaturaktoren wie zum Beispiel bei Uhrenantrieben und einigen Rotation-Mikroaktoren durchgesetzt [Fau98]. Damit auf eine Schmierung verzichtet werden kann, wird die Lagerschale meist aus einem sehr harten, feinstbearbeiteten Material, wie z.B. Saphir, hergestellt. Das Problem ist die notwendige Montage und paßgenaue Fertigung von Lager und Welle.

Wälzlager

Das Wälzlager besteht aus Ringen, dem Außenring und dem Innenring mit Rollbahnen, zwischen denen die Wälzkörper abrollen. Die Wälzkörper sind meist in einem Käfig gefaßt, wodurch sie in einem gleichmäßigen Abstand gehalten werden, um eine gegenseitige Berührung zu verhindern. Der Montage- und Herstellungsaufwand ist durch die Wälzkörper erheblich höher als bei Gleitlagern.

Der Einsatz von Wälzlagern in der Mikrotechnik ist durch Fertigungstoleranzen und den Herstellungsaufwand stark eingeschränkt. Bei der konventionellen Fertigung steigt die absolute Genauigkeit, wohingegen die relative Genauigkeit sinkt. Wird Mikrotechnik eingesetzt, wird zwar eine hohe Präzision erreicht, die relative Genauigkeit und Oberflächengüte erlangt je-

doch nicht den Wert der Feinwerktechnik. Wird ausschließlich das Skalierungsverhalten betrachtet, vergrößert sich der Wirkungsgrad von Wälzlagern mit zunehmender maßstabsge-rechter Verkleinerung. Dies wird nachgewiesen, wenn die Rollreibung in Abhängigkeit einer charakteristischen geometrischen Größe betrachtet wird.

Für die Rollreibung gilt:

$$F_R = \frac{F_n \cdot f_h}{r}, F_N = F_G, F_G \sim r^3, F_R \sim r^2, \quad (3.1)$$

wobei F_R die Rollreibungskraft, F_N die Normalkraft, F_G die Gewichtskraft, r den Radius und f_h den Hebelarm der Rollreibung darstellt. Der Hebelarm ist von der elastischen Verformung der Unterlage abhängig und sinkt mit deren steigender Härte. Die Beziehung zeigt, daß der Einsatz von Wälzlagern in der Mikrotechnik sinnvoll wäre, wenn man davon ausgeht, daß die Gewichtskraft proportional dem Radius r ist. So fällt bei geometrisch ähnlicher Verkleinerung die Reibkraft schneller als die Gewichtskraft, denn diese ist abhängig von der dritten Potenz des Radius, die Reibkraft aber nur von dessen zweiter Potenz.

Strömungslager

Eine Möglichkeit stellen Strömungslager oder auch Luftlager dar. Durch im Stator angeordnete Düsen wird Druckluft unter den Läufer geführt, welcher dadurch angehoben wird. In fast allen Fällen ist eine Regelung des Abstandes zwischen Stator und Läufer notwendig [Rie97]. Wird nur die Reibung betrachtet, ist der Wirkungsgrad sehr hoch, die notwendige Volumenänderungsarbeit zur Druckluftherzeugung führt wiederum zu dessen deutlicher Verminderung. Durch den hohen apparativen und regelungstechnischen Aufwand eignen sich diese Lager nicht für Mikroantriebe. Nicht betrachtet werden aerodynamische Lager, die sich noch im Entwicklungsstadium befinden [Iof00]

Magnetlager

Neben den konventionellen Lagern, wie Wälz- und Gleitlager, werden bei schnellaufenden Maschinen zunehmend aktive Lager in Form von Magnetlagern verwendet. Die in Magnetlagern zu realisierenden Kräfte sind jedoch im allgemeinen um Größenordnungen kleiner als in den zuvor genannten Lagerungsarten. Sie bieten jedoch den Vorteil, daß sie berührungslos arbeiten und deshalb vor allem für hohe Drehzahlen oder Geschwindigkeiten geeignet sind. Das zu lagernde Bauteil (Welle) wird in der Regel über Elektromagnete im Gleichgewicht gehalten. In [Klö98] und [Hei98] werden Magnetlager für Linearmotoren und Polygonscanner verwendet, welche in einer Koordinatenrichtung aktiv geregelt werden. Hierdurch ist der re-

gelungstechnische und materielle Aufwand, mit Luftlagern vergleichbar, hoch und nur für spezielle Mikroantriebe geeignet. Der Vollständigkeit halber sind noch die passiven, auf supraleitenden Materialien basierenden Lager zu nennen, hier ist nach [Leh00] keine Energiezufuhr notwendig. In [May00] werden berührungsfreie selbststabile Magnetlager vorgestellt, die aufgrund der Wechselwirkung von Permanentmagnetfeldern mit monolithischen Hochtemperatur-Supraleitern (HTSL) völlig passiv und damit gegenüber geregelten Magnetlagern wartungsarm, hoch zuverlässig und elektro-magnetisch verträglich arbeiten. Als besonders vorteilhaft dürfte der Fortfall der aufwendigen Sensorik und Leistungselektronik zu werten sein. Die Kraftentwicklung von monolithischen Supraleitern wird nach [May00] wie folgt beschrieben:

Wird ein Supraleiter auf eine Temperatur unterhalb der CURIE-Temperatur (T_c) z.B. mit flüssigem Stickstoff abgekühlt, so friert er das ihn in dieser Position durchdringende Magnetfeld ein. Bei Verschiebungen aus diesem Zustand hält der Hochtemperatur-Supraleiter aufgrund von inneren Strömen diese innere Feldverteilung gegenüber der äußeren aufrecht, was automatisch mit einer Energieänderung und damit einer immer stabilen rückstellenden Kraftentwicklung verbunden ist.

Federführungen

In der Mikrotechnik haben Federführungen durchgesetzt.. Sie bestehen aus Gelenkmechanismen nach der Art eines Gelenkvierecks oder aus der Kombination mehrerer solcher Systeme, deren Koppel eine exakte oder angenäherte Translationsbewegung ausführen. Wesentlich dabei ist, daß die Gelenke und manchmal auch einige Koppelglieder durch elastische Elemente in Form von Federn gebildet werden. Die bisher am häufigsten verwendeten Federführungen gehen auf die Parallelfederführungen zurück [Kra89]. Es können aber auch einfache Blattfedern als Federführungen verwendet werden. Damit ergeben sich besonders vorteilhafte Eigenschaften, insbesondere Spielfreiheit, praktische Reibungsfreiheit sowie weitgehende Verschleißfreiheit. Die effektive Nutzung dieser Eigenschaften wird eingeschränkt durch die relativ kleinen Führungswege, den sperrigen Aufbau und die Neigung zu Schwingungen. Ferner wirken sich Querabweichungen und Kippung bei Auslenkungen an einfachen Parallelfederführungen nachteilig aus. Diese Nachteile können durch eine angepaßte Gestaltung ausgeglichen werden.

Dadurch sind die Bewegungsformen stark eingeschränkt. So sind nur oszillierende Bewegungen in einem beschränkten Raum möglich. Die oben genannten nicht-stoffschlüssigen Lage-

rungen lassen hingegen mehr Spielraum in der Gestaltung der Bewegung zu, sind aber in den Mikrobereich nicht ohne weiteres zu übertragen. Bei der Bestimmung des Wirkungsgrades ist die notwendige, zur Verformung der Feder benötigte Kraft und die innere Reibung zu berücksichtigen.

Um die Einsatzfähigkeit der Federführungen bei elektrodynamischen Mikroaktoren zu bewerten, ist der Leistungsumsatz in solchen Anordnungen zu bestimmen. Die bevorzugte Methode der Lagerung bei Mikroaktoren ist die Federführung. Mit zunehmender Verkleinerung besteht nur noch die Möglichkeit, Federführungen einzusetzen. Der Nachteil besteht im begrenzten Bewegungsbereich und der von der Auslenkung abhängigen Federkraft, die vom Aktor zusätzlich aufzubringen ist. Diese zusätzliche Kraft beeinflusst die Lage des Arbeitspunktes auf den stationären Betriebskennlinien.

3.2.2 Felderzeugung

Zur Herstellung magnetisch wirkender Antriebe wird mindestens eine steuerbare Quelle des magnetischen Flusses benötigt. Bei elektrodynamischen Aktoren reichen in der Regel stromdurchflossene Strompfade, die sich im Feld eines Permanentmagneten befinden, aus.

Elektromagnetische Antriebe benötigen aufgrund ihrer Wirkungsweise einen Kreis mit einem niedrigen magnetischen Widerstand, in diesem Falle der weichmagnetische Werkstoff als Leiter des magnetischen Flusses. Die Spule muß sich aufgrund des Wirbelfeldes um den Leiter winden. Dies stellt für die Mikrotechnik eine erhebliche Schwierigkeit dar. Für die existierenden Kleinst- und Mikroantriebe werden in Abhängigkeit der Baugröße verschiedene Strategien verfolgt:

- Gewickelte Spulen werden bei elektrodynamischen und elektro-magneto-mechanischen Aktoren (CD-Lese und Schreibköpfe, im Mikromotor von [Fau98], oder dem elektromagnetischen Antrieb von [Guc96]) bis zu einem Spulendurchmesser von 0,5 mm verwendet (Drahtdurchmesser 15 μm). Es ist zur Zeit noch die einfachste Methode zur Herstellung von Spulen bis zu dieser Größe. In der Mikrotechnik existiert noch keine befriedigende Lösung zur Herstellung von Spulen mit einem Eisenkern und einer hohen Windungszahl, woraus ein hoher Innenwiderstand folgt, der notwendig ist, um diese Antriebe mit den in der Mikroelektronik üblichen Spannungen anzusteuern. Die LIGA-Technik ist zur Herstellung nur bedingt geeignet. Mit der in [Scu96] verwendeten Prozedur sind zur Herstellung mindestens fünf Lithographie-Schritte notwendig, einschließlich zweier Synchrotron-

Belichtungsschritte. Hochohmige und belastbare Spulen um einen Kern sind nach diesen Verfahren nicht wirtschaftlich zu fertigen.

- Bei elektrodynamischen, periodisch bewegten Aktoren, wie z.B. Scanner oder Pumpen, werden Luftspulen verwendet. Sie werden mittels UV-Tiefenlithographie (oder LIGA) und anschließender galvanischer Abscheidung hergestellt. Auf dieses Herstellungsverfahren wird später genauer eingegangen.
- Das magnetische stationäre Feld wird bei elektrodynamischen Aktoren mittels Permanentmagneten erzeugt. Dies ist die einfachste Möglichkeit zur Felderzeugung. Alle zur Zeit in der Mikrotechnik bekannten elektrodynamische Antriebe verwenden dieses Prinzip.

3.3 Ermittlung des Arbeitspunktes bei periodischen Bewegungen

Wie gezeigt wurde, lassen die verwendeten Federführungen nur eine begrenzte Bewegungsmöglichkeit zu. Die Bewegung kann als wechselsinnige Bewegung mit Rast bezeichnet werden. Ein Sonderfall ist, wenn die Bewegungs- und Rastphase zyklisch ist. Die benötigte Leistung kann nicht so einfach wie bei kontinuierlichen Rotations- und Translationsaktoren bestimmt werden. Der federgeführte Mikroaktor ist ein schwingfähiges System, ein gedämpfter Feder-Masse-Schwinger. Der Mikroaktor kann durch seine Masse, die Steifigkeit der Feder und die Dämpfung beschrieben werden. Bei diesem Schwinger wird die Leistung als skalares Produkt von Kraftvektor und Geschwindigkeitsvektor berechnet. Wenn Krafrichtung und Geschwindigkeitsrichtung zusammenfallen, kann dafür das gewöhnliche Produkt $F \cdot v$ eingesetzt werden. Ist dies nicht der Fall, darf nur die in Geschwindigkeitsrichtung fallende Komponente der Kraft eingesetzt werden.

3.3.1 Einfaches Modell federgeführter Antriebe

Ist eine Funktion periodisch, kann sie nach FOURIER in eine konvergierende unendliche Reihe entwickelt werden (FOURIER-Reihe [Jür92]). Sie beinhaltet Sinus- und Cosinus-Funktionen. Die Periode dieser Funktionen beträgt 2π und es gilt:

$$f(t) = f(t \cdot \omega + 2\pi). \quad (3.2)$$

Der Ansatz lautet:

$$f(t) = a_0 + a_1 \cdot \cos(\omega t) + a_2 \cdot \cos(2 \cdot \omega t) + \dots a_n \cdot \cos(n \cdot \omega t) + b_0 + b_1 \cdot \sin(\omega t) + b_2 \cdot \sin(2 \cdot \omega t) + \dots b_n \cdot \sin(n \cdot \omega t). \quad (3.3)$$

Dabei sind $\sin(\omega t)$ und $\cos(\omega t)$ die Grundsicherungen, während die folgenden Glieder die Obersicherungen darstellen. Ihre Periode wird mit zunehmenden n immer kleiner, so daß man für $\sin(n\omega t)$ und $\cos(n\omega t)$ die Periode $2\pi n^{-1}$ erhält. Für viele Standardfunktionen sind FOURIER-Reihen bekannt. So ist es möglich, durch Addition von Sinussicherungen entsprechend den Koeffizienten der FOURIER-Reihen nahezu alle periodischen Funktionen anzunähern. Allerdings läßt sich nicht jede Funktion durch eine FOURIER-Reihe darstellen. Hinreichend für Konvergenz und Darstellbarkeit ist, daß sich der Grundbereich der Periode 2π in eine endliche Anzahl von Teilbereichen zerlegen läßt, in denen jeweils $f(t)$ monoton und stetig ist (DIRICHLET-Bedingung). Für die hier verwendeten Funktionen ist dies der Fall. Es werden ausnahmslos bereits existierende Reihen verwendet [Dub98], [Wit96].

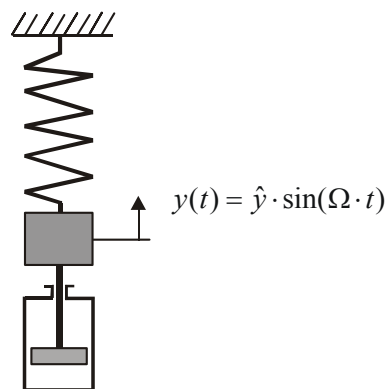


Abb. 3.2: Modell eines einfachen gedämpften Feder-Masse-Schwingers.

Dieses Verfahren kann zur Ermittlung der umgesetzten mechanischen Leistung bei den untersuchten federgeführten Mikroaktoren verwendet werden. Hierzu wird zuerst der Energieumsatz eines einfachen, harmonisch erregten und gedämpften Feder-Masse-Schwingers betrachtet, welcher das Modell eines federgeführten Mikroaktors darstellt. Mit dem Ergebnis läßt sich der Energieumsatz anderer periodischer Bewegungen aus der Summe aller Einzelreaktionen zusammensetzen, die durch die harmonische Erregung hervorgerufen werden.

Um das Verhalten und den Energieverbrauch deutlich zu machen, wird das schwingfähige System als einfacher gedämpfter Feder-Masse-Schwinger angenommen (Abb. 3.2). Die Bewegung wird durch die Amplitude \hat{y} und der Kreisfrequenz Ω beschrieben:

$$y(t) = \hat{y} \cdot \sin(\Omega \cdot t) . \quad (3.4)$$

Die Abhängigkeit der Bewegung $y(t)$ von der Kraft $F(t)$ kann für eine erzwungene Schwingung durch folgende Differentialgleichung beschrieben werden:

$$F(t) = m \cdot \ddot{y}(t) + d \cdot \dot{y}(t) + c \cdot y(t). \quad (3.5)$$

Man nennt sie die Gleichung der erzwungenen Schwingung mit den konstanten Parametern Masse m , Dämpfungskonstante d , Steifigkeit c und der sog. Erregerkraft $F(t)$. Normiert auf die Masse folgt mit:

$$\frac{d}{m} = 2 \cdot \delta \quad \text{und} \quad \omega_0^2 = \frac{k}{m} \quad (3.6)$$

die Differentialgleichung der erzwungenen gedämpften Schwingung:

$$F(t) = m(\ddot{y}(t) + 2 \cdot \delta \cdot \dot{y}(t) + \omega_0^2 \cdot y(t)). \quad (3.7)$$

In den meisten Fällen sind die Konstanten, wie die Masse m , die Abklingkonstante δ und die Eigenkreisfrequenz ω_0 bekannt. Bei vorgegebener Kraft-Zeit-Funktion wird die Differentialgleichung nach dem Weg $y(t)$ aufgelöst. Für eine einfache sinusförmige Erregerkraft $F(t)$ ist die Differentialgleichung leicht zu lösen. Ist $F(t)$ hingegen komplexer, wird die Lösung wesentlich aufwendiger. Einfacher ist es, bei vorgegebener Weg-Zeit-Funktion die benötigte Kraft-Zeit-Funktion zu berechnen. Dies ist bei den meisten Anwendungen vorteilhaft, da bei diesen die Bewegungsfunktionen vorgegeben sind, z. B:

- Schwingspiegel zur Laserablenkung (Dreieckschwingung),
- wechselsinnige Bewegungen mit Rast (Trapezschwingung).

Die zugehörige Kraft-Zeit-Funktion wird nach (3.7) berechnet.

3.3.2 Benötigte Kraft-Zeit-Funktion und der Leistungsumsatz der Schwingung

Im vorliegenden Fall ist nicht die Kraft-Zeit-Funktion die bekannte Größe, sondern die Weg-Zeit-Funktion. Die Bewegungsaufgabe ist eine harmonische Schwingung. Nach dem Lösen einer trivialen Differentialgleichung kann die Kraft-Zeit-Funktion ermittelt werden.

Es ergibt sich durch Einsetzen von (3.4) in (3.7)

$$F(t) = \hat{y} \cdot m \left((\omega_0^2 - \Omega^2) \cdot \sin \Omega t + 2 \cdot \delta \cdot \Omega \cos \Omega t \right) \quad (3.8)$$

die benötigte Kraft-Zeit-Funktion. Mit der Definitionsgleichung für die mechanische Leistung

$$P = \frac{dW}{dt} = F(t) \cdot \dot{y}(t) \quad (3.9)$$

kann aus (3.8) und der ersten Ableitung der Gleichung (3.4) nach der Zeit die mechanische Momentan-Leistung als Funktion der Zeit bestimmt werden:

$$P(t) = m(\Omega \hat{y})^2 \left(\frac{(\omega_0^2 - \Omega^2)}{2 \cdot \Omega} \sin 2\Omega t + 2\delta \cos^2 \Omega t \right), \quad (3.10)$$

$$\text{mit Teil 1: } \frac{(\omega_0^2 - \Omega^2)}{2 \cdot \Omega} \sin 2\Omega t$$

$$\text{und Teil 2: } 2\delta \cos^2 \Omega t.$$

Es ist zu sehen, daß die Leistung aus zwei überlagerten Schwingungen zusammengesetzt ist. Der erste Teil schwingt mit der doppelten Antriebsfrequenz und ist abhängig von der Differenz aus der Eigenkreisfrequenz und der Antriebskreisfrequenz. In der Elektrotechnik wird dieser Teil Blindleistung genannt, der Gleichwert ist Null. Sie pendelt mit zweifacher Antriebsfrequenz zwischen der Quelle und dem Antrieb. Der zweite Teil ist nur von der Abklingkonstante δ abhängig und wird Wirkleistung genannt. Der Momentanwert ist zu jeder Zeit $P(t) \geq 0$. Zusammenfassend wird die Wirkleistung dazu verwendet, die durch Dämpfung dem System entzogene Energie wieder zuzuführen. Im Gegensatz dazu wird die Blindleistung genutzt, um das System gegen seine bevorzugte Bewegung, die Bewegung mit der Eigenkreisfrequenz, anzutreiben. In der Gleichung (3.11) bis (3.13) sind die beiden Leistungen als Funktion der Zeit und als Effektivwert einzeln dargestellt.

$$P_W(t) = (\Omega \cdot \hat{y})^2 \cdot m \cdot 2\delta \cos^2 \Omega t \quad (3.11) \quad P_{W \text{ eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P_W(t) dt} \quad (3.12)$$

$$P_B = \Omega \cdot m \cdot \hat{Y}^2 \cdot \frac{\omega_0^2 - \Omega^2}{2} \sin 2\Omega t \quad (3.13) \quad P_{B \text{ eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P_B(t) dt} \quad (3.14)$$

Die Abb. 3.3 zeigt graphisch den Verlauf der beiden Leistungen. Wie bekannt ist, wird bei der Schwingung während einer Periode fortlaufend kinetische in potentiellen Energie bzw. umgekehrt gewandelt. Bei der maximalen Auslenkung $|\hat{y}| = \max.$ ist die potentielle Energie maximal und die kinetische gleich Null. Demgegenüber ist im Fall $\hat{y} = 0$ die potentielle Energie gleich Null und die kinetische maximal. Nur im Resonanzfall, wenn die Antriebskreisfrequenz gleich der Eigenkreisfrequenz ist, besteht ein Gleichgewicht zwischen kinetischer und potentieller Energie in diesen beiden Punkten.

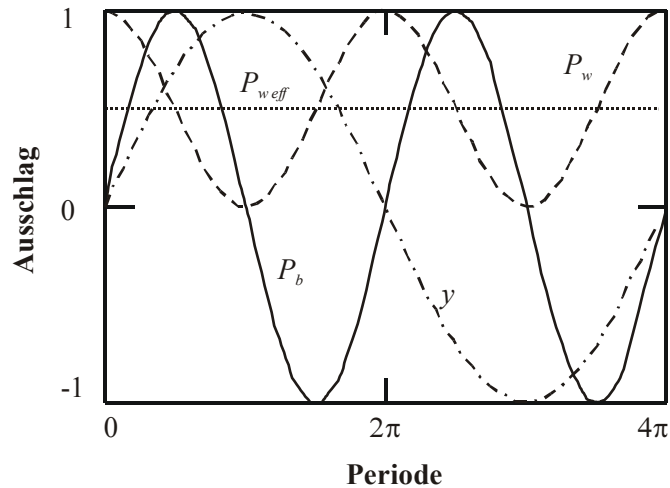


Abb. 3.3: Normierter Verlauf von Blind- und Wirkleistung.

Die verschiedenen Betriebsfälle bzw. Arbeitspunkte auf der Betriebskennlinie werden in Bezug auf die Eigenkreisfrequenz des Mikroaktors festgelegt. Hierzu wird das Frequenzverhältnis

$$\lambda = \frac{\Omega}{\omega_0} \quad (3.15)$$

eingeführt.

Es sind folgenden Betriebszustände zu unterscheiden:

1. Kreisfrequenz Ω ist gleich der Eigenkreisfrequenz ω_0 des Mikroaktors ($\lambda = 1$),
2. Kreisfrequenz Ω ist kleiner als die Eigenkreisfrequenz ω_0 ($\lambda < 1$) (man spricht hier vom unterkritischen Gebiet) und
3. Kreisfrequenz Ω ist größer als die Eigenkreisfrequenz ω_0 ($\lambda > 1$) (überkritisches Gebiet).

Im unterkritischen Fall ist das Gleichgewicht zur potentiellen Energie hin verschoben, im überkritischen Fall zur kinetischen Energie (siehe Abschnitt 3.3.3). Physikalisch kann die Wirkleistung so dargestellt werden, daß der Geschwindigkeitsvektor in Richtung des Kraftvektors zeigt, wohingegen der Winkel zwischen diesen Vektoren im Fall der Blindleistung 90° beträgt, analog zum Winkel zwischen Spannung und Strom in der Elektrotechnik.

3.3.3 Betriebsfälle und Wirkungsgrad des schwingenden Systems

Die ausgeführte Blind- und Wirkleistung ist vom Frequenzverhältnis abhängig. Von der Blindleistung der Erregerkraft muß man die Blindleistung der gesamten Federkraft oder die

der gesamten Trägheitskraft unterscheiden, die ein Maß für die in umkehrbarer Weise umgesetzte Energie ist. Im unterkritischen Bereich ist die Blindleistung der Federkraft, im überkritischen die Blindleistung der Trägheitskraft, jeweils ein Maß für die gesamte pendelnde Energie. Diese Energie, welche zwischen System und Erreger pendelt, wird Blindleistung genannt, da sie im Mittel keine Arbeit verrichtet.

Im unterkritischen Bereich wird die Blindleistung dazu verwendet, die Bewegung von $|\hat{y}| = \max.$ nach $\hat{y} = 0$ zu bremsen, um sie auf dem umgekehrten Weg wieder mit der gleichen Leistung zu beschleunigen. Wird die Schwingung im überkritischen Bereich ausgeführt, kehren sich die Verhältnisse um, so daß von $|\hat{y}| = \max.$ nach $\hat{y} = 0$ beschleunigt werden muß. Kann die Quelle der Leistung, der Erreger, diese Energie aufnehmen und bei Bedarf wieder abgeben, trägt eine hohe Blindleistung nicht zu einer Verschlechterung des Wirkungsgrades bei. Ist der Antrieb als Generator und als Motor zu verwenden, kann durch sogenanntes Nutzbremsen diese Energie in elektrische umgewandelt, ins Netz gespeist und während der nächsten Viertel-Periode wieder an das System abgeben werden. Um die Position der Arbeitspunkte der drei Betriebsfälle auf der Betriebskennlinie zu ermitteln, wird der normierte Verlauf (normiert auf Masse, Amplitude und Abklingkonstante) der Leistung in Abhängigkeit vom Frequenzverhältnis betrachtet (Abb. 3.4).

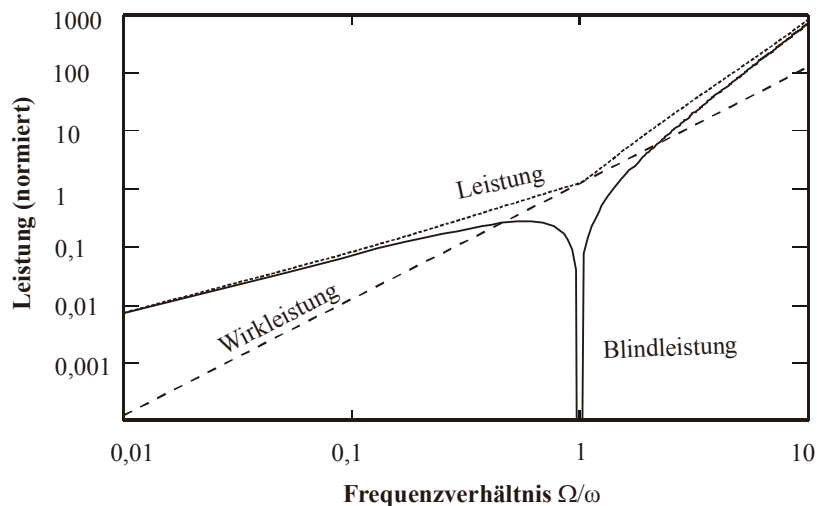


Abb. 3.4: Verlauf von Wirk- und Blindleistung in Abhängigkeit vom Frequenzverhältnis.

Alle Werte sind Effektivwerte. Deutlich zu erkennen ist, daß die Leistung mit steigender Frequenz stark ansteigt. Die Wirkleistung weist eine konstante Steigung mit 2 pro Dekade auf, wohingegen die Blindleistung im unterkritischen Bereich mit 1 pro Dekade und im überkritischen Bereich mit 3 pro Dekade steigt. Somit besitzt letztere in der näheren Umgebung der

Resonanzfrequenz ein Minimum. Es ist weiter zu erkennen, daß die Wirkleistung wesentlich geringer ist als die Blindleistung; ausgenommen der Bereich der Eigenresonanz $\lambda \cong 1$, in dem die Blindleistung stark abnimmt, um bei $\lambda = 1$ zu Null zu werden.

Zur Bestimmung des Wirkungsgrades ist es aufgrund der großen Unterschiede zwischen $P_W(t)$ und $P_B(t)$ notwendig, daß beide Leistungen getrennt voneinander betrachtet werden. Dazu wird der Aktor gedanklich in zwei Aktoren zerlegt, von denen der eine ausschließlich Wirkleistung (3.11) und der andere Blindleistung (3.13) verrichtet.

Für jedes Antriebsprinzip kann so, auf Grundlage der Betriebskennlinien, der Arbeitspunkt und der zugehörige Wirkungsgrad bestimmt werden. Der Gesamtwirkungsgrad η berechnet sich aus den Wirkungsgraden η_B für Blindleistung und η_W für Wirkleistung, gewichtet durch die beiden Teilleistungen P_B und P_W

$$\eta = \frac{\eta_B \cdot P_B + \eta_W \cdot P_W}{P} . \quad (3.16)$$

Die Lage des Arbeitspunktes ist abhängig von der Lage der Motorkraft in Bezug auf die Anzugskraft. Auf den stationären Betriebskennlinien ist die Anzugskraft durch den Punkt definiert, in dem die Geschwindigkeit in Richtung der Motorkraft gleich Null ist. Während der Vektor der Geschwindigkeit, gemäß der Definition, bei der Blindleistung senkrecht auf dem Kraftvektor steht, sind die beiden Vektoren im Fall der Wirkleistung parallel gerichtet. Dies bedeutet, daß der Arbeitspunkt des Aktors, welcher die Blindleistung verrichtet, immer bei der Anzugskraft liegt. In allen Fällen ist dieser Arbeitspunkt unabhängig von der Belastung. Verrichtet hingegen der Aktor Wirkleistung, ist der Arbeitspunkt abhängig von der Belastung, in diesem Fall der Dämpfung. Er kann sich auf jedem Punkt der Kennlinie befinden. So bewegt sich der Arbeitspunkt in Abhängigkeit von der Dämpfung zwischen Leerlauf (Dämpfung = 0) und der Anzugskraft (Dämpfung $\rightarrow \infty$).

Arbeitspunkte bei magnetisch wirkenden Aktoren

Die elektrodynamischen und elektro-magneto-mechanischen Aktoren verhalten sich in Bezug auf die beiden Arbeitspunkte gleich. Wird Blindleistung verrichtet, ist der Wirkungsgrad gleich Null, da infolge der nicht vorhandenen Bewegung keine Spannung induziert wird und die gesamte Eingangsspannung am Motorwiderstand abfällt. Bei der Verrichtung von Wirkleistung wird ein von der Motorkraft abhängiger Wirkungsgrad erzielt.

Arbeitspunkt bei elektrostatischen Aktoren

Elektrostatische Aktoren verhalten sich genau umgekehrt. Ihren maximalen Wirkungsgrad erreichen sie bei der Anzugskraft, also bei Verrichtung von Blindleistung. Bedingt durch den Stillstand ist kein Stromfluß vorhanden. Es fällt keine Spannung am Motorwiderstand ab, welche den Wirkungsgrad vermindert. Erst durch die Bewegung kommt es zu einem Stromfluß, Spannung fällt am Motorwiderstand ab und der Wirkungsgrad sinkt.

Mit diesen Aussagen ist es möglich, für die verschiedenen Energiewandlungsprinzipien sinnvolle Anwendungen zu finden. Da in der Mikroaktorik Federführungen und nachgiebige Mechanismen die meistgenutzten Elemente zur Übernahme vom Führungsaufgaben sind, sollen besonders auf dieser Grundlage die Eigenschaften und Möglichkeiten der verschiedenen Prinzipien dargelegt werden.

Zusammengefaßt gilt für federgeführte Antriebe:

- Als Leerlauf wird die Geschwindigkeit definiert, welche der Antrieb erreicht, wenn keine äußeren Kräfte wirken und die Motorkraft gleich Null ist. Das schwingende System benötigt keine Motorkraft, wenn die Dämpfung oder die Abklingkonstante gleich Null und die Antriebsfrequenz gleich der Eigenkreisfrequenz ist.
- Bei dem in Resonanz betriebenen System entspricht die Kraft, welche notwendig ist, um die Dämpfung zu überwinden, der Motorkraft. Wird die Motorkraft und die Geschwindigkeit in Effektivwerten angegeben, ist es möglich, diese Antriebe als kontinuierlich laufend zu betrachten. Die Leistung, die zur Überwindung der Reibung notwendig ist, ist die Wirkleistung.
- In Bezug auf den Arbeitspunkt ist zwischen Bewegung mit der Eigenkreisfrequenz und den unter- bzw. überkritischen Bewegungen zu unterscheiden.
- Bei Bewegungen außerhalb der Resonanzfrequenz leistet die Erregerkraft sowohl Wirk- als auch Blindleistung.
- Der Arbeitspunkt im Fall der Blindleistung liegt bei der Anzugskraft. Im Extremfall wird bei einer sehr langsamen oder unendlich langsamen Schwingung die mechanische Leistung nahezu Null, da die Geschwindigkeit zu Null wird und die Kraft benötigt wird, um die Federspannung aufrechtzuerhalten. Es wird eine Kraft, aber keine Geschwindigkeit erzeugt, so daß die mechanische Leistung gleich Null ist.

- Im Fall der Generierung von Blindleistung ist der Wirkungsgrad elektrodynamischer und elektromagnetischer Antriebe gleich Null, der Wirkungsgrad elektrostatischer Antriebe wird maximal.

Daraus folgt: Werden nur energetische Kriterien beachtet, sind elektrostatische Antriebe hervorragend für alle Bewegungsaufgaben geeignet, bei denen der Anteil der Blindleistung die Wirkleistung übersteigt. Hingegen sind elektro-magneto-mechanische oder elektrodynamische Aktoren nach diesen Gesichtspunkten nur sinnvoll einzusetzen, wenn hauptsächlich Wirkleistung benötigt wird.

Natürlich sind zur Auswahl eines geeigneten Antriebsprinzips weitere Kriterien zu berücksichtigen, die wichtigsten sind:

- die erreichbaren Parameter wie Geschwindigkeit und Kraft pro Volumen,
- die elektrischen Eingangsparameter wie Strom und Spannung,
- die zur Verfügung stehenden Technologien und Kosten der Herstellung,
- und die Betriebssicherheit.

Grundsätzlich kann gelten: *Elektrodynamische* Antriebe sind nur für *dynamische* Anwendungen sinnvoll einzusetzen.

3.4 Möglichkeiten zur Erhöhung des Wirkungsgrades durch Nutzung der Blindleistung

Die Blindleistung vermindert bei magnetischen Aktoren den Wirkungsgrad erheblich. In der Elektrotechnik ist es möglich, die Blindleistung durch geeignete Maßnahmen zu kompensieren. Ob dies in der Mikroaktorik ebenfalls möglich ist, soll in der folgenden Ausführung kurz abgeschätzt werden. Wie beschrieben, pendelt die Energie mit doppelter Frequenz zwischen dem Antrieb und dem Erreger. Es werden drei Möglichkeiten untersucht:

1. die Anpassung der Resonanzfrequenz an die Arbeitsfrequenz (Konstruktion der Antriebe dahingehend, daß die Differenz zwischen Arbeits- und Resonanzfrequenz möglichst klein und so die Blindleistung minimiert wird.),
2. die mechanische Zwischenspeicherung der Blindleistung bzw. die
3. elektrische Zwischenspeicherung der Blindleistung.

Hierzu ist es notwendig, sich ein genaues Bild von den vorhandenen Wirk- und Blindgrößen zu machen. Die folgende Gleichung gibt die Phasenverschiebung zwischen der Auslenkung $y(t)$ und der Erregerkraft $F(t)$ an. Die Abb. 3.5 zeigt die Komponenten der Blindleistung.

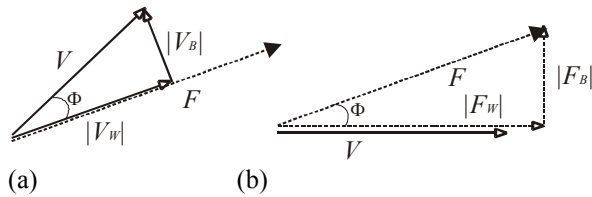


Abb. 3.5: a) Zerlegung in Wirk- und Blindgeschwindigkeit,
b) Zerlegung in Wirk- und Blindkraft.

$$\tan \phi = \frac{2 \cdot \delta \cdot \Omega}{\omega_0^2 - \Omega^2} \quad (3.17)$$

Je nach unter- oder überkritischer Erregung wird dem System die Leistung in der ersten halben Periode zu- oder abgeführt. Entsprechend dieser Komponenten wird der Antrieb gebremst oder beschleunigt. Die Bremskraft oder Beschleunigungskraft entspricht der Blindkraft und die Leistung dem Produkt aus Blindkraft und Blindgeschwindigkeit.

Zusammengefaßt gilt:

$v_w = v \cdot \cos\phi$	Wirkgeschwindigkeit	$v_B = v \cdot \sin\phi$	Blindgeschwindigkeit
$F_w = F \cdot \cos\phi$	Wirkkraft	$F_B = F \cdot \sin\phi$	Blindkraft

3.4.1 Mechanische Maßnahmen zur Verminderung der Blindleistung

Die einfachste Möglichkeit zur Vermeidung der Blindleistung ist der Betrieb des Aktors mit der Resonanzkreisfrequenz. Das ist nur möglich, wenn die benötigte Antriebsaufgabe eine sinusförmige Bewegungsfunktion benötigt und die Frequenz auch zeitlich konstant ist. In den wenigsten Fällen wird eine reine sinusförmige Bewegungsfunktion mit konstanter Frequenz benötigt. Durch eine harmonische Synthese ist es jedoch möglich, aus harmonischen Schwingungen bestimmter Amplitude und Frequenz beliebige periodische Bewegungsfunktionen zu realisieren. Da diese Bewegungsfunktion gewissermaßen hardware-seitig in das System implementiert ist, wird dieses Verfahren nur für eine bestimmte Bewegungsfunktion nutzbar. Im Abschnitt 5.2 wird ein auf diese Art arbeitender Scanner beschrieben.

Minimiert werden kann die Blindleistung ohne die oben genannten Einschränkungen nur, wenn die Resonanzfrequenz des Antriebs mit der ersten Oberschwingung der Bewegungsfunktion zusammenfällt. Im Abschnitt 5.1.4 wird ein Beispiel hierfür gegeben.

3.4.2 Elektrische Zwischenspeicherung der Blindleistung

Der schwingende Aktor wird gemäß der Bewegungsfunktion ständig positiv oder negativ beschleunigt. Dabei stellt sich, unter Berücksichtigung der Phasenverschiebung, die zur elektrischen Eingangsspannung und Belastung zugehörige Momentangeschwindigkeit ein. In allen Fällen wird bei der negativen Beschleunigung (Bremsen) dem Aktor Energie entzogen. Diese

Energie kann genutzt werden, wenn der Antrieb vom Motorbetrieb in den Generatorbetrieb wechselt. Bei Gleichstrommotoren spricht man in diesem Fall von Nutzbremsen. Die Energie wird zwischengespeichert und kann bei Bedarf wieder abgegeben werden. Der Übergang in den Generatorbetrieb erfolgt stetig, wenn die ideale Leerlaufgeschwindigkeit v_0 überschritten wird. Der Zusammenhang zwischen Leerlaufgeschwindigkeit und Eingangsspannung ermöglicht die stetige Überführung der beiden Betriebsarten ineinander. Durch Herabsetzen der Eingangsspannung U wandert der Arbeitspunkt P_1 in den 2. Quadranten (Abb. 3.6).

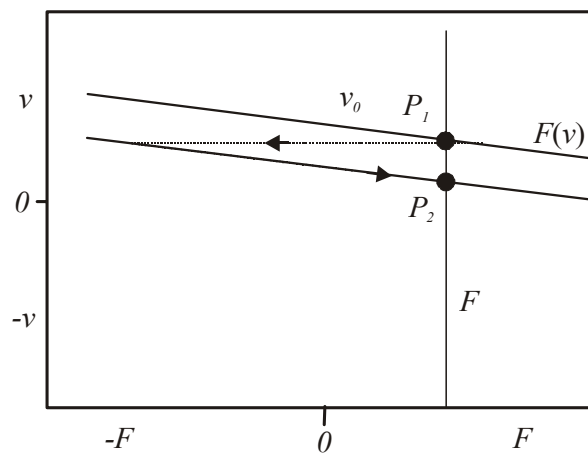


Abb. 3.6: Betriebskennlinie Generator/Motor [See92].

Unmittelbar nach der Spannungsänderung ist die Geschwindigkeit infolge der Trägheit des Läufers noch konstant und wird durch die Bremswirkung des Generatorbetriebs und der Reibung gemindert. Lässt man jetzt die Eingangsspannung konstant, so wird der Antrieb abgebremst, bis der neue Arbeitspunkt P_2 erreicht ist. Verwendet wird dieses Verfahren hauptsächlich bei kontinuierlichen Aktoren, welche eine Rotations- oder Translationsbewegung mit konstanter Drehzahl bzw. Geschwindigkeit ausführen.

Führen federgeführte Aktoren eine harmonische Bewegung mit der Eigenkreisfrequenz aus, können sie mit kontinuierlichen Aktoren (Translation oder Rotation ausführend) verglichen werden. Durch folgenden einfachen Versuch kann dies nachgewiesen werden (Abb. 3.7). Der federgeführte Aktor wird über einen Sinusgenerator mit der Eingangsspannung versorgt. Die Frequenz entspricht der Eigenkreisfrequenz. Nachdem der Einschwingvorgang abgeschlossen ist, wird der Schalter geöffnet und die Spannungsquelle vom Aktor getrennt. Am Meßgerät kann die induzierte Spannung abgelesen werden. Unmittelbar nach der Trennung ist die Amplitude des Aktors aufgrund der Trägheit konstant, nimmt aber infolge der Reibung ab. Gemessen wird die induzierte Spannung. Der Ausschlag unmittelbar nach der Trennung ist gleich der Eingangsspannung multipliziert mit dem Wirkungsgrad (Gleichung (2.15)). Die Frequenz ist gleich der Eigenkreisfrequenz.

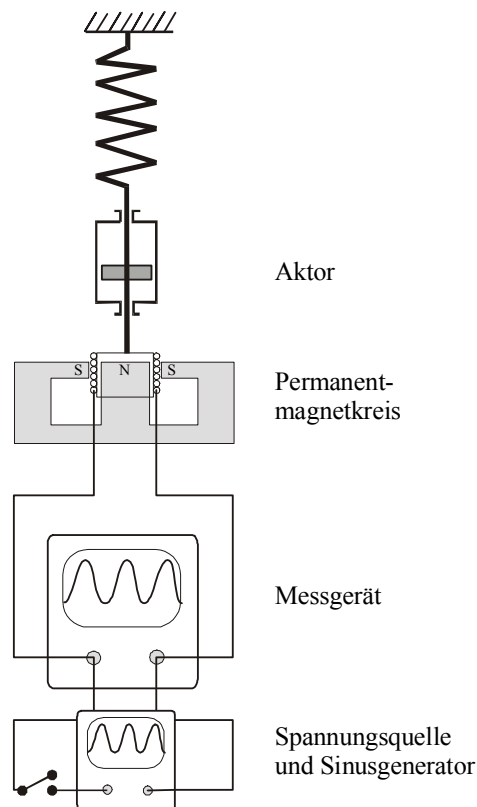


Abb. 3.7 Versuchsaufbau zur Messung des Generators.

Zur einfacheren Betrachtung des Energieumsatzes sollen nur die Effektivwerte verwendet werden. Wird die Amplitude der Eingangsspannung gesenkt oder, verallgemeinernd formuliert, ist die Momentangeschwindigkeit des Antriebs höher als die zugehörige momentane Eingangsspannung, verschiebt sich der Arbeitspunkt in den 2. Quadranten und der Antrieb

wird abgebremst, bis der neue Arbeitspunkt erreicht wird (Abb. 3.6). Die Energiedifferenz zwischen den beiden Arbeitspunkten (P_1, P_2) kann durch Umschalten in den Generatorbetrieb genutzt werden. Dieser Vorgang wird Nutzbremse genannt [See92]. Zu beachten ist hierbei noch der Wirkungsgrad des Antriebs im Generatorbetrieb. Wie im Motorbetrieb, besitzt der Antrieb auch im Generatorbetrieb eine stationäre Betriebskennlinie. Der Wirkungsgrad ist von der Belastung abhängig. Bei geringer Belastung und minimalem Stromfluß ist der Wirkungsgrad maximal und fällt mit steigender Belastung.

Wie gezeigt wurde, schwingt der Aktor nach der Trennung von der Spannungsquelle mit der Eigenkreisfrequenz. Durch das Abbremsen wird bei annähernd konstanter Frequenz nur die Amplitude gemindert, so daß eine Nutzung des Antriebs als Generator zur Zwischenspeicherung der Blindleistung nicht möglich ist.

4 Herstellung von elektrodynamischen Mikroaktoren

Die Verfahren zur Herstellung von elektrodynamischen Mikroaktoren werden in die drei Teilbereiche:

1. Quellen des Magnetfeldes im Bereich der Antriebsstrompfade,
2. Strompfade für den Antrieb und
3. Führung des Läufers

zusammengefaßt.

Für die Generierung des Magnetfeldes werden Seltenerd-Dauermagnetwerkstoffe eingesetzt [Vak98], [Wid98]. Sie haben sich auch bei kommerziellen Gleichstromkleinmotoren aufgrund der hohen Energiedichten und der leistungslosen Feldgenerierung durchgesetzt. Für die Strompfade können, bis auf Abmessungen von knapp einem Millimeter, aus Draht gewickelte Spulen eingesetzt werden. Für kleinere Antriebe oder für ein spezielles Spulen-Layout kommen nur noch galvanisch abgeformte Strompfade in Frage. Als Führungen können mit zunehmender Miniaturisierung nur noch stoffschlüssige Varianten verwendet werden. Die Anforderungen und die möglichen Verfahren werden im folgenden Abschnitt dargestellt. Ist eine Montage der Baugruppen bei Aktoren mit Abmessungen im Millimeter-Bereich noch möglich, muß bei kleineren oder kaskadierten Aktoren auf eine integrierende Technologie zurückgegriffen werden. Bei der Herstellung der Aktoren sind grundsätzlich alle Teilkomponenten von gleicher Bedeutung und können eigentlich nur im Zusammenhang betrachtet werden. Trotzdem sollen die einzelnen Herstellungsprozesse getrennt voneinander dargestellt werden, um anschließend deren Kompatibilität zu beurteilen.

4.1 Herstellung des Magnetkreises

Der notwendige Magnetkreis, der in den Abmessungen mindestens eine Größenordnung über den kleinsten Strukturen für Strompfade und Federführungen liegt, kann zum Teil noch mit konventionellen Techniken hergestellt werden. Erst bei Aktorengrößen im unteren Millimeterbereich wird es notwendig, auf Mikrotechnologien zurückzugreifen. Die geometrische Größe der im Rahmen der Arbeit aufgebauten Aktoren gestattet es, noch auf die konventionellen, feinwerktechnisch hergestellten Magnetkreise zurückzugreifen, auf deren Fertigung hier nicht

eingegangen werden soll. Es wird jedoch ein kurzer Überblick über die mikrotechnische Herstellung hart- und weichmagnetischer Werkstoffe gegeben.

4.1.1 Dünne hartmagnetische Nd/Fe/B - Schichten

Dauermagnete sollen ohne weitere Energiezufuhr eine bestimmte Nutzenergie-dichte in Form des magnetischen Feldes zur Verfügung stellen. Maßgebend für die Güte eines Dauermagnetmaterials sind neben der permanenten Permeabilität μ_p und dem Ausbauchungsfaktor der Hysteresekurve seine Remanenz B_r , die Koerzitivfeldstärke H_c und das Energieprodukt $(BH)_{max}$. Seltenerd-magnete auf Basis von Nd/Fe/B und Sm/Co stellen momentan die leistungsfähigste Materialgruppe aufgrund ihrer hohen Kristallanisotropie dar. Problematisch für mikro- und feinwerktechnische Lösungen ist die schwierige Bearbeitbarkeit der Sinterstücke. Schichtdicken bis zu 20 μm können nach [Bar99] effizient durch Kathodenzerstäubung hergestellt werden. Gesputterte Schichten dieser Materialien erreichen jedoch nicht die hohen Kennwerte gesinterter Magnete. Bereits 1988 wurden [Cad88] Nd/Fe/B-Dünnschichtmagnete, deren Vorzugsachsen sowohl senkrecht als auch parallel zur Schichtebene orientiert werden können, realisiert. In [Yam91] wurde eine Koerzitivfeldstärke von 557 kAm^{-1} und ein maximales Energieprodukt von 159 kJm^{-3} erreicht, wohingegen gesinterte Materialien Werte bis zu 290 kJm^{-3} [Wid98] erreichen. Eine umfassende Untersuchung der magnetischen Eigenschaften gesputterter Nd/Fe/B-Schichten in Abhängigkeit von der Stöchiometrie und der Schichtdicke liefert [Ara96]. Zusätzlich wird der Einfluß anderer Legierungselemente, wie z.B. Terbium (Tb) untersucht. In [Kap96] wird die Herstellung senkrecht orientierter Magnetschichten bei hohen Abscheide-Raten von ca. $10 \mu\text{mh}^{-1}$ mit Schichtdicken bis zu $300 \mu\text{m}$ beschrieben. Das maximale Energieprodukt $(BH)_{max}$ der Schichten soll dabei bereits 340 kJm^{-3} betragen haben (weitere Werte sind $B_r = 1,35 \text{ T}$ und $H_c = 640 \text{ kAm}^{-1}$).

4.1.2 Galvanische Abscheidung weichmagnetischer Ni/Fe-Legierungen

Für die magnetische Flußleitung werden Materialien benötigt, die eine geringe Koerzitivfeldstärke, eine geringe Remanenz, eine große Sättigungsflußdichte und eine große Permeabilität aufweisen. Bei erschmolzenen und wärmebehandelten Werkstoffen lassen sich die Eigenschaften nach den Anforderungen in weiten Grenzen variieren. So wird bei speziellen Nickel-Eisen-Legierungen eine maximale relative Permeabilität von 300.000 erreicht, die Koerzitivfeldstärke liegt bei wenigen Am^{-1} . Zur Herstellung und Strukturierung weichmagnetischer Schichten wird in der Mikrotechnik die galvanische Abscheidung in lithographisch geformten

Strukturen verwendet, wie z.B. mit LIGA oder LC-LIGA [Ley96], [Tho96]. Wichtig ist ein hohes Aspektverhältnis, so daß Dünnschichtverfahren sehr selten verwendet werden. Zu den gängigen Materialien zählen Nickel-Eisen-Legierungen. In [Par98] werden verschiedene elektrolytisch abgeschiedene Legierungen auf ihre magnetischen Eigenschaften untersucht. Die Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die Eigenschaften elektrolytisch abgeschiedener Metalle.

Tabelle 4.1: Magnetische Kennwerte elektrolytisch abgeschiedener Materialien [Par98].

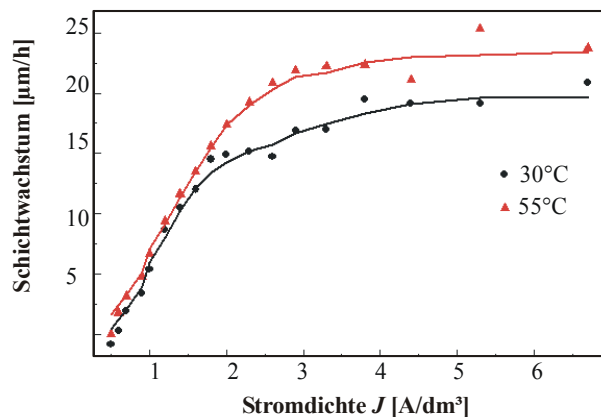
Zusammensetzung (Gew. %)	B_s (T)	H_c (Am ⁻¹)
Ni79,8 Fe20,2	0,9	52
Ni50,9 Fe49,1	1,41	104
Co83,2 Fe7,0 Cu9,8	1,46	224

Aufgrund der geringen Koerzitivfeldstärke von elektrolytisch abgeschiedenen Ni/Fe-Legierungen wurden Untersuchungen mit dem Ziel durchgeführt, diese zur Flußleitung zu verwenden. In [Bar98] wurden günstige Abscheideparameter (Stromdichte, Temperatur) für die Erzeugung von Mikrostrukturen aus einem Nickel-Eisen-Elektrolytsystem auf Sulfatbasis ermittelt. Ein wichtiges Kriterium der Schichten sind neben den magnetischen Parametern die inneren Spannungen, welche die verwendbare Schichtdicke begrenzen.

Die inneren Spannungen und die Zusammensetzung können beeinflusst werden durch:

- den pH-Wert des Elektrolyten (pH-Mittelwert = 2,5),
- die Elektrolytbad-Temperatur (Bereich von 25 °C bis 55 °C),
- die Stromdichte (Bereich von 1 bis 4 Adm⁻²) sowie
- die Art der Konvektion während der Abscheidung im Elektrolyten (erzwungen oder frei).

Die Mikrostreufähigkeit des verwendeten Elektrolytsystems wird mit Abscheidungen in einer HULL-Zelle untersucht. Eine hohe Mikrostreufähigkeit ist notwendig, damit kleine Querschnitte mit vergleichbarer Geschwindigkeit gefüllt werden wie die Strukturen mit größerem Querschnitt. Als Anode wurde ein Nickelblech verwendet. Die Kathode besteht aus kupferkaschiertem Leiterplattenmaterial. Die Schichtdicken wurden mittels der Röntgenfluoreszenz-methode gemessen.



Das Diagramm läßt sich in drei Bereiche einteilen. Im ersten Bereich, bis zu einer Stromdichte von 3 Adm^{-2} , steigt das Schichtwachstum mit steigender Stromdichte, die Oberfläche ist metallisch matt. Im zweiten Bereich ist das Schichtwachstum weniger stark von der Stromdichte abhängig und die Oberfläche ist metallisch glänzend. Im nicht eingezeichneten Bereich, oberhalb von 7 Adm^{-2} , kommt es zu keiner zusammenhängenden Schicht. Nach [Bar98] ist der Grund dafür die hohe Wasserstoffabscheidung. Technisch genutzt werden kann nur der zweite Bereich.

Abb. 4.1: Schichtdicke als Funktion der Stromdichte bei unterschiedlichen Temperaturen.

Die Untersuchungen ergaben, daß:

- die Arbeitsstromdichte von 2 bis 4 Adm^{-2} zu kompakten Schichten mit gleichmäßiger Oberfläche bei hoher Schichtqualität führt,
- ein Stromdichtebereich kleiner als 2 Adm^{-2} zu ungleichmäßigen und mit Schlieren behafteten Schichten führt,
- von der Temperatur abhängige Diffusionsvorgänge den Abscheidungsprozeß der Legierung beeinflussen. (In Abb. 4.1 ist die Abhängigkeit des Schichtwachstums von Abscheidungen bei 30°C und 55°C als Funktion der lokalen Stromdichte auf der Kathode dargestellt.),
- eine bessere Streufähigkeit des Elektrolyten bei niedrigeren Temperaturen besteht (Dieser Sachverhalt ist auf den höheren Einfluß der Diffusionspolarisation bei niedrigen Temperaturen auf die Streufähigkeit zurückzuführen.),
- die inneren Spannungen mit steigender Temperatur sinken (Die Spannungen sinken von 115 MPa bei 30°C auf 30 MPa bei 55°C - gemessen mit einem IS-Meter (Innere Spannung). Als Kathode dienten Probestreifen aus Eisen mit einer Dicke von $50 \mu\text{m}$. Die Beschichtung der Probestreifen aus dem Nickel-Eisen-Elektrolyten erfolgte bei einer Stromdichte von $3,3 \text{ Adm}^{-2}$. Aus der Längenänderung der Probestreifen vor und nach einer Beschichtungszeit von 20 Minuten wurde die innere Spannung ermittelt.),
- das Elastizitätsmodul der Legierung bei 145 GPa (ermittelt durch einen Biegeversuch) liegt.

In der Abb. 4.2 ist die mit einem Vibrationsmagnetometer aufgenommene Magnetisierungskennlinie einer $60\mu\text{m}$ dicken Legierungsschicht parallel zur Schichtebene zu sehen.

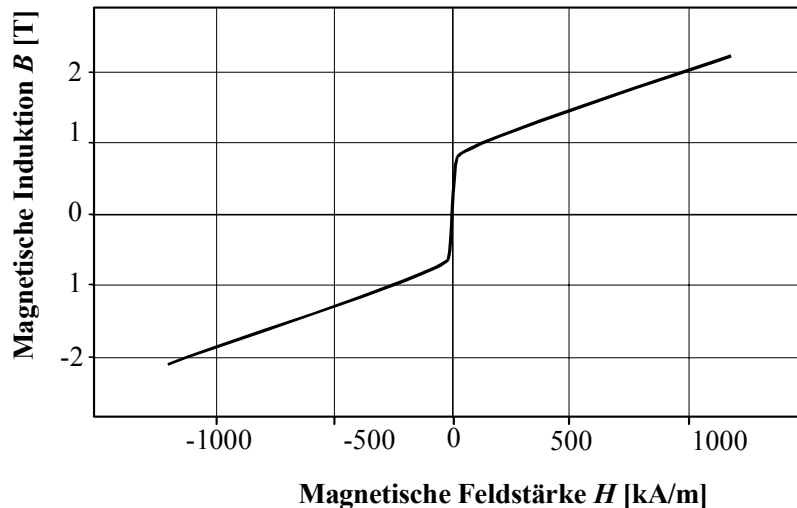


Abb. 4.2: Hysteresekurve einer galvanisch abgeschiedenen Permalloyschicht, Schichtdicke $60\ \mu\text{m}$, Messrichtung: Parallel zur Schichtebene, ${}_bH_C = 0,2\ \text{kAm}^{-1}$, $B_r = 9,3\ \text{mT}$, $M_s = 846\ \text{mT}$, $M_r/M_s = 0,011$.

Die mit gewalzten Blechen vergleichbare Sättigungsflußdichte von $846\ \text{mT}$ und die Koerzitivfeldstärke von $0,2\ \text{kAm}^{-1}$ ermöglichen der elektrolytisch abgeschiedenen Legierungsschicht den Einsatz in miniaturisierten Permanentmagnetkreisen zur magnetischen Flußleitung. Zur Formgebung dieser Schichten wird die UV-Tiefenlithographie mit anschließender galvanischer Abformung oder das LIGA-Verfahren angewendet.

4.2 Die Herstellung der Strompfade

Weitere Teilkomponenten sind die Strompfade zur Erzeugung der Motorkraft. An die Strompfade werden sowohl elektrische als auch geometrische Anforderungen gestellt. Die elektrischen beziehen sich auf einen hohen spezifischen Leitwert des verwendeten Materials, um die thermischen Verluste im Arbeitspunkt gering zu halten. Nun ist es ausreichend, den betreffenden Raum nur durch einen Strompfad auszufüllen. Dies führt aber zu einem sehr geringen Gesamt Widerstand des Strompfades und zu sehr geringen Eingangsspannungen im mV-Bereich. Für die Ansteuerung wesentlich günstiger ist eine Eingangsspannung oberhalb von $3\ \text{V}$. Deshalb ist der Strompfad anzupassen. Bei konstantem Leitervolumen und konstanter Stromdichte werden eine Vielzahl seriell angeordneter Strompfade verwendet mit der Konsequenz, daß viele feine Strompfade benötigt werden.

Der andere Anspruch basiert auf der geometrisch exakten Ausrichtung der Strompfade zum magnetischen Feld. Diese Anforderung ist aufgrund der präzisen Mikrotechniken sehr einfach zu erfüllen.

Elektrodynamische Antriebe benötigen bei Erregung mit einem Permanentmagneten im Gegensatz zu elektro-magneto-mechanischen Aktoren keine Strompfade, die um einen Eisenkern

geführt werden. Dieser Vorteil erleichtert besonders die Herstellung der Strompfade, da sogenannte Luftspulen für einen wirkungsvollen Antrieb ausreichend sind. Durchgesetzt hat sich zu deren Herstellung die galvanische Abformung in mikrostrukturierten Hohlräumen. Diese werden mittels Röntgentiefenlithographie, UV-Tiefenlithographie (LC-LIGA) [Ntb00], Mikroprägen mit LIGA-Werkzeugen, RIE-Tiefenstrukturierung, Fotoformverfahren von fotosensiblen Glas [Har98] oder anderen Verfahren hergestellt.

Bei einigen werden diese Strukturen, wie die Galvanikform, ausschließlich zur galvanischen Abformung verwendet und nach Erfüllung dieses Zwecks wieder entfernt („verlorene Form“), wie z. B. bei der Röntgentiefenlithographie [Fzk99] oder der UV-Tiefenlithographie [Ntb00, Loe95]. Bei der RIE-Tiefenstrukturierung oder dem Fotoformverfahren von fotosensiblen Glas bleibt die Form in der Regel nach der Abformung erhalten.

Als Leitermaterial wird bei vielen Anwendungen Kupfer verwendet, da es sich neben einem hohen spezifischen Leitwert auch einfach galvanisch abscheiden läßt. Zur Herstellung einer funktionsfähigen und vollständigen planaren Luftspule gehören drei Ebenen. In der Hauptebene befinden sich die seriell spiralförmig angeordneten Strompfade. Die beiden restlichen Ebenen sind notwendig, um den inneren Anschlußkontakt nach außen zu führen.

Bevor die Strategien der Kontaktierung dargestellt werden, wird auf die Technologien zur Herstellung der Hauptebene mit den seriell angeordneten Strompfaden eingegangen. Zuvor sollen noch die möglichen Strompfad-Anordnungen zur Beschreibung der separaten Ebenen klassifiziert werden:

- *Freie Strompfade* sind am Umfang an keiner Stelle mit dem Substrat verbunden.
- *Aufliegende Strompfade* liegen an einer Stelle des Umfangs linienförmig am Substrat an.
- *Eingegrabene Strompfade* berühren an zwei bis drei Seiten des Umfangs das Substrat.
- *Vergrabene Strompfade* sind an allen Seiten vom Substrat umgeben.

4.2.1 Verfahren zur Herstellung der Hauptebene

Zuerst werden die Verfahren zur Herstellung der Hauptebene betrachtet. Hier sind besonders die Verfahren interessant, bei denen die Galvanikform ausschließlich für die galvanische Abscheidung verwendet wird. Die Abb. 4.3 zeigt einen Vergleich zwischen den beiden meist verwendeten Verfahren zur Bildung verllorener Formen für die Galvanik. Die Vorgehensweise ist gleich; wesentliche Unterschiede ergeben sich nur bei der Belichtung der verschiedenen

lithographisch bearbeiteten Werkstoffe. Während zur Belichtung des bei der LIGA-Technik verwendeten Polymethylmetacrylat (PMMA) eine Synchrotronstrahlung (auch Röntgentiefenlithographie genannt) nötig ist, reicht zur Tiefenlithographie von hochaufragenden Photoresisten einfache UV-Strahlung aus. Verwendet werden z.B. Photoresiste der AZ4000-Serie von Hoechst [Hoe00] oder der SU-8 von Microchem Corp. [Mic00]. Hieraus ergeben sich die erheblichen Differenzen bei den Prozeßkosten der beiden Verfahren; eine Röntgentiefenlithographie ist zur Zeit circa um den Faktor 1000 teurer als eine einfache UV-Tiefenlithographie. Dafür wird bei diesem Verfahren aber eine höhere Präzision und ein um den Faktor 10 bis 100 höheres Aspektverhältnis erreicht.

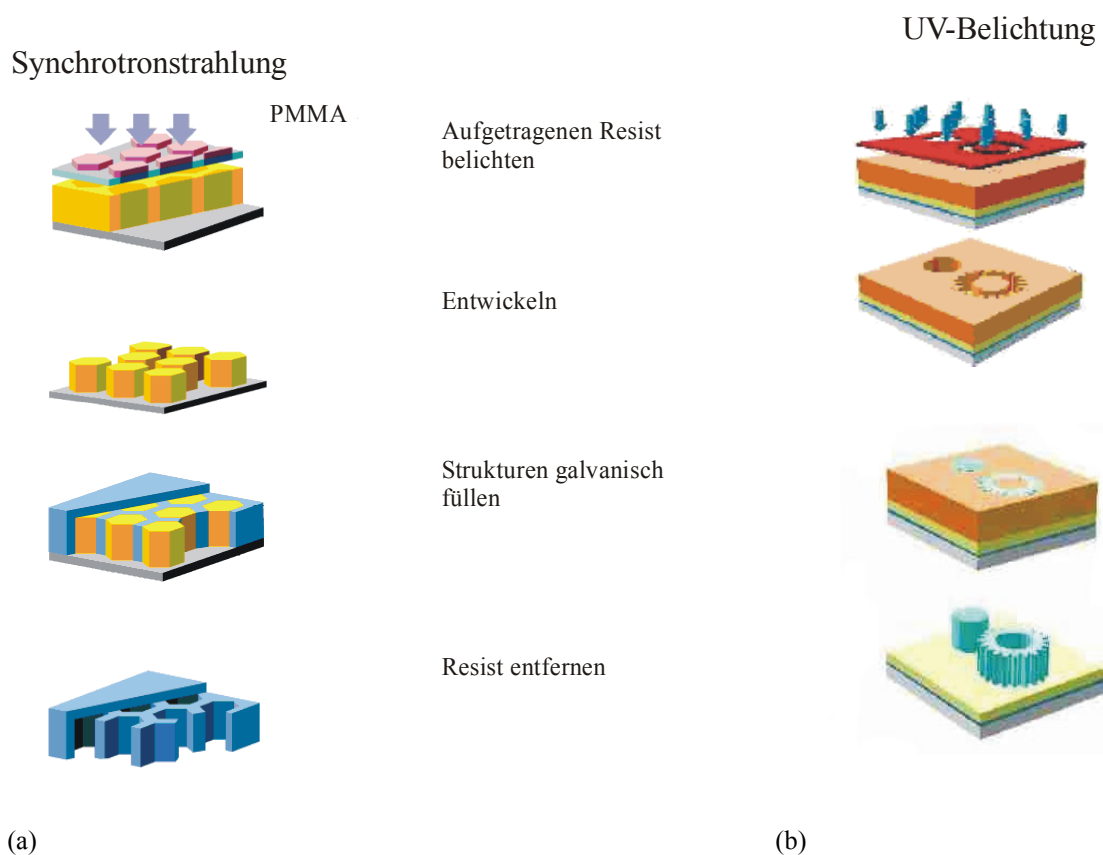


Abb. 4.3: a) Schema der LIGA-Technik [Fzk00],

b) Schema der UV-Tiefenlithographie (LC-LIGA), ohne den Prozeßschritt der Abformung [Ntb00].

Im ersten Schritt wird der Resist auf eine elektrisch leitende Grundplatte aufgetragen. Die durch die Maske hindurchtretende Strahlung wird vom Resist absorbiert und führt zu einer chemischen Modifikation. In einem geeigneten Entwickler werden, je nach verwendetem Photoresist, die belichteten oder unbelichteten Bereiche herausgelöst. Durch die mikrogalvanischen Verfahren wird eine Komplementärstruktur in der nach dem Entwicklungsprozeß entstandenen Resiststruktur aus Metall, wie etwa Kupfer, aufgebaut, indem das Metall in die Zwischenräume des elektrisch nicht-leitenden Resistes abgeschieden wird (Abb. 4.4).

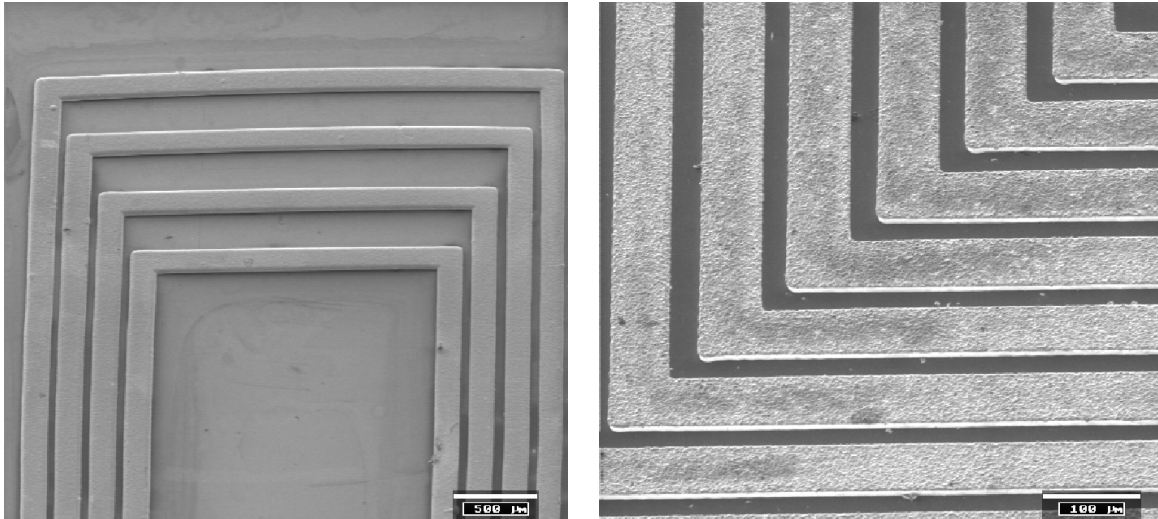


Abb. 4.4: Strompfade aus Kupfer - galvanisch abgeschieden, Verfahren: UV-Tiefenlithographie, Photoresist: AZ4562.

Anschließend wird der Resist entfernt, zurück bleibt die metallische Struktur als aufliegender Strompfad. Eine Abformung der metallischen Mikrostruktur zur Herstellung weiterer Galvanikebenen ist bei diesen Verfahren möglich, soll aber nicht betrachtet werden, da sich ein solcher Aufbau nicht wirtschaftlich realisieren läßt.

Bei der zweiten Methode wird das mikrostrukturierte und mechanisch genutzte Substrat selbst als Form für den galvanischen Prozeß verwendet und bleibt nach diesem Schritt erhalten. Als Substrat wird Silizium oder mikrostrukturierbares Glas verwendet.

Während bei der ersten Methode die Startschicht einfach aufgebracht werden kann, ist dies bei der direkten galvanischen Abscheidung in das Substrat ungleich schwieriger (Abb. 4.5). Unterschieden wird zwischen durchgängig strukturierten, d. h. die Hohlräume erstrecken sich von der Oberseite bis zur Unterseite des Substrats, und nicht-durchgängig strukturierten Substraten, wobei die betreffenden Strukturen nicht bis zur anderen Seite des Substrates reichen (Abb. 4.5).

Wird das Substrat wie in [Fra95] durchgängig strukturiert, kann von der Unterseite her eine metallische Startschicht aufgelegt werden, welche nach Fertigstellung mechanisch oder chemisch entfernt wird. Die Abb. 4.5 zeigt den Verfahrensablauf.

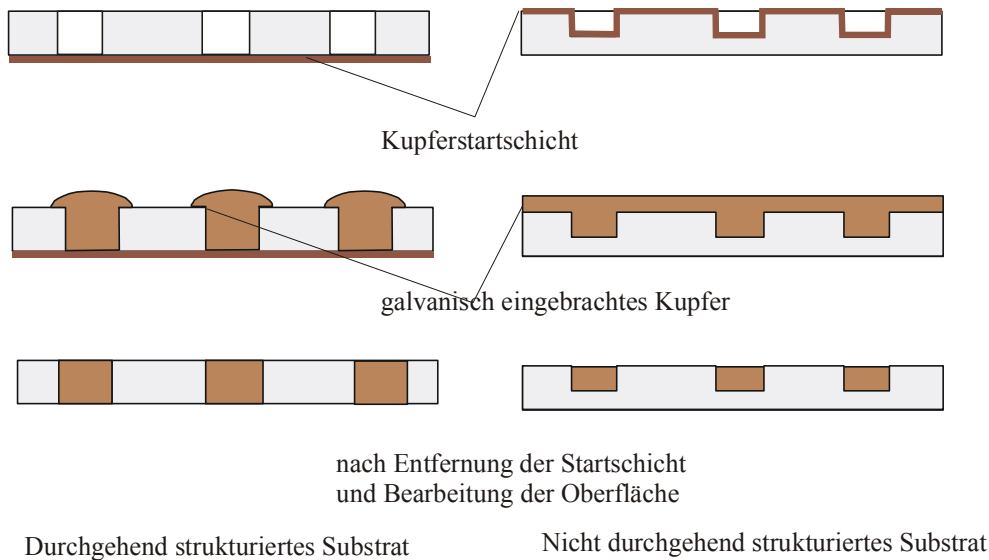


Abb. 4.5: Verfahrensweise bei durchgängig strukturierten Substraten.

Durchgehende Strukturen schränken die Formgebung stark ein, da aus Festigkeitsgründen nur zusammenhängende, sich gegenseitig abstützende Strukturen möglich sind. Eleganter ist es, in Anlehnung an die Kupfermetallisierung in der Mikroelektronik [Hil99] die Strukturen nicht durchgängig zu gestalten. Das Aufbringen der Startschicht ist bei diesem Verfahren schwieriger. Wird die gesamte Oberfläche des Substrats mit der Startschicht beschichtet, erfolgt das Wachstum ebenfalls auf der gesamten Oberfläche und nicht nur in den Strukturen. Außerdem kann es beim Überwachsen der Strukturen zu Luftpneinschlüssen kommen, wodurch das Aspektverhältnis stark begrenzt wird. Dieses außerhalb der Strukturen liegende Material muß mechanisch oder auch chemisch entfernt werden. Die Beanspruchung durch die mechanische Bearbeitung kann den stofflichen Verbund zwischen galvanisch abgeschiedenem Metall und dem Substrat, welcher zum Teil nur auf Formschluß basiert, zerstören. Der chemische Angriff erfolgt meist gleichmäßig, so daß dieses Verfahren für die relativ ungleichmäßige Oberfläche der galvanischen Schicht ungeeignet ist. Ein besseres Ergebnis kann erzielt werden, wenn die Startschicht strukturiert wird oder Teile elektrisch isoliert abgedeckt werden. Wird die Startschicht strukturiert, so sind alle Strukturen elektrisch untereinander zu verbinden. Dabei wirkt sich allerdings die inhomogene Feldstärkeverteilung ungünstig auf das Schichtwachstum aus. Die Strukturen wachsen nun von der Startschicht beginnend auf, die Wachstumsrate ist aber wegen der strukturierten Startschicht und den hieraus resultierenden Inhomogenitäten in der

Feldstärkeverteilung nicht gleichmäßig, welches die maximale Füllhöhe oder den Abstand benachbarter Strukturen begrenzt. Gleichmäßiges Schichtwachstum ist wichtig, wenn auf der Substratoberfläche weitere mikrotechnische Prozesse stattfinden sollen.

In der Abb. 4.6 sind beide Varianten dargestellt. Die linke Abbildung zeigt den Ablauf zur Herstellung eingegrabener Strompfade mit einer teilweise durch Photolack abgedeckten Startschicht. Im ersten Schritt wird das Substrat ($\langle 100 \rangle$ orientiertes Silizium) für den folgenden Trockenätzprozeß maskiert. Nach dem Ätzprozeß und der Entfernung der Maskierungsschicht erfolgt eine Oxidation zur Isolierung der Strompfade gegenüber dem Silizium und eine Metallisierung der Startschicht für die Galvanik. Das negative Abbild der metallischen Struktur im Photolack wird durch einen photolithographischen Prozeß erzeugt. So kann gewährleistet werden, daß die galvanische Abscheidung nur in den speziell dafür vorgesehenen Hohlräumen stattfindet und eingegrabene Strompfade mit hoher Stromtragfähigkeit entstehen.

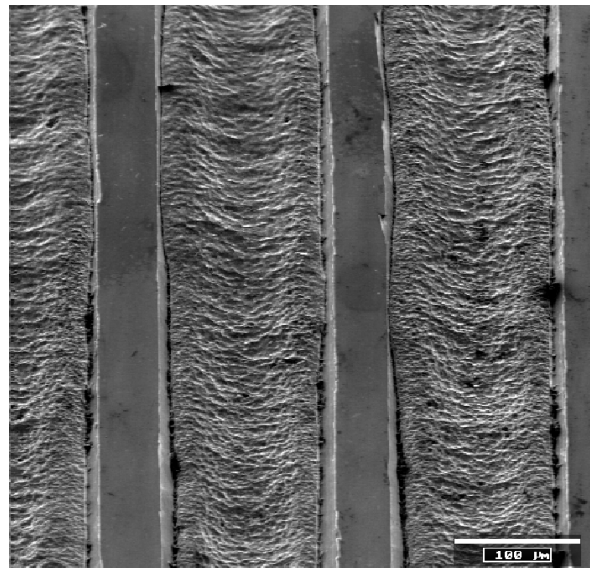
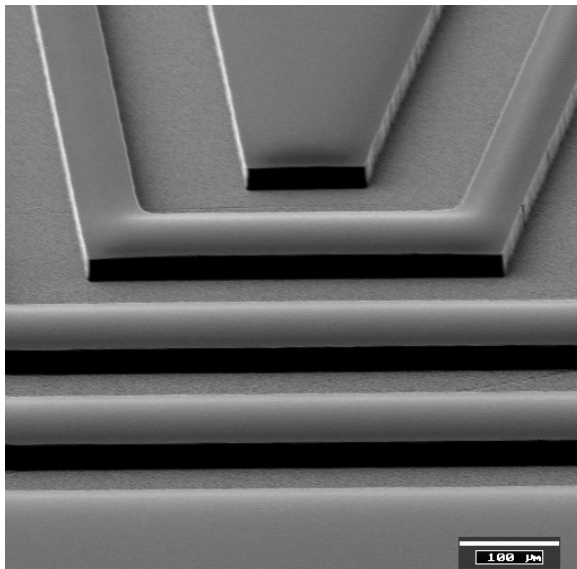
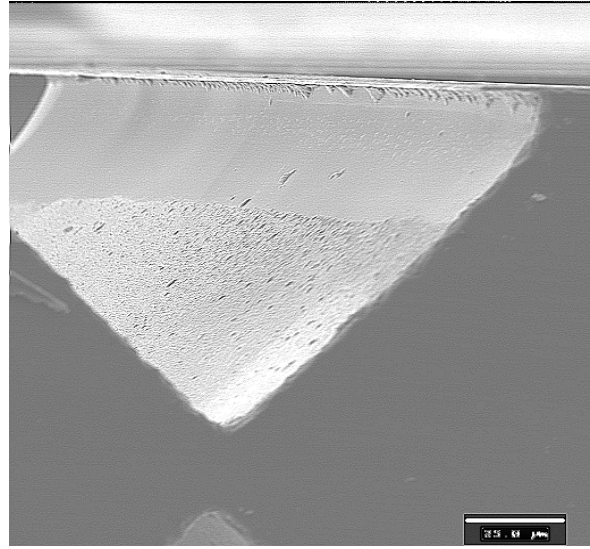
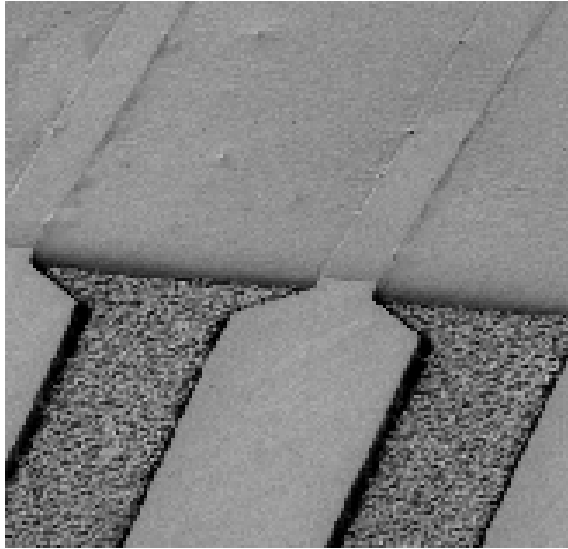
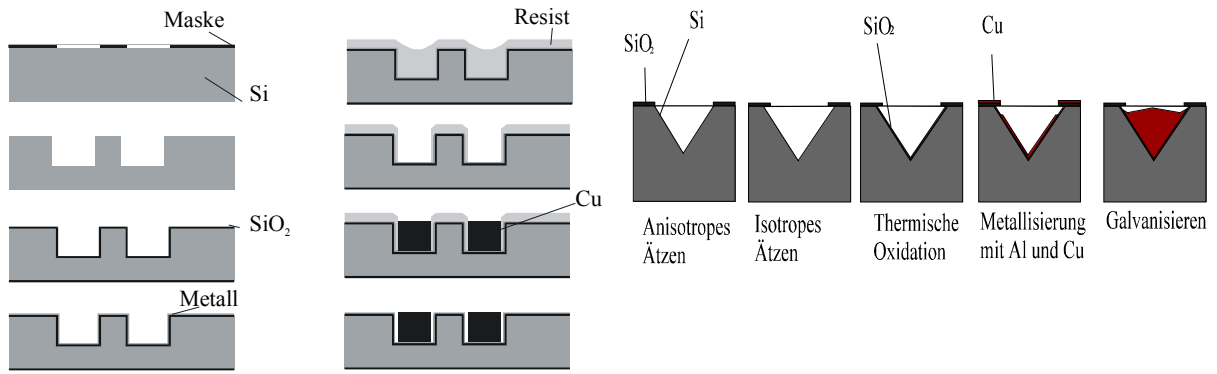
Die rechte Abbildung zeigt den Ablauf zur Herstellung eingegrabener Strompfade mit einer strukturierten Startschicht auf dem Grabengrund, welche durch ein spezielles, im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes Verfahren entsteht. Im ersten Schritt werden die V-Gräben durch naß-chemisches anisotropes Ätzen nach einem Standardverfahren hergestellt. Die V-Gräben werden anschließend mit einem isotropen Ätzverfahren in $\langle 111 \rangle$ -Richtung weitergeätzt. Dabei wird die Oxidmaske unterätzt, wodurch ihr Überstand einen Teil des Grabens abschattet. Hieran schließt sich eine weitere thermische Oxidation an. Das Oxid wird wiederum zur elektrischen Isolation zwischen dem Silizium-Substrat und dem galvanisch abgeschiedenen Metall (in diesem Fall Kupfer) benötigt. Als vierter Schritt wird die Wafer-Oberseite mit der benötigten Startschicht metallisiert. Durch die überstehende Maskierungsschicht wird der abgeschattete Bereich nicht metallisiert. Es entstehen mit diesem Verfahren bei nur einem Lithographieschritt die Gräben für die eingegrabenen Strompfade und die strukturierte Startschicht. Dadurch, daß die Startschicht auf dem Grund des Grabens von der zwangsläufig ebenfalls metallisierten Substratoberfläche elektrisch isoliert ist, folgt bei der Kontaktierung auch eine selektive galvanische Abscheidung. Diese führt zur einfachen Herstellung eingegrabener Strompfade mit nur einem Lithographieschritt.

Der Nachteil besteht in dem geringen Aspektverhältnis (Höhe der Struktur zu deren Breite), welches dadurch begrenzt wird, daß sehr schmale und tiefe Strukturen nicht bis auf den Grund metallisiert werden können.

Der Vollständigkeit halber soll noch das Mikroprägen des Instituts für Mikrotechnik Mainz erwähnt werden. Beim Mikroprägen besteht das Substrat aus einem weichen, plastisch gut formbaren und an der Oberfläche metallisierten Kunststoff. Der Prägestempel hat die Form der herzustellenden Spule. Während des Prägens drückt der scharfkantige Prägestempel die Metallisierung in den Werkstoff und erzeugt auf diesem Wege die Galvanikform mit der strukturierten Startschicht. Die Metallisierung reißt entlang des Stempelumfangs auf.

Nachteilig ist das begrenzte Aspektverhältnis infolge der Belastung der Prägestempel sowie deren Standzeit. Um die Strompfade zu kontaktieren, wird die Metalloberfläche durch ein Mikrofräsverfahren geglättet; die weiteren Ebenen werden durch mehrere lithographische Schritte aufgebracht.

Das Glätten der Oberfläche ist aufgrund des unregelmäßigen Schichtwachstums, welches durch die nicht-homogene Stromdichte-Verteilung verursacht wird, notwendig. Dieses Verfahren wird aufgrund des hohen technologischen Aufwandes nur selten eingesetzt.



(a) Das obere Bild zeigt die galvanisch aufgefüllten Strukturen, welche im hinteren Teil des Bildes mit einer Polymerschicht abgedeckt sind. Im unteren Bild ist das trockenätzte Silizium-Substrat zu sehen.

(b) Das obere Bild zeigt die geätzten V-Gräben mit unterätzter Siliziumoxid-Maske und der aufgebracht Startschicht; im unteren sind die aufgefüllten Strukturen zu sehen.

Abb. 4.6 a) Verfahren nach [Hei98], b) Verfahren nach [Fra96].

4.2.2 Herstellung der Kontaktierungsebenen

4.2.2.1 Zur Zeit verwendete Verfahren

Während die Herstellung einer Ebene verhältnismäßig einfach ist, stellt der Aufbau der benötigten drei Ebenen erhebliche Anforderungen an die verwendeten Technologien. Bei mikro-technischen Verfahren zur Herstellung kontaktierter oder sich kreuzender Strompfade werden immer drei Ebenen benötigt (Abb. 4.7):

Ebene 1, die Hauptebene mit den krafterzeugenden Strompfaden, **Ebene 2**, die Isolierung der Kontaktebene gegenüber den Strompfaden und Kontaktierung der Strompfade der ersten Ebene mit den Brücken in der **Ebene 3**.

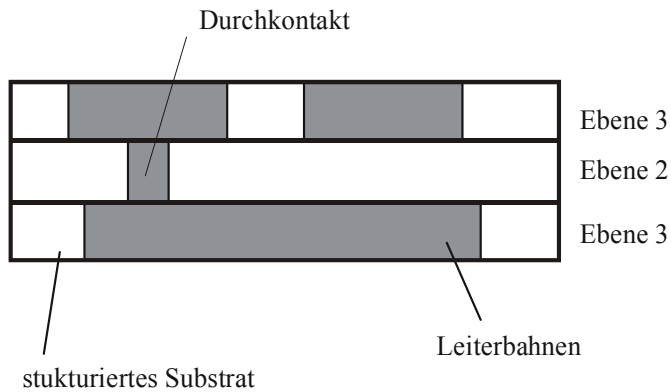


Abb. 4.7 Darstellung einer Durchkontaktierung.

Besonders aufwendig sind Verfahren unter der Verwendung von drei aufeinanderfolgenden Röntgen- oder UV-Tiefenlithographie-Schritten und ebenso vielen Galvanik-Schritten, wie z.B. in [Loe94] beschrieben. Nach dem Entfernen des Photoresists entsteht ein freier Strompfad zwischen dem inneren Kontaktpunkt und dem äußeren Anschlußpunkt der Spule. Dieses Verfahren erweist sich als sehr aufwendig, da drei Metallisierungs-, Lithographie- und Galvanikschritte notwendig sind. Zwar bereiten diese Einzelprozesse auf einer ebenen Substratoberfläche keine Probleme, doch ist es sehr aufwendig, auf den hier vorliegenden unebenen Strukturen diese Prozesse mit ausreichender Sicherheit durchzuführen. Eine weitere Schwierigkeit wird durch den freien Strompfad verursacht. Durch dessen geringere Umschließung wird die Wärmeabfuhr und somit die Stromtragfähigkeit gegenüber den anderen aufliegenden Strompfaden gemindert, welches zu einer thermischen Schwachstelle im gesamten Aufbau führt.

Einfacher ist die in [Cat99] vorgestellte Technologie. Es wird hier ein hochdotierter Silizium-Wafer zur Kontaktierung des inneren Anschlußpunktes verwendet. Auf einer Isolierschicht

befinden sich zwei Öffnungen, so daß der innere Anschlußpunkt nach außen geleitet werden kann. Neben Kostengesichtspunkten (hochdotierte Wafer sind keine Standardprodukte und deswegen entsprechend teuer) wird auch die Konstruktionsvielfalt durch die geringe Leitfähigkeit und die unzureichende gegenseitige Isolierung benachbarter Einzelspulen geschmälert. Aus den Schwierigkeiten der vorgestellten Verfahren können Anforderungen an ein einfacheres Verfahren abgeleitet werden:

- Keine hochaufragenden Prozesse auf unebenen Oberflächen, wie z.B. mehrere aufeinanderfolgende Röntgen- oder UV-Tiefenlithographie-Schritte,
- pro Substratseite nur einen hochaufragenden Prozeß,
- kompatibel zu anderen Verfahren der Mikromechanik (Herstellung mechanischer Komponenten).

Aus diesen Anforderungen folgen drei Aufbauvarianten:

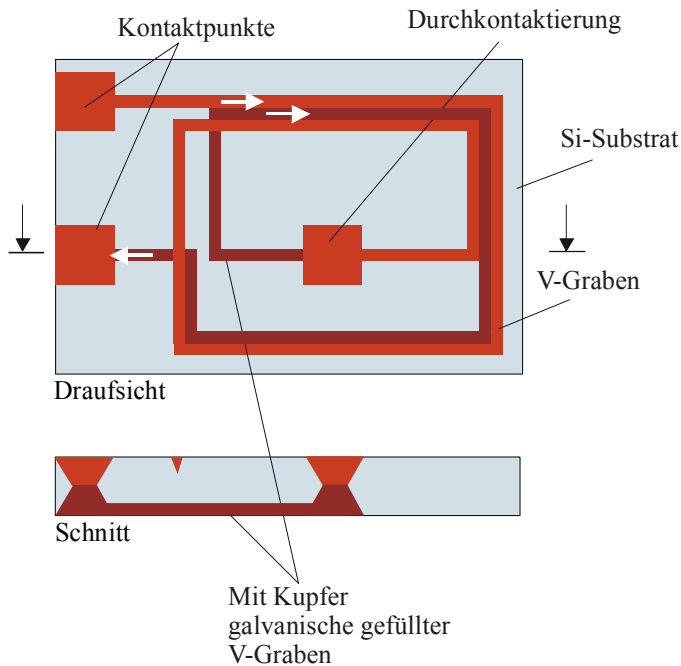
- Beidseitig strukturierte Substrate (Der Kontakt wird mittels Durchkontaktierung, ähnlich der Leiterplattenfertigung, hergestellt.),
- durchgängig mit der gleichen Technologie strukturierte Substrate (Der Kontakt wird durch Fügen von drei Ebenen realisiert.),
- einseitig strukturierte Substrate mit einer Dünnschichtkontaktierung.

4.2.2.2 Beidseitig strukturierte Substrate

Bei einem beidseitig strukturiertem Substrat befinden sich Strompfade sowohl auf der Ober- als auch auf der Unterseite. Die Strompfade sind in das Substrat eingegraben, die Oberkante der Strompfade schließt mit der Substratoberfläche ab. Das Substrat wird als Galvanikform verwendet und anschließend nicht entfernt. Zu beachten ist, daß sich kreuzende Strompfade auf der Oberseite und auf der Unterseite nicht berühren. An dafür vorgesehenen Punkten befinden sich Durchkontaktierungen, welche die Ober- mit der Unterseite elektrisch verbinden.

Bei dieser Art der Herstellung ist auf die gleiche Stromrichtung der übereinanderliegenden Strompfade zu achten. Diese wird erreicht, wenn der Wicklungssinn auf beiden Substratseiten gegenläufig ist. Der Strom fließt auf der ersten Seite von außen nach innen und auf der Gegenseite durch die Kontaktierung von hier wieder nach außen. Nachteilig ist grundsätzlich, daß das Substrat beidseitig strukturiert und für die Kontaktierung eine Verbindung zwischen den beiden Seiten geschaffen werden muß. So hängt die Miniaturisierungsfähigkeit von der

Substratdicke und dem Aspektverhältnis ab. Als Verfahren zur Herstellung der Strompfade ist das nach Abb. 4.6b zweckmäßig.



Wird der Werkstoff beidseitig strukturiert und mit Durchbrüchen versehen, kann über den Durchbruch die Rückseite der Spule kontaktiert werden. Die Abbildung zeigt das Prinzip der beidseitigen Spulen mit einer Durchkontaktierung. Anisotrop beidseitig in $\langle 100 \rangle$ orientiertes Silizium geätzte V-Gräben werden galvanisch mit Kupfer aufgefüllt. Auf der Vorderseite befinden sich Wicklungen, die zum Mittelpunkt bzw., auf der Rückseite, aus der Mitte zum zweiten Kontaktpunkt führen. Der Wicklungssinn ist so gewählt, daß die übereinander angeordneten Strompfade die gleiche Stromrichtung besitzen. In der Mitte der Spule befindet sich eine Durchkontaktierung, welche die Oberseite mit der Unterseite verbindet. Zur Herstellung der Strompfade wird das in der Abb. 4.6b vorgestellte Verfahren angewendet.

Abb. 4.8: Aufbau beidseitig strukturierter Substrate.

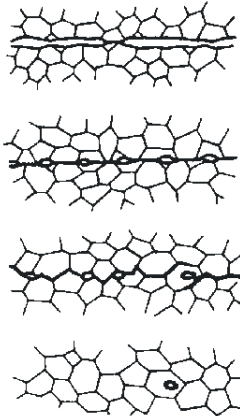
4.2.2.3 Kontaktierung durch anschließendes Fügen der drei Ebenen

Eine weitere Methode wird bei der Herstellung von Spulen in fotosensiblen Glas durch das Fotoform-Verfahren angewendet [Mik00, Har98]. Das Substrat wird durchgehend strukturiert. Auf die Strukturierungstechniken soll hier nicht näher eingegangen werden; sie sind unter anderem in [Har98, Fra95] nachzulesen. Es entstehen eingegrabene Strompfade. Die Startschicht wird von unten angelegt und die Strukturen werden von hier aus aufgefüllt, analog zu Abb. 4.5. Nach dem Galvanik-Schritt ist es erforderlich, die Startschicht mechanisch zu entfernen und die überwachsenen Strukturen mechanisch zu glätten. Im ersten Schritt werden die überwachsenen Strukturen durch Fräsen bis auf die Höhe des Glases abgetragen. Hieran schließt sich ein Polierprozeß, mit dem die nötige Oberflächengüte erreicht wird, an. Die drei polierten Ebenen werden nach einer Reinigung übereinander angeordnet, justiert und durch einen Diffusionsschweißprozeß gefügt. Hierbei ist zwischen zwei verschiedenen Verfahren zu unterscheiden. Der erste Prozeß erfolgt unter Vakuum, der zweite unter Normalatmosphäre. Um diese verschiedenen Verfahren zu beschreiben, ist erst eine Gegenüberstellung der verschiedenen Bindungsmechanismen notwendig.

Durch den Fügeverbund Metall-Glas kommt es zu folgenden Stoffpaarungen:

- Metall-Metall (z.B. Kupfer-Kupfer)
- Glas-Glas
- Metall-Glas (z.B. Kupfer-Foturan®)

Stoffpaarung Metall-Metall



- Erstkontakt weniger Rauigkeitsspitzen
 - Deformation der Rauigkeitsspitzen
 - Diffusion über die Korngrenzen und Korngrenzenwanderung
 - Volumendiffusion der Atome zu den Leerstellen
- Bei der Metall-Metall-Verbindung kommt es infolge von Wärme und Druck unter Annäherung der Oberflächen zu einem physikalischen Kontakt, während die Rauigkeitsspitzen eingeebnet werden. Die Oxidschicht bricht auf und es kommt zu Rekristallisations- und Diffusionsvorgängen, wodurch eine Schweißung im festen Zustand entsteht. Wichtig ist, daß eine Annäherung der Werkstücke auf Gitterdimensionen erreicht wird. Weitere Angaben in [Fra95].

Abb. 4.9: Verbindung Metall-Metall.

In der Abb. 4.9 ist der Bindungsmechanismus für das Diffusionsschweißen von Metall-Metall-Verbindungen aufgeführt.

Stoffpaarung Glas-Glas

Der Diffusionsschweißprozeß von Glas-Glas-Verbindungen unterscheidet sich grundsätzlich von dem der Metall-Metall-Verbindungen. Unterschiede bestehen in der Herstellung des physikalischen Kontaktes und der Verbindungsbildung.

Der physikalische Kontakt wird nach [Hul83] nicht durch eine plastische Verformung der Fügeflächen hergestellt, sondern durch das Ansprengen der Glasoberflächen. Das Ansprengen ist ein in der Optiktechnologie lange bekanntes Verfahren zur Herstellung optischer Kontakte. Glasoberflächen haben das Charakteristikum, sich bei ausreichender Formgenauigkeit ansprengen zu lassen. Hierbei muß die Formabweichung der Fügeflächen geringer als 100 nm sein. Das Ansprengen beruht auf den VAN DER WAALS'schen Kräften, die zwischen den Gelschichten durch die Adsorption von Wasser wirken. Hierdurch wird die erste Phase des Diffusionsschweißens realisiert. Eine plastische Annäherung wie zum Diffusionsschweißen von Metall-Metall-Verbindungen ist nicht erforderlich. Der zweite Unterschied liegt in der Verbindungsbildung. Bei Temperaturen im Bereich des unteren Kühlpunktes ist nach [Spa84,

Dun81] nicht mit einer Diffusion von Sauerstoff- und Siliziumatomen zu rechnen. Genau in diesem Bereich liegen die verwendeten Schweißtemperaturen. Wie sich bei den Glasoberflächen der Stoffschluß ausbilden kann, obwohl sich die $[\text{SiO}_4]$ -Tetraeder im Prinzip nicht bewegen, wird in [Köh78] durch die Kondensation der adsorbierten Kieselgelschicht zu Siloxan-Brücken beschrieben (Abb. 4.10).

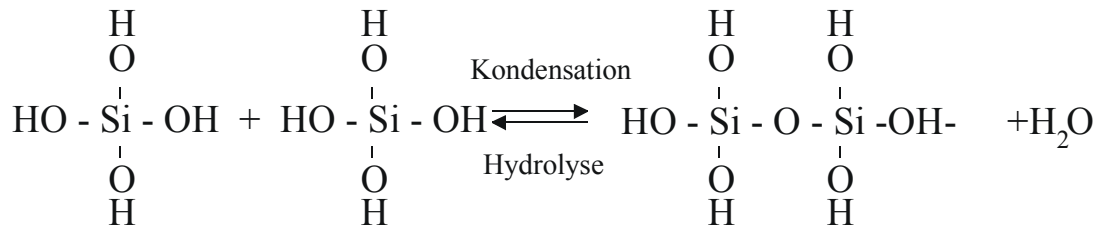


Abb. 4.10: Kondensation der Kieselgelschicht zu Siloxan-Brücken [Köh78].

Die Kieselgelschicht kann unter bestimmten Bedingungen kondensieren, wobei $[-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-]$ -Bindungen entstehen. Die Entstehung der Siloxan-Brücken ist der den Stoffschluß verursachende Prozeß. Die Verbindungsbildung bleibt somit auf die Oberflächen beschränkt. Die Kondensation beginnt ab einer Temperatur von 350-400 °C. Dies heißt, daß sich angesprengte Glasverbindungen bei Temperaturen ab 350 °C diffusionsschweißen lassen. Mechanischer Druck ist zum Schweißen nicht unbedingt erforderlich.

Die Verbindung Glas-Metall

Der Verfahrensablauf ist dem Diffusionsschweißprozeß von Metall-Metall-Verbindungen ähnlich. Es unterscheidet sich nur die Verbindungsbildung. Bei Glas-Metall-Verbindungen entstehen stöchiometrisch und strukturell vollkommen neue Schichten in der Fügezone, deren Entstehungsursachen neben der Diffusion der Fügepartner auch in chemischen Reaktionen der Substrate miteinander zu suchen sind. Metalle und Gläser besitzen einen verschiedenartigen Aufbau: Metalle sind kristallin und Gläser amorph. Weiter unterscheiden sich auch die Bindungsarten. Im Metall liegt eine Metallbindung, im Glas eine Ionenbeziehung vor. Hierdurch können Metalle nicht direkt mit Gläsern verbunden werden. Es wird eine Zwischenschicht benötigt, welche sich mit dem Metall und dem Glas verbindet. Eine Metalloxidschicht kann diese Aufgabe übernehmen. Das Metalloxid ist vorzugsweise das Oxid des zu verschweißenden Metalls. Es besitzt die Fähigkeit, sich sowohl mit dem Metall, als auch mit dem Glas zu verbinden. Bei Metallen mit festen Oxidschichten, wie Aluminium, Titan oder Chrom ist keine weitere Zwischenschicht notwendig. Metalle, welche keine feste Oxidschicht bilden, wie Eisen, Nickel oder Kupfer, müssen über eine Zwischenschicht geschweißt werden. So wird

Kupfer zum Beispiel mit Chrom initialisiert („vorgekeimt“). Es kann nach zwei Verfahrensweisen geschweißt werden. In der ersten Variante ist die Metalloberfläche oxidiert, in der zweiten Variante ist der Ausgangszustand die oxidfreie Oberfläche. Hierzu lassen sich nur Metalle mit einer höheren Sauerstoffaffinität als Silizium verwenden. Die Metalle müssen SiO_2 reduzieren können. Zur Herstellung der Metall-Fügestellen ist ein Vakuum notwendig. Wie Versuche gezeigt haben, ist ein Feinvakuum ausreichend, um die Oxidation des Metalls zu verhindern. Die Herstellung der Glas-Glas-Verbindung gelingt hingegen am besten in Normalatmosphäre. Im Vakuum sind grundsätzlich angesprengte Oberflächen notwendig. Eine Erklärung kann aus dem Bindungsmechanismus abgeleitet werden. Die Verbindung beruht auf der Kondensation der an den Oberflächen adsorbierten Gel-Schichten. Die Vermutung liegt nahe, daß diese Gel-Schichten bei Temperaturen oberhalb von 400 °C im Hochvakuum zum Teil desorbieren oder sich soweit verändern, daß die Kondensation der Gel-Schichten nicht mehr ablaufen kann. Nach [Hul83] lassen sich Glasoberflächen über 400 °C wegen der desorbierten Zwischenschicht nicht mehr ansprengen. In [Köh78] sind Untersuchungen zum Verhalten der adsorbierten Wasserschicht gemacht worden. Die Adsorptionsschichten an der Oberfläche von Baryt-Korn-Glas und Kieselglas wurden mittels Glimmentladung ausgetrocknet. Ein Ansprengen war hiernach nicht mehr möglich. Erst durch die Bildung einer neuen Adsorptionsschicht ließen sich die Proben wieder ansprengen. Nach [Dun81] verringert sich im Hochvakuum bei einer Erwärmung von Raumtemperatur auf 400 °C die Anzahl der an der Glasoberfläche adsorbierten OH-Gruppen von 5,2 auf 3,2 OH-Gruppen nm^{-2} . Die Anzahl der adsorbierten H_2O -Moleküle verringert sich unter gleichen Bedingungen von 6,0 auf 0 H_2O -Moleküle nm^{-2} . Bei Raumtemperatur unter atmosphärischen Bedingungen oder im Hochvakuum liegt die Anzahl der OH-Gruppen konstant bei $5,2\text{ nm}^{-2}$. Sind die Fügeflächen angesprengt, besteht an diesen gefügten Oberflächen nicht die Gefahr, daß die Gelschichten desorbieren. Eine angesprengte Verbindung ist in diesem Sinne vakuumdicht. Auf diese Weise können angesprengte Glasoberflächen im Vakuum diffusionsgeschweißt werden.

Nachteile dieses Verfahrens ergeben sich aus:

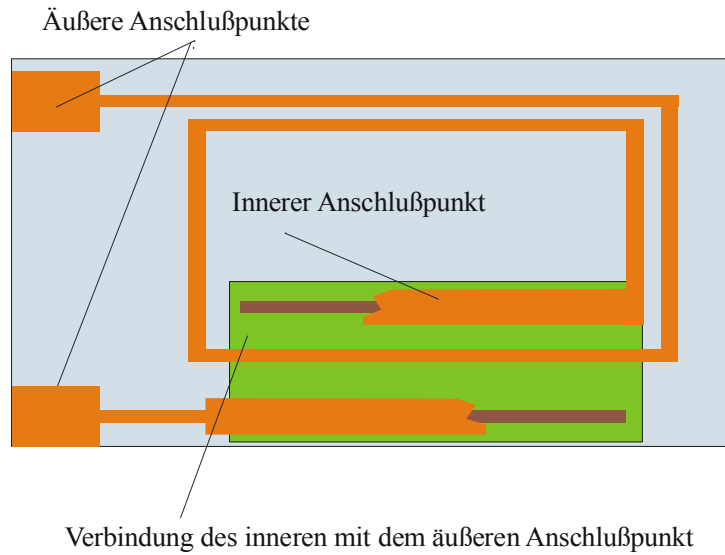
- der mechanische Nachbearbeitung der Fügeteile,
- den unterschiedlichen mechanischen und thermischen Eigenschaften der Fügeteile,
- den vielen Fertigungsschritten sowie
- der schlechten Kompatibilität bei der Herstellung von Strompfaden und mechanischen Strukturen.

4.2.3 Einseitig strukturierte Substrate

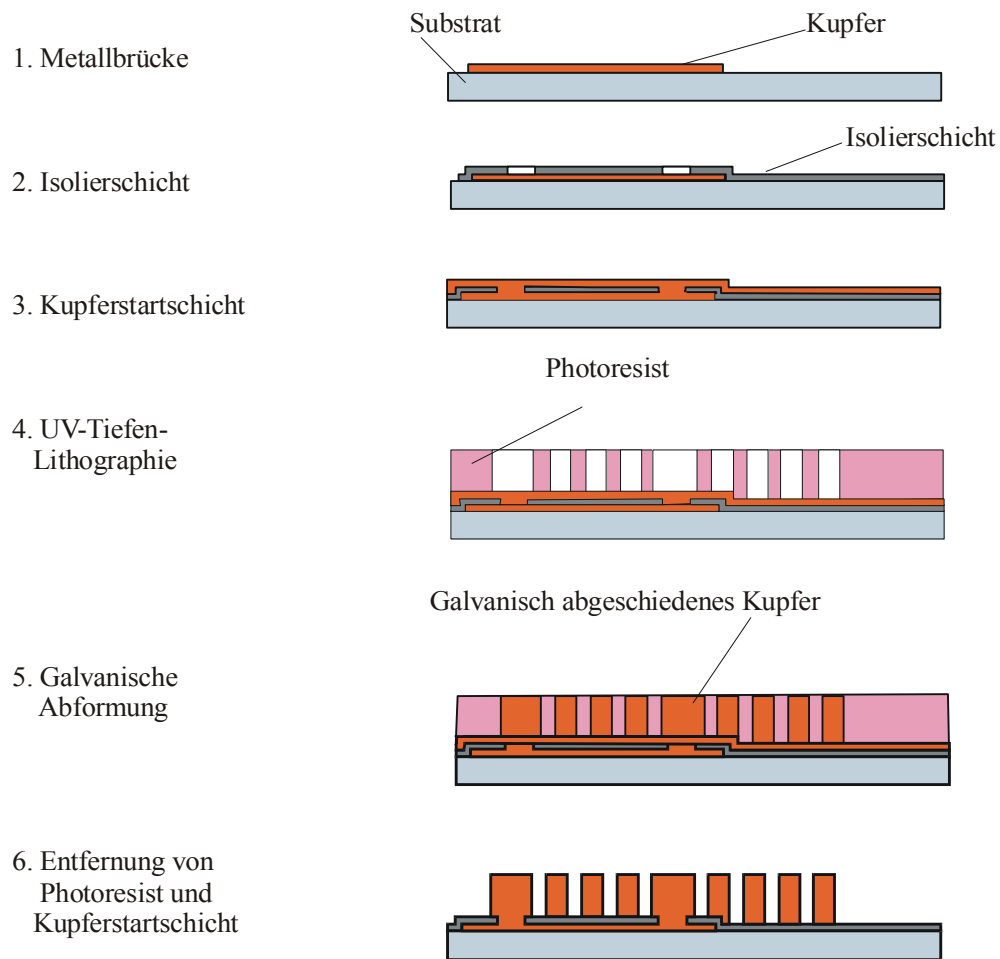
Aus den beiden erwähnten Verfahren und ihren beschriebenen Nachteilen wird ersichtlich, daß die Miniaturisierungsfähigkeit stark eingeschränkt ist und sich somit die Herstellung extrem aufwendig gestaltet. Durch die Tendenz zu immer größeren Wafer-Durchmessern nimmt aus Stabilitätsgründen auch die Dicke der Substrate zu, so daß eine Durchstrukturierung nicht mehr zweckmäßig ist. Durchgesetzt hat sich zur Spulenerstellung die UV-Tiefenlithographie mit einem anschließenden Galvanikprozeß. Unter Berücksichtigung der zur Zeit verwendeten Technologien wird an ein modifiziertes Verfahren die Forderung gestellt, daß nur ein UV-Tiefenlithographie-Prozeß zuzulassen ist. Das erleichtert die Prozeßführung erheblich. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Kontaktierungsverfahren nach diesen Anforderungen entwickelt. Die Prozeßsicherheit wird weiter erhöht werden, wenn, wie bei diesem Verfahren, die UV-Tiefenlithographie in der Abfolge der lithographischen Prozesse der letzte Schritt ist. Aus den Forderungen folgt, daß die Kontaktierung nur mittels eines Dünnschichtprozesses erfolgen kann.

Die Reihenfolge der Ebenen ist demzufolge gegenüber Abb. 4.7 umgekehrt. Die Abb. 4.11 zeigt das verwendete Verfahren für den Aufbau einer kontaktierten Spule.

Der Aufbau ist in drei Teilschritte gegliedert. Im ersten und zweiten Schritt wird die Kontaktierungs- und die Isolationsebene hergestellt. Sie bestehen im wesentlichen aus einer Metallbrücke, welche sich auf einem elektrisch isolierenden Substrat befindet und einer Isolierschicht mit zwei Kontaktöffnungen. Im vorliegenden Aufbau wird als Metallbrücke Kupfer und als Substrat Silizium mit einer dünnen Oxidschicht verwendet. Die Haftfähigkeit zwischen Kupfer und Siliziumoxid kann durch eine dünne Chromschicht verbessert werden. Die dünne Kupfer- und die Chromschicht werden durch einen PVD-Prozeß (Physical Vapour Deposition) aufgetragen. Als Isolierschicht wird eine Siliziumnitrid-Schicht, die mit Hilfe eines PECVD-Prozesses (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) abgeschieden wird, verwendet. Die benötigten Kontaktöffnungen lassen sich durch naß- oder trockenchemisches Ätzen herstellen. Im dritten Schritt werden die Strompfade nach dem in Abb. 4.3b dargestellten Verfahren unter Verwendung der UV-Tiefenlithographie hergestellt. Als Startschicht für den Galvanikprozeß wird Kupfer verwendet. Die entstehenden Hohlräume werden galvanisch mit Kupfer gefüllt, anschließend wird der Resist und die freie Startschicht entfernt. Sofern es die Konstruktion der Strompfade zuläßt, ist die Breite der Brücke so zu wählen, daß der Querschnitt der Brücke gleich dem Leiterquerschnitt der einzelnen Strompfade ist.



(a) Draufsicht auf den Durchkontakt



(b) Schnittdarstellung der Herstellung der durchkontaktierten Spule.

Abb. 4.11 Galvanische Abformung und kontaktierte Spule.

Werden zusätzlich mechanische Strukturen im Grundsubstrat benötigt, kann das Substrat nach Fertigstellung der Strompfade strukturiert werden. Hierzu ist das Substrat vor dem Aufbringen der Strompfade mit einer Maskierungsschicht zu versehen. Bei den im Rahmen der Arbeit aufgebauten Aktoren wurde naßchemisch strukturiertes Silizium verwendet. Silizium kann naß- oder trockenchemisch mit Siliziumoxid als Maskierungsschicht strukturiert werden. Die Kupferspulen werden vom Ätzmedium (im vorliegenden Fall KOH 30 %) nicht angegriffen. Es ist zweckmäßig, als Brückenmaterial ein gegen das Ätzmedium resistentes Metall zu verwenden. Anderenfalls besteht die Gefahr, daß das Metall durch prozeßbedingte Poren in der Isolierschicht angegriffen wird.

Die Abb. 4.12 zeigt die Herstellung eines federgeführten Läufers mit galvanisch erzeugten Strompfaden. Die Herstellung ist in drei Schritte unterteilt. Im ersten und zweiten Schritt werden die Maskierungsschicht für die Siliziumstrukturierung, die Metallbrücke zur Kontaktierung der Strompfade und die Isolierschicht mit den Kontaktöffnungen aufgebracht. Im dritten Schritt werden die Strompfade mit Hilfe der UV-Tiefenlithographie gefertigt. Zuletzt wird das Substrat unter Verwendung der zuvor aufgetragenen Maskierungsschicht strukturiert.

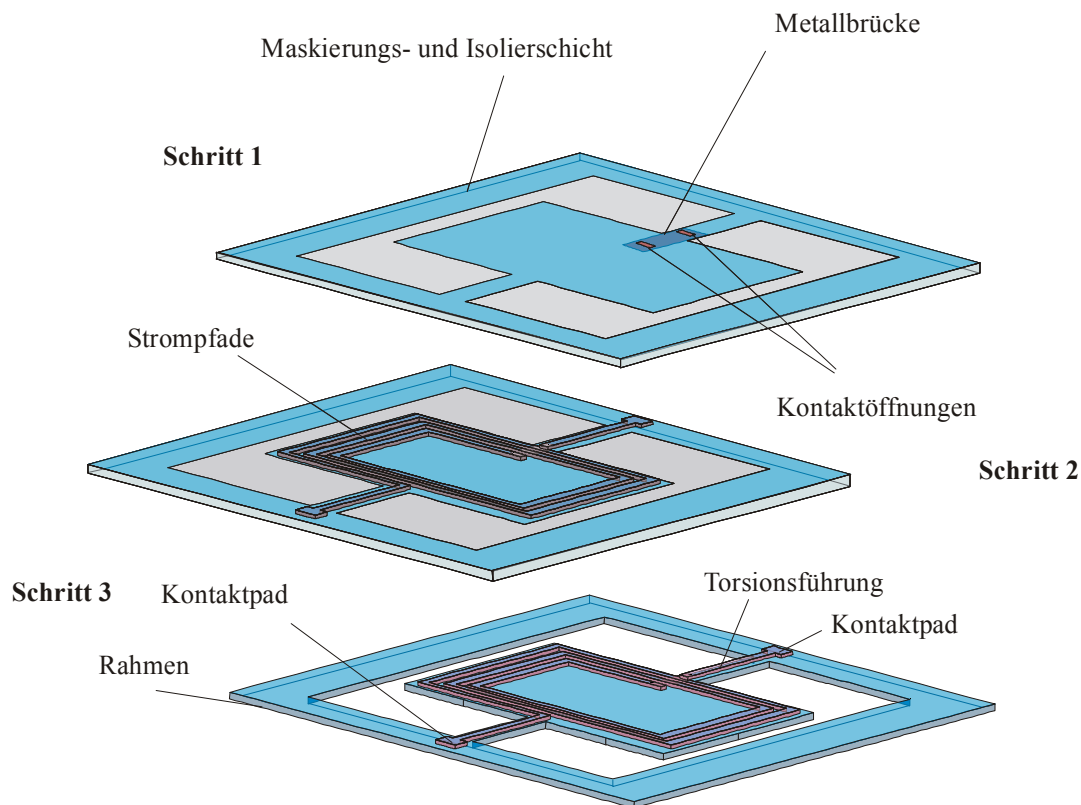


Abb. 4.12: Galvanisch hergestellte Strukturen mit mechanischen Elementen.

4.3 Bewertung

In der Tabelle 4.2 sind die spezifischen Vor- und Nachteile der Kontaktierungsverfahren aufgeführt. Nach dieser Einschätzung ist das zuletzt vorgestellte Verfahren das aussichtsreichere für die Herstellung von Mikroaktoren.

Tabelle 4.2: Bewertung der verschiedenen Kontaktierungsmöglichkeiten.

	Dreifach-Galvanik Prozeß	Beidseitiges Substrat	Drei-Ebenen Fügen	Ein-Galvanik Prozeß
Prozessicherheit	gering	mittel	mittel	hoch
Kompatibilität	schlecht	schlecht	schlecht	gut
Aufwand	hoch	mittel	hoch	niedrig
Miniaturisierungsfähigkeit	mittel	schlecht	mittel	hoch
Stromtragfähigkeit	mittel	hoch	hoch	hoch

4.4 Realisierung der Führung

Festkörpergelenke sind seit langem Stand der Technik. Sie ermöglichen eine spielfreie und reibungsfreie Führung. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Führungen ausschließlich aus monokristallinem Silizium gefertigt. Der Grund liegt in der einfachen Verfügbarkeit und den guten Strukturierungsmöglichkeiten. So ist z.B. durch anisotropes Trockenätzen nahezu jede Struktur, unabhängig von der Kristallorientierung, herstellbar. Aber auch durch naßchemisches anisotropes Ätzen bestehen große Variationsmöglichkeiten der Formgebung. Für den hier beschriebenen Aufbau der Aktoren wurde hauptsächlich naßchemisches anisotropes Ätzen verwendet.

Die Anzahl mechanischer Systeme ist nahezu unbegrenzt [Art72], für etliche Problemstellungen existieren bereits Lösungen. Bei einigen ist jedoch eine Modifizierung notwendig, um den Mechanismus mit Mikrotechnologien herstellen zu können. Für die gestellte Aufgabe kann auf einfache existierende Mechanismen, wie z.B. Parallelfederführungen, zurückgegriffen werden. Interessanter sind die Materialeigenschaften der für die Federn zu verwendenden Werkstoffe. In Frage kommen generell alle Werkstoffe z.B. Silizium, Metall, Glas oder Kunststoff; einzige Voraussetzung ist, daß der Werkstoff nur im elastischen Bereich seiner Spannungs-Dehnungs-Charakteristik eingesetzt wird. Die Möglichkeiten zur Mikrostrukturierung sollen nicht betrachtet werden. Es muß davon ausgegangen werden, daß die Antriebe ihre Funktionsfähigkeit verlieren, sobald die Federführungen durch äußere oder innere Kräfte plastisch verformt wurden.

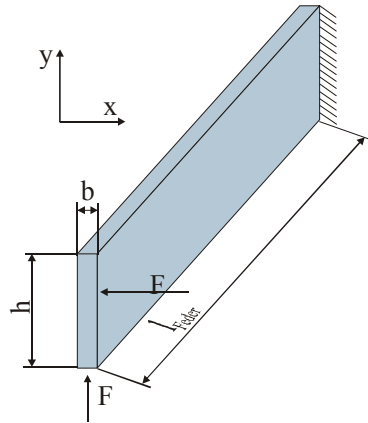


Abb. 4.13: Einseitig eingespannter Balken.

Eine Verformung über die Streckgrenze ist nicht zulässig. Bei sehr sprödem Werkstoffen, wie z.B. Silizium, fällt die Streckgrenze mit der Bruchfestigkeit zusammen, so daß keine plastische Verformung auftritt. Der Bruch bei Überlastung muß durch Anschläge, die den Bewegungsbereich einschränken, verhindert werden. Eine richtig dimensionierte Federführung weist in Bewegungsrichtung eine große Nachgiebigkeit und in allen anderen Richtungen eine hohe Steifigkeit auf. Wird angenommen, daß bei Belastung nur Biegung in den Federn auftritt und ist s_b der Weg in Abhängigkeit von der generierten Kraft in der Bewegungsrichtung x (Abb. 4.13), so gilt für einen rechteckförmigen Querschnitt mit der Breite b und der Höhe h nach [Dub98]:

$$s_b = \frac{2 \cdot F \cdot l_{Feder}^3}{h \cdot b^3 \cdot E_{Si}}, \quad (4.1)$$

mit der Federlänge l_{Feder} .

Für die Bewegung s_s in der gesperrten Richtung y gilt:

$$s_s = \frac{8 \cdot F \cdot l_{Feder}^3}{b \cdot h^3 \cdot E_{Si}}. \quad (4.2)$$

Das Verhältnis von s_b und s_s ,

$$\frac{s_b}{s_s} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{h}{b}\right)^2, \quad (4.3)$$

gibt an, um welchen Faktor nachgiebiger die Feder in der Bewegungsrichtung als in der gesperrten Richtung ist. Eine hohe Steifigkeit der gesperrten Richtung ist erforderlich, um die Bewegung in dieser Richtung (z.B. in x -Richtung) weitgehend zu sperren. Die Höhe h des rechteckigen Federquerschnitts ist im Verhältnis zur Breite b groß zu wählen (die Versagens-

arten Beulung und Knickung werden nicht berücksichtigt). Die Steifigkeit der Federführung in Bewegungsrichtung wird über die Breite b eingestellt. Da das Verhältnis (4.3) unabhängig vom E-Modul ist, ist eine Variation des E-Moduls nicht geeignet, um die Nachgiebigkeit in Bewegungsrichtung zu erhöhen und in der gesperrten Richtungen verringern. Demnach ist ein Werkstoff ideal, der

- keine mechanische Hysterese besitzt,
- eine große Dehnung und Kerbschlagzähigkeit hat und
- dauerhaft ist.

In der Tabelle 4.3 sind die Werkstoffeigenschaften für einige der in Frage kommenden Federwerkstoffe aufgeführt. Unter Berücksichtigung der obigen Aussagen sind Silizium und Glas keine günstigen Werkstoffe. Besonders Silizium arbeitet aufgrund des einkristallinen Aufbaus zwar nahezu hysteresefrei, besitzt aber aus diesem Grund ein ungünstiges Bruchverhalten, welches durch die niedrige Kerbschlagarbeit oder die Bruchzähigkeit zum Ausdruck kommt.

Günstiger sind in dieser Hinsicht polykristalline oder amorphe Werkstoffe, wie z.B. Metalle oder Kunststoffe, hierbei weisen jedoch besonders die Kunststoffe eine merkliche Hysterese auf. Ihr Vorteil liegt in der vergleichsweise hohen Dehnung. Ein weiterer Vorteil ist für einige Anwendungen die Form des Versagens. Während Silizium und auch Glas wegen ihres spröden Verhaltens ohne Vorwarnung und ohne plastische Verformung brechen, kündigt sich bei Metallen oder Kunststoffen das Versagen durch eine vorhergehende plastische Verformung an.

Tabelle 4.3: Mechanische Eigenschaften von möglichen Federwerkstoffen.

Werkstoff	Bruchdehnung [%]	Zugfestigkeit t [Gpa]	Dichte [kgdm ⁻³]	Bruchzähigkeit [(Mpa) ^{1/2}]	E-Modul (Zugversuch) [Gpa]	Dauerfestigkeit [Mpa]
Silizium	2,7	je nach Oberfläche	2,33	0,4	187-130	*
Stahl (legiert)	...5...8..	1,1-1,45	7,8	2-5	210	ca. 500-1000
SiO ₂ (Fasern)		0,8-1,2	2,18	0,3 ...0,6	65-75	
Al ₂ O ₃		2,2-2,6 (Druck)	3,9	4	300-400	
(Ni55/Ti45)	15 -40	0,8/1,0	6,4...6,5	*	60-90	
Cu/Be ₂ halbhart hart	5...25 1...7	0,5 1,3	8,25	*	120-160	ca. 300

*=Es lagen keine Werte vor, [Dub98], [Goo99], [Mem00]

5 Beispiele für elektrodynamische Mikroaktoren

Um die zuvor aufgestellten Aussagen zu untermauern, wurden mehrere elektrodynamische Mikroantriebe aufgebaut und die statischen und dynamischen Eigenschaften untersucht. Es werden wechselsinnige Bewegungen mit Rast beschrieben, periodische und harmonische Bewegungen in unter- und überkritischen Bereichen betrachtet sowie die Anwendung des elektrodynamischen Energiewandlungsprinzips für kaskadierte Aktoren beurteilt.

5.1 Wechselsinnige Bewegungen mit Rast

5.1.1 Erzeugung von getrennt steuerbaren Antriebskräften für zwei Koordinatenrichtungen

Bei klassischen Mehrkoordinatenaktoren wird eine Bewegung in der Ebene oder im Raum durch eine Addition der Dreh- und Längsbewegungen der einzelnen Motoren, die seriell zum Gestell angeordnet sind, erreicht. Der Anker von integrierten Mehrkoordinatenmotoren besitzt den Freiheitsgrad $f > 1$, damit sind sowohl der Bewegungsablauf als auch die Bewegungsform steuerbar. Dies ergibt eine Reihe von Vorteilen wie:

- einfacherer mechanischer Aufbau,
- Wegfall von Bewegungswandlern und Koppелеlementen zwischen den Bewegungsrichtungen,
- geringere zu bewegende Massen,
- bessere Dynamik und
- höhere Geschwindigkeit.

Es entsteht aber auch ein entscheidender Nachteil. Durch die parallele Bewegung in mehreren Koordinatenrichtungen ist ein integriertes Meßsystem für alle Freiheiten notwendig [Scä97]. Auf die verschiedenen Meßverfahren soll hier nicht eingegangen werden, vielmehr sollen einige Möglichkeiten zum mikrotechnischen Aufbau integrierter elektrodynamischer Mehrkoordinatenantriebe diskutiert werden. Die Anzahl der getrennt steuerbaren Elemente zur Kraftgenerierung entspricht dem Freiheitsgrad. Für einen Zweikoordinatenantrieb werden demzufolge zwei Antriebselemente benötigt. In der Abb. 5.1 sind zwei Möglichkeiten zur Krafter-

zeugung in zwei Koordinatenrichtungen dargestellt, die sich aufgrund des planaren Aufbaus zur Herstellung mittels Mikrotechnologien eignen.

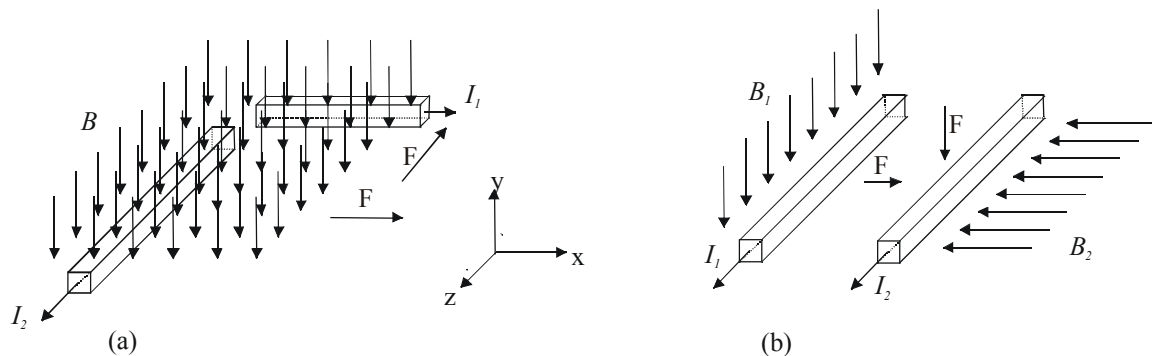


Abb. 5.1: Krafterzeugung in zwei Koordinatenrichtungen,
a) homogene Feldverteilung,
b) inhomogene Feldverteilung .

In der Abb. 5.1a werden in einem homogenen, zeitlich konstanten B -Feld Kräfte in x - und y -Richtung durch zwei getrennt ansteuerbare Strompfade erzeugt. Die Strompfade stehen senkrecht aufeinander. Der Strom I_1 erzeugt eine Kraft in z -Richtung, der Strom I_2 eine Kraft in x -Richtung. In der Abb. 5.1b laufen die Ströme I_1 und I_2 parallel in einem inhomogenen Magnetfeld. Im Bereich der Strompfade I_1 und I_2 besitzt das B -Feld Komponenten, die senkrecht aufeinander stehen. Folglich erzeugt der Strom I_1 eine Kraft in x -Richtung und der Strom I_2 eine Kraft in y -Richtung. Die Kräfte sind in beiden Fällen für beide Richtungen getrennt über die Stromstärke steuerbar. Aus diesen Betrachtungen folgt, daß für eine Bewegung in zwei Richtungen zwei senkrecht aufeinander stehende Strompfade oder B -Felder notwendig sind.

Die Platzierung der krafterzeugenden Strompfade ist sowohl im Läufer als auch im Stator möglich. Die Permanentmagnete sind im jeweiligen Fall im Stator bzw. im Läufer angeordnet. Für die Permanentmagnet-Anordnung im Läufer gilt:

- der Läufer benötigt keine Zuleitungen für die Energiezufuhr,
- die Magnetfeldformung durch einen Eisenkreis erhöht die bewegte Masse,
- ohne Eisenkreis sind nur schwache und inhomogene Magnetfelder erreichbar.

Für eine Spulenordnung im Läufer gilt:

- der Läufer benötigt Zuleitungen für die Energiezufuhr,
- Die Spulen und die Zuleitungen werden bewegt,
- ein starkes und homogenes Magnetfeld wird durch den Eisenkreis (Magnetfeldformung) erreicht.

5.1.2 Aufbau eines Aktors mit bewegtem Magneten

Wird bei einem Aktor mit bewegtem Magneten auf den Eisenrückschluß verzichtet, ergibt sich ein sehr einfacher Aufbau. Aufgrund des schwachen inhomogenen Magnetfeldes können allerdings nur geringe Kräfte und Bewegungen erzeugt werden.

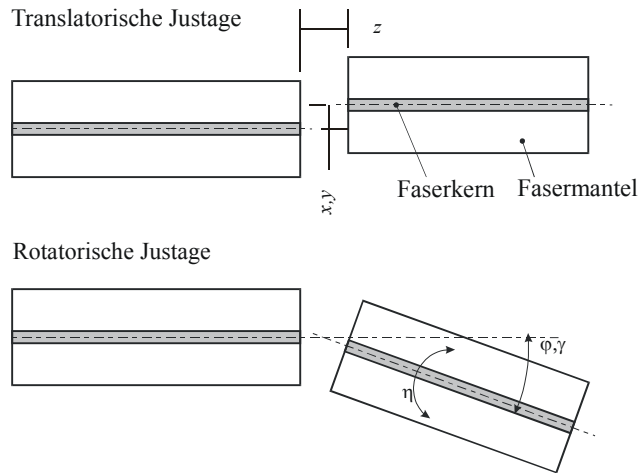


Abb. 5.2: Mögliche Fehllagen bei der Stirnflächenkopplung zweier Lichtwellenleiter.

Daß dieser einfache Aufbau für einen Aktor genutzt werden kann, zeigt das folgende Beispiel. Eine Anwendung ist die Kopplung und Positionierung von Lichtwellenleitern (LWL). Bei der Kopplung zweier Lichtwellenleiter über die Stirnflächen (s. Prinzipdarstellung in Abb. 5.2) ist die verursachte Dämpfung von den sechs Fehllagevariablen x , y , z sowie φ , γ , η der beiden LWL zueinander abhängig. Die Dämpfung ist hierbei besonders empfindlich gegenüber den beiden radialen Fehllagen x und y [Ger97]. Die Kopplung wird durch die Positionierung eines der LWL erreicht.

Durch Funktionsintegration, d.h. bei Verwendung des Lichtwellenleiters zur Lichtleitung und als mechanisches Führungselement, können die benötigten Kräfte und beweglichen Bauelemente auf ein Minimum reduziert werden. Der folgende Aufbau verdeutlicht dies. Um einen beweglichen Permanentmagneten (Freiheitsgrad $f=2$) werden Strompfade angeordnet, welche diesen in die erforderlichen Richtungen ablenken. Die Abb. 5.3 zeigt das Prinzip. Ein diametral magnetisierter Permanentmagnet ist am Lichtwellenleiter befestigt und wird durch ihn geführt. Der Magnet erfüllt die Anforderungen nach Abb. 5.1b. Durch die geschlossenen Feldlinien existieren Bereiche, in denen die Feldlinien senkrecht aufeinander stehen, wie in der Abb. 5.4 zu sehen ist. Diese Strompfade sind um den Magneten angeordnet. Die erzeugte

elektrodynamische Kraft wirkt auf den Permanentmagnet, bewegt diesen und folglich auch den Lichtwellenleiter gegen dessen eigene Federkraft.

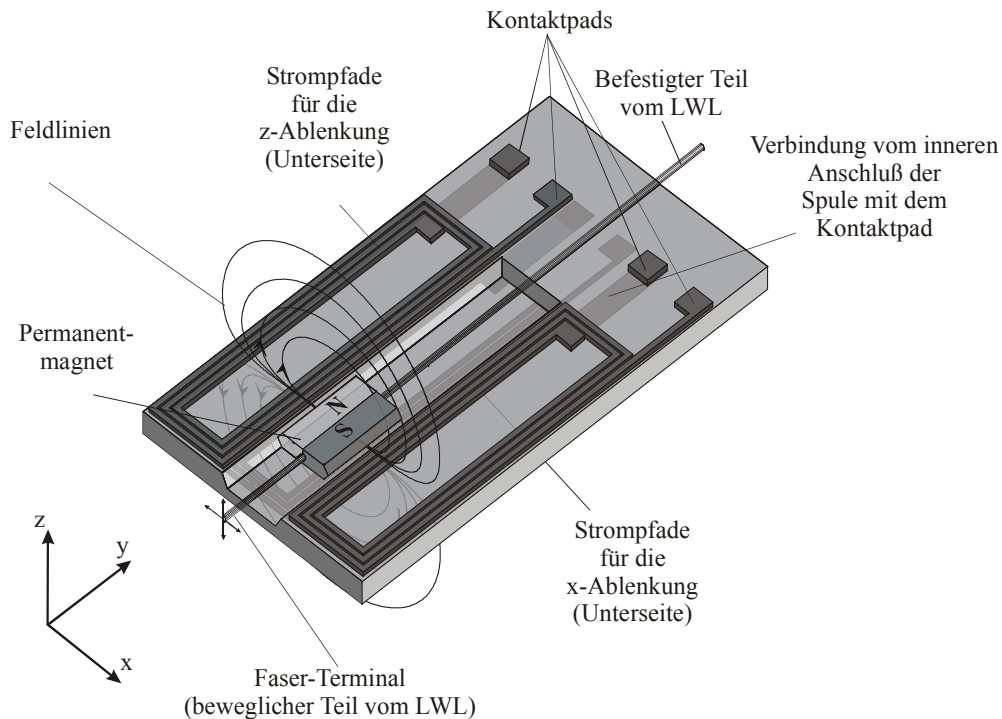


Abb. 5.3: Beispiel eines Positionierantriebes für Lichtwellenleiter.

Die Position des Lichtwellenleiters wird durch die Stromstärke in den Strompfaden eingestellt. Je nach Lage der Strompfade im inhomogenen Magnetfeld erzeugen sie Kraftkomponenten in x- und/oder y-Richtung. Die Strompfade für die x- bzw. y-Richtung werden mit x-Deflektor bzw. mit y-Deflektor bezeichnet.

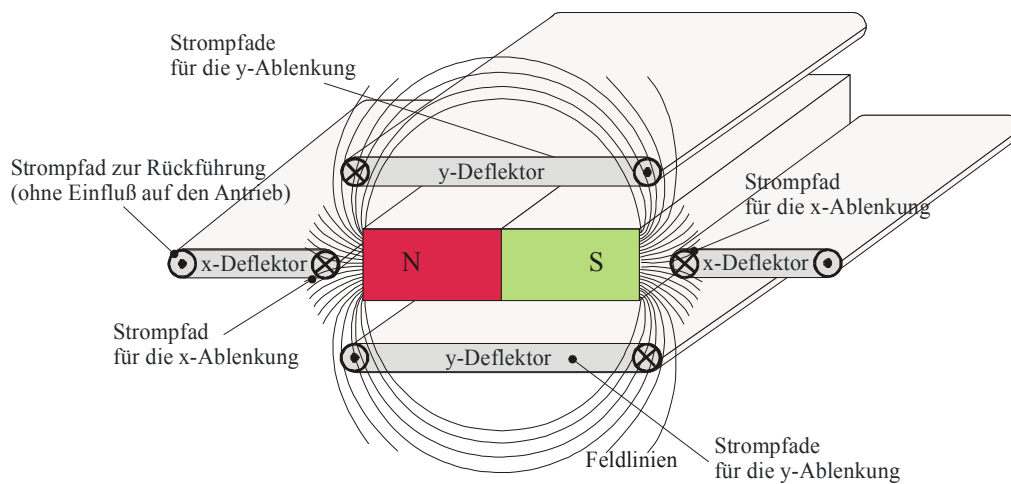


Abb. 5.4: Prinzip der Krafterzeugung im Streufeld des Permanentmagneten (beweglicher Permanentmagnet, ortsfeste Strompfade).

Im vorliegenden Fall werden die Strompfade so angeordnet, daß sie in der neutralen Position (in der nicht-ausgelenkten Position des LWL) Kräfte exakt in x- und y-Richtung erzeugen (Abb. 5.4). In der ausgelenkten Position generieren die Einzelstrompfade durch die relative Verschiebung des Feldes Kräfte, die nicht exakt in diese Richtungen zeigen. Zur den Hauptkomponenten F_x und F_y kommen die Nebenkomponten F_{yn} bzw. F_{xn} hinzu.

Diese bewirken ein sogenanntes Übersprechen der Bewegungsrichtungen. Durch eine symmetrische und paarweise Anordnung, mit mindestens vier Strompfaden können die entstehenden Nebenkomponten nahezu vollständig kompensiert werden. Die paarweise generierten Kräfte besitzen die gleichen Hauptkomponenten; die Nebenkomponten besitzen den gleichen Betrag bei entgegengesetztem Vorzeichen und heben sich daher auf.

Die im Bewegungsraum generierten Kräfte lassen sich mit Hilfe der Feldverteilung $B(x,y)$ und der Stromdichte in Abhängigkeit von der Position berechnen.

$$F_x = J \cdot l \cdot \int_{x_1, y_1}^{x_2, y_2} B_y(x, y) dy dx \quad (5.1)$$

$$F_y = J \cdot l \cdot \int_{x_1, y_1}^{x_2, y_2} B_x(x, y) dy dx \quad (5.2)$$

x_1, x_2, y_1, y_2 sind die Koordinaten der krafterzeugenden Strompfade.

In der Abb. 5.5 und der Abb. 5.6 sind die generierten Kräfte für die beiden Koordinatenrichtungen einer Anordnung mit sechs bzw. vier Strompfaden dargestellt. Der Stromfluß in allen Strompfaden ist zeitlich konstant. Der Permanentmagnet wird im Bewegungsraum von -100 µm bis 100 µm bewegt, die generierte Kraft nach (5.1) und (5.2) berechnet und auf die Kraft in der neutralen Position normiert. Zu erkennen ist die homogene Kraftverteilung im Bewegungsraum. Diese homogene Verteilung ist für eine lineare Strom-Auslenkungs-Kennlinie notwendig.

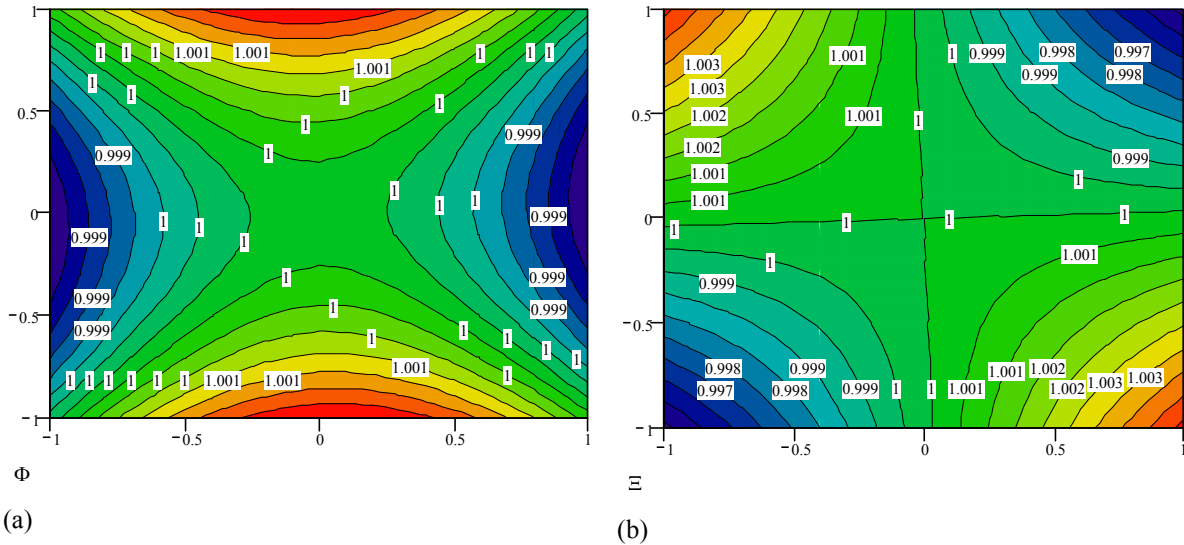


Abb. 5.5: Berechnete Kraft für eine Anordnung mit sechs Strompfaden (die normierten Kräfte bei Verschiebung des Magneten in x- und in y-Richtung bei einem Bewegungsbereich von $-100 \mu\text{m}$ bis $100 \mu\text{m}$). a) Kraft F_x , b) Kraft F_y .

Die Abb. 5.6 zeigt, daß beim Verzicht der zwei oberen Strompfade zur y-Ablenkung die Homogenität der Kraftverteilung geringfügig sinkt.

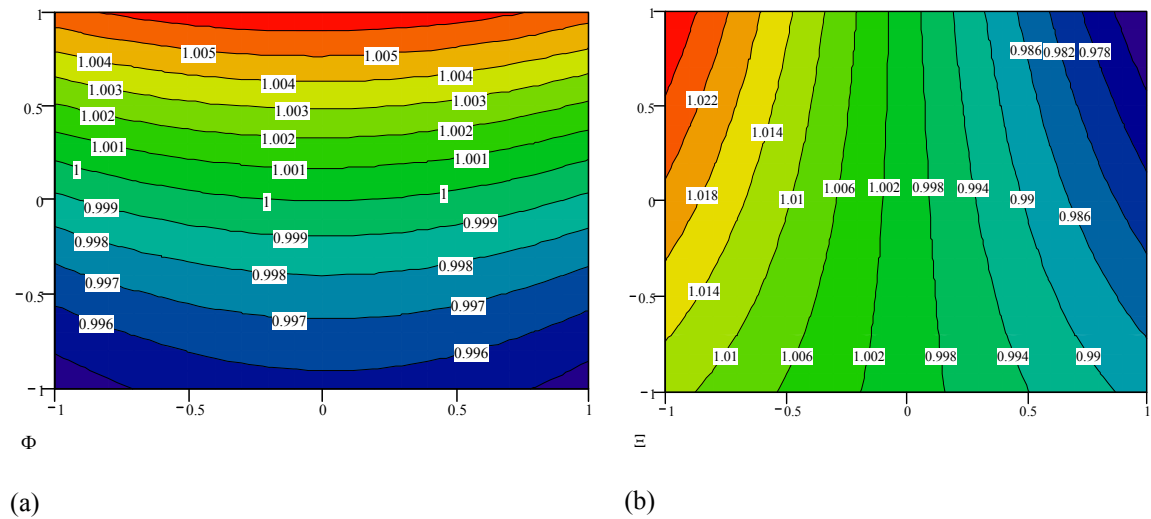


Abb. 5.6: Berechnete Kraft für eine Anordnung mit vier Strompfaden (die normierten Kräfte bei Verschiebung des Magneten in x- und in y-Richtung bei einem Bewegungsbereich von $-100 \mu\text{m}$ bis $100 \mu\text{m}$)

In der Abb. 5.7 ist die gemessene Abhängigkeit der Position von der Stromstärke aufgetragen. Es wird nur der y-Deflektor betätigt. Die x-Position wird mit Hilfe des x-Deflektors konstant bei $x = 0, 50$ bzw. $-100 \mu\text{m}$ gehalten und das geringe Übersprechen wird nicht berücksichtigt. Bei Variation der Stromstärke im y-Deflektor wird die Position des Magneten mit Hilfe eines LASER-Interferometers bestimmt. Ein Maß für den linearen Zusammenhang von Stromstärke und zugehöriger Auslenkung ist der Korrelationskoeffizient σ , der bei $\sigma = 1$ liegt.

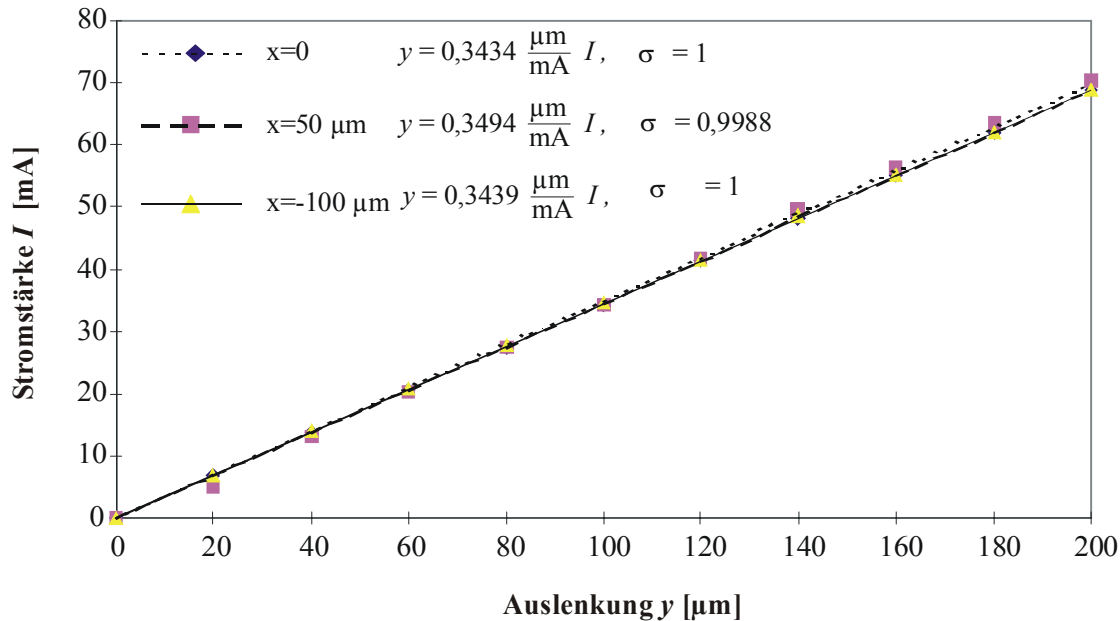


Abb. 5.7 Strompositionskurve des y -Deflektors (die Strompfade zur y -Ablenkung).

5.1.3 Antriebe mit bewegten Strompfaden

Bei Aktoren mit bewegten Strompfaden befinden sich diese im Läufer, die Permanentmagnete sind im Stator untergebracht. Im Stator wird das Magnetfeld generiert und über die Flußleitstücke zu den Spulen geleitet. Durch die Magnetfeldformung können im Luftspalt bis zu 1,0 T erreicht werden. Die Spulen und die zu positionierende Masse werden an Federführungen im Magnetfeld gehalten. Über Leiterbahnen auf den Federn werden die Spulen mit Strom versorgt. Bei den realisierten Antriebsvarianten werden die Mikrospulen im Feld eines gestellfesten Permanentmagneten bewegt. Hierbei kann das Erregerfeld durch einen Eisenrückschluß verstärkt werden, welcher dessen örtliche Konzentration und die Verringerung von Streuverlusten ermöglicht. Zur Herstellung des Antriebs wird das im Abschnitt 4.2.3 beschriebene Verfahren verwendet. Die Abb. 5.8 zeigt den Aufbau des Aktors ohne den Magnetkreis; die Abb. 5.9 den aus einkristallinen Silizium gefertigten Aktor.

Durch das stärkere magnetische Feld ist es möglich, höhere Anzugskräfte zu generieren, wodurch die Einsatzmöglichkeiten vergrößert werden. Der Läufer wird durch zwei orthogonal zueinander laufende verschachtelte Parallelfederführungen geführt. Auf der Ober- und Unterseite befinden sich die Strompfade für die beiden Bewegungsrichtungen. Die Zuführungen laufen über Führungsfedern zu den Kontaktpads, die sich gut zugänglich auf dem äußerem Rahmen befinden.

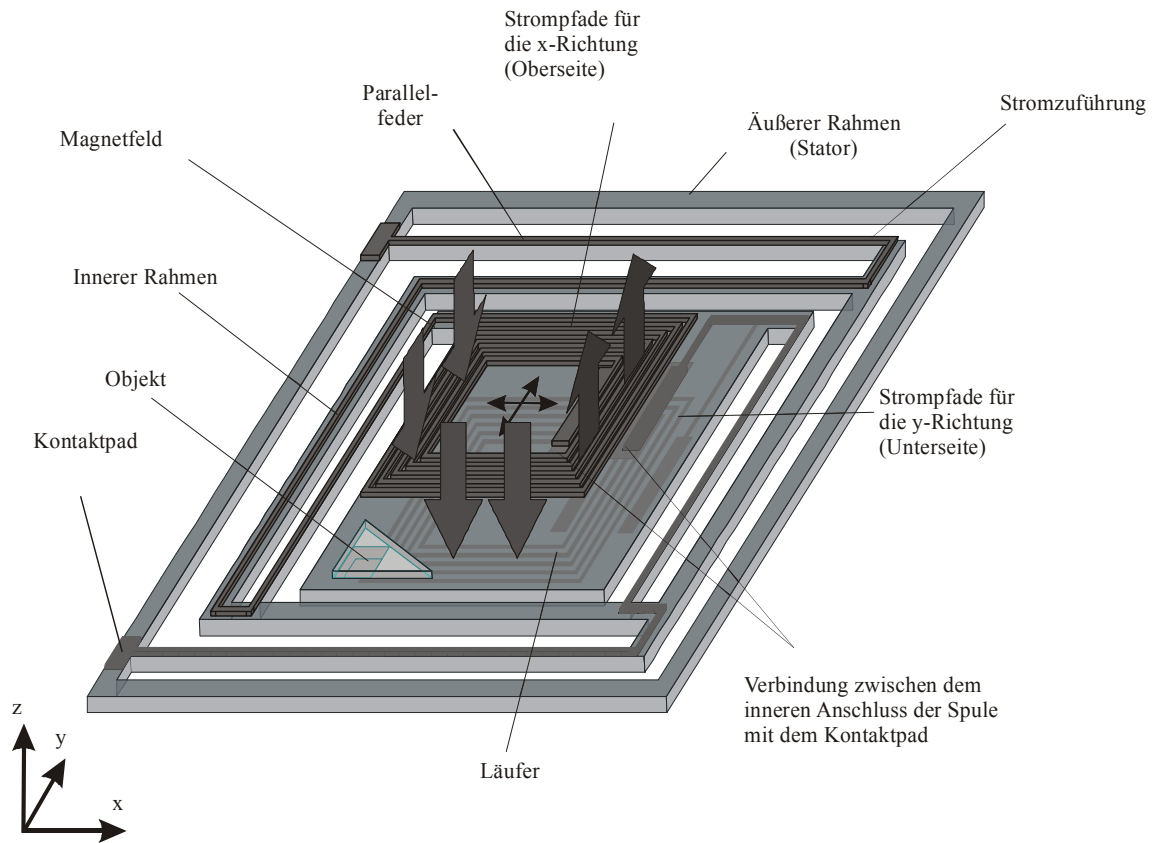


Abb. 5.8: Aufbau des Positionierantriebs (die Pfeile deuten die Richtung des Magnetfeldes an).

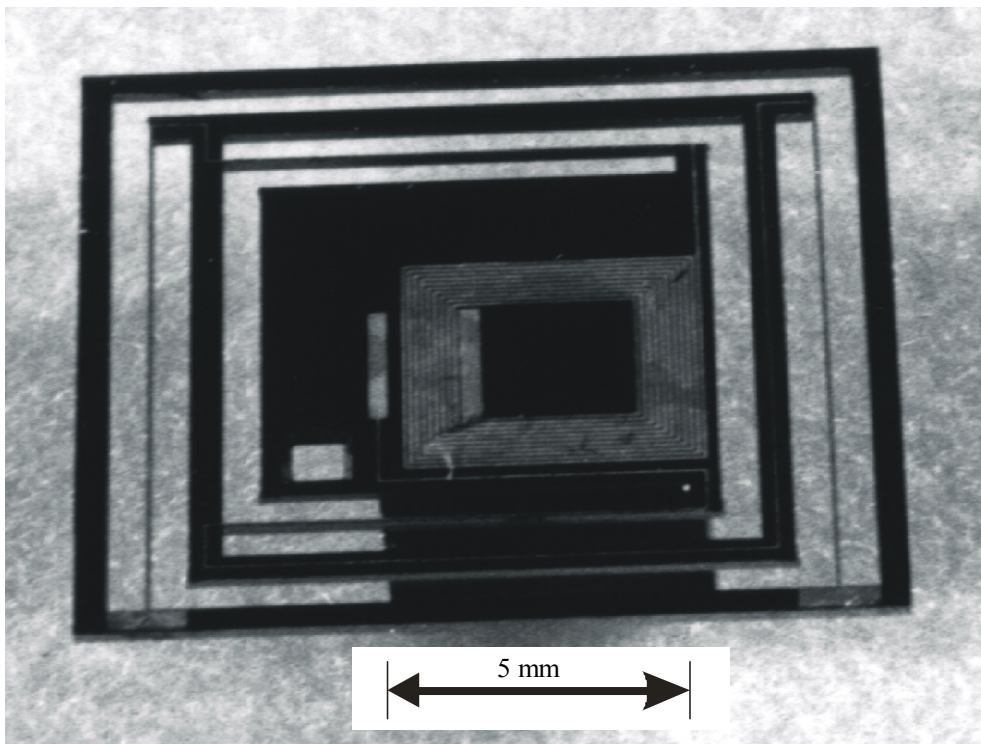


Abb. 5.9: Bild des Antriebs (Bewegungsbereich $600 \cdot 600 \mu\text{m}^2$, Eigenkreisfrequenz 256 Hz).

5.1.4 Energetische Betrachtung

Zuvor wurde festgestellt, daß bei Bewegungen mit der Eigenkreisfrequenz die Antriebskraft ausschließlich Wirkleistung erzeugt und alle Punkte auf der Betriebskennlinie möglich sind. Im Fall einer über- oder unterkritischen Bewegung liegt der Arbeitspunkt, in Abhängigkeit von der Dämpfung, fast immer bei der Anzugskraft. Um den Wirkungsgrad bei beliebigen Positionieraufgaben zu bestimmen, wird eine periodische, nicht-harmonische Bewegung angenommen. Zum Beispiel ist eine trapez-, rechteck-, sägezahn- oder dreieckförmige Bewegungsfunktion zweckmäßig, um einen Positioniervorgang nachzubilden. Diese Bewegungsformen oder einige Variationen davon werden häufig für Positionieraufgaben eingesetzt, z.B. die sägezahnförmige Bewegung für Scanning-Aufgaben bei Schwingspiegeln oder die rechteck- bzw. die trapezförmige für Multiplexer bei der Kopplung von Lichtwellenleitern.

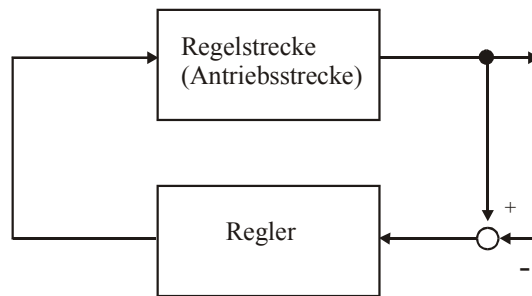


Abb. 5.10: Einfacher Regelkreis.

Es soll nach einer Möglichkeit gesucht werden, die benötigte mechanische Leistung des Antriebs zu bestimmen, wobei das mechanische System durch die Eigenkreisfrequenz, den Frequenzgang, die Masse und die Dämpfung bestimmt ist. Mit dem Ergebnis soll bei maximaler Leistung des Antriebs und einer vorgegebenen Abweichung von der Idealbewegung eine Aussage darüber möglich sein, welche Amplitude bei welcher Frequenz erreicht werden kann. Um die verschiedenen Bewegungsaufgaben zu lösen, ist die Verwendung eines geschlossenen Regelkreises sinnvoll, wie ihn Abb. 5.10 zeigt. Viele Bewegungsaufgaben können aber auch gelöst werden, wenn der Aktor in einer offenen Steuerkette betrieben wird. Da bei diesem Verfahren der apparative Aufwand geringer ist als bei einem geschlossenen Regelkreis, wird zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens der Aktor in einer offenen Steuerkette betrieben. Die Funktion für die Ansteuerung des Aktors wird mit Hilfe der harmonischen Synthese erstellt.

Eine sinnvolle Möglichkeit, um sowohl die Leistungscharakteristik als auch die dynamischen Eigenschaften des Antriebs zu berücksichtigen, ist die harmonische Analyse und Synthese.

Wie unter Abschnitt 3.3.1 erläutert wurde, lassen sich die untersuchten Bewegungsfunktionen mit Hilfe von FOURIER-Reihen darstellen und analysieren. Ebenso, wie es möglich ist, durch die Addition jede beliebige periodische Funktion anzunähern, ist auch entsprechend der Gleichung (3.10) für jede Einzelschwingung die benötigte mechanische bzw. elektrische Leistung bestimmbar. Die Summe der Einzelleistungen ergibt die Gesamtleistung, die vom Antrieb aufzubringen ist. Grundlage der Betrachtung ist die FOURIER-Reihe der zu untersuchenden periodischen Bewegung, sowie die daraus folgende effektive Wirk- und Blindleistung nach (3.11) und (3.13). Wie schnell die Blindleistung und die Wirkleistung der verschiedenen Reihen konvergieren, läßt sich aus der FOURIER-Reihe erkennen. Besonders die Beschleunigungen an den unstetigen Übergängen der Rechteck- oder der Sägezahnschwingungen erfordern hohe Kräfte, so daß im Gegensatz zu einer Dreieckschwingung eine höhere Anzahl von Gliedern notwendig ist, um die Funktion in gleicher Qualität anzunähern. Die Reihe wird im wesentlichen durch Sinus- bzw. Cosinus-Schwingungen der selben Periode, bzw. ein Vielfaches davon, angenähert:

$$\sin x, \cos x, \sin 2x, \cos 2x, \sin 3x, \cos 3x, \dots, \sin nx, \cos nx .$$

Die Amplituden nehmen stetig nach einer bestimmten Gesetzmäßigkeit, z.B.

$$\frac{1}{1}, \frac{1}{3^2}, \frac{1}{5^2}, \dots, \frac{1}{n^2}, \text{ oder } \frac{1}{1}, \frac{1}{3}, \frac{1}{5}, \dots, \frac{1}{n},$$

ab. Vom Gradienten der Amplitudenabnahme ist abhängig, ob und wie schnell die einzelnen Terme der benötigten Wirk- und Blindleistung konvergieren. Die Amplitude der beiden Reihen in (5.3) und (5.4) für eine Rechteckschwingung bzw. eine Sägezahnschwingung konvergieren langsamer als die Amplituden für die Dreieck- oder die Trapezschwingung in den Reihen (5.5) und (5.6).

$$\text{Rechteckschwingung} \quad Y = \frac{4a}{\pi} \left[\sin x + \frac{\sin(3x)}{3} + \frac{\sin(5x)}{5} + \frac{\sin(7x)}{7} + \dots \right] \quad (5.3)$$

$$\text{Sägezahnschwingung} \quad Y = \frac{a}{2} - \frac{a}{\pi} \left[\sin x + \frac{\sin(2x)}{2} + \frac{\sin(3x)}{3} + \frac{\sin(4x)}{4} + \dots \right] \quad (5.4)$$

$$\text{Dreieckschwingung} \quad Y = \frac{8a}{\pi^2} \left[\sin x + \frac{\sin(3x)}{3^2} + \frac{\sin(5x)}{5^2} + \frac{\sin(7x)}{7^2} + \dots \right] \quad (5.5)$$

$$\text{Trapezschwingung} \quad Y = \frac{4a}{\pi b} \left[\frac{\sin b \sin x}{1^2} + \frac{\sin 3b \sin 3x}{3^2} + \frac{\sin 5b \sin 5x}{5^2} + \dots \right] \quad (5.6)$$

Durch Berechnung der effektiven Wirk- und Blindleistung nach (3.12) und (3.14) für die Einzelschwingungen wird deutlich, daß im Fall der Rechteck- und der Sägezahnsschwingung, bei denen die Amplituden nur mit n^{-1} abnehmen, die effektive Wirkleistung der Einzelschwingungen konstant ist und die effektive Blindleistung mit n ansteigt. Im Gegensatz dazu fällt die effektive Wirk- und Blindleistung bei der Dreieck- und der Trapezschnwingung stetig mit n^{-2} und mit n^{-1} , da die Amplituden der Einzelschwingungen mit n^{-2} fallen. Dabei wurde für diese Betrachtungen davon ausgegangen, daß die Frequenz der ersten Schwingung der betreffenden Reihen der Eigenkreisfrequenz des Systems entspricht. In diesem Fall ist die Blindleistung dieser Schwingung natürlich Null.

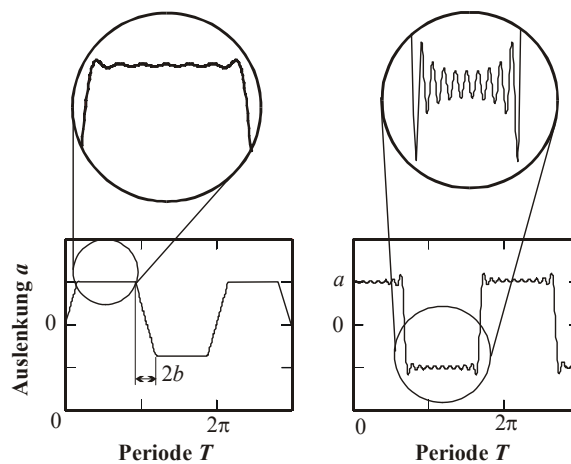


Abb. 5.11: Bewegungsverlauf einer Trapezschnwingung und einer Rechteckschnwingung bei Abbruch nach dem 10. Glied der Reihe nach (5.6) bzw. (5.3).

Um den vorgestellten Positionierantrieb zu untersuchen, wird zur Ansteuerung eine trapezförmige Bewegungsfunktion gewählt, die eine wechselsinnige Bewegung mit Rast darstellt. Die Abb. 5.11 zeigt den angenäherten Bewegungsverlauf einer Trapezschnwingung und zum Vergleich den einer Rechteckschnwingung. Beide Reihen wurden nach dem 10. Glied abgebrochen. Es ist an den maßstäblich vergrößerten Ausschnitten zu sehen, daß durch das schnellere Konvergieren der Trapezschnwingung die Abweichung erheblich geringer ist. Das Objekt, die Masse, wird in der Zeit $2b$ um $2a$ bewegt und hält diese Position eine vorgegebene Zeit (Rast). Diese Bewegung ist typisch für viele Positionieraufgaben. In einer endlichen Zeit wird eine Masse vom Punkt A zum Punkt B bewegt und hat dort einen Rastpunkt.

Je größer die Anzahl der Glieder ist, desto genauer kann die gewünschte Bewegungsfunktion angenähert werden. Folglich steigt in diesem Fall auch die benötigte mechanische Leistung, wobei diese durch die zur Verfügung stehende Leistung des Antriebs begrenzt ist. Dies bestimmt die Anzahl der Glieder zur Annäherung der Reihe. Wird die Reihe nach dem 10. Glied

abgebrochen, so beträgt der Fehler $\Delta a = 0,1 \%$ für die Trapezschwingung. Für viele Anwendungen ist diese Genauigkeit ausreichend.

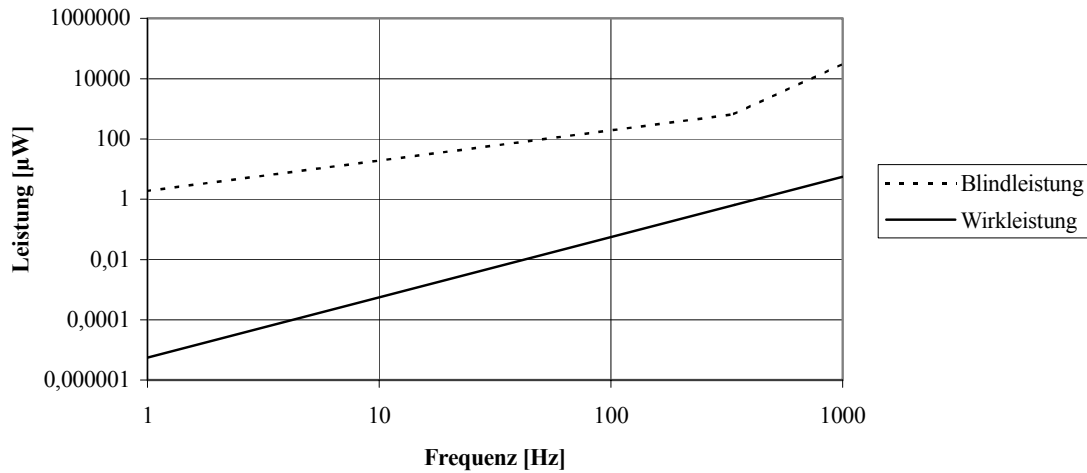


Abb. 5.12: Verteilung von Wirk- und Blindleistung bei der Ansteuerung des Aktors mit einer Trapezfunktion mit verschiedenen Frequenzen.

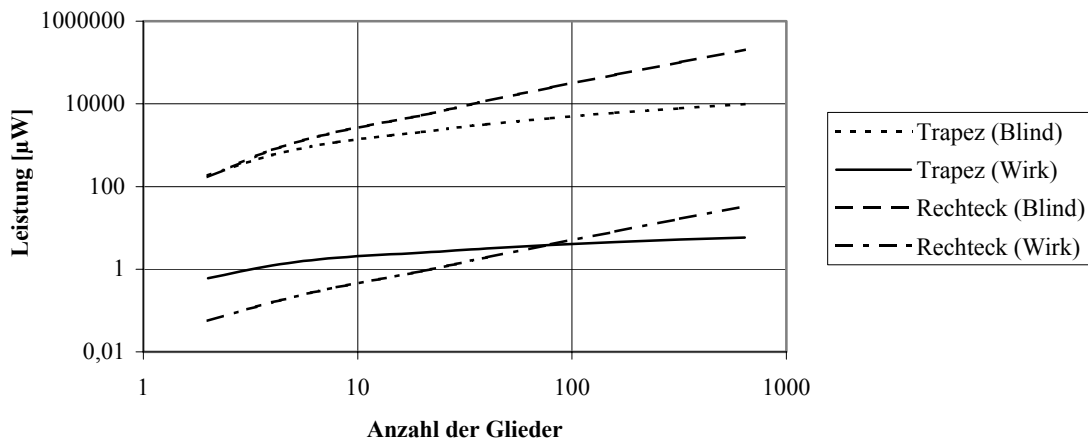


Abb. 5.13: Vergleich der Zunahme der Leistungen in Abhängigkeit der Anzahl der Glieder, mit denen die Schwingung jeweils einer Rechteck- und einer Trapezschwingung angenähert wird.

Zum Vergleich ist in der Abb. 5.12 die Verteilung zwischen Wirk- und Blindleistung bei Ansteuerung des Antriebs mit verschiedenen Frequenzen bei geringer Dämpfung gezeigt. Bei höherer Dämpfung ändern sich diese Verhältnisse ein wenig, bei gleicher Blindleistung steigt die benötigte Wirkleistung.

Zu erkennen ist, daß die Blindleistung zu jeder Zeit größer als die Wirkleistung ist. Die Blindleistung steigt im unterkritischen Bereich geringer an als die Wirkleistung. Im überkritischen Bereich steigt sie stärker an, was daran liegt, daß im ersten Bereich in der Reihe immer

ein Glied mit einer Frequenz nahe der Eigenkreisfrequenz vorhanden ist und der Einfluß bis zur Resonanzfrequenz zunimmt. Im zweiten, überkritischen Bereich, ist in der Reihe kein Glied mit einer Frequenz nahe der Eigenresonanz vorhanden, so daß die Blindleistung von hier ab stärker ansteigt. In der Abb. 5.13 ist der Anstieg der benötigten Leistungen in Abhängigkeit von der Anzahl der Glieder der Reihe dargestellt. Zusätzlich erfolgt ein Vergleich zwischen der Rechteckschwingung, bei der die Leistungen stetig ansteigen, und einer Trapezschwingung, bei welcher die Leistungen konvergieren. Es ist weiter abzulesen, welche Genauigkeit bei vorgegebener Leistung erreicht werden kann.

5.1.5 Bestimmung der umgesetzten Leistung

Die umgesetzte mechanische Leistung des Aktors wird durch Addition der effektiven Leistung der in (5.7) aufgeführten Einzelglieder der FOURIER-Reihe bestimmt:

$$Y(t) = \frac{4a}{\pi b} \left[\sin b \sin \Omega t + \frac{\sin 3b \sin 3\Omega t}{3^2} + \frac{\sin 5b \sin 5\Omega t}{5^2} \dots + \frac{\sin 19b \sin 19\Omega t}{19^2} \right]. \quad (5.7)$$

Die Einzelleistungen berechnen sich nach (3.12) und (3.14).

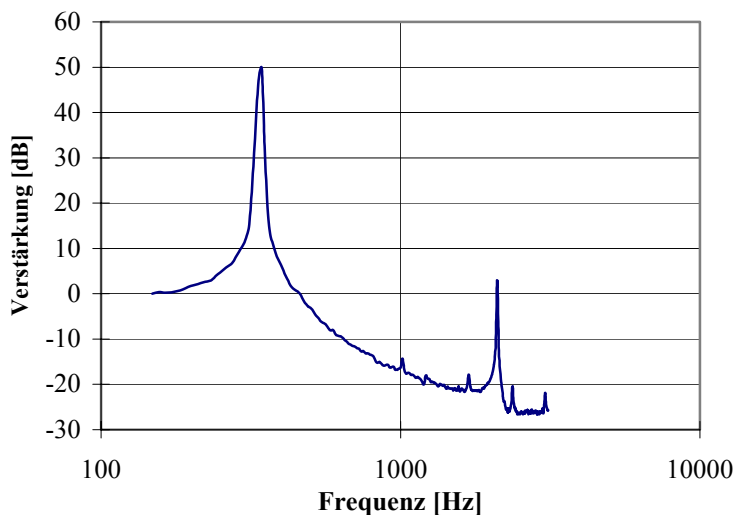


Abb. 5.14: Verstärkungsfunktion eines Positionierantriebs mit dem Freiheitsgrad $f=1$.

Bei einer vorgegebenen Frequenz der periodischen Bewegung sollen die optimalen Systemparameter, welche hauptsächlich durch die Eigenkreisfrequenz bestimmt sind, ermittelt werden. Hierzu wird ein Aktor beliebiger Eigenkreisfrequenz verwendet. Um den Antrieb ohne Regelalgorithmen entsprechend der Bewegungsfunktion anzusteuern, werden sowohl die Frequenzen und die Amplituden für die Bewegungsfunktion aus der FOURIER-Reihe als auch die

zugehörigen Werte für den Stromfluß aus der Verstärkungsfunktion benötigt. Die Abb. 5.14 zeigt den Frequenzgang des aufgebauten Positionierantriebs.

In der Tabelle 5.1 sind die nach (5.7) berechneten Amplituden und Frequenzen für die Trapezschwingung aufgeführt. Benötigt wird nun für jede Frequenz die zugehörige Ansteuerfunktion, gekennzeichnet durch die Strom-Zeit-Funktion und die Phasenverschiebung. Werden diese Werte mit den zugehörigen Werten aus der Verstärkungsfunktion in Abb. 5.14 verknüpft, erhält man die gewünschten Werte für die Ansteuerung (Tabelle 5.1). Im Gegensatz zu (5.7) kann durch eine trigonometrische Umformung das Produkt der Winkelfunktionen durch eine Summe ersetzt werden, so daß die 10 verschiedenen Schwingungen ausreichen und in der Ansteuerung ein Multiplizierwerk verzichtbar ist. Zusätzlich ist für die verschiedenen Bewegungen noch der effektive Strom, die beiden mechanischen Leistungen und der Wirkungsgrad angegeben.

Tabelle 5.1: Berechnung der Komponenten der FOURIER-Reihe für eine Bewegungsamplitude $a = 100 \mu\text{m}$.

	Frequenz	Amplitude [μm]	Amplitude [mA] $\omega = 100 \text{ Hz}$	Amplitude [mA] $\omega = 341 \text{ Hz}$ $=\omega_0$	Amplitude [mA] $\omega = 600 \text{ Hz}$
1	$1 \cdot \omega$	127	1626	12	4397
2	$3 \cdot \omega$	14,1	53	362	862
3	$5 \cdot \omega$	5,08	92	250	433
4	$7 \cdot \omega$	2,59	127	212	330
5	$9 \cdot \omega$	1,57	125	166	204
6	$11 \cdot \omega$	1,05	105	140	149
7	$13 \cdot \omega$	0,75	94	113	114
8	$15 \cdot \omega$	0,56	85	85	60
9	$17 \cdot \omega$	0,43	44	56	80
10	$19 \cdot \omega$	0,35	45	25	78
Effektive Stromstärke [mA]			1327	215	3431
Blindleistung [mW]			1,62	6,1	55,1
Wirkleistung [μW]			0,50	5,8	18,1
Wirkungsgrad			0,03%	0,09%	0,03%

Die Abb. 5.15 zeigt die Versuchsanordnung. Sie besteht aus 10 Sinusgeneratoren, die die Schwingungen gemäß der FOURIER-Reihe erzeugen und die Ansteuerung darstellen. Diese Signale werden von einem Summierer überlagert und über einen Verstärker zum Antrieb geleitet. Die Generatoren und der Summierer werden über Software in einem Rechner erzeugt. Zur Messung der Bewegung wird ein LASER-Interferometer verwendet.

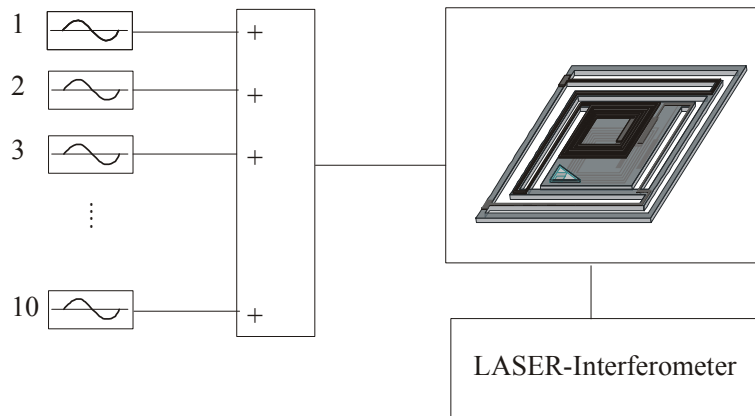


Abb. 5.15: Versuchsanordnung aus Ansteuerung, Antrieb und Positionsmeßeinrichtung.

In der Abb. 5.16 sind die Ausgangssignale des Summierers $I(\varphi)$, und die gemessene Bewegungsfunktion $a(\varphi)$ dargestellt. Aus der Messung der Bewegungs- und Stromfunktion kann abgelesen werden, daß die Bewegung, bei der die Frequenz der Trapezschwingung der Eigenkreisfrequenz entspricht, die energetisch günstigste ist. Der Wirkungsgrad ist hier am höchsten und der benötigte Strom im Verhältnis zu mechanischen Leistung am geringsten.

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß bei Aktoren, die eine wechselsinnige Bewegung mit oder ohne Rast ausführen, die energetisch günstigste Bewegung vorliegt, wenn die erste harmonische Schwingung der FOURIER-Reihe mit der Eigenkreisfrequenz des Antriebs übereinstimmt. Der Wirkungsgrad ist in diesem Fall maximal. Ein weiterer Vorteil gegenüber elektrostatischen Aktoren ist die kurzzeitige Überbelastbarkeit zur Erhöhung der Motorkraft. Ausschlaggebend für die Erwärmung ist die effektive Stromstärke. Sie führt zu der gleichen Erwärmung wie ein Gleichstrom gleicher Stromstärke. Die Stromspitzen bei der Beschleunigung sind zulässig und führen zu keiner thermischen Überlastung. Im Gegensatz hierzu führt bei elektrostatischen Aktoren eine Erhöhung der Eingangsspannung über die zulässige Durchschlagsspannung unmittelbar zum Durchschlag. Beim Vorliegen einer periodischen Bewegung ist es zweckmäßig, die Resonanzfrequenz des Antriebs an die erste harmonische Schwingung der FOURIER-Reihe anzupassen. Die Maxima von Frequenz und Amplitude werden von der zulässigen effektiven Stromstärke begrenzt. Da bei dem betrachteten Anwendungsfall der Anteil der Blindleistung η_B mit dem Wirkungsgrad Null am Gesamtwirkungsgrad gegenüber der Wirkleistung mit maximalem Wirkungsgrad η_W überwiegt, ist eine Anwendung nur sinnvoll, wenn energetische Gründe nicht ausschlaggebend sind.

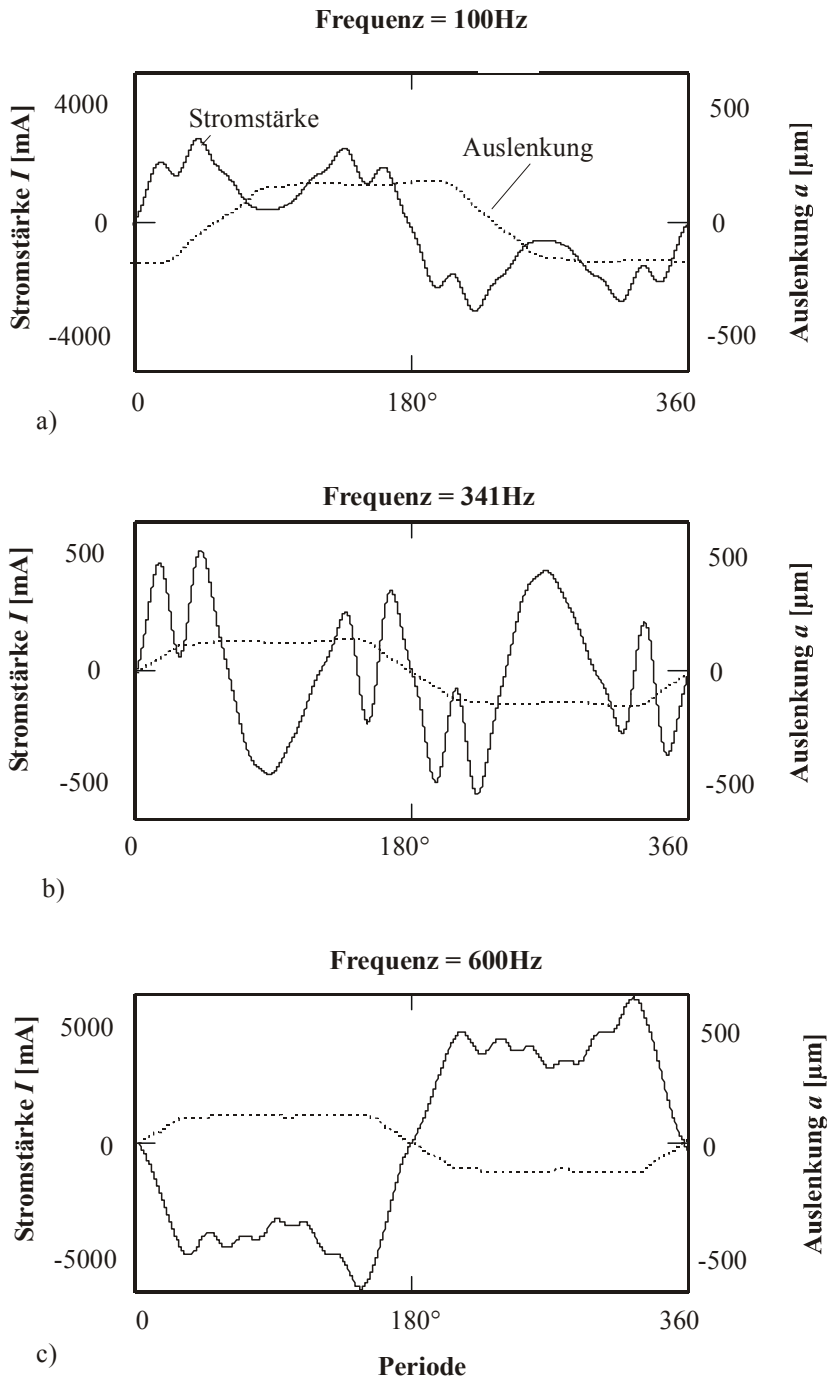


Abb. 5.16: Auslenkung und Stromstärke über eine Periode:
 a) Trapezschwingung mit 100 Hz,
 b) Trapezschwingung mit 341 Hz,
 c) Trapezschwingung mit 600 Hz.

5.2 Dynamischer Betriebsfall

Der vorherige Abschnitt zeigte, daß unharmonische Bewegungen für elektrodynamische Antriebe aus energetischer Sicht nicht sinnvoll sind. Es wurde auch gezeigt, daß es nicht möglich

ist, die Blindleistung zu kompensieren. Ist die Bewegungsfunktion bekannt, kann die Bewegung durch eine mechanische harmonische Synthese realisiert werden. Die mechanischen Schwingungen einer Reihe schwingfähiger Systeme werden überlagert, alle Systeme werden mit ihrer energetisch günstigen Eigenkreisfrequenz betrieben. Die Resonanzfrequenz der Einzelsysteme entspricht den Frequenzen der Glieder der FOURIER-Reihe. Die Einzelsysteme dürfen dabei nicht mechanisch miteinander verkoppelt sein, wie es bei Mehrmassensystemen in der Regel der Fall ist. Ein solches System kann nur durch eine Differentialgleichung mit n Koeffizienten beschrieben werden. Die konstruktive Einstellung der benötigten einzelnen Resonanzfrequenzen erweist sich als schwierig, da alle Parameter voneinander abhängig sind.

Zur Realisierung eines Aktors mit mechanischem Ausgang ist eine solche Lösung sehr aufwendig. Ist die Ausgangsgröße von nicht-mechanischer Art, so ist es möglich, die Ausgangsgrößen der Einzelantriebe zu überlagern. Eine gute Anwendung dafür sind die Schwing Spiegel zur periodischen Ablenkung von Lichtstrahlen. Gefordert wird bei dieser Anwendung eine konstante Lichtintensität über dem Scanning-Bereich, wozu eine Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit benötigt wird. Eine Dreieck- oder vorzugsweise eine Sägezahnschwingung weist einen Bewegungsbereich mit konstanter Geschwindigkeit auf. Bei periodisch angetriebenen Schwing- oder Schwenkspiegeln entspricht die $\varphi(t)$ -Funktion der obengenannten Bewegungsfunktion, wie z.B. bei [Tuc00]

$$\varphi(t) = \frac{8}{\pi^2} \hat{\varphi} \left[\sin \Omega t - \frac{\sin 3\Omega t}{3^2} + \frac{\sin 5\Omega t}{5^2} - \dots \right]. \quad (5.8)$$

Wie gezeigt wurde, eignen sich elektrodynamische Aktoren aufgrund ihrer Betriebskennlinien-Charakteristik nicht für diese Bewegungsaufgabe. Die Lösung besteht in der beschriebenen harmonischen Synthese. Eine Reihe von Schwingspiegeln wird entsprechend den Koeffizienten der FOURIER-Reihe angesteuert, die Eigenkreisfrequenz dieser Spiegel ist die Frequenz des zugehörigen Gliedes aus der Reihe.

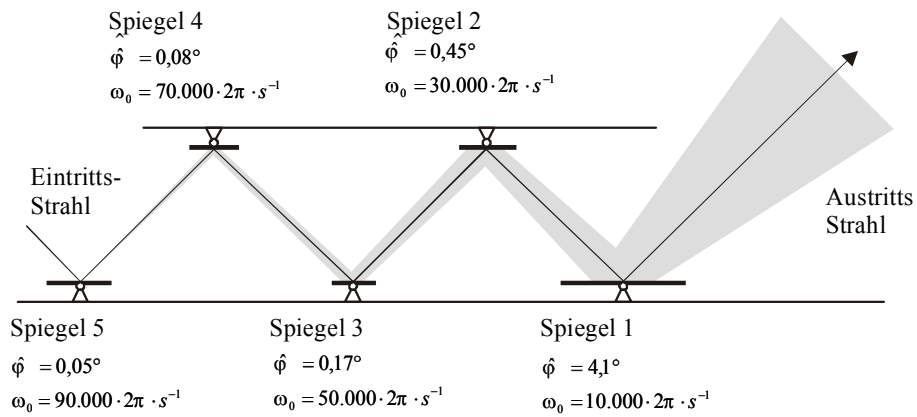


Abb. 5.17: Prinzip der harmonischen Synthese am Beispiel eines Scanners.

Die Abb. 5.17 zeigt das Prinzip der harmonischen Synthese an mehreren in Reihe angeordneten Schwenkspiegeln. Die Aufteilung der Spiegel ist so gewählt, daß die Spiegelgröße in Richtung des Strahls zunimmt und die Frequenz abnimmt. Durch die Strahlaufweitung muß der nachfolgende Spiegel eine größere Fläche aufweisen. Der Vorteil liegt bei dieser Anordnung darin, daß der kleinste Spiegel mit der höchsten Frequenz und der kleinsten Amplitude schwingt und der größte mit der tiefsten Frequenz und der größten Amplitude.

Die Abb. 5.18 zeigt ein Modell des Schwingspiegels. Auf der Oberseite sind die Strompfade angeordnet, die sich in einem homogenen Magnetfeld befinden. Die durch die Anordnung der Strompfade hervorgerufene entgegengesetzte Stromrichtung an der Umrandung des Schwingspiegels bewirkt eine Drehbewegung.

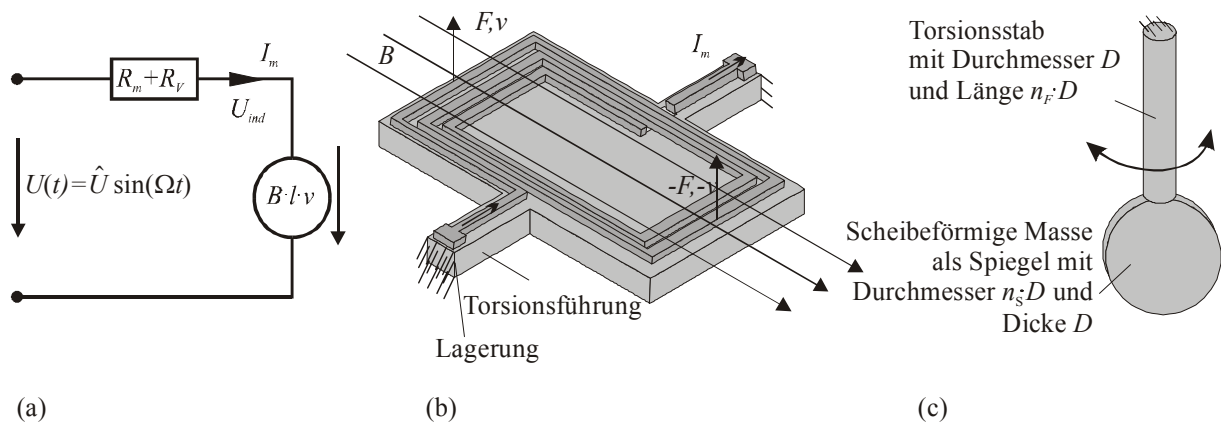


Abb. 5.18:a) Ersatzschaltbild des Antriebs, b) Modell des Schwingspiegels, c) mechanisches Ersatzmodell.

An Hand einer einfachen Rechnung wird deutlich, daß bei geometrisch ähnlicher Verkleinerung und gleicher Amplitude die Eigenresonanz ansteigt. Das Modell besteht aus einem Torsionsstab mit dem Durchmesser D und der Länge $n_F \cdot D$, an welchem sich eine scheibenförmige

ge Masse, der Spiegel mit dem Durchmesser $= n_S \cdot D$ und der Dicke $= D$ befindet. Für dieses statisch bestimmte Modell gilt:

Das Trägheitsmoment

$$J = \frac{m}{2} \left(\frac{D n_S}{2} \right)^2 \quad \text{mit } m = \rho \cdot D^3 n_S^2 \quad (5.9)$$

ergibt sich aus der Masse m und dem Durchmesser D des Spiegels unter Vernachlässigung der Masse der Feder.

Mit den Grundgleichungen für die Torsion:

dem Torsionswiderstandsmoment

$$W_t = \frac{\pi \cdot D^3}{16}, \quad (5.10)$$

dem Torsionsflächenmoment

$$I_t = \frac{\pi \cdot D^4}{32}, \quad (5.11)$$

der zulässigen Torsionsspannung

$$\tau_{t,zul.} = \frac{M_{t,zul.}}{W_t}, \quad (5.12)$$

und dem zulässigen Drehwinkel

$$\varphi_{zul.} = \frac{M_{t,zul.} \cdot l}{I_t \cdot G} = \frac{M_{t,zul.} \cdot n_F D}{I_t \cdot G} \quad (5.13)$$

$G =$ Schubmodul

wird die Torsionsspannung

$$\tau_{t,zul.} = \frac{\varphi \cdot G}{2 \cdot n_F}. \quad (5.14)$$

in Abhängigkeit des Drehwinkels berechnet.

Mit den Grundgleichungen für die Eigenkreisfrequenz

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c_t}{J}}, \quad c_t = \frac{M_t}{\varphi} \quad (5.15)$$

und (5.9) bis (5.15) erhält man:

$$\omega_0 = \frac{1}{4 \cdot n_s^2 \cdot D} \sqrt{\frac{G}{\pi \cdot n_F \cdot \rho}} \quad (5.16)$$

Durch Einsetzen von Gleichungen (5.14) in (5.16) ergibt sich die Abhängigkeit der Eigenkreisresonanz von den geometrischen Abmessungen, der zulässigen Torsionsspannung und der Dichte:

$$\omega_0 = \frac{1}{n_s^2 \cdot D} \sqrt{\frac{\tau_{t,zul.}}{\pi \cdot \varphi \cdot \rho \cdot 8}} \quad (5.17)$$

Bleibt die Dichte, die zulässige Torsionsspannung und der Ablenkwinkel konstant, so ist die Eigenkreisresonanz umgekehrt proportional der geometrischen Größe D .

Die Betrachtung zeigt, daß kleinere Schwingspiegel bei gleicher mechanischer Belastung und Auslenkung eine höhere Eigenkreisfrequenz aufweisen.

5.2.1 Ausführungsbeispiel eines kaskadierten Scanners

Die Abb. 5.19 zeigt ein Ausführungsbeispiel eines kaskadierten Scanners. Es besteht aus mehreren seriell angeordneten Schwingspiegeln nach Abb. 5.18. Das Magnetfeld wird durch Permanentmagneten generiert. Anstelle der vielen einzelnen Magneten ist es möglich, ein Magnetfeld mit nur einer Feldquelle aufzubauen. Der Magnetkreis ist dann derart gestaltet, daß in der gesamten Vorrichtung ein nahezu homogenes Magnetfeld existiert.

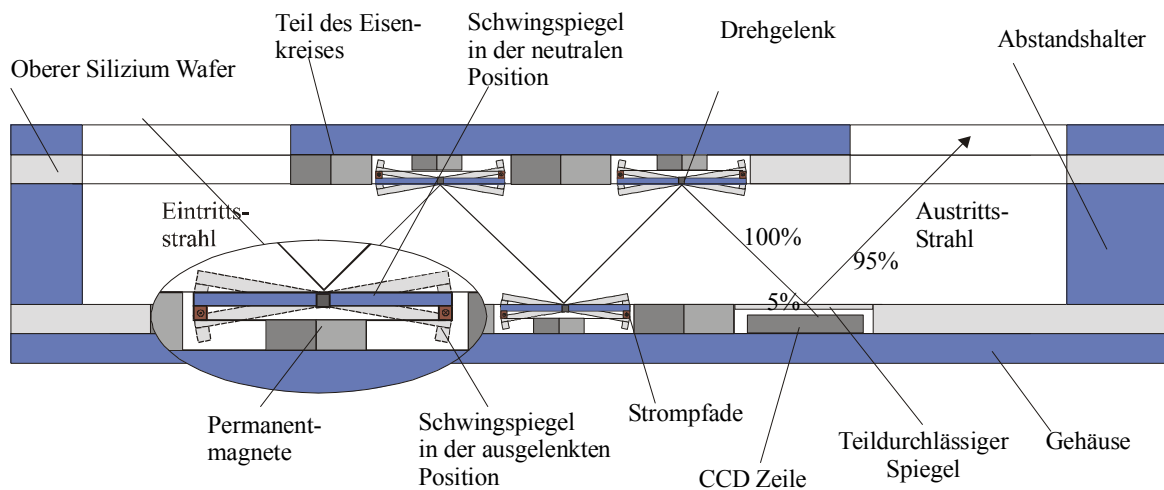


Abb. 5.19: Schematische Darstellung des kaskadierten Scanners.

Die Feldlinien werden durch die Flußleitstücke zu den Strompfaden geleitet, welche sich unter den Spiegeln befinden. Sie verlaufen im Bereich der Strompfade senkrecht zu diesen und zur

Bewegungsrichtung des Spiegels, so daß eine Kraft erzeugt wird, welche den Schwingspiegel auslenkt.

Die Strompfade sind so orientiert, daß ein für die Bewegung ausreichender Teil senkrecht zur Bewegungsrichtung und parallel zur Drehachse fließt. Die Schwingspiegel werden durch Torsionsfedern geführt, die im Schnitt dargestellt sind. Infolge des Stromflusses durch die Strompfade wird der Schwingspiegel um die Drehachse, die mit den Torsionsfedern zusammenfällt, geschwenkt. Über die Distanzstücke wird der Abstand zwischen den Spiegeln eingestellt. Im Gehäuse befindet sich die Eintrittsöffnung, durch die der Lichtstrahl eintritt und vom ersten Schwingspiegel abgelenkt wird. Der Spiegel schwingt analog dem letzten benötigten Glied der FOURIER-Reihe. Dieser abgelenkte Strahl trifft auf den nächsten Spiegel, welcher ihn auf den darauf folgenden Spiegel ablenkt, bis der letzte ihn über einen teildurchlässigen Spiegel ausleitet. Ein geringer Teil, ca. 5 %, fällt auf eine CCD-Zeile (Charge Coupled Device), der Rest wird durch die Austrittsöffnung auf die zu scannende Fläche geleitet.

Das Signal aus der CCD-Zeile wird mittels einer harmonischen Analyse ausgewertet. Die Amplituden der Einzelspiegel können so korrigiert werden. Die Schwingungsform ist durch das schwingfähige System vorgegeben. Es wird harmonisch mit einer Frequenz erregt, welche einer seiner Eigenresonanzen entspricht. Die Eigenresonanz der Spiegel wird so gewählt, daß sie der jeweiligen Frequenz aus der FOURIER-Reihe entspricht. Die Abtastgeschwindigkeit wird durch die zeitliche Änderung des Ablenkwinkels bestimmt. Die Meß- und Regeleinrichtung ist nur soweit erforderlich, daß sie die Amplitude konstant hält. Da es sich bei einer Resonanzschwingung um eine sehr stabile Schwingung handelt, ist eine Regelung der Schwingungsform nicht erforderlich.

In der Abb. 5.20 sind die Fertigungsschritte des Schwingspiegels dargestellt. Verwendet werden beidseitig polierte, einkristalline <100>orientierte Siliziumwafer. Im ersten Schritt werden beide Seiten maskiert, die Oberseite für RIE-Strukturierung und die Unterseite für naßchemisches anisotropes Ätzen. Im zweiten Schritt wird die Spiegeldicke durch ein naßchemisches anisotropes Verfahren eingestellt und die Spulen aufgebracht. Im letzten Schritt wird die Umrandung des Spiegels durch ein modifiziertes RIE-Verfahren hergestellt.

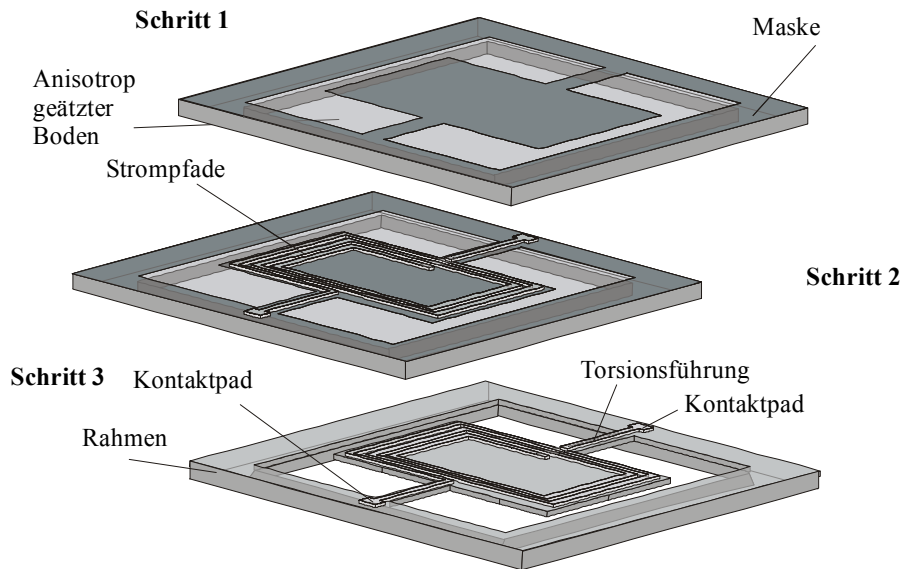


Abb. 5.20: Fertigungsschritte zur Herstellung eines Schwingspiegels.

Die Abb. 5.21 zeigt einen einzelnen Schwingspiegel ohne die Stromfäden.

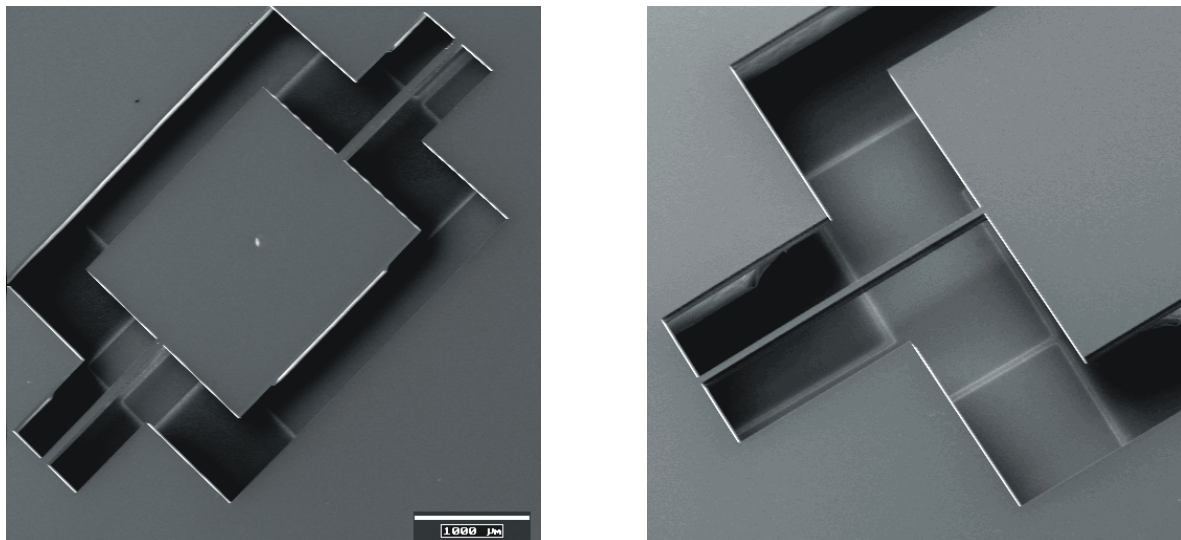


Abb. 5.21: REM-Aufnahme eines Schwingspiegels ohne die Stromfäden.

5.2.2 Dynamische Messungen

Für die Messungen zur Überprüfung der Leistungsgebiete elektrodynamischer, in Resonanz schwingender Aktoren wurde auf einen eindimensionalen Positionierantrieb zurückgegriffen. Der Vorteil liegt bei diesem Aktor darin, daß alle Stromfäden in einem homogenen Magnetfeld den gleichen Weg zurücklegen.

Tabelle 5.2: Gemessene elektrische Eingangswerte und mechanische Ausgangswerte.

Elektrische Kenn- und Eingangswerte	
Effektiver Motorstrom I_m	3,7 μA
Effektive Eingangsspannung U	640 μV
Motorwiderstand R_m	101,5 Ω
Länge der Strompfade l	10 cm
Mechanische Kenn- und Ausgangswerte	
Amplitude	5 μm
Winkelgeschwindigkeit	2124 s^{-1}
Magnetische Induktion B	0,35 T
Reduzierte Masse m	25 mg
Abklingkonstante δ	0,3 s^{-1}

In der Tabelle 5.2 sind die für die Messung verwendeten elektrischen Eingangswerte und die mechanischen Ausgangswerte aufgetragen. Der Antrieb wird mit der Resonanzkreisfrequenz betrieben. Um die Inhomogenität des Magnetfeldes zu vernachlässigen, wird nur eine sehr kleine Amplitude von 5 μm zugelassen. Die Bewegung wird mittels eines LASER-Interferometers gemessen. Aus der freien gedämpften Schwingung des Systems wird über das logarithmische Dekrement die Abklingkonstante δ bestimmt. Die effektive Geschwindigkeit läßt sich aus der gemessenen Winkelgeschwindigkeit ermitteln. Mit Hilfe dieser Werte kann nun die Betriebskennlinie und der Arbeitspunkt bestimmt werden.

Aus der Eingangsspannung U ergibt sich nach Gleichung (2.9) die Leerlaufgeschwindigkeit bei $F_m = 0$, der erste Punkt zur Bestimmung der stationären Betriebskennlinie. Der zweite Punkt wird durch die aus dem Kurzschlußstrom resultierende Anzugskraft nach Gleichung (2.10) bestimmt. Der Arbeitspunkt resultiert aus der Motorkraft nach der Gleichung (2.6).

Tabelle 5.3: Berechnete Parameter zur Festlegung der stationären Betriebskennlinie und des Arbeitspunktes.

Kennwert	Wert	Ursprung
Effektive Geschwindigkeit v	7,55 mms^{-1}	gemessen
Leerlaufgeschwindigkeit V_0	18,3 mms^{-1}	(2.9)
Anzugskraft F_a	220 nN	(2.10)
Motorkraft F_m	130 nN	(2.6)
Induzierte Spannung	250 μV	gemessen
Wirkungsgrad	0,41	(2.14)
Wirkungsgrad	0,39	(2.15)
Mech. Leistung $P_{mech.}$	1 nW	$F_m \cdot v$
Mech. Leistung $P_{mech.}$	1,05 nW	(3.12)
Elektr. Leistung P_{el}	2,4 nW	$U \cdot I_m$

Die Tabelle 5.3 enthält die berechneten Punkte auf der stationären Betriebskennlinie. Mit der gemessenen induzierten Spannung kann die Berechnung überprüft werden. Ausgangspunkt ist

der Wirkungsgrad nach Gleichung (2.14), berechnet aus dem Verhältnis der Motor- und der Anzugskraft, und der Wirkungsgrad nach Gleichung (2.15) aus dem Verhältnis von induzierter Spannung und Eingangsspannung. Die induzierte Spannung wird durch kurzzeitiges Umschalten vom Motorbetrieb in den Generatorbetrieb bestimmt (vergl. Abschnitt 3.4.2 und Abb. 3.7). Ein Vergleich der effektiven mechanischen Wirkleistung nach Gleichung (3.12) mit dem Produkt aus Motorkraft und -geschwindigkeit und der effektiven elektrischen Eingangsleistung multipliziert mit dem Wirkungsgrad zeigt, daß alle Werte dicht beieinander liegen.

5.2.3 Energetische Betrachtung

Wie die vorhergegangene Erläuterung zeigte, leistet die Erregerkraft bei diesem Prinzip ausschließlich Wirkleistung. Der Wirkungsgrad ist in diesem Fall maximal und die erforderliche elektrische Energie beträgt im Vergleich mit einem konventionell angesteuerten Schwingenspiegel nur einen Bruchteil. Nachgewiesen wird dies durch die Berechnung der umgesetzten Leistung eines Einzelschwingenspiegels, der ein mit dem kaskadierten Scanner (Abb. 5.19) vergleichbares Ausgangssignal liefert.

5.3 Kaskadierte elektrodynamische Antriebe

Wie bereits im Abschnitt 3 erläutert, wird erwartet, daß durch die Verknüpfung kaskadierter Mikroantriebe differenzierten Verhaltens mit den Ansteuerstrategien biologischer Muskelantriebe eine unkonventionelle Generation von Aktoren mit neuen Anwendungsfeldern geschaffen werden kann.

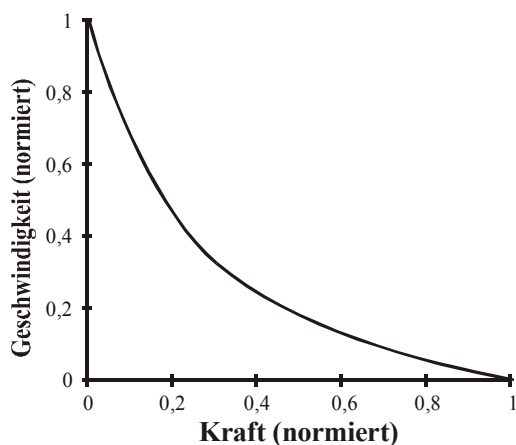


Abb. 5.22: Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Kraft eines Skelettmuskels nach HILL (Normiert auf die Leerlaufgeschwindigkeit und die Anzugskraft).

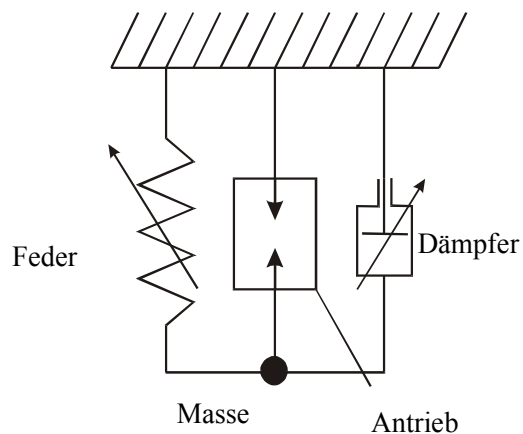


Abb. 5.23: Einfaches Ersatzschaltbild eines Skelettmuskels [Hun92].

Eine technisch besonders interessante Eigenschaft ist die ruck- und stoßfreie Ausführung komplizierter Bewegungen. Dies läßt sich darauf zurückführen, daß der Muskelantrieb sowohl für die Geschwindigkeitserzeugung als auch für die Krafterzeugung bei geringer Gegenkraft bzw. bei geringer Geschwindigkeit optimal ausgelegt ist. Dies zeigt die sogenannte HILL'sche Kurve (Abb. 5.22). Zusätzlich ist der Muskelantrieb imstande, als Dämpfungselement mit einstellbarer Dämpfung im skelettalen Verband Bewegungen zu bremsen.

Während im Allgemeinen ein Muskel als Ganzheit mit einem homogenen Antriebsmodul gleichgesetzt wird, beinhaltet dieser Ansatz die enkaptische Hierarchie krafterzeugender Elemente, die mechanisch 3-dimensional und kybernetisch variabel verknüpft sind. Die Abb. 5.23 zeigt ein einfaches Ersatzschaltbild eines Muskels. Es besteht aus einer Feder mit einstellbarer Nachgiebigkeit, einem Dämpfungselement mit einstellbarer Dämpfung, einer Masse und dem Antrieb. Die hierbei zu stellende Frage betrifft die technische Relevanz und die Rahmenbedingungen, in denen elektrodynamische schwingende Antriebe sinnvoll für spezielle Bewegungsaufgaben einzusetzen sind.

Die Abb. 5.24 zeigt einen Vergleich zwischen biologischen und technischen Strukturen mit zunehmender Integration der Krafterzeugung. Eine Differenzierung der einzelnen Elemente und eine Zuordnung der Elemente zu bestimmten Bestandteilen des muskulären Antriebs ist nur schwer möglich, da die Bestandteile zum Teil mehrere Funktionen erfüllen. Diese Modelle beschränken sich nur darauf, das Übertragungsverhalten exakt nachzubilden, wobei der eigentliche Antrieb als Blackbox betrachtet wird. Die zu entwickelnde künstliche Maschine soll nicht den exakten Aufbau des Muskels nachbilden, sondern vielmehr eine mit muskulären Aktoren vergleichbares Übertragungsverhalten liefern.

Durch die Nachbildung des Übertragungsverhaltens resultiert sowohl eine Kraftquelle als auch eine Geschwindigkeitsquelle. Hieraus ergibt sich die bei muskulären Aktoren beobachtete kraftvolle Feinfühligkeit, welche die für Lebewesen typischen geschmeidig-fließenden Bewegungen ermöglicht. Weitere Vorteile und qualitativ neue (emergente) Eigenschaften des Gesamtsystems können durch die Verkopplung einer Vielzahl elementar wirkender Mikroantriebe mit variablen Verkopplungsregeln hervorgebracht werden, welche sich nicht aus der Summe der Eigenschaften der Einzelantriebe ergeben.

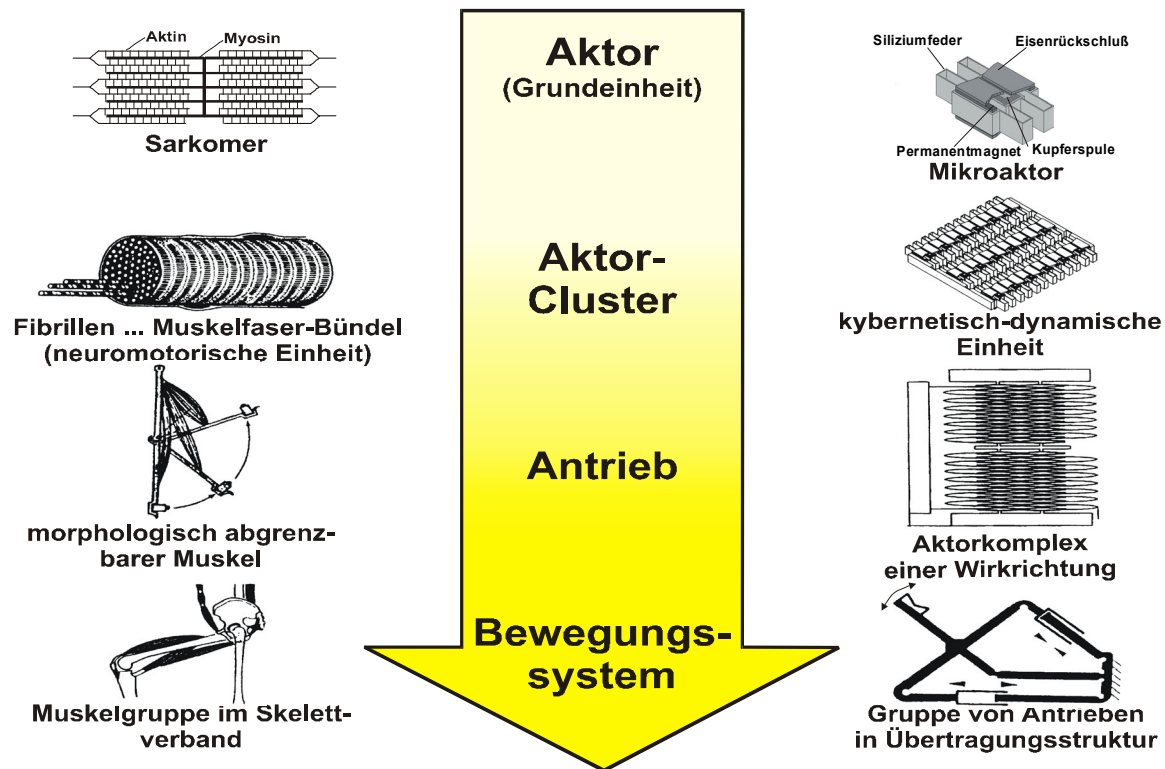


Abb. 5.24: Vergleich zwischen biologischen und technischen Strukturen mit zunehmender Integration der Kraft erzeugung [Fra98].

Diese neuen Eigenschaften können sein:

- Schaffung eines „mechanisch aktiven Raumes“ durch 3D-Kaskadierung seriell und parallel mechanisch verknüpfter, kooperierender multiaxialer Translationsaktuatoren mit differentieller Beschaltung, Ruck- und stoßfreie Ausführung komplizierter Bewegungen durch weiche Kraftankopplung (z.B. Schreiben),
- Ausführung von Bewegungen mit höheren Freiheitsgrad bei abstimmbarer Gelenksteifigkeit durch Kontrahieren eines Antriebspaares in einer antagonistischen Anordnung,
- optimale Kraft- und Geschwindigkeitserzeugung durch bifunktionelle Auslegung der Antriebe,
- ansteuerungsabhängige Wirkung räumlich abgegrenzter Gruppen von Aktoren als Kraftgeneratoren oder Dämpfungselemente,
- aktives Dämpfen und Bremsen von Bewegungen und bedarfsweise Sperrung von Gelenkfreiheiten,
- unabhängige Variabilität der Ausgangsparameter,
- funktionssichernde Redundanz durch Verkettung aller Elemente und Fremdkrafttoleranz durch Nachgiebigkeit.

Neben der Generierung mechanischer Leistungen muß der benötigte Antrieb in der Lage sein, Bewegungen zu bremsen. Hier ist in der Regel die gleiche Leistung wie in der Beschleunigungsphase zur Erzeugung der Bewegung notwendig. Das heißt, der Antrieb muß in der Lage sein, diese Bewegungsenergie der Energiequelle zurückzuführen oder zumindest in Wärme umwandeln. Hierzu ist das elektrodynamische Antriebsprinzip sehr gut in der Lage. Es kann sowohl elektrische in mechanische als auch mechanische in elektrische Energie umwandeln. Über einen einstellbaren Widerstand kann diese Energie in Wärme umgewandelt und so das mechanische System gedämpft oder gebremst werden. Das Bremsen sowie auch das Gegenstrombremsen ist bei Elektromotoren eine eingeführte Technik.

Zur Herstellung der Kaskade bietet sich das elektrodynamische Prinzip in einer Kombination mit dem elektrostatischen Prinzip aufgrund des hohen Wirkungsgrades bei der Verrichtung von Blindleistung an. Wird ausschließlich das elektrodynamische Prinzip verwendet, können Antriebe mit verschiedenen Kennlinien verknüpft werden, so daß ein optionaler Geschwindigkeits- und Kraftgenerator entsteht.

Das ausgewählte elektrodynamische Antriebsprinzip zur Kraft- und Geschwindigkeitserzeugung erweist sich als leistungsstark und universell einsetzbar. Durch die Reversibilität der Energiewandlung kann die Eigenbewegung feinfühlig abgebremst werden. Die vorgestellte Kaskade erfüllt die Anforderungen des mechanischen Ersatzschaltbildes in Abb. 5.23 soweit, daß es ein Feder-Dämpfer-System mit einstellbarer Dämpfung und einem kontraktilem Element darstellt. Zur vollständigen Implementierung muskelähnlichen Verhaltens ist eine Feder mit einstellbarer Kennlinie nach [Hun92, Läs70, Win90] zwingend erforderlich. Nur so kann eine Maximierung des Wirkungsgrades erreicht werden. Der vorgestellte Antrieb besitzt durch die konstante Steifigkeit der Siliziumfedern eine nahezu konstante Eigenresonanz und nur in diesem Bereich wird vom Antrieb hauptsächlich Wirkleistung erzeugt. In danebenliegenden Bereichen ist der Anteil der Blindleistung außerordentlich hoch und verschlechtert den Wirkungsgrad. Die verwendeten Federn sind zur Zeit eine vielgenutzte Möglichkeit zur Führung linear bewegter Rotoren. Es muß nach Lösungen gesucht werden, die es ermöglichen, die Federsteifigkeit der Führungselemente von nahezu Null bis zu einem maximalen Wert einzustellen [Gra99].

5.3.1 Ausführungsbeispiel

Sollen mehrere Mikroaktoren zu einer Kaskade verbunden werden, ist eine kaskadierfähige Konstruktion erforderlich. Dies bedeutet, daß die mechanischen Ausgangsgrößen Kraft, Weg und Geschwindigkeit verlust-, verzögerungs- und rückwirkungsarm auf die folgenden Aktoren übertragen werden müssen. Nach [Gra99] ist es für eine schnelle Positionsregelung zweckmäßig, benachbarte Läufer seriell starr und, um eine gegenseitige Überbestimmtheit auszuschließen, nachgiebig parallel zu verknüpfen. Die Abb. 5.25 zeigt das Funktionsprinzip eines kaskadierfähigen elektrodynamischen Mikroaktors mit seriell starrer Verknüpfung.

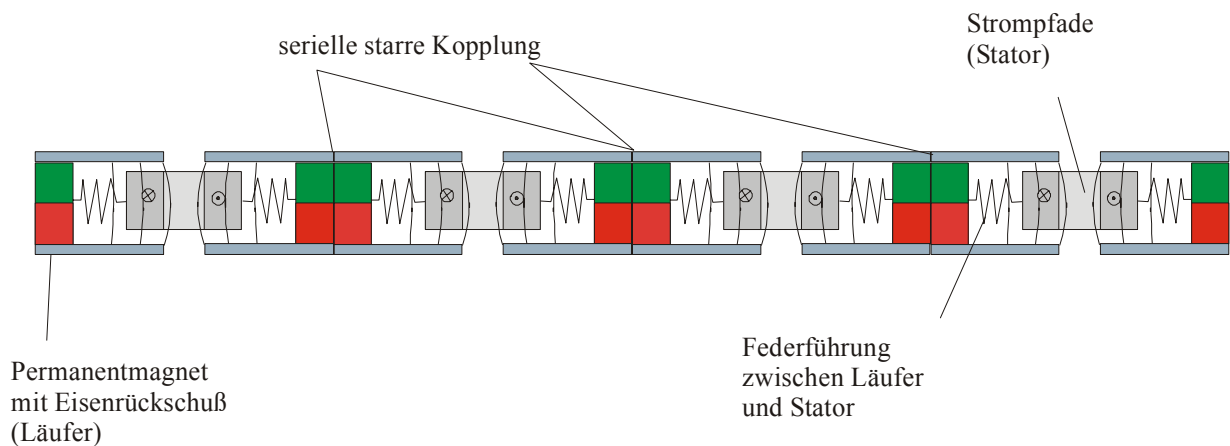


Abb. 5.25: Funktionsprinzip und seriell starre Verknüpfung der Aktoren.

Der Stator der Aktoren besteht im wesentlichen aus den Strompfaden und ist über eine Federführung mit dem Läufer verbunden. Im Läufer generiert ein Permanentmagnetkreis das benötigte Magnetfeld, Eisenflußleitstücke konzentrieren das Feld über den Strompfaden. Die entgegengesetzte Stromrichtung in einem weitgehend homogenen Magnetfeld bewirkt entgegengerichtete Kräfte. Die beiden Läufer werden in Abhängigkeit von der Stromrichtung zum Stator zu oder weg bewegt. Der Aktor wird gestreckt oder kontrahiert. In Abb. 5.26 ist ein kaskadierungsfähiger, mikrotechnologisch herstellbarer Einzelantrieb dargestellt. Er besteht aus einem mikrostrukturierten Silizium-Grundsubstrat, welches die Spulen, den Permanentmagneten und optional die Eisenflußleitstücke aufnimmt. Durch die Eisenflußleitstücke soll das Magnetfeld über der sich in der Mitte befindlichen Planarspule konzentriert werden. Die Läufer sind über Federführungen am Stator befestigt (Abb. 5.25) In Abhängigkeit von der Stromrichtung in der Spule kann sich der Aktor konzentrisch oder exzentrisch bewegen. Benachbarte Läufer sind seriell starr und, um eine gegenseitige Überbestimmtheit auszuschließen, nachgiebig parallel verknüpft. Werden bei passiver Bewegung die Strompfade über einen

regelbaren Widerstand kurzgeschlossen, arbeitet der Aktor als geschwindigkeitsproportionaler Dämpfer mit einstellbarer Kennlinie (Generatorbetrieb).

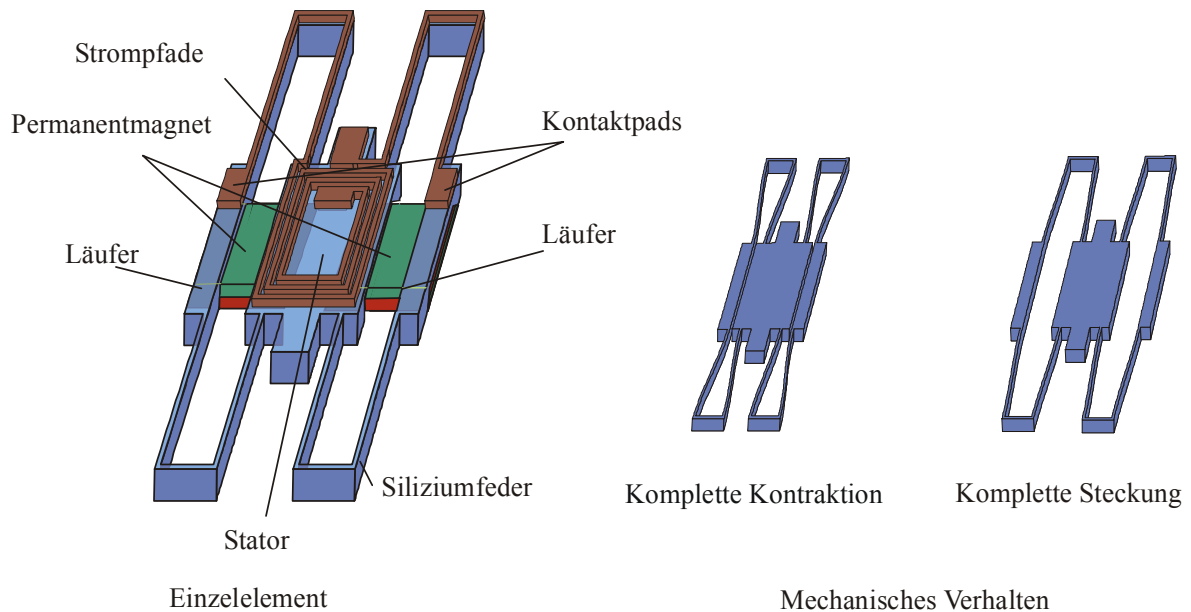
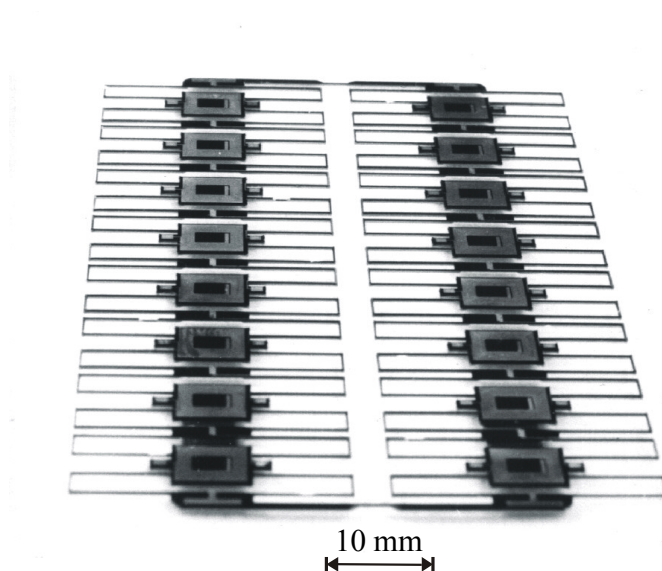


Abb. 5.26: Kaskadierfähiger elektrodynamischer Mikroantrieb.

Abb. 5.27 zeigt acht in Reihe und zwei parallel geschaltete Einzelaktoren ohne den Magnetkreis. Als Herstellungsverfahren wird das im Abschnitt 4.2.3 beschriebene Verfahren angewendet.



Technische Daten eines Einzelaktors:

- Anzugskraft: 20 mN
- Weg bei Kontraktion: 1300 μm
- Weg bei Streckung: 500 μm
- Eigenkreisfrequenz: 214 Hz

Abb. 5.27: Photographie der 2 mal 8-Kaskade.

Die Kaskade ist funktionsfähig, jedoch stellen die Streufelder der Magnetkreise der Einzelaktoren erhebliche Schwierigkeiten bei der Montage dar. Über die Streufelder wirken magnetische Kräfte auf die benachbarten Aktoren, wodurch sich diese aus der Ebene heraus bewegen.

Durch die Federn ist diese Bewegungsrichtung nur unzureichend gesperrt, so daß diese Fehlbewegung zu einer Zerstörung des Verbundes führen kann, wenn diese nicht durch andere Maßnahmen verhindert wird. Für die durchgeführten Versuche wurde die Kaskade nur vorgespannt betrieben, unter Zugspannung behält sie ihre ebene Form stabil. Analog zu den beschriebenen muskulären Antrieben, welche ohne Antagonisten nur zur Kontraktion fähig sind, kann auch diese Kaskade nur dafür verwendet werden um Zugkräfte zu generieren. Das Energiewandlungsprinzip ermöglicht zwar die Generierung von Zug- und Druckkräften, aber um diese Möglichkeit nutzen zu können muß, eine andere Konstruktion verwendet werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Zielstellung dieser Arbeit war die Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten des elektrodynamischen Energiewandlungsprinzips für Mikroaktoren. Dabei wurde das elektrodynamische Prinzip mit dem elektro-magneto-mechanischen und dem elektrostatischen Prinzip verglichen und die Eigenschaften dieser Prinzipien herausgearbeitet, um so für jedes Prinzip geeignete Anwendungen zu finden. Grundlage des Vergleichs bildeten die stationären Betriebskennlinien. Als markante Arbeitspunkte wurden besonders das Verhalten bei Leerlauf (die Leerlaufgeschwindigkeit), beim Anzug (die Anzugskraft) und bei maximaler mechanischer Leistung (das Leistungsoptimum) betrachtet.

Die Untersuchung ergab, daß besonders der Wirkungsgrad der Aktoren in den verschiedenen Arbeitspunkten ein geeignetes Vergleichskriterium bildet. Vor allem bei zunehmender Packungsdichte von Mikroaktoren in einem Mikrosystem stellt der Wirkungsgrad einen begrenzenden Faktor dar. Die Verlustleistung der innen liegenden Mikroaktoren kann bei ansteigender Packungsdichte nicht mehr wirksam über die Oberfläche abgeführt werden. Dieses limitiert die Leistung der Aktoren. Zur Entwicklung mehrdimensional kaskadierter Mikroaktoren ist die Beachtung der Effizienz der Energiewandlung daher von entscheidender Bedeutung. Der grundlegende Unterschied zwischen magnetisch wirkenden Aktoren und elektrostatischen Aktoren ist der Wirkungsgrad in den beiden Extrempunkten Leerlaufgeschwindigkeit und Anzugskraft. Die magnetisch wirkenden Aktoren weisen im Gegensatz zu den elektrostatischen einen hohen Wirkungsgrad im Bereich der Leerlaufgeschwindigkeit auf. Im anderen Extrempunkt, bei der Anzugskraft, ist der Wirkungsgrad der magnetischen Aktoren gleich Null. Daraus folgt, daß aus energetischer Sicht magnetisch wirkende und besonders die elektrodynamischen Aktoren für dynamische Bewegungsaufgaben geeignet sind. Die elektrostatischen Aktoren hingegen eignen sich hervorragend für quasi statische Bewegungsaufgaben. Diese Überlegungen galten bisher nur für kontinuierliche Rotations- und Translationsbewegungen.

Da die weitaus größte Anzahl von Mikroaktoren aufgrund der eingesetzten Federführungen wechselsinnige Bewegungen mit oder ohne Rast ausführen, wurde eine Methode entwickelt, um diese mit kontinuierlichen Aktoren vergleichen zu können. Die federgeführten Mikroaktoren können durch die erzwungene harmonische Schwingung eines gedämpften Feder-Masse-

Systems beschrieben werden. Die Parameter sind die schwingende Masse, die Dämpfung und die Elastizität der Führungsfedern. Die umgesetzte Leistung wird in effektive Wirk- und Blindleistung zerlegt. Im Fall einer Bewegung mit der Eigenkreisfrequenz ist die Wirkleistung ausschlaggebend, im anderen Fall überwiegt die Blindleistung. Wird für beide Leistungen der Wirkungsgrad bestimmt, kann aus dem Verhältnis der beiden Leistungen zueinander der Gesamtwirkungsgrad bestimmt werden. Für elektrodynamische Mikroaktoren ist der Wirkungsgrad beim Verrichten von Wirkleistung maximal und beim Verrichten von Blindleistung minimal. Bei elektrostatischen Aktoren ist es genau umgekehrt. Liegt keine harmonische Schwingung, sondern eine beliebige periodische Bewegung vor, kann diese mittels einer FOURIER-Reihe angenähert werden. Die Gesamtleistung ergibt sich in diesem Fall aus der Summe aller Einzelleistungen, sowohl der Wirkleistung als auch der Blindleistung. Mit diesem Modell können alle periodischen Bewegungen hinsichtlich ihres Leistungsbedarfes untersucht werden. Wird der federgeführte Aktor mit der Eigenkreisfrequenz betrieben, kann er mit kontinuierlich laufenden Rotations- und Translationsaktoren unter der Voraussetzung verglichen werden, daß Effektivwerte verwendet werden.

Um den Nachweis an konkreten Beispielen führen zu können, wurden drei verschiedene elektrodynamische Mikroaktoren untersucht: ein 2-Koordinaten-Positionierantrieb, ein kaskadierter Schwingenspiegel und ein kaskadierungsfähiger Einkoordinatenantrieb. Die Betrachtung zeigt, daß nur die Aktoren, die mit ihrer Eigenkreisfrequenz betrieben werden und deren Erregerkraft ausschließlich Wirkleistung ausführt, mit einem hohen Wirkungsgrad arbeiten. Der Wirkungsgrad kann in Abhängigkeit vom Arbeitspunkt bis zu 90 % betragen. Bei beliebigen wechselsinnigen Bewegungen mit Rast wird überwiegend Blindleistung umgesetzt; hier ist der Wirkungsgrad minimal. Der Wirkungsgrad des untersuchten 2-Koordinaten-Positionierantriebs betrug dabei maximal 0,1 %.

Die meisten technischen Anwendungen benötigen eine andere Bewegungsform als eine harmonische Schwingung, so daß der energetisch günstige Betrieb mit der Eigenkreisfrequenz nicht möglich ist. Es wurde gezeigt, daß die Blindleistung nicht zu kompensieren ist. Falls die Bewegungsfunktion bekannt ist (z.B. Dreieckschwingung konstanter Frequenz) und der Aktor mechanisch nicht in Wechselwirkung mit der Umgebung steht, kann die benötigte Bewegung durch eine mechanische harmonische Synthese realisiert werden. Die mechanischen Schwingungen einer Reihe schwingfähiger Systeme werden überlagert. Alle Systeme werden mit ihrer energetisch günstigen Eigenkreisfrequenz betrieben. Die Eigenkreisfrequenz der Einzelsysteme entspricht den Frequenzen der Glieder der zugehörigen FOURIER-Reihe. Als Beispiel wur-

de ein kaskadierter Schwingspiegelaktor aufgeführt. Die Erregerkraft leistet bei diesem Prinzip ausschließlich Wirkleistung. Der Wirkungsgrad ist in diesem Fall maximal und die erforderliche elektrische Energie beträgt nur einen Bruchteil der für den Betrieb eines konventionell angesteuerten Schwingspiegels nötigen Energie.

Elektrodynamische Mikroaktoren sind in der Herstellung zwar wesentlich aufwendiger als elektrostatische Mikroaktoren, sie zeichnen sich aber durch den großen Bewegungsbereich und die unkomplizierte Ansteuerung aus. Ist der Wirkungsgrad nicht das entscheidende Auswahlkriterium, werden ihre Haupteinsatzgebiete im Bereich der Positionierantriebe mit großem Bewegungsbereich, wie z.B. bei CD-Lese- und Schreibköpfen liegen. Für Schwingspiegel zur Lichtablenkung sind die elektrostatischen Mikroaktoren aufgrund ihres hohen Wirkungsgrades bei Blindleistung überlegen. Durch die harmonische Synthese zur Ansteuerung kaskadierter Schwingspiegel könnten ebenfalls elektrodynamische Mikroaktoren mit hohem Wirkungsgrad arbeiten.

7 Literatur

- [Ara96] T. Araki, M. Okabe MEMS feb., San Diego 1996
- [Art72] I. Artobolewsky, *Theorie der Maschinen und Mechanismen*, 1972
- [Ban99] D. Banks, University of Surrey, 1999, <http://www.dbanks.demon.co.uk/ueng/>
- [Bar99] H. Bartsch, T. Mache, T. Hofmann, H. Wurmus, *Magnetische Schichten – Schlüssel zur Realisierung mikromechanischer Sensor- und Aktorlösungen*, 44th International Scientific Colloquium, Technical University of Ilmenau, September 20 – 23, 1999, Reihe 8: Mikrosystemtechnik und Nanomaschinen Microsystem Technology and Nanomachines (CD-Rom)
- [Bec97] U. Beckord, R. Bessey, , *Mikromotoren gewinnen Schwung*, F&M 105(1997) 11-12, © Carl Hanser Verlag, München 1997, Seite 850-852
- [Ben98] P. Benjamin, *A History of Electricity*, John Wiley and Sons, New York 1898
- [Bre92] U. Brengt, T. Gessner, C. Kaufmann, R. Kiehnscherf, J. Markert, 1992, *Electrostatic micromechanic actuators*, Journal of Micromechanics and Microengineering 2 (1992), Seite 256-261
- [Bre98] W. Brenner, Gh. Haddad, G. Popovic, A. Vujanic, D. Petrovic, A. Matzner, G. Abraham, *Torque Characteristic of Micromotors and Rotating Mikrosystems*, ACTUATOR 98, 6th, International Conference on New Actuators, 17-19 Juni, Bremen 1998, Seite 100 102
- [Cad88] F. J. Cadieu, J.Vac. Sci. Technol. A 6 (3), May/Jun 1988
- [Cas89] W. Cassing [Hrsg.], *Elektromagnetische Wandler und Sensoren*, expert verlag, Ehningen bei Böblingen 1989
- [Cat96] R. Catanescu, J. Noetzel, J. Zacheja, J. Binder, K.-L Krieger, R. Laur, *On-Chip Coils Produced by Electroplating*, ACTUATOR 96, 5th, International Conference on New Actuators, 26-28 Juni, Bremen 1996 Seite 120-123
- [Cho93] Chong H. Ahn, G. Mark, A. Allen *Fully Integrated Surface Micromachined*

- Magnetic Microactuator with a Multilevel Meander Magnetic Core*, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 2, No. 2, März 1993
- [Con98] Conrad Elektronik, *Versandkatalog*, 1998, Seite 966-997
- [Dr99] Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co.KG, *Firmen-Prospekt*, Schönach 1999
- [Dub98] W. Beitz, K.-H. Küttner [Hrsg.], *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*, 16. Auflage, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1987
- [Dun81] H.H. Dunken, *Physikalische Chemie der Glasoberfläche*, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1981
- [Els92] H. Elscher, *Grundlagen der Elektrotechnik / Elektronik*, Verlag Technik GmbH, Berlin, München 1992
- [Fau98] Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co.KG, <http://WWW.faulhaber.de>, Schönach 1999
- [Feu96] A. Feustel, O. Kruselmark, U. Lehmann, J. Müller, T. Sperling, , *Electromagnetic Membrane Actuator with a complaint Silicone Suspension*, ACTUATOR 96, 5th, International Conference on New Actuators, 26-28 Juni, Bremen 1996, Seite 76-79
- [Flu96] J.,H.,J Fluitman, H. Guckel, *Micro Actuator Principles*, ACTUATOR 96, 5th, International Conference on New Actuators, 26-28 Juni, Bremen 1996, Seite 23-28
- [Fra95] T. Frank, *Untersuchungen zum Aufbau- und Verbindungstechnik von Mikroaktuatoren auf der Basis auf der Basis forostrukturierbarer Gläser*, Diplomarbeit, Technische Universität Ilmenau, 1995, unveröffentlicht
- [Fra96] T. Frank, *Realisation of a Microactuator for the two-dimension Alignment of Optical Fibers*, ACTUATOR 96, 5th, International Conference on New Actuators, 26-28 Juni, Bremen 1996, Seite 136-139
- [Fra98] T. Frank, C. Schilling, *The development of cascable microdrives with muscle-like operating behaviour*, Journal of Micromechanics and Microengineering 8 (1998) 222-229
- [Fzk00] Forschungszentrum Karlsruhe, <http://www.fzk.de/FZK2/forschung/index.html>
- [Ger97] T. Gerlach, D. Enke, T. Frank, L. Hutschenreuther, H.-J. Schacht, R. Schüler, *Automatic adjustment of monomode optical waveguides by a microsystem*, Journal of Micromech. Microeng. 7 (1997) Seite 227-229.

- [Ges98] T. Gessner, W. Dötzel, H. Fujita, D. Collard, *Microactuators for Scanning and other Applications*, ACTUATOR 98, 6th, International Conference on New Actuators, 17-19 Juni, Bremen 1998, Seite 27-33
- [Ges99] Gessner 99, <http://www.infotech.tu-chemnitz.de/~zfm/index.html>], 1999
- [Goo99] Goodfellow GmbH, *Firmenkatalog*, 1999
- [Gra99] T. Gramsch, P. Meier, T. Frank, M. Kallenbach, C. Schilling, R. Blickhan, H. Wurmus, *Ein Vergleich des Skelettmuskels mit Mikroaktuatorkaskaden mittels FEM-Simulation des Muskels*, IWK44, Ilmenau, 20.-23.09. Ilmenau 1999.
- [Guc96] H. Guckel, T. Earles, J. Klein, J. D. Zook, T. Ohnstein, *Electromagnetic linear actuators with inductive position sensing*, Sensors and Actuators A 53 (1996), Seite 386-391
- [Har98] A. Harnisch, *Beitrag zur Entwicklung von Herstellungstechnologien für komplexe Bauteile aus mikrostrukturiertem Glas*, Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 1998
- [Hei98] U. Heim, A. Albrecht, M. Klöpzig, *High Speed Polygon Scanner*, ACTUATOR 98, 6th, International Conference on New Actuators, 17-19 Juni, Bremen 1998, Seite 58 - 61
- [Hil99] U. Hilleringmann, *Silizium- Halbleitertechnologie*, B.G. Teubner, Stuttgart Leipzig 1999
- [Hoe00] Hoechst, Clariant GmbH <http://www.clariant.com/>, 2000
- [Hos94] H. Hosaka, H. Kuwano, K. Yanagisawa, *Electromagnetic microrelay: concepts and fundamental characteristics*, Sensors and Actuators A, 40 (1994), Seite 41-47
- [Hul83] R. Hultsch, *Diffusionsschweißen optischer Bauelemente aus Quarzglas*, Schweißtechnik 33 (1983)
- [Hun92] J. W. Hunter, S. Lafontaine, *A comparison of muscle with artificial actuators*, IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, SC, USA, 22-25 Jun. 1992, (Piscataway: IEEE Service Centre), Seite 178-185
- [IOF00] Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik in Jena, *Rotationspolygonscanner*, <http://www.iof.fhg.de/german>, 2000.

- [Jen95] D., J. Jendritza, (ed), *Technischer Einsatz neuer Aktuatoren*, expert Verlag, Renningen-Malmsheim 1995
- [Jür92] R. Jürgler, *Allgemeine Maschinendynamik*, Carl Hanser Verlag München, Wien 1992
- [Kal91] E. Kallenbach (Hrsg), *Gerätetechnische Antriebe*, Verlag Technik GmbH, Berlin 1991
- [Kal94] E. Kallenbach, R. Eick, P. Quendt, , *Elektromagnete: Grundlagen, Berechnung, Konstruktion, Anwendungen*, B.G. Teubner, Stuttgart 1994
- [Kal95] E. Kallenbach, A. Albrecht, O. Birli, M. Eccarius, C. Feindt, V. Zöppig, *Magnetische Mikroaktuatoren - Entwicklungsstand und Perspektiven*, 15. Internationalen Kolloquium Feinwerktechnik, 25. und 26.09.1995, Mainz
- [Käm96] K.-P. Kämper, W. Ehrfeld, B. Hagmann, H. Lehr, F. Michel, A. Schirling, C. Thüringen, T. Witting, *Electromagnetic Permanent Magnet Micromotor with integrated micro Gear Box*, ACTUATOR 96, 5th, International Conference on New Actuators, 26-28 Juni, Bremen 1996, Seite 429-432
- [Kap96] B.A. Kapitanov, N.V. Kornilov, Ya.L. Linetsky, V.Yu. Tsvetkov, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 127 (1993) Seite 289-297
- [Klö98] M. Klöpzig, *A Novel Linear Micromachined Electromagnetic Actuator Including Magnetic Suspension*, ACTUATOR 98, 6th, International Conference on New Actuators, 17-19 Juni, Bremen 1998, Seite 551 - 554
- [Köh78] G. Köhler, *Fügen von Glas mit extrem hoher Genauigkeit*, Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität, Jena 1978
- [Kra89] W. Krause (Hrsg.), *Konstruktionselemente der Feinmechanik*, VEB Verlag Technik, Berlin 1989
- [Läs70] P. Lässig, *Beschreibung der mechanischen Übertragungseigenschaften des ruhenden und tetanisierten Skelettmuskels durch ein Feder-Dämpfungssystem mit variablen Parametern*, *Elektronische Informationsverarbeitung und Kybernetik* 4/5 Seite 209-228,.: Verlag Wissenschaft, Leipzig 1970
- [Leg96] R. Legtenberg, A. W. Groeneveld, M. Elwenspoek, 1996, *Comp-drive actuators for large displacements*, *Journal of Micromechanics and Microengineering* 6

(1996) Seite 320-329

- [Leh00] B. Lehdorff, M. Hein, *Hochtemperatur-Supraleiter, Vom Magnetlager bis zum Mikrowellenchip* <http://www.verwaltung.uni-wuppertal.de/presse/output/okt98/htsl.html>, 2000
- [Leh96] H. Lehr, W. Ehrfeld, B. Hagemann, K.-P. Krämer, F. Michel, Ch. Thüringen, , *Entwicklung von Mikroaktoren am Institut für Mikrotechnik Mainz*, VDI Berichte, 1269, Innovative Kleinantriebe, 1996, Seite 77-87
- [Ley96] K. Leyendecker, W. Bacher, K. Bade, W. Stark, *Untersuchungen zum Stofftransport bei der Galvanoformung von LIGA-Mikrostrukturen*, Wissenschaftlicher Bericht Forschungszentrum Karlsruhe FZKA 5594, 1996
- [Loe94] B. Loechel, A. Maciossek; H. J. Quenzer, H.J. Huber, *Galvanoplated 3d strukture for micro systems*, *Microelectronic Engeneering*, Band 23 (1994) Heft 1-4, Seiten 455-459
- [Loe95] B. Loechel, A. Maciossek; H. J. Quenzer, B. Wagner, G. Engelmann, *Magnetically driven mikrostrukturen fabricated with multilayer electroplating*, *Sensors and Actuators, A, Physical*, Band 46-47 (1995) Seite 89-103
- [Low74] F., Lowenheim, *Modern electroplating*. John Willey and Sons, 1974
- [Lun88] K. Lunze, *Einführung in die Elektrotechnik*, VEB Verlag Technik, Berlin 1988
- [May00] H. May, R. Palka, W.-R. Canders, *Aufbau, Berechnung und Eigenschaften von selbststabilen HTSL-Magne-lagern für hochtourige Maschinen*, http://www.iem.ing.tu-bs.de/iem/jahresbericht/1997/gemeinsam_jb1997.html
- [Mei99] P. Meier, R. Blickhan, *Oscillations of the skeletal muscles after deactivation*, *Sat. Symp. On skeletal muscles of the ISB*, Canmore, 05.- 06. Aug. 1999
- [Mem00] MEMS Technology Applications Center, 3021 Cornwallis Road, P.O. Box 12889, Research Triangle Park, NC 27709-2889, <http://mems.mcnc.org/ligasems.html>, 2000
- [Mem99] MEMS Material Database: Measurements, <http://mems.isi.edu/mems/-materials/measurements.cgi>, 1999

- [Mgt00] mgt mikroglas technik AG, *FOTURAN*, <http://www.mikroglas.de/>, 2000
- [Mic00] Microchem corp., *SU-8 Bulletin Board*, <http://www.microchem.com/su8.cfm.>, 2000
- [Moo72] A. D. Moore, *Elektrostatik*, Verlag Cemie 1972
- [Mül94] G. Müller, *Grundlagen elektrischer Maschinen*, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim 1994
- [Nam96] Z. Nami, C. H. Ahn, M. G. Allen, 1996, *An energy-based design criterion for magnetic microactuators*, Journal of Micromechanics and Microengineering 6 (1996), Seite 337-344
- [Ntb00] Interstaatliche Fachhochschule für Technik Buchs (NTB), *Low-Cost LIGA-Prozess*, <http://www.ntb.ch/Infos/IMS/Projekte/LC-LIGA.html>, 2000
- [Oma92] P. M. Omar, M. Mehregany, R. L. Mullen, *Electric and Fluid Field Analysis of Side-Drive Micromotors*, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 1, No. 3, September 1992
- [Par98] Y. Park, M. G. Allen, J. Micromech. Microeng. 8 (1998), Seite 307-316
- [Phi84] E. Philippow, *Grundlagen der Elektrotechnik*, Verlag Technik, Berlin 1984
- [Rie97] D. Riemer, *Untersuchung zur Berechnung, konstruktiven Gestaltung und technologischen Realisierung von kaskadierbaren elektrostatischen Mikroantrieben*, Dissertation TU-Ilmenau 1997
- [Rug99] I. Ruge, Fraunhofer-Institut für Festkörpertechnologie IFT 1999, http://www.ift.fhg.de/ift-se/61relais_micro-d.htm
- [Sak69] M. Sakata, S. Wakabayashi, H. Totani, H. Goto, , *PZT thin Film Buckling Actuator for optical applications*, ACTUATOR 96, 5th, International Conference on New Actuators, 26-28 Juni, Bremen 1996, Seite 169-172
- [Scä97] C. Schäffel, *Untersuchung zur Gestaltung integrierter Mehrkoordinatenantrieben*, Dissertation, Verlag ISLE, Ilmenau 1997
- [Sch93] N. Schwesinger, *Planarer Tintenstrahldruckkopf mit piezokeramischem Anttrieb*, , F&M 101 (1993) 11-12, 456-460 © Carl Hanser Verlag, München 1993
- [Sch96] J. Schimkat, *Grundlagen und Modelle zur Entwicklung und Optimierung von*

- Silizium- Mikrorelais*, Dissertation, Berlin 1996
- [Sch97] J. Schimkat, L. Kieseewetter, , *Neuer Aktuator für Silizium-Mikrorelais*, F&M 105(1997) 1-2 © Carl Hanser Verlag, München 1997
- [Sci97] I. Schiele, C. Evers, B. Hillerich, F. Kozlowski, 1997, *A Surface Micromachined Electrostatic Microrelay*, 8. Internationale Messe mit Kongreß für Sensoren, Meßaufnehmer und Systeme, 1997, Seite 87-91
- [Scu96] J. Schulz, B. Roge, J. Mohr, *Elektrostatischen und elektromagnetische Mikroaktoren in LIGA-Technik*, VDI Berichte, 1269, Innovative Kleinantriebe, 1996, Seite 89-104
- [See92] E. Seefried, *Elektrische Antriebe, Lehrbriefe für das Hochschulstudium*, Zentralstelle für das Hochschulfernstudium, Dresden 1992
- [Sim71] K. Simonyi, *Theoretische Elektrotechnik*, Dt. Verlag der Wissenschaften, Berlin 1971
- [Spa84] S. Spauszus, *Werkstoffkunde Glas*, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1984
- [Sul98] E.J. O'Sullivan, E.I. Copper, L.T. Pomankiw, K.T. Kwietniak, *Electrochemical microfabrication*, IBM Journal of Research & Development Vol 42, No.5, 1998
- [Tho96] A. Thommes, W. Stark, W. Bacher, *Die galvanische Abscheidung von Eisen-Nickel in LIGA-Mikrostrukturen*, Wissenschaftlicher Bericht Forschungszentrum Karlsruhe FZKA 5586, 1996
- [Til97] H. A. C. Tilmans, *Equivalent circuit representation of electromechanical transducers: II Distributed-parameter system*, Journal of Micromechanics and Microengineering 7 (1997), Seite 285-309
- [Tri89] W. S. N. Trimmer, *Microactuators and Micromechanical Systems*, Sensor and Actuators, 19 (1989), Seite 267-287
- [Tuc00] Technische Universität Chemnitz, *Silizium-Mikrospiegel (Torsionsaktoren)*, <http://www.infotech.tu-chemnitz.de/~microtec/index.html>, 2000
- [Vak98] Vacuumschmelze GmbH, *Selten-Erd-Dauermagnetwerkstoffe*, 1998
- [Vdi00] VDI-Glossar, http://WWW.Mikrotechnik_VDI_Glossar.html, 2000

- [Vis96] W. Vishnewsky, R. Glöß, , *Piezoelectric Rotary Motors* ACTUATOR 96, 5th International Conference on New Actuators, 26-28 Juni, Bremen1996, Seite 245-248
- [Wag99] P. Wagler, S.-P. Heyn. B. Clasbrummel, *Mikrotechnik in der Medizin*, Deutsches Ärzteblatt 96, Heft 27, 9, Juni 1999, Seite 1464-1468
- [Wid98] WIDIA GmbH, *Firmenprospekt*, Münchener 1999
- [Wis00] H. Guckel, University of Wisconsin, <http://mems.engr.wisc.edu>, 2000
- [Wit96] J. Wittenburg, *Schwingungslehre: Lineare Schwingungen, Theorie und Anwendungen*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1996
- [Wni90] J. M. Winters, S. L-Y. Woo (eds) *Hill-Based Muscle Models: A Systems Engineering Perspective Multiple Muscle Systems*, Biomechanics and Movement Organization, Springer Verlag, Seite 69 -93, Heidelberg New York 1990
- [Yam91] S. Yamashita, J. Yamasaki, M. Ikeda, N. Iwabuchi J. Appl. Phys. 70 (10) 15 Nov 1991
- [Yan95] K. Yanagisawa, H. Kuwano, A. Tago, *Electromagnetically driven microvalve*, *Microsystem Technologies* 2 (1995) © Springer-Verlag 1995