

Diss. ETH Nr. 15217

*Magnetgelagertes Pumpsystem
für die Halbleiterfertigung*

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von

MARTIN NEFF

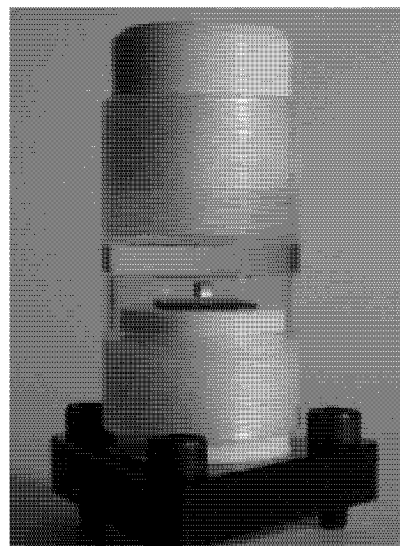
Dipl. El.-Ing. ETH
geboren am 7. Oktober 1972
von Appenzell

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. J. Hugel, Referent
Prof. Dr. P. Rudolf von Rohr, Korreferent

2003

Vorwort



Das berührungslose Schweben eines Körpers, wie beispielsweise des vollständig passiv magnetgelagerten Würfels in der Abbildung oben, fasziniert. Magnetlager sind jedoch nicht nur wissenschaftliche Laborobjekte, sondern bestätigen ihre Vorteile heutzutage in konkurrenzfähigen Produkten. Die Herausforderung Magnetlager für neue Anwendungen nutzbar zu machen, bewegte mich zum Start der vorliegenden Dissertation.

Sie entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der *Professur für Elektrotechnische Entwicklungen und Konstruktionen (EEK)* der *ETH Zürich*. In enger Zusammenarbeit mit der Firma *Levitronix GmbH* wurden vorherige Forschungsarbeiten zu magnetgelagerten Pumpsystemen für die Halbleiterfertigung weiterentwickelt. Für die Erfahrungen, welche ich im Rahmen dieser Arbeit sammeln konnte, danke ich allen Beteiligten.

Meinem Doktorvater Prof. Dr. J. Hugel danke ich für das entgegengebrachte Vertrauen und die Schaffung des industrienahen, innovativen Umfeldes, welches diese Arbeit erst ermöglichte. Herrn Prof. Dr. P. Rudolf von Rohr danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferates.

Für die angenehme Zusammenarbeit danke ich Dr. R. Schöb und Dr. N. Barletta von *Levitronix*. In konstruktiven Gesprächen mit ihnen lernte ich die Aspekte von Magnetlagern kennen und erhielt nützliche Anregungen für meine Arbeit.

Sehr geschätzt habe ich die enge Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern von *EEK* und *Levitronix*, wobei viele interessante Diskussionen

entstanden. Vielen Dank für die Unterstützung mit Rat und Tat. Ebenso danke ich allen Studenten, die mit ihrem Einsatz in Studien- und Diplomarbeiten zum guten Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben.

Besonders danke ich meiner Frau Sabrina für den Rückhalt während der Doktoratszeit sowie für die Durchsicht des Manuskripts.

Zürich, August 2003

Martin Neff

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
Kurzfassung	ix
Abstract	xi
Symbolverzeichnis	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Herstellungsprozess von Halbleiterbausteinen	3
1.2 Flüssigkeitspumpen in der Halbleiterfertigung	4
1.2.1 Beispiel Spinprozess-Anlage	5
1.2.2 Anforderungen an Fördersysteme	8
1.3 Stand der Technik	9
1.3.1 Balgpumpen	10
1.3.2 Magnetkupplungspumpen	11
1.3.3 Folgerungen	12
1.4 Zielsetzung	12
1.5 Aufbau der Arbeit	13
2 Magnetgelagerte Antriebe	15
2.1 Magnetlagerung	15
2.1.1 Passive Magnetlagerung	16

2.1.2	Aktive Magnetlagerung	19
2.1.3	Lagerlose Motoren	23
2.1.4	Magnetgelagerte Pumpen	27
2.2	Der lagerlose Scheibenmotor	28
2.2.1	Reduzierte Komplexität	29
2.2.2	Modellierung und Regelung	31
2.2.3	Lagerlose Kreiselpumpe	38
2.2.4	Systemübersicht	38
2.2.5	Schlussfolgerungen	40
3	Verluste und Erwärmung im Scheibenmotor	43
3.1	Verluste	45
3.1.1	Verluste im Lager	47
3.1.2	Modell für Eisenverluste	47
3.1.3	Modell für Kupferverluste	55
3.1.4	Motorverluste	58
3.2	Erwärmung	60
3.2.1	Thermisches Modell des Scheibenmotors	62
3.2.2	Identifikation des thermischen Modells	64
3.2.3	Thermische Begrenzung der Motorleistung	64
3.2.4	Höhere Flüssigkeitstemperaturen	66
4	Hydrodynamik magnetgelagerter Kreiselpumpen	67
4.1	Flüssigkeiten und Anlagen	68
4.2	Grundlagen der Hydrodynamik	70
4.2.1	Kennlinien	71
4.2.2	Modellgesetze	74
4.2.3	Einfluss der Viskosität	75
4.2.4	Kavitation	77
4.3	Problematik des passiven Axiallagers	78
4.3.1	Axiale Reluktanzkraft	79
4.3.2	Hydraulischer Axial Schub	79

4.3.3	Axialschubausgleich	81
4.4	Strömungsanalyse	83
4.5	Schlussfolgerungen	84
5	Chemikalienpumpe für die Halbleiterfertigung	87
5.1	Ätz- und Reinigungschemikalien	89
5.1.1	Reinheitsanforderungen	90
5.1.2	Einsatzbedingungen	90
5.2	Beständige, hochreine Fluorkunststoffe	91
5.2.1	Elektrische und magnetische Eigenschaften	93
5.2.2	Chemikalienbeständigkeit	94
5.2.3	Gas- und Dampfpermeation	95
5.2.4	Mechanische Eigenschaften	98
5.2.5	Thermische Eigenschaften	99
5.3	Rotorummantelung	99
5.3.1	Realisierung	102
5.3.2	Zuverlässigkeit	107
5.4	Reinheit von Fördersystemen	109
5.4.1	Ursachen für Verunreinigungen	110
5.4.2	Testverfahren	111
5.4.3	Ergebnisse	112
5.5	Schlussfolgerungen	114
6	Realisierung des Pumpsystems	115
6.1	Systemübersicht	116
6.1.1	Prozessorgesteuerter Wechselrichter	117
6.1.2	Lagerloses Pumpsystem als Messinstrument	120
6.2	Chemikalienbeständigkeit Scheibenmotor	121
6.2.1	Beschichtung Motorgehäuse	122
6.2.2	Hermetische Abdichtung des Motors	123
6.3	Leistungsfähigkeit	125
6.3.1	Pumpsysteme höherer Leistung	129

7 Zusammenfassung	133
8 Ausblick	135
Literaturverzeichnis	137
Curriculum Vitae	145

Kurzfassung

Bei der Herstellung von Halbleiterbausteinen werden Siliziumscheiben in Nassprozessen mit aggressiven Chemikalien behandelt. Die Prozessqualität bzw. die Ausfallquote hängt dabei stark von der Reinheit der Flüssigkeiten und Anlagen ab. Pumpen haben deshalb hohe Anforderungen bezüglich der Reinheit und der chemischen Beständigkeit zu erfüllen, weshalb nur hermetische Fördersysteme eingesetzt werden.

Der lagerlose Scheibenmotor von Barletta [Barl98], genutzt als Antrieb einer hermetischen Kreiselpumpe, bietet gegenüber den herkömmlichen Balg- und Membranpumpen wesentliche Vorteile. Aufgrund der berührungsfreien Lagerung des Pumpenrades entstehen keine Partikel durch mechanischen Abrieb. Und die hohe Drehzahl des Flügelrades ergibt einerseits eine kontinuierliche Strömung und erlaubt andererseits eine kompakte Baugröße der Pumpe. Ausgehend vom Konzept des lagerlosen Scheibenmotors werden in dieser Arbeit Wege aufgezeigt, wie die Anforderungen bezüglich Reinheit, Chemikalienbeständigkeit und Förderleistung erfüllt werden können.

Um die Leistungsfähigkeit des Scheibenmotors zu optimieren, werden Modelle für Kupfer- und Eisenverluste eingeführt. Der optimale Arbeitspunkt hängt dabei hauptsächlich vom Erregerfeld des Permanentmagnet-Rotors ab. Anhand eines Modells der Erwärmung lässt sich eine dem Arbeitspunkt entsprechende Kühlung des Motors vorsehen.

Die Hydrodynamik des magnetgelagerten Flügelrades wird untersucht, wobei das passive Axiallager genauer betrachtet wird. Da dieses Reluktanzlager Axialkräfte nur beschränkt aufnehmen kann, ist der Axialschub der Kreiselpumpe hydrodynamisch auszugleichen. Mit einer

entsprechenden Dimensionierung erreicht man, dass Flüssigkeiten unterschiedlicher Viskosität gefördert werden können.

Die aggressiven Chemikalien verlangen, dass die Kreiselpumpe aus einem beständigen, hochreinen Fluorkunststoff hergestellt wird. Um Korrosion und ein Austreten von Metallen zu verhindern, ist der Permanentmagnetrotor mit einer Ummantelung zu schützen. Aufgrund der substantiellen Permeation ist die Einsatzdauer eines Rotors jedoch beschränkt.

Mit den realisierten Prototypen werden die Vorteile der Magnetlagerung bei der Förderung hochreiner, aggressiver Chemikalien gezeigt. Die geringe benetzte Oberfläche innerhalb der Pumpe ergibt zusammen mit der berührungslosen Lagerung ein Pumpsystem mit exzellenten Reinheitseigenschaften.

Abstract

During the production of semiconductor components, silicon wafers are treated in wet processes with corrosive chemicals. The process quality and yield depend mainly on the purity of the liquids and the process equipment. Therefore pumps have to fulfill stringent requirements for purity and chemical resistance, and therefore only hermetic pump systems can be used.

The bearingless slice motor developed by Barletta [Bar198], used to drive a hermetic centrifugal pump, offers essential advantages compared to conventional bellows and diaphragm pumps. Due to the contactless bearing of the pump impeller, no particles are generated from mechanical abrasion. The high rotational speed of the impeller yields on the one hand a continuous flow and on the other a relatively compact pump. Starting with the concept of the bearingless slice motor, this work demonstrates how the purity, chemical resistance and pump capacity requirements can be satisfied.

The slice motor is optimized using modelling for copper and iron losses. Thereby the optimal operating point depends mainly on the excitation of the permanent-magnet rotor. With a model for heat dissipation a cooling design corresponding to the specific operating point of the motor can be created.

The hydrodynamics of the magnetically levitated impeller, with its passive axial bearing, is investigated with greater scrutiny. Because the ability of this reluctance bearing to take up axial forces is limited, the axial thrust of the centrifugal pump is hydrodynamically reduced. Appropriate dimensions of the impeller and the pump housing make it possible to convey viscous liquids.

The corrosive chemicals require that the centrifugal pump is made of a chemically-resistant and highly-pure fluoropolymer. To prevent corrosion of the rotor and metallic contamination of the chemicals, the permanent magnet rotor is protected by an encapsulation. Due to substantial permeation, operating life of a rotor is limited.

With the realized prototypes the advantages of magnetic bearings for the delivery of highly-pure, corrosive chemicals are demonstrated. The small wetted surface within the pump and the contactless bearings result in a pump system with excellent purity characteristics.

Symbolverzeichnis

Konventionen

A, a	Skalare
$\underline{A}, \underline{a}$	Vektoren
$a^{(x)}$	x -Komponente eines Vektors $\underline{a} = \begin{pmatrix} a^{(x)} \\ a^{(y)} \end{pmatrix}$
$\underline{\underline{A}}$	Matrizen
$\overline{A}(x), a(x)$	Funktion, Wert abhängig von x
\hat{x}	Amplitude einer sinusförmigen Grösse: $x(t) = \hat{x} \cdot \sin(\omega t)$
\dot{x}	zeitliche Ableitung erster Ordnung ($= \frac{dx}{dt}$)
\ddot{x}	zeitliche Ableitung zweiter Ordnung ($= \frac{d^2x}{dt^2}$)

Indizes

a, b	Grössen der Wicklungsphasen a, b
d, q	d -, q -Komponente im Feldkoordinatensystem
D, Q	D -, Q -Komponente im Statorkoordinatensystem
e	elektrische Grösse
m	mechanische Grösse
Cu	die Wicklungen betreffend
Fe	den Eisenkreis betreffend
PM	permanentmagnetisch erzeugt
S	Strang- oder Phasengrösse
V	hydraulische Grösse bei Förderung viskoser Flüssigkeiten

w	hydraulische Grösse bei Förderung von Wasser
(S)	Vektorgrösse im Statorkoordinatensystem (hochgestellt)
(F)	Vektorgrösse im Feldkoordinatensystem (hochgestellt)
s	Sollgrösse (hochgestellt)
f	gefilterte Grösse (hochgestellt)
0	Arbeitspunktgrösse
1	Antriebsgrösse
2	Lagergrösse
(I)	den Radseitenraum zwischen Deckscheibe und Gehäuse betreffend
(II)	den Radseitenraum zwischen Tragscheibe und Gehäuse betreffend

Formelzeichen

A	Fläche
B	magnetische Flussdichte
B_{PM}	Flussdichte im Luftspalt, permanentmagnetisch erzeugt
\underline{B}_s	Vektor der Streuinduktion
b_2	Höhe des Kanals am Laufradaustritt
c	Konzentration einer diffundierenden Substanz
c_{Hy}	Materialkonstante der Hystereseverluste
c_m	Drehmomentkonstante
c_u	Spannungskonstante
c_{Ws}	Materialkonstante der Wirbelstromverluste
c_1, c_2	Absolutgeschwindigkeit einer Strömung am Laufradeintritt bzw. -austritt
c_{1m}, c_{2m}	Axialkomponente der Absolutgeschwindigkeit einer Strömung am Laufradeintritt bzw. -austritt
c_{1u}, c_{2u}	Komponente in Umlaufrichtung der Absolutgeschwindigkeit einer Strömung am Laufradeintritt bzw. -austritt
D	Diffusionskoeffizient
$\underline{\underline{D}}$	Drehmatrix zur Koordinatentransformation
d	Dämpfung eines Feder-Masse-Systems bzw. eines passiven Magnetlagers

d_{Fe}	Blechdicke des Eisens
D_R	D-Anteil eines Reglers
d_s	Dämpfung einer Magnetlager-Strecke
E_t	Zug-Elastizitätsmodul
f	Füllfaktor
F_d	Störkraft
F_{dx}	Störkraft in x -Richtung
f_e	elektrische Grundswingungsfrequenz
F_g	Gewichtskraft eines Körpers
$F_h^{(z)}$	hydraulischer Axialschub
F_L	Lorentz-Kraft
F_M	Maxwell-Kraft
F_m	Magnetlagerkraft, welche auf einen Körper/Rotor wirkt
$F_m^{(z)}$	Reluktanzkraft des passiven Axialmagnetlagers
f_Q, f_H, f_η	Korrekturfaktoren zur Umrechnung der Kennlinien von Wasser auf viskose Flüssigkeiten
$F_x(s)$	Übertragungsfunktion des Filters der Positionsmessung
$F_\omega(s)$	Übertragungsfunktion des Filters der Drehzahlmessung
$F_{(III)}$	Impulskraftanteil des hydraulischen Axialschubs
g	Erdbeschleunigung (Normwert 9.80665 m/s^2)
$G_d(s)$	Störübertragungsfunktion eines Magnetlagers
$G_m(s)$	Übertragungsfunktion einer Magnetlagerstrecke
H	Förderhöhe
H_A	Förderhöhe einer Anlage
H_{opt}	Förderhöhe am Bestpunkt
H_S	Energiehöhe im Saugstutzen
H_{th}	theoretische Förderhöhe bei endlicher Schaufelzahl
$H_{\text{th}\infty}$	theoretische Förderhöhe bei unendlicher Schaufelzahl
I, i	Strom
j	Diffusionsströmung
J_r	Rotorträgheitsmoment um eine Achse senkrecht zur Drehachse
J_z	Rotorträgheitsmoment um die Drehachse
k	Feder- bzw. Magnetlagersteifigkeit
k_i	Kraft-Strom-Faktor
k_L	Lorentzkraft-Faktor
k_M	Maxwellkraft-Faktor

k_s	Kraft-Weg-Faktor
k_z	Steifigkeit des Axialmagnetlagers
l	Länge, Dicke
l_w	mittlere Windungslänge
M	Antriebsmoment bei verlustfreier Leistungsübertragung
m	Masse, Strang-/Phasenzahl
M_{Fe}	Bremsmoment herrührend von den Eisenverlusten
M_m	Lastmoment
$M_{\text{th}\infty}$	theoretisches, hydraulisches Impulsmoment bei unendlicher Schaufelzahl
n	Drehzahl
n_q	spezifische Drehzahl
P	Leistung, Wärmefluss
P	Permeationskoeffizient
p	Polpaarzahl
P_{Cu}	Kupferverluste
P_e	elektrische Antriebsleistung
P_{Fe}	Eisenverluste
P_h	hydraulische Förderleistung
P_{Hy}	Hystereseverluste
$PI(s)$	Übertragungsfunktion eines PI-Reglers
$PID(s)$	Übertragungsfunktion eines PID-Reglers
P_m	mechanische Antriebsleistung
P_{ML}	Motorverluste
P_R	P-Anteil eines Reglers
p_v	Dampfdruck
P_{Ws}	Wirbelstromverluste
p_0	Gas-/Dampfdruck
$p(I), p(II)$	Druckverteilungen in den Radseitenräumen
Q	Förderstrom, Diffusionsmenge
Q_{La}	Förderstrom durch das Laufrad
Q_{opt}	Förderstrom am Bestpunkt
$Q(I)$	Förderstrom im Radseitenraum (I)
$Q(II)$	Leckagestrom im Radseitenraum (II)
R	thermischer Widerstand
r	Radius der Rotorscheibe, Radialkoordinate
R_{FS}	thermischer Widerstand Flüssigkeit/Sensorik
R_{GU}	thermischer Widerstand Gehäuse/Umgebung

R_{MG}	thermischer Widerstand Motor/Gehäuse
R_S	ohmscher Widerstand einer Phase
$R(s)$	Übertragungsfunktion des Positionsreglers
R_{SM}	thermischer Widerstand Sensorik/Motor
R_α	thermischer Übergangswiderstand
R_λ	thermischer Leitungswiderstand
R_2	Laufradaussenradius
S	Absorptionskoeffizient
s	Variable der Laplace-Transformation
\underline{s}	Radiallage des Rotors
t	Zeit
T_L	elektrische Zeitkonstante des unterlagerten Stromregelkreises
T_m	mechanische Zeitkonstante eines Magnetlagers
t_0	Verzögerung der Asymptoten bei Diffusionsvorgängen
U, u	Spannung
U_{DC}	Zwischenkreisspannung
\underline{u}_{i1}	Vektor der induzierten Spannung im Antrieb
u_1, u_2	Umfangsgeschwindigkeit einer Strömung am Laufradeintritt bzw. -austritt
V_{Fe}	Volumen des Eisens
w	Windungszahl
w_1, w_2	Relativgeschwindigkeit einer Strömung am Laufradeintritt bzw. -austritt
X	Position eines schwebenden Körpers
x, y, z	Positionskoordinaten eines Körpers/Rotors (xy : radial, z : axial)
x	Positionsvariable in einer Membran ($x_0 \leq x \leq x_l$)
α	Drehwinkel um x -Positionsordinate
α	Wärmeübergangskoeffizient
β	Drehwinkel um y -Positionsordinate
β_2	Austrittswinkel am Laufrad
γ	Drehwinkel um z -Positionsordinate, mechanischer Rotorwinkel
γ_F	Winkel zwischen Stator- und Feldkoordinatensystem, Feldwinkel
δ_{Fe}	Dichte des Eisens

η	dynamische Viskosität
η_h	hydraulischer Wirkungsgrad
η_{hopt}	hydraulischer Wirkungsgrad am Bestpunkt
η_{PS}	Wirkungsgrad des gesamten Pumpsystems
ϑ_i	Absoluttemperatur
ϑ_{ij}	Temperaturdifferenz
ϑ_{F}	Temperatur der Flüssigkeit
ϑ_{FS}	Temperaturdifferenz Flüssigkeit/Sensorik
ϑ_{FU}	Temperaturdifferenz Flüssigkeit/Umgebung
ϑ_{G}	Temperatur des Gehäuses
ϑ_{M}	Temperatur des Motors
ϑ_{S}	Temperatur der Sensorik
ϑ_{U}	Temperatur der Umgebung
μ_{M}	hydraulischer Minderleistungsfaktor
λ	spezifische Wärmeleitfähigkeit
μ_r	relative magnetische Permeabilität
μ_0	magnetische Feldkonstante ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$)
ν	kinematische Viskosität
ξ	Wicklungsfaktor
ρ	Dichte
ρ_{Cu}	spezifischer elektrischer Widerstand von Kupfer
Φ	magnetischer Fluss
φ	geometrischer Winkel in der xy -Ebene
Ψ	verketteter Fluss
ω	Winkelfrequenz

Abkürzungen

CMP	chemisch-mechanisches Polieren (engl. <i>chemical mechanical polishing/planarization</i>)
DC	Gleichspannung, -strom
DSP	digitaler Signalprozessor
ECTFE	Ethylen-Chlortrifluorethylen
ETFE	Ethylen-Tetrafluorethylen
FEP	Tetrafluorethylen/Hexafluorpropylen-Copolymerisat
IC	integrierte Halbleiterschaltung (engl. <i>integrated circuit</i>)

IR	Infrarot
MCDS	Magnetic Control Development Studio; Entwicklungssoftware für Magnetlageransteuerung der Firma <i>Levitronix</i>
MOSFET	Feldeffekttransistor (engl. <i>Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor</i>)
M270-35A	Elektroblech-Sortenbezeichnung nach DIN EN 10106
M330-35A	Elektroblech-Sortenbezeichnung nach DIN EN 10106
NO20/NO10	Elektroblech-Sortenbezeichnungen nach IEC 404-8-8
NPSH	Netto-Energiehöhe im Saugstutzen (engl. <i>net positive suction head</i>)
PC	Personal Computer
PCTFE	Polychlortrifluorethylen
PD-Regler	Proportional-Differential Regler
PFA	Perfluoralkoxy-Copolymerisat
PID-Regler	Proportional-Integral-Differential Regler
PM	Permanent-Magnet
ppt	Anzahl Teile in einer Billion Teile (engl. <i>parts per trillion</i>)
PTFE	Polytetrafluorethylen
PTV	Messmethode für Partikelgeschwindigkeit (engl. <i>particle tracking velocimetry</i>)
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PWM	Pulsweitenmodulation
SEMI	Semiconductor Equipment and Materials International
TI	Texas Instruments
TOC	gesamter organischer Kohlenstoffgehalt (engl. <i>total organic carbon</i>)

Kapitel 1

Einleitung

Die Verkleinerung von integrierten Halbleiterschaltungen (engl. *integrated circuit, IC*) – heutige Prozessoren verfügen über 200 Millionen Transistoren je cm^2 [Bass02] und Strukturen kleiner als 100 nm – ist nur möglich dank der technologischen Entwicklung bei den Fertigungsanlagen und -prozessen. Ein Hauptaugenmerk wird dabei auf die *Reinheit der Produktionsumgebung und der Prozessmedien* gelegt.

So können Flüssigkeiten, wobei es sich vielfach um aggressive Chemikalien handelt, nur durch hermetisch gekapselte Fördersysteme verteilt werden, um den Reinheitsanforderungen zu genügen. Bei Flüssigkeitspumpen bieten sich *Magnetlager* als interessante Lösung an, da sie *berührungs-, verschleiss- und wartungsfrei* arbeiten.

Ausgehend von einem Überblick über den Herstellungsprozess von Halbleiterbausteinen und den Einsatz von Flüssigkeitspumpen soll im Folgenden die Motivation und Aufgabenstellung für ein magnetgelagertes Pumpsystem hergeleitet werden.

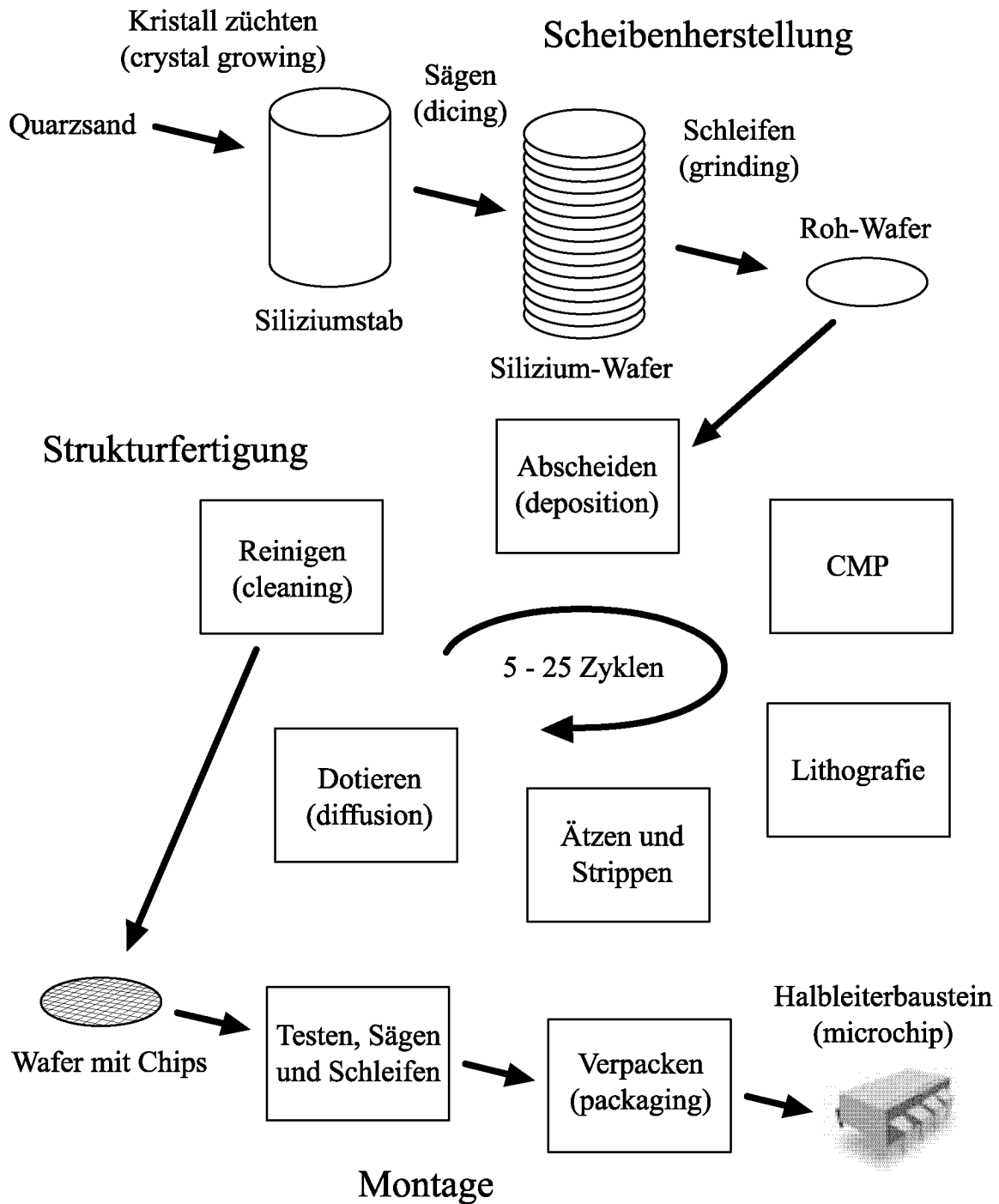


Abb. 1.1: Herstellungsprozess eines Halbleiterbausteins

1.1 Herstellungsprozess von Halbleiterbausteinen

Das am häufigsten verwendete Ausgangsmaterial für elektronische Halbleiterbausteine ist Silizium, welches als Quarzsand überall in der Natur vorkommt. Um daraus funktionstüchtige Halbleiterbausteine herzustellen, werden die drei Fertigungsschritte **Scheibenherstellung**, **Strukturfertigung** und **Montage** durchlaufen. Abb. 1.1 zeigt den gesamten Herstellungsprozess vom Quarzsand bis zum fertigen Halbleiterbaustein, welcher in der Literatur [Nish00, Zant00, Ruge91, Schu91] ausführlich beschrieben ist.

Aus einem Siliziumeinkristall werden dünne Siliziumscheiben (engl. *wafer*) geschnitten, welche mechanisch bearbeitet und geätzt werden, um eine spiegelglatte Oberfläche zu erhalten. Dieses Zwischenprodukt dient als Substrat für die Struktur der elektronischen Schaltungen, wobei auf einer Siliziumscheibe mehrere hundert Schaltungen gleichzeitig hergestellt werden. Die Struktur wird schichtweise durch eine Abfolge sich wiederholender Einzelprozesse erzeugt:

Abscheiden Durch Verfahren, wie CVD (engl. *chemical vapor deposition*) oder PVD (engl. *physical vapor deposition*) wird eine Maskierungsschicht auf die Scheibenoberfläche abgeschieden.

CMP Um eine plane Wafer-Oberfläche zu erhalten werden die Scheiben chemisch-mechanisch poliert bzw. planarisiert (engl. *chemical mechanical polishing/planarization*).

Lithographie Über die Maskierungsschicht wird ein strahlungsempfindlicher Lack aufgebracht, durch eine Maske belichtet und entwickelt.

Ätzen und stripfen Die lithographisch erzeugten Strukturen werden durch Plasmaätzprozesse in die darunter liegende Schicht übertragen und danach der Fotolack wieder entfernt (engl. *stripfen*).

Dotierung/Diffusion Durch die Öffnungen in der Maskierungsschicht werden Fremdionen in das Silizium eingetrieben, um Zonen unterschiedlicher Leitfähigkeit zu erzeugen.

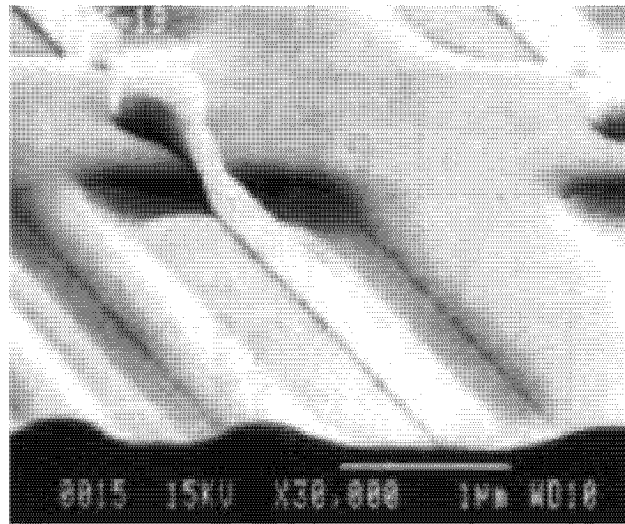


Abb. 1.2: strukturierte Scheibenoberfläche [Nish00]

Reinigen Zusätzlich wird die Scheibenoberfläche mehrfach durch Reinigungsverfahren von metallischen und organische Verunreinigungen, sowie Partikeln gesäubert.

Abb. 1.2 zeigt die strukturierte Oberfläche einer Siliziumscheibe nach mehreren Bearbeitungsschritten. Ist die Struktur vollständig aufgebracht, werden die Siliziumscheiben in einzelne Halbleiterplättchen (engl. *die*) zersägt und in ein Gehäuse montiert (engl. *packaging*). Während der Herstellung von Halbleiterbausteinen wird die Qualität ständig kontrolliert und schlussendlich die Funktion überprüft, bevor die Bausteine versandt werden.

1.2 Flüssigkeitspumpen in der Halbleiterfertigung

Im Laufe der Strukturfertigung wird die Scheibenoberfläche mehrfach mit flüssigen Chemikalien behandelt. Aus sicherheitstechnischen und logistischen Gründen werden in der Fabrikation die Chemikalien meist zentral gelagert und gemischt. Die Förderung der Chemikalien zu den Anlagen, die Zirkulation innerhalb der Anlagen und die Förderung der verbrauchten Flüssigkeiten zur Aufbereitung oder Entsorgung über-

nehmen Flüssigkeitspumpen.

Von den in Abb. 1.1 abgebildeten Prozessschritten werden hauptsächlich folgende Schritte mit flüssigen Chemikalien durchgeführt:

- Reinigen
- Strippen
- Substratätzen
- CMP

Sowohl beim *Reinigen* als auch beim *Strippen* geht es darum Verunreinigungen (Partikel, Metalle, Polymere oder Fotolack) von der Scheibenoberfläche zu entfernen.

Unter *Substratätzen* versteht man Ätzprozesse zur Oberflächenbearbeitung, beispielsweise zum Entfernen von Schleifschäden oder zur Reduzierung der Scheibendicke.

Beim *CMP* wird eine chemische Flüssigkeit (engl. *slurry*) verwendet, in welcher kleinste Partikel ($< 1 \mu\text{m}$) als Poliermittel gelöst sind. Bei der Oberflächenbearbeitung wird diese Flüssigkeit zwischen eine Platte und den Wafer gepumpt. Bewegen sich Platte und Wafer nun gegeneinander, wird die Waferoberfläche durch die Partikel poliert und ausgeebnet. Die Flüssigkeit muss kontinuierlich bewegt werden, um ein Sedimentieren der Partikel zu verhindern. Gleichzeitig führen jedoch zu hohe Scherkräfte zu einer unerwünschten Verklumpung (Aggregation) [Nish00].

1.2.1 Beispiel Spinprozess-Anlage

Die Nasschemietechnologie (engl. *wet bench*) wird unterteilt in **Einzelscheiben-** (engl. *single wafer processing*) und **Mehrscheiben-Prozesstechnologie** (engl. *batch processing*), wobei entweder jede Scheibe separat behandelt wird oder mehrere Scheiben zusammen in ein Chemikalienbad getaucht werden. In der Halbleiterindustrie geht der Trend hin zu Einzelscheibenprozessen [Heyn00], da bei diesen Prozessen weniger Chemikalien benötigt werden und eine bessere Prozessqualität erreicht wird. Anhand des folgenden Beispiels einer

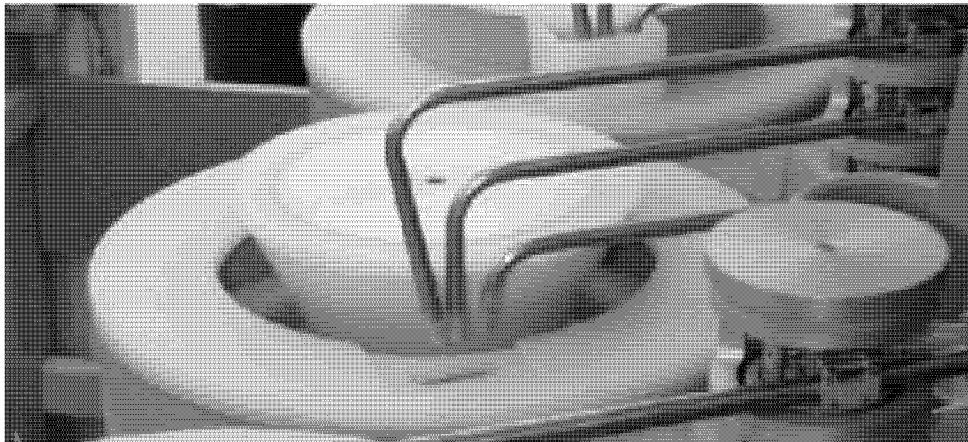


Abb. 1.3: Prozesstopf in Spinprozess-Anlage

Einzelscheiben-Prozessanlage soll auf die speziellen Anforderungen an Fördersysteme eingegangen werden.

Reinigungs-, Ätz- und Stripprozesse werden auf so genannten *Spinprozessanlagen* [Zant00, Hatt98, Lysa00] (engl. *spin process equipment*) durchgeführt, wobei die Flüssigkeit durch eine Sprühdüse (engl. *nozzle*) von einer Seite auf die drehende Scheibenoberfläche aufgebracht wird. Aufgrund der Drehbewegung bildet sich ein dünner Film auf der Siliziumscheibe, womit über der gesamten Oberfläche gleichmässige Prozessbedingungen hergestellt werden. Aussen wird die Flüssigkeit durch Zentrifugalkräfte weggeschleudert, was eine einseitige Bearbeitung der Scheiben möglich macht. Abb. 1.3 zeigt einen Prozesstopf mit ausgefahrenem Scheibenaufnehmer (engl. *chuck*) in der Mitte. Neben einem Medienarm zum Aufbringen von Reinigungs- oder Ätzchemikalien wird je ein Medienarm zum Spülen mit deionisiertem Wasser (DI-Wasser) und zum Trocknen mit Stickstoff benötigt.

Der Flüssigkeitskreislauf einer Anlage ist vereinfacht in Abb. 1.4 aufgezeichnet. Die Prozesspumpe fördert die Chemikalien vom Tank durch einen Filter und einen Durchlauferhitzer (engl. *Inlineheater*) auf die Siliziumscheibe. Die weggeschleuderte Flüssigkeit wird im Prozesstopf gesammelt und zurück in den Tank geleitet.

Um einen gleichmässigen Prozessfilm auf den Siliziumscheiben zu erzeugen und damit eine hohe Reproduzierbarkeit zu erreichen, ist die Flüssigkeit in einer *kontinuierlichen Strömung* auf die Scheibenoberfläche aufzubringen. Eine pulsierende Flüssigkeitszufuhr oder gar ein

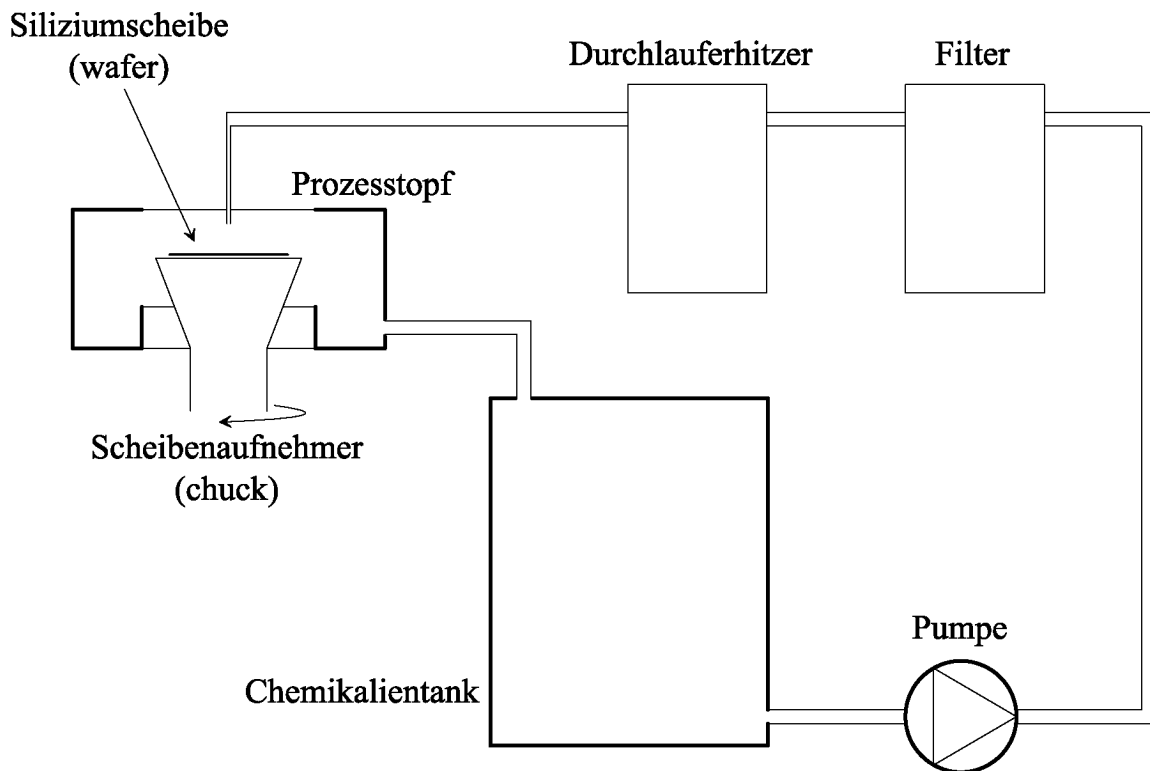


Abb. 1.4: Chemikalienkreislauf in Spinprozess-Anlage

Abtropfen führen zu unregelmässigen Prozessergebnissen.

Im Filter werden die abgespülten Rückstände gesammelt, wodurch die Chemikalien wiederholt verwendet werden können. Zudem werden Partikel im Medium herausgefiltert, welche vom Medium selber, von der Anlage oder aus der Umgebung stammen. Aufgrund der Komplexität und der feinen Strukturen sind Verunreinigungen der Waferoberfläche die Hauptursache für fehlerhafte Bausteine. Dabei liegt die Obergrenze der unkritischen Partikelgrösse bei etwa einem Zehntel der kleinsten Strukturgrösse des Halbleiterbausteins [Nish00].

Neben Partikelkontaminationen, welche zu Kurzschlüssen oder Unterbrüchen führen, beeinträchtigen Ionenkontaminationen auf dem Wafer die Leistungsfähigkeit der hergestellten Halbleiterbausteine. Um eine wirtschaftliche Ausbeute (Anteil funktionsfähiger Schaltungen der gesamthaft hergestellten Schaltungen) zu erhalten, muss die Anzahl der Defekte pro Flächeneinheit klein gehalten werden. Daraus resultieren extreme Anforderungen an die Reinheit der Fertigungsumgebung sowie der Medien und Anlagen. Erst die Entwicklung *strenger Reinraum-*

konzepte ermöglichte die wirtschaftliche Herstellung von hochintegrierten Halbleiterbausteinen.

1.2.2 Anforderungen an Fördersysteme

Aus obigem Beispiel können folgende Anforderungen an Fördersysteme in der Halbleiterfertigung hergeleitet werden:

Chemikalienbeständigkeit Die in der Nasschemie verwendeten Flüssigkeiten setzen sich aus Säuren, Basen, Oxidations- und Lösungsmitteln zusammen, welche im Extremfall bis zu 180°C heiss sind. Die flüssigkeitsberührenden Teile der Pumpe dürfen in keiner Weise von diesen Chemikalien angegriffen werden.

Atomare/molekulare Verunreinigung Kontaminationen der Chemikalien mit Metallen, Anionen und organischen Kohlenstoffverbindungen durch das Fördersystem müssen Grenzwerte (Kap. 5.4.2 auf S. 111) einhalten, um eine hohe Produktionsausbeute zu erreichen.

Partikelverunreinigung Vom Fördersystem sollten kaum Partikel an die Flüssigkeit abgegeben werden. Deshalb sind mechanisch aneinander reibende Teile wie Ventile oder mechanische Lager zu vermeiden.

Reproduzierbarkeit Bei Halbleiterfertigungsprozessen ist die Reproduzierbarkeit äusserst wichtig. Je nach Anwendung ist deshalb ein kontinuierlicher, regelbarer Flüssigkeitsstrom gefordert, um gleichmässige Prozessergebnisse zu erreichen.

Hydraulische Leistungsfähigkeit Die Anforderungen an die Leistung hängen stark von der Anwendung ab, wobei wegen der dichten Filter bereits bei kleinem Fördervolumen eine grosse Förderhöhe zu liefern ist. Zudem ist der Betrieb auch bei unterschiedlichen Flüssigkeitsviskositäten zu gewährleisten.

Baugrösse Da Reinraum teuer ist, sind Fördersysteme kompakt zu bauen, um die Betriebskosten zu reduzieren. Neben der eigentlichen Pumpe sind auch Komponenten für die Leistungszufuhr und die Abfuhr von Verlusten zu berücksichtigen.

Zuverlässigkeit Fördersystem haben diese Anforderungen zuverlässig zu gewährleisten. So werden zum Beispiel Metallverunreinigungen erst spät im Fertigungsablauf erkannt, womit auch die in der Zwischenzeit prozessierten Siliziumscheiben kontaminiert wurden.

Sicherheit Da die zu pumpenden Medien sehr aggressiv und teilweise brennbar sind, sind entsprechende Sicherheitsvorkehrungen gemäss den in der Halbleiterindustrie geltenden Normen [SEMI00b, SEMI96b, SEMI00a, SEMI96a, SEMI98] einzuhalten.

Lärm, Vibrationen Aufgrund der chemisch aggressiven Umgebung können keine Dämpfungswerkstoffe eingesetzt werden. Mechanische Schwingungen des Fördersystems sind zu vermeiden, da diese direkt an die Befestigung weitergegeben werden.

1.3 Stand der Technik

Aufgrund der extremen Anforderungen bezüglich Chemikalienbeständigkeit und Reinheit werden in der Nasschemie *ausschliesslich herme-*

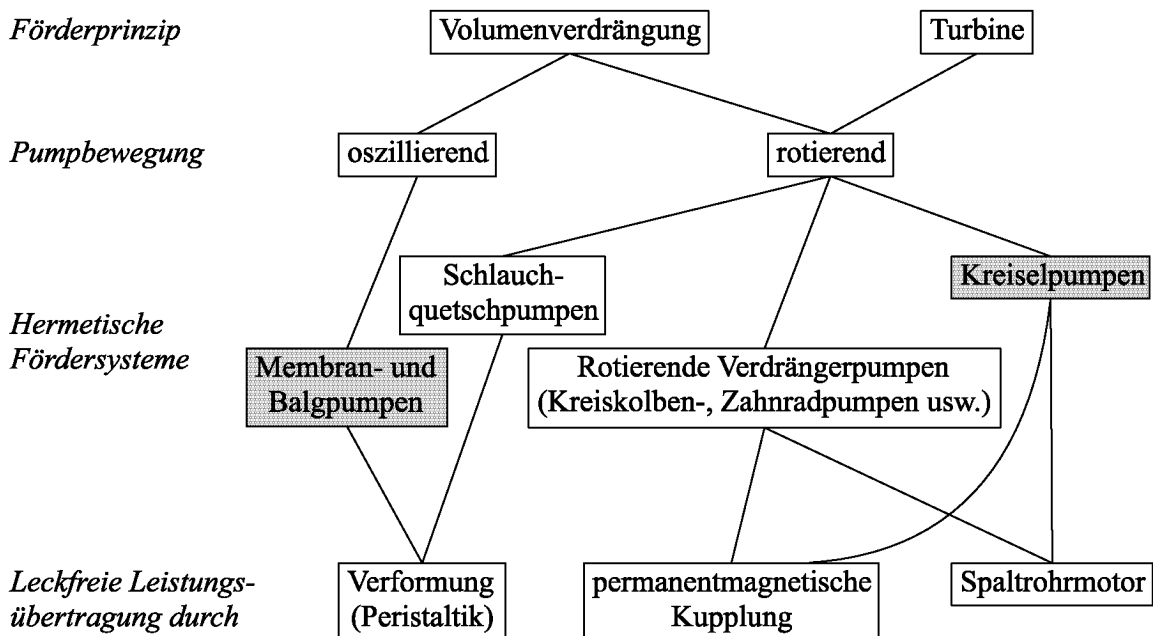


Abb. 1.5: Übersicht hermetische Fördersysteme

tische Fördersysteme eingesetzt. Abb. 1.5 gibt eine Übersicht über hermetische Fördersysteme. Die Leistungsübertragung durch eine Trennhülle zwischen Fluid und Umgebung erfolgt entweder mechanisch durch Verformung dieser Trennhülle oder elektromagnetisch mit einer permanentmagnetischen Kupplung bzw. einem Spaltrohrmotor.

Die Chemikalienförderung in der Halbleiterindustrie übernehmen hauptsächlich Balg- und Membranpumpen, seltener permanentmagnetisch gekuppelte Kreiselpumpen. Der folgende Abschnitt geht näher auf die Funktion von Balg- und Magnetkupplungspumpen ein, wobei deren Einsatzgrenzen erläutert werden. Für eine genauere Beschreibung hermetischer Fördersysteme sei auf [Neum94] verwiesen.

1.3.1 Balgpumpen

Abb. 1.6 zeigt den Schnitt durch eine Balgpumpe, in welcher zwei Bälge durch ein Gestänge miteinander verbunden sind. Durch abwechselndes Zuleiten von Druckluft in die beiden Luftkammern werden die Bäl-

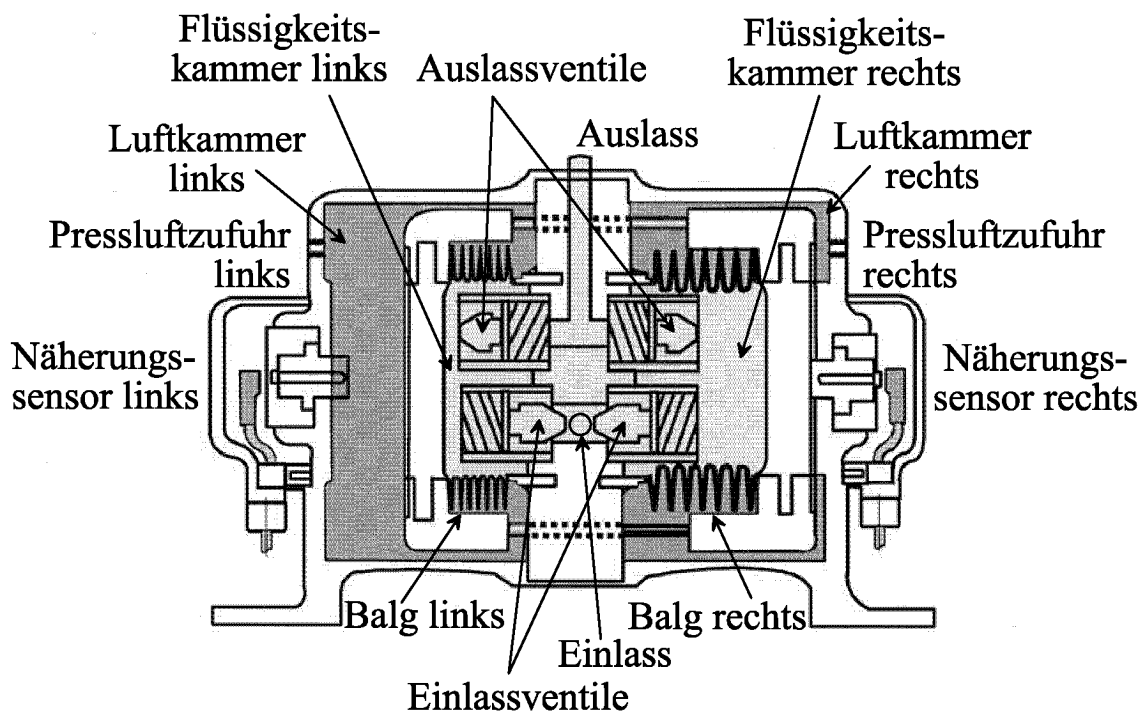


Abb. 1.6: Schnitt durch eine Balgpumpe

ge hin und her bewegt, wobei Flüssigkeit durch ein Einlassventil in eine Flüssigkeitskammer gelangt und gleichzeitig Flüssigkeit über ein Auslassventil aus der anderen Kammer gedrückt wird. Die Signale der Näherungsschalter werden für die Ansteuerung eines Pneumatikventils verwendet, welches die wechselnde Druckluftzuleitung in die Luftkammern sicherstellt.

Indem alle flüssigkeitsberührenden Teile aus hochreinen, chemikalienresistenten Fluorkunststoffen hergestellt werden, werden die Anforderungen an die Beständigkeit und Reinheit erfüllt. Durch die mechanische Bewegung der Bälge und Ventile lösen sich jedoch Partikel, welche das Medium verunreinigen. Typischerweise steigt dabei die Partikelverunreinigung exponentiell mit der Schlagzahl an. Die Lebensdauer der Bälge und Ventile ist zudem beschränkt und ein Austausch aufwändig. Aufgrund des Förderprinzips pulsiert die Strömung, was auch durch den Einsatz von Pulsationsdämpfern nicht vollständig unterdrückt werden kann. Dabei benötigen Balgpumpen verglichen mit ihrer Leistungsfähigkeit viel Platz. Die pneumatische Ansteuerung und die lineare Wechselbewegung erzeugen relativ viel Lärm und Vibrationen. Die pneumatische Ansteuerung hat jedoch den Vorteil, dass sie sicherheitstechnisch bezüglich Brandgefahr bedenkenlos ist.

1.3.2 Magnetkupplungspumpen

Abb. 1.7 zeigt eine Magnetkupplungspumpe, bei welcher das Drehmoment indirekt von einem Norm-Motor über eine Permanentmagnetkupplung auf des Flügelrad übertragen wird. Die Lager des Flügelrades befinden sich innerhalb der Pumpe und sind als fluidgeschmierte Gleitlager ausgeführt. Diese Gleitlager beschränken den Einsatz von Magnetkupplungspumpen stark, denn nicht alle Medien eignen sich als Schmiermittel. Zudem entsteht in den Gleitlagern mechanischer Abrieb, welcher als Partikelverunreinigung an die Flüssigkeit abgegeben wird, und bei fehlender Schmierung (im Trockenlauf) werden Gleitlager innert kurzer Zeit zerstört.

Magnetkupplungspumpen haben gegenüber Balgpumpen jedoch den Vorteil, dass Kreiselpumpen einen kontinuierlichen Flüssigkeitsstrom liefern und kompakter gebaut werden können.

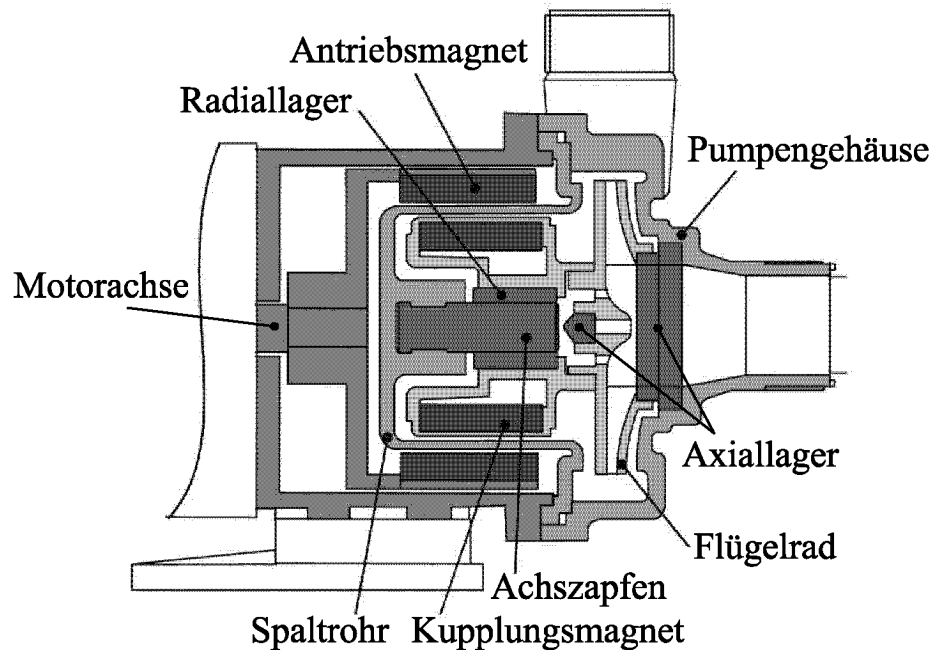


Abb. 1.7: Schnitt durch eine Magnetkupplungspumpe

1.3.3 Folgerungen

Sowohl bei Balg- als auch bei Magnetkupplungspumpen werden die Chemikalien verunreinigt mit Partikeln, welche sich durch mechanische Reibung oder Verformung lösen. Gleichzeitig werden auch atomare und molekulare Verunreinigungen freigesetzt, was die Ausbeute funktions-tüchtiger Schaltungen reduziert.

Bei einer Kreiselpumpe wird die Förderhöhe durch Fliehkräfte aufgebaut, weshalb ein kontinuierlicher Förderstrom entsteht und keine Ventile zum Druckaufbau benötigt werden. Wird dabei das Flügelrad durch die hermetische Trennhülle berührungsfrei gelagert, steht ein Chemikalien-Fördersystem mit reduzierter Verunreinigung zur Verfügung.

1.4 Zielsetzung

Die Idee einer vollständig berührungsfreien Lagerung kann mit Magnetlagern realisiert werden. Diese Arbeit untersucht mit welchem Konzept die Anforderungen bezüglich Reinheit, chemischer Beständigkeit und

Leistungsfähigkeit erfüllt werden können. Ziel der Arbeit ist der Entwurf und die Realisierung eines *magnetgelagerten Pumpsystems für die Halbleiterfertigung*.

Die Aufgabenstellung erfordert einen bereichsübergreifenden Ansatz und ist *interdisziplinär* zu lösen. Für die Bearbeitung der Problemstellungen werden neben Elektrotechnik Kenntnisse aus folgenden Wissensgebieten benötigt:

- Magnetlagertechnik
- Kunststofftechnologie
- Chemie
- Hydrodynamik
- Maschinenbau

Neben der eigentlichen Aufgabenstellung sind beim Entwurf auch wirtschaftliche und produktionstechnische Kriterien zu beachten.

1.5 Aufbau der Arbeit

Basierend auf bereits erfolgte Arbeiten über den lagerlosen Motor werden in dieser Arbeit folgende Problemkreise im Zusammenhang mit der Anwendung in der Halbleiterfertigung behandelt:

- Das folgenden Kapitel beginnt mit einer *Einführung in die Magnetlagertechnologie*. Bei den Betrachtungen über magnetgelagerte Flüssigkeitspumpen steht dabei der Einsatz als Fördersystem in der Nasschemie im Vordergrund, wobei schlussendlich auf das genauer untersuchte Konzept des lagerlosen Scheibenmotors eingegangen wird.
- In Kapitel 3 wird die Leistungsfähigkeit des lagerlosen Scheibenmotors untersucht und entsprechende *Modelle für Verlustberechnung und Wärmeabfuhr* erarbeitet. Diese Modelle bilden die Basis für den Entwurf eines kompakten Antriebs einer Kreiselpumpe.

- Kapitel 4 betrachtet die *hydraulische Leistungsfähigkeit* magnetgelagerter Kreiselpumpen. Insbesondere werden die hydrodynamischen Kräfte auf das Flügelrad untersucht, wobei die unterschiedlichen Flüssigkeitsviskositäten zu berücksichtigen sind.
- In Kapitel 5 wird untersucht, wie die geforderte *Chemikalienbeständigkeit* und *hohe Reinheit* des Fördersystems erreicht werden kann. Dabei wird vor allem die Ummantelung des Rotors genauer betrachtet.
- Schlussendlich zeigt Kapitel 6 anhand von Prototypen die praktische *Realisierbarkeit* magnetgelagerter Pumpsysteme. Vor- und Nachteile des mechatronischen Ansatzes werden dabei erläutert.

Kapitel 2

Magnetgelagerte Antriebe

Bei der vollständigen Lagerung von Rotoren in Maschinen müssen fünf (drei translatorische und zwei rotatorische) räumliche Freiheitsgrade dieses Rotors stabilisiert werden. Der sechste Freiheitsgrad, die Rotation um die geometrische Längsachse, übernimmt der Antrieb. In magnetgelagerten Antrieben werden dabei die Lagerkräfte elektromagnetisch erzeugt.

Dieses Kapitel beschreibt nach einer Einführung in die Magnetlagertechnologie das Konzept des lagerlosen Scheibenmotors, welcher von Barletta [Barl98] entwickelt wurde. Dabei wird der Einsatz als Fördersystem in der Nasschemie genauer betrachtet und die Vor- und Nachteile dieses Konzepts diskutiert.

2.1 Magnetlagerung

Bei magnetgelagerten Körpern spricht man vielfach vom *Schweben* des Körpers. Dieser Begriff beschreibt die Eigenschaften von Magnetlagern treffend und kann in der folgenden Definition als Synonym von *Positionieren* betrachtet werden.

Unter einem Magnetlager versteht man das berührungslose Positionieren eines Körpers in einem oder mehreren seiner Freiheitsgrade durch

Kräfte im magnetischen Feld. Dabei wird zwischen passiver und aktiver Magnetlagerung unterschieden.

2.1.1 Passive Magnetlagerung

Kann ein Körper durch eine rein passive Magnetanordnung stabil in der Schwebelage gehalten werden? Sowohl Earnshaw [Earn42] im nach ihm benannten Theorem als auch Maxwell [Maxw91] weisen nach, dass sich ein in einem unregelmäßigem Magnetfeld schwebender Körper nicht im stabilen Gleichgewicht befinden kann, wenn nicht mindestens ein Freiheitsgrad durch andere Kräfte stabilisiert wird. Diese Aussage wurde von Braunbek [Brau39] um die Feststellung erweitert, dass ein stabiles und freies Schweben eines Systems im magnetischen Feld eines anderen Systems dann möglich ist, wenn mindestens in einem der beiden Systeme diamagnetische Materie der relativen Permeabilität $\mu_r < 1$ vorhanden ist.

Permanentmagnetlager

In passiven Permanentmagnetlagern werden die anziehenden bzw. abstoßenden Kräfte zwischen Permanentmagneten zur Lagerung ausgenutzt. Während die auf anziehenden Kräften basierenden Permanentmagnetlager unter Verwendung von Eisen eine Steigerung der magnetischen Flussdichten und damit höhere Kräfte erlauben, können abstoßende Kräfte nur rein permanentmagnetisch erzielt werden. Abb. 2.1 zeigt ein Radiallager, welches die abstoßenden Kräfte von Permanent-

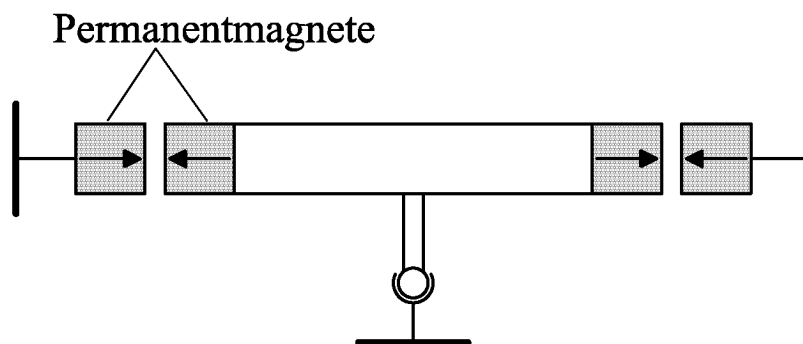


Abb. 2.1: Beispiel eines Permanentmagnetlagers

magneten ausnutzt. Eine Übersicht über weitere Ausführungsformen gibt J.-P. Yonnet [Yonn81].

Heutzutage gelangen in Magnetlagern fast ausschliesslich gesinterte Seltenerd-Magnete zum Einsatz. Nur mit diesen Magneten lässt sich in eisenlosen Magnetkreisen eine genügend hohe Feldstärke erreichen, um praktisch ausreichende Lagerkräfte zu erhalten. Vor allem die Entwicklung von kostengünstigen und relativ temperaturstabilen *Neodym-Eisen-Bor Magneten* hat den Magnetlagern in den letzten Jahren neue Anwendungsbereiche eröffnet.

Reluktanzlager

Eine weitere Kategorie von passiven Magnetlagern beruht auf der anziehenden Kraft zwischen magnetisierten Eisenteilen. Da der Magnetkreis die Reluktanz, d. h. den magnetischen Widerstand, zu verkleinern versucht, können die entstehenden Kräfte zur Stabilisierung ausgenutzt werden. Das Feld im Magnetkreis kann sowohl permanentmagnetisch als auch elektrisch, beispielsweise in einem Motor (Abb. 2.2), erzeugt werden.

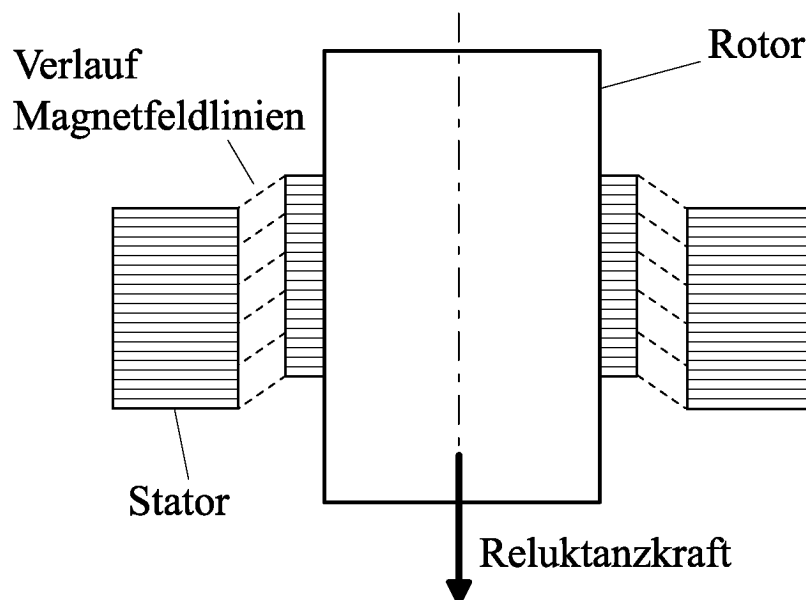


Abb. 2.2: Passives Reluktanz-Magnetlager

Modellierung von passiven Magnetlagern

Ein passives Magnetlager kann analog einem *mechanischen Feder-Masse-System* modelliert werden und besitzt deshalb auch vergleichbare Eigenschaften. In Abb. 2.3 ist das mechanische Analogon zum Reluktanzlager in Abb. 2.2 gezeichnet. Bei kleinen Auslenkungen um die Ruhelage können beide Systeme mit einer linearisierten Differentialgleichung beschrieben werden:

$$m \cdot \ddot{x} = F_{dx} - d \cdot \dot{x} - k \cdot x, \quad (2.1)$$

mit der Position x , der Rotormasse m , der Störkraft F_{dx} und der Feder- bzw. Magnetlagersteifigkeit k . Wobei die Dämpfung d bei Magnetlagern von der Geometrie des Lagers, den Wirbelstromverlusten im Magnetkreis und vor allem dem Medium im Lager abhängt. In niederviskosen Medien, z. B. Gasen, kann die Dämpfung sehr klein werden. Die Übertragungsfunktion $G_d(s)$ zwischen Störkraft und Position

$$G_d(s) = \frac{x(s)}{F_{dx}(s)} = \frac{1}{m \cdot s^2 + d \cdot s + k} \quad (2.2)$$

zeigt, dass bei kleiner Dämpfung d die Pole der Systeme nahe an der

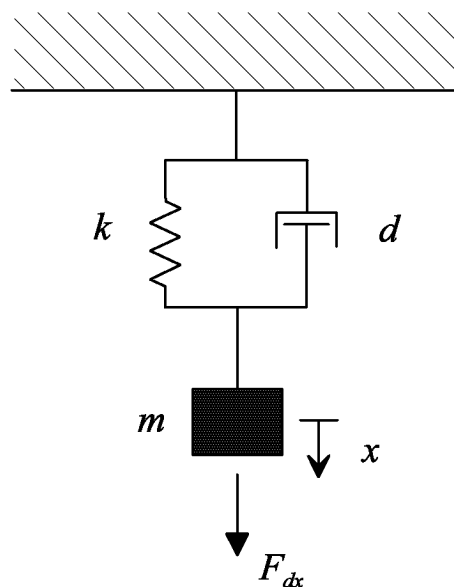


Abb. 2.3: Feder-Masse System

Imaginärachse liegen. Dynamische Störkräfte in Richtung der passiven Lagerung regen daher schwach gedämpfte Schwingungen an und führen zu einer unruhigen bis grenzstabilen Lagerung.

Die vorhandenen *Störkräfte* und die *Dämpfungseigenschaften des Mediums* im Lager bestimmen weitestgehend das Verhalten von passiven Magnetlagern.

2.1.2 Aktive Magnetlagerung

In aktiven Magnetlagern wird die Position eines Körpers durch regelbare elektromagnetische Kräfte stabilisiert. Dabei besteht ein aktives Magnetlagersystem grundsätzlich aus den vier Komponenten

- elektromechanischer Aktor,
- Sensorik,
- Regler und
- Leistungsverstärker.

Die aktive Ansteuerung bietet den Vorteil, dass die Magnetlagersteifigkeit und -dämpfung innerhalb gewisser Grenzen eingestellt werden kann. Am Beispiel des schwebenden Körpers kann die Funktionsweise eines aktiven Magnetlagers einfach veranschaulicht werden.

Der schwebende Körper

Beim schwebenden Körper wird nur ein Freiheitsgrad des Körpers, die vertikale translatorische Bewegung, aktiv gelagert. Da der Elektromagnet nur anziehende Reluktanzkräfte auf den ferromagnetischen Körper ausüben kann, wird als Gegenkraft die Gewichtskraft F_g benötigt.

Abb. 2.4 gibt eine Übersicht über die Systemstruktur des schwebenden Körpers. Ein Elektromagnet und der Körper bilden den *elektromechanischen Aktor*. Die Position X des Körpers wird durch die *Sensorik* erfasst und dem *Regler* zugeführt, welcher den für die Stabilisierung notwendigen Strom ermittelt. Dieser Sollstrom I^s wird über einen *Leistungsverstärker* dem Elektromagneten eingeprägt und erzeugt die gewünschte Magnetkraft F_m , um den Körper in der Schwebelage zu halten.

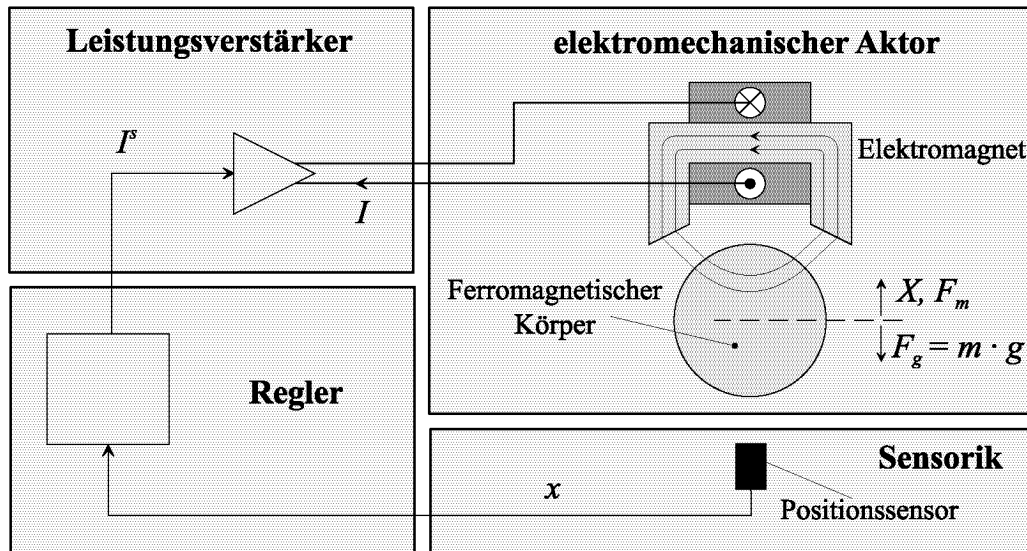


Abb. 2.4: Systemübersicht des schwebenden Körpers

Modellierung von aktiven Magnetlagern

Für das Beispiel des schwebenden Körpers lautet die Bewegungsdifferentialgleichung:

$$m \cdot \ddot{X} = -F_g + F_m(X, I) \quad (2.3)$$

Die Magnetkraft F_m ist im Arbeitsbereich proportional zum Quadrat des Spulenstroms I und umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands zwischen Körper und Elektromagnet [Schw94]. Zur Vereinfachung wird die Magnetkraft F_m im Arbeitspunkt linearisiert.

$$F_m(x, i) = F_m(X_0, I_0) + \underbrace{\frac{\partial F_m}{\partial X} \Big|_{(X_0, I_0)}}_{=k_s} \cdot x + \underbrace{\frac{\partial F_m}{\partial I} \Big|_{(X_0, I_0)}}_{=k_i} \cdot i \quad (2.4)$$

Der Arbeitspunkt (X_0, I_0) wird so festgelegt, dass sich die Magnetkraft $F_m(X_0, I_0)$ und die Gewichtskraft F_g aufheben. Je grösser der Abstand zwischen Körper und Elektromagnet gewählt wird, desto grösser ist der Arbeitspunktstrom I_0 , welcher den Elektromagneten vormagnetisiert. Diese Vormagnetisierung kann auch permanentmagnetisch erregt werden, was die ohmschen Verluste im Elektromagneten reduziert.

Wird die linearisierte Magnetkraft F_m in die Gl. (2.3) eingesetzt, ergibt sich folgende einfache Beschreibung einer Magnetlagerstrecke

$$m \cdot \ddot{x} = k_s \cdot x + k_i \cdot i, \quad (2.5)$$

wobei mit k_s (Kraft-Weg-Faktor) und k_i (Kraft-Strom-Faktor) die gebräuchlichen Modellparameter eingeführt werden.

$$G_m(s) = \frac{x(s)}{i(s)} = \frac{k_i}{m \cdot s^2 - k_s} \quad (2.6)$$

Die Übertragungsfunktion $G_m(s)$ einer Magnetlagerstrecke besitzt einen Pol in der rechten Halbebene und ist daher instabil. Der Kraft-Weg-Faktor k_s kann dabei als 'negative Federsteifigkeit' betrachtet werden. Das heisst, dass bei kleinen Auslenkungen aus dem labilen Gleichgewichtspunkt (Arbeitspunkt) der Körper entweder zum Elektromagneten gezogen wird oder nach unten fällt. Für stabiles Schweben braucht es also ein Regelsystem, welches den Strom i entsprechend nachführt.

Regelung von aktiven Magnetlagern

Abb. 2.5 zeigt das Blockschaltbild des geschlossenen Regelkreises mit Positionsregler und unterlagertem Stromregelkreis. Mit der Dämpfung d_s ist, im Gegensatz zur vereinfachten Modellierung von oben, die geschwindigkeitsabhängige Dämpfungseigenschaft des den ferromagnetischen Körper umgebenden Mediums berücksichtigt.

Der Stromregelkreis wird näherungsweise als Verzögerungsglied erster Ordnung modelliert. Da die elektrische Zeitkonstante T_L normalerweise viel kleiner als die mechanische Zeitkonstante T_m ist, kann die Verzögerung des Stromreglers vernachlässigt werden.

$$T_m = \sqrt{\frac{m}{k_s}} \gg T_L \quad (2.7)$$

Eine Magnetlagerstrecke weist ein doppelt integrierendes Verhalten auf, weshalb ein Regler mit einer Nullstelle in der Übertragungsfunktion notwendig ist. Im einfachsten Fall handelt es sich dabei um einen PD-Regler der Form:

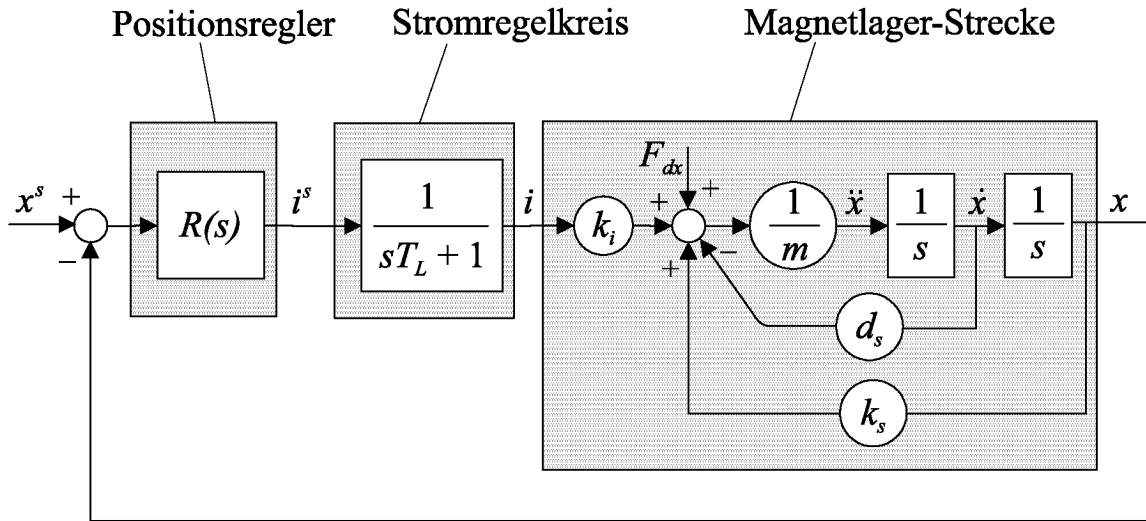


Abb. 2.5: Regelstruktur eines aktiven Magnetlagers

$$R(s) = \frac{i(s)}{x^s(s) - x(s)} = D_R \cdot s + P_R \quad (2.8)$$

Betrachtet man die Störübertragungsfunktion $G_d(s)$ des geschlossenen Regelkreises, ist wie bei passiven Magnetlagern die Charakteristik eines Feder-Masse-Systems zu erkennen:

$$G_d(s) = \frac{x(s)}{F_{dx}(s)} = \frac{1}{m \cdot s^2 + \underbrace{(k_i \cdot D_R + d_s)}_d \cdot s + \underbrace{(k_i \cdot P_R - k_s)}_k} \quad (2.9)$$

Die Steifigkeit k und die Dämpfung d können jedoch einfach über die Regelparameter P_R und D_R eingestellt werden, wobei der *Signal-Rausch-Abstand des Positionsmesssignals* die regeltechnisch erreichbare Steifigkeit und Dämpfung limitiert.

Aktive Magnetlager

Will man einen ferromagnetischen Körper unabhängig von einer Gegenkraft (Gewichtskraft beim schwebenden Körper) vollständig in einer Richtung magnetisch lagern, muss eine Anordnung gemäss Abb. 2.6 ge-

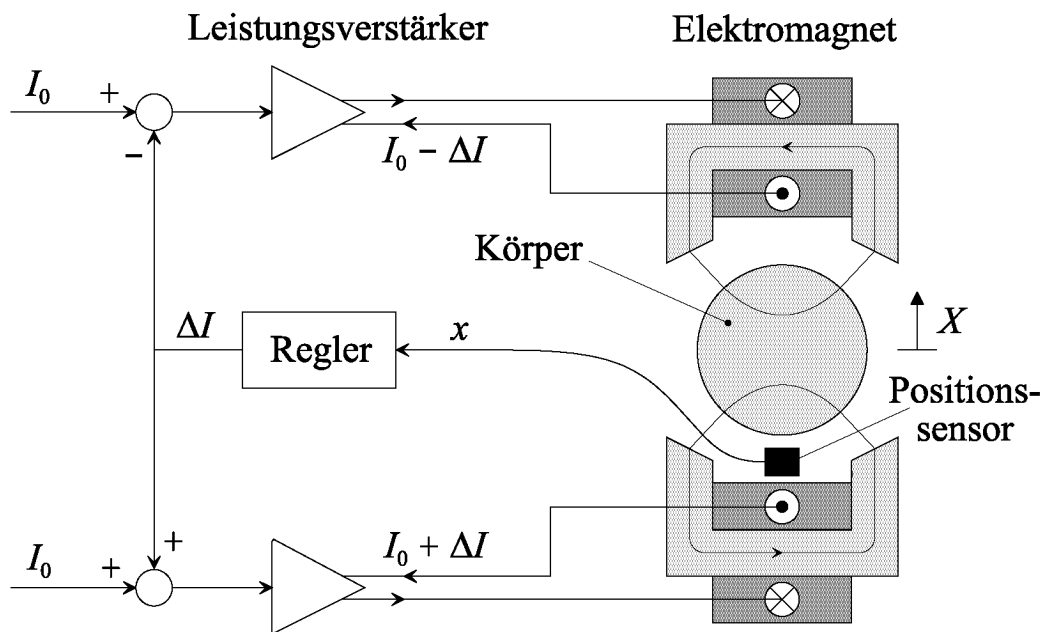


Abb. 2.6: Aktives Magnetlager für eine Richtung

wählt werden. In dieser Ausführungsform erzeugen beide Elektromagnete anziehende Kräfte, indem sie durch den Strom I_0 vormagnetisiert werden. Um eine Kraft in x -Richtung zu erzeugen, gibt der Regler einen Differenzstrom ΔI vor, welcher die Magnetisierung im einen Elektromagneten erhöht und im anderen verringert.

Zur magnetischen Lagerung von weiteren Freiheitsgraden wird diese Anordnung entsprechend vervielfältigt. Je nach Einsatzgebiet und Anforderungen wurden und werden verschiedenste Bauformen entwickelt, wobei insbesondere die Kostenreduktion im Vordergrund steht. Dazu werden bei Mehrachsenlagern Synergien ausgenutzt und/oder Standardkomponenten eingesetzt.

2.1.3 Lagerlose Motoren

Können in einem Motor mit Hilfe zusätzlicher Einrichtungen sowohl das Drehmoment als auch nach Betrag und Richtung einstellbare radiale Kräfte erzeugt werden, spricht man vom lagerlosen Motor. Diese Bezeichnung wurde in [Bich90] eingeführt und bedeutet keineswegs das Fehlen von Lagerkräften, sondern weist darauf hin, dass ausserhalb des Motors keine Lager benötigt werden.

Grundgesetz

Wie können Magnetlager und Antrieb integriert werden? In einem Drehfeldmotor mit der Polpaarzahl p_1 können steuerbare Querkräfte mit einer Zusatzwicklung der Polpaarzahl

$$p_2 = p_1 \pm 1 \quad (2.10)$$

erzeugt werden [Herm74, Herm75]. Diese radialen Kräfte sind die Summe von *Lorentz-* und *Maxwell-Querkräften* [Schu96].

Maxwell-Querkräfte

Maxwell-Kräfte treten in einem magnetischen Kreis an den Grenzflächen von Materialien mit unterschiedlicher Permeabilität auf. Die Kraft dF_M auf ein infinitesimales Grenzflächenelement dA zwischen Luftspalt und hochpermeablem Material ($\mu_r \gg 1$), durch das die Induktion B senkrecht hindurch tritt, berechnet sich aus der Maxwellschen Formel:

$$dF_M = \frac{B^2 dA}{2\mu_0} \quad (2.11)$$

Die Kraft ist dabei senkrecht zum Grenzflächenelement dA in den Luftspalt gerichtet.

In einem konventionellen Motor erzeugt das Antriebsfeld Maxwellkräfte über dem Umfang des Rotors, wobei sich diese gesamthaft aufheben, falls der Rotor exakt zentriert ist. Bei einer Auslenkung aus dieser Zentrumslage treten Querkräfte auf, welche als magnetische Zugkräfte bezeichnet werden [Wied67].

Für den Fall einer Antriebs-Polpaarzahl $p_1 = 1$ und einer Lager-Polpaarzahl $p_2 = 2$ ist in Abb. 2.7 die Realisierung von Maxwell-Querkräften dargestellt. Im Querschnitt links wird eine Kraft in x -Richtung erzeugt, indem die Flussdichte im Luftspalt rechts vom Rotor erhöht und links davon abgeschwächt wird. In y -Richtung heben sich die lokalen Kraftwirkungen des überlagerten Magnetflusses gesamthaft auf.

Wird das 4-polige Lagerfeld um 45° gedreht, wie im rechten Querschnitt abgebildet, erhält man eine Kraft in y -Richtung. Damit ist es

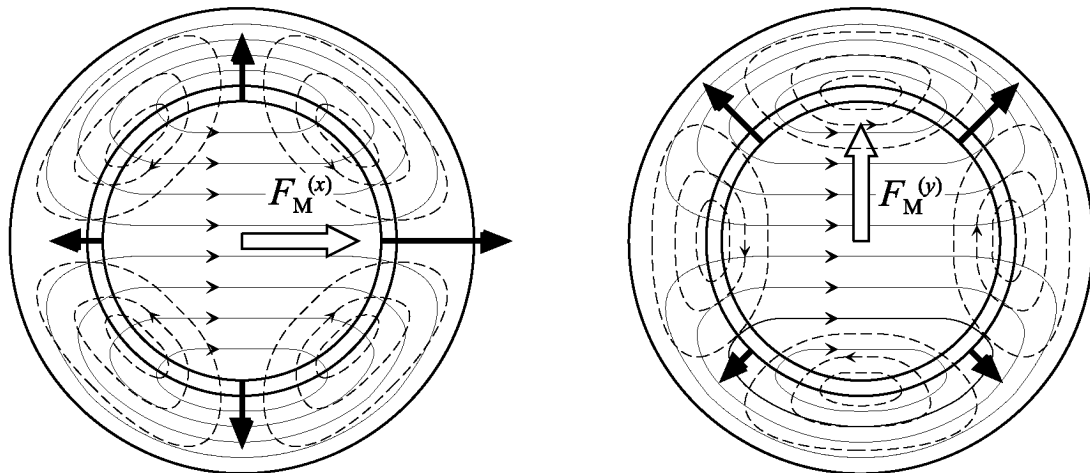


Abb. 2.7: Maxwell-Querkraftbildung für $p_1 = 1$ und $p_2 = 2$

möglich radiale Maxwell-Kräfte in jeder beliebigen Richtung zu erzeugen.

Lorentz-Querkräfte

Die Kraft dF_L auf einen vom Strom I durchflossenen Leiter der Länge dl im Magnetfeld mit der Flussdichte B berechnet sich gemäss

$$dF_L = B \cdot I \cdot dl \quad (d\mathbf{l} \perp \mathbf{B}), \quad (2.12)$$

wobei der Leiter senkrecht zur Feldrichtung steht. Diese Kraft wird als Lorentz-Kraft bezeichnet und bildet die Basis für die Berechnung des Drehmoments in elektrischen Maschinen. Bei genutzten Motoren handelt es sich eigentlich um eine Maxwell-Kraftwirkung, da der Leiter in der Nut wegen der hohen Permeabilität des Eisens praktisch im feldfreien Raum liegt. Die resultierende Kraft hat jedoch denselben Wert, wie wenn sich der Leiter im Luftspalt befinden würde [Küpf93].

In Abb. 2.8 ist die Realisierung von Lorentz-Querkräften veranschaulicht. Sie zeigt eine 2-polige Antriebsflussverteilung mit einem 4-poligen Lagerstrombelag auf dem Innendurchmesser des Stators. Der Lagerstrombelag bewirkt tangential am Rotor angreifende Lorentzkräfte, welche in ihrer Summe eine Querkraft ergeben. Der linke Querschnitt zeigt den Strombelag für eine Kraft in x -Richtung. Rechts ist zu sehen,

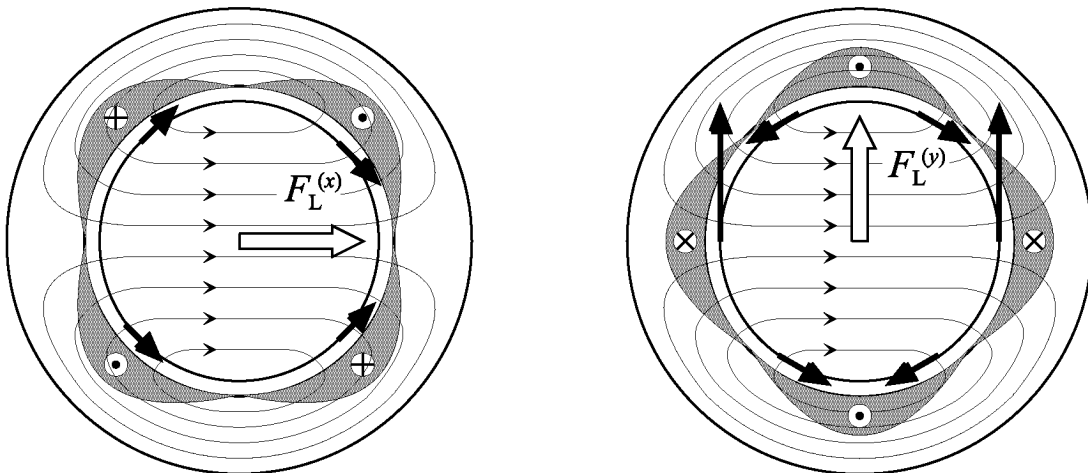


Abb. 2.8: Lorentz-Querkraftbildung für $p_1 = 1$ und $p_2 = 2$

dass bei einer 45° -Drehung des Strombelags die resultierende Lorentz-Querkraft in y -Richtung wirkt.

Zusammenfassung der Querkräfte

Für den Fall $p_2 = p_1 + 1$ addieren sich Lorentz- und Maxwell-Querkräfte (vergl. Abb. 2.7 mit Abb. 2.8); umgekehrt zeigen für $p_2 = p_1 - 1$ die beiden Kraftwirkungen in entgegengesetzter Richtung [Schö93]. Der erste Fall ist deshalb vorteilhafter, wobei auch für $p_2 = p_1 - 1$ funktionsfähige lagerlose Motoren aufgebaut wurden [Bich90, Silb00].

Für die Positionsregelung im lagerlosen Motor wird zusätzlich zur Information der Rotorposition auch jene der Winkellage des Antriebsfeldes benötigt. Bei einer konstanten Störkraft in eine Richtung muss das Lagerfeld mit dem Antriebsfeld mitdrehen, um die Richtung der Lagerkraft beizubehalten. Dies macht den Einsatz des lagerlosen Motors bei hohen Drehzahlen problematischer, da die Induktivität der Lagerwicklung die maximale zeitliche Stromänderung beschränkt.

Die radiale Stabilisierung des Rotors durch Lagerkräfte, welche im lagerlosen Motor selbst erzeugt werden, vereinfacht den mechanischen Aufbau eines magnetgelagerten Antriebs. Da das Antriebsfeld zur Lagerung verwendet werden kann, ist keine Vormagnetisierung nötig und beide Wicklungssysteme (Antrieb und Lager) nutzen denselben Eisenkreis.

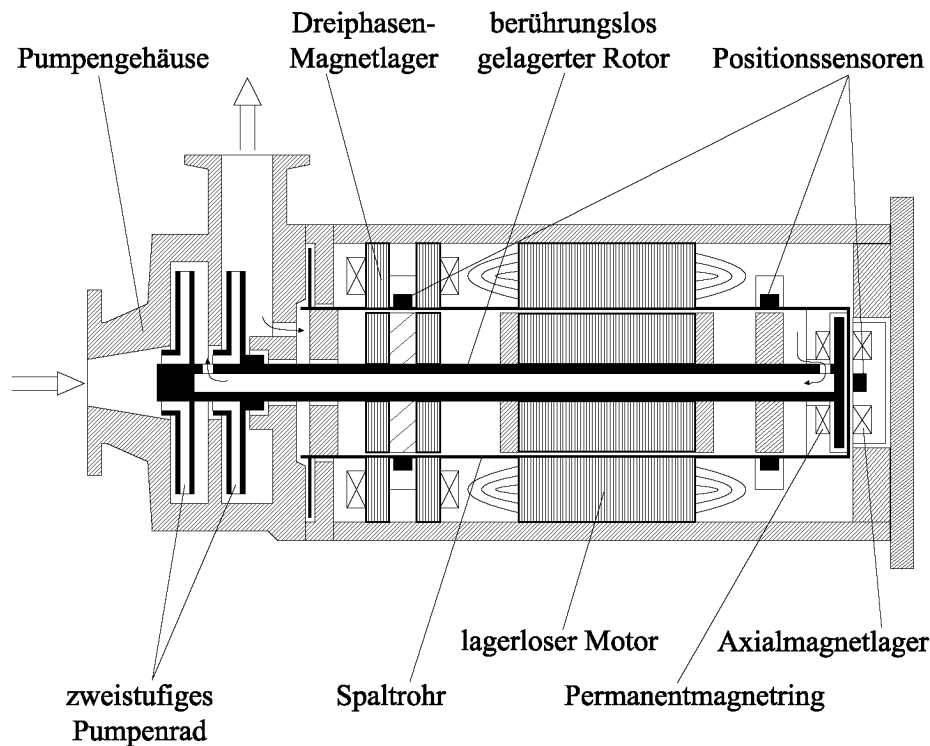


Abb. 2.9: Lagerlose Spaltrohrpumpe [Gemp97]

2.1.4 Magnetgelagerte Pumpen

Der grosse Vorteil von magnetgelagerten Antrieben für Pumpen liegt in der berührungslosen Lagerung, welche mechanischen Abrieb ausschliesst und eine hermetische Kapselung des Pumpenraums zulässt. Abb. 2.9 zeigt den Querschnitt durch die lagerlose Spaltrohrpumpe von Gemp [Gemp97], bei welcher alle sechs Freiheitsgrade aktiv magnetgelagert sind. Die hermetische Kapselung des Pumpenraums bildet ein dünnes Spaltrohr, welches im Luftspalt zwischen Rotor und Stator liegt. Der Rotor wird also komplett vom Fördermedium umspült.

Radial wird der Rotor durch ein Dreiphasen-Magnetlager und einen lagerlosen Motor stabilisiert. Der Motor treibt zudem das zweistufige Flügelrad an. Ein permanentmagnetisch vorgespanntes Axialmagnetlager nimmt die axialen Schubkräfte des Flügelrades auf. Dieser Aufbau verfolgte verschiedene Ansätze zur Reduktion der Baugrösse und der Kosten:

- Die Integration eines Radiallagers und des Antriebs im lagerlosen

Motor reduziert die Baulänge, da der Eisenkreis doppelt genutzt wird.

- Der Einsatz von handelsüblichen Dreiphasenumrichtern sowohl für den Motor, als auch für das Dreiphasen-Radiallager reduziert die Elektronikkosten.
- Die permanentmagnetische Vorspannung des Axiallagers reduziert sowohl den Elektronikaufwand als auch die thermischen Verluste und lässt eine kompaktere Bauweise zu.

Trotzdem sind vollständig aktiv magnetgelagerte Pumpsysteme aufwändig, denn für jeden Freiheitsgrad sind eine entsprechende Positionsensorik, ein Regler höherer Ordnung und Leistungsverstärker nötig. Die Komplexität ist der grosse Unterschied zu passiven Magnetlagern, weshalb diese zur Systemvereinfachung eingesetzt werden. Dabei wird ein Teil der Freiheitsgrade eines Rotors durch passive Magnetlager stabilisiert.

2.2 Der lagerlose Scheibenmotor

Der lagerlose Scheibenmotor wurde von Barletta entwickelt [Barl98]. Seine Arbeit bildet die Grundlage für die folgende Beschreibung dieses magnetgelagerten Antriebs. Abschliessend werden die Vor- und Nachteile des Scheibenmotors als Antrieb eines Pumpsystems für die Halbleiterfertigung diskutiert.

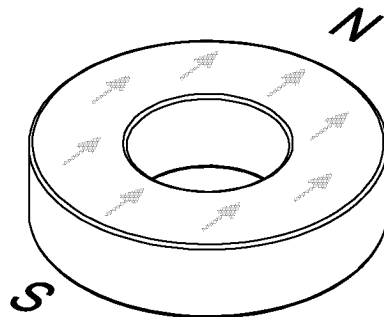


Abb. 2.10: Diametral magnetisierter zweipoliger Magnetring als Scheibenrotor

2.2.1 Reduzierte Komplexität

Von einem Scheibenrotor spricht man, wenn das Trägheitsmoment J_z des Rotors um die Drehachse grösser ist, als das Trägheitsmoment J_r um eine Achse senkrecht zur Drehachse.

$$J_z > J_r \quad (2.13)$$

Abb. 2.10 zeigt einen zweipoligen Scheibenrotor, welcher aus permanentmagnetischem Material besteht und diametral magnetisiert ist. Wird dieser Rotor in einen Stator eingesetzt, können *Reluktanzkräfte* zur mechanischen Stabilisierung der Scheibe genutzt werden.

Bei einer axialen Auslenkung, wirken Reluktanzkräfte dieser Auslenkung entgegen und stabilisieren den Rotor (Abb. 2.11 oben). Ebenso lassen sich Verkippungsbewegungen passiv stabilisieren (Abb. 2.11 unten). Die Eigenschaften dieser passiven Reluktanzlager sind bereits in Kap. 2.1.1 beschrieben und gelten auch für den Scheibenrotor.

Der Stator kann nun mit dem Wicklungssystem eines lagerlosen Motors versehen werden. Dies ermöglicht sowohl radiale Lagerkräfte als auch ein Drehmoment auf den Rotor zu übertragen. Der Scheibenrotor erlaubt demnach die passive Stabilisierung von drei Freiheitsgraden und

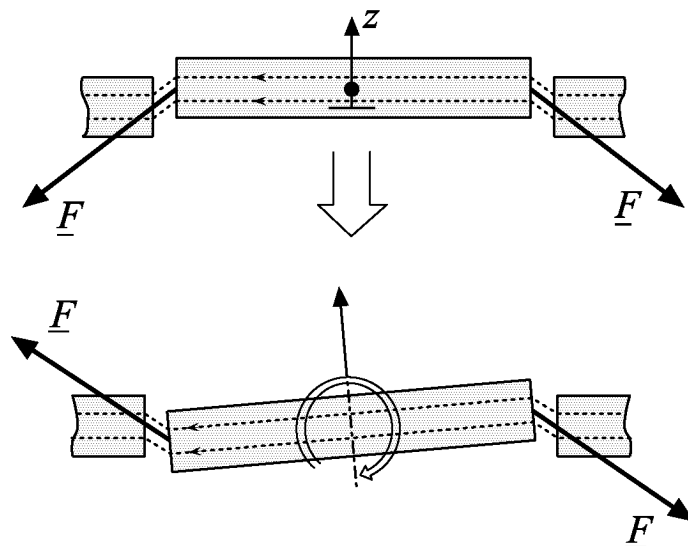


Abb. 2.11: Prinzip des passiven Axiallagers (oben) und des passiven Kipplagers (unten)

reduziert die aktive Magnetlagerung auf zwei radiale Bewegungsrichtungen und den Antrieb.

Wie in [Schö93] gezeigt wurde, kann im lagerlosen Motor über den Magnetisierungsfluss des Antriebs die magnetische Vorspannung und damit die Steifigkeit der Radiallager eingestellt werden. Diese magnetische Vorspannung ist aber auch für die Steifigkeit der passiven Reluktanzlager (Axiallager und Kipplager) im lagerlosen Scheibenmotor entscheidend. Ein *hoher Magnetisierungsfluss* verbessert deshalb das gesamte Lagerverhalten.

Barletta zeigt, dass für grosse Luftspalte bei beschränkter Baugrösse durch Permanentmagnete eine höhere Luftspalt-Flussdichte erreicht wird als durch elektromagnetische Induktion [Barl98]. Die Vorteile hoher Lagersteifigkeiten und Drehmomente, bei geringeren Verlusten stehen jedoch zusätzlichen Kosten für einen Neodym-Eisen-Bor Magnetring gegenüber.

Für einen sinnvollen Einsatz des lagerlosen Scheibenmotors als Pumpenantrieb in der Halbleiterfertigung ist die *axiale Lagersteifigkeit* und der *magnetische Luftspalt* entscheidend. Einerseits muss die axiale Lagerkraft den hydraulischen Axialschub aufnehmen (Kap. 4), andererseits wird der magnetische Luftspalt für eine dicke Rotorummantelung benötigt (Kap. 5).

Der Tempelmotor

Für die Realisierung des lagerlosen Scheibenmotors wurde ein zweipoliger diametral magnetisierter Magnetring gewählt ($p_1 = 1$). Gemäss [Bara89] erzeugt dieser eine sinusförmige Feldverteilung im Luftspalt, was auch bei offener Nutung des Motors ein relativ kleines Rastmoment ergibt. Zudem kann der Rotor einfach und kostengünstig an einem Stück hergestellt werden.

Beim Antrieb des lagerlosen Motors handelt es sich um einen Synchronmotor, dessen Magnetisierungsfluss durch den Permanentmagnet-Rotor erzeugt wird. Abb. 2.12 zeigt den lagerlosen Scheibenmotor mit zurückgezogenen Wicklungen (Tempelmotor). Der Stator ist zusammengesetzt aus konzentrisch angeordneten L-förmigen Eisenkernen und einem ringförmigen Eisenrückschluss. Die Wicklungen sind beim Tempelmotor unterhalb der Ebene des Rotors angeordnet und lassen des-

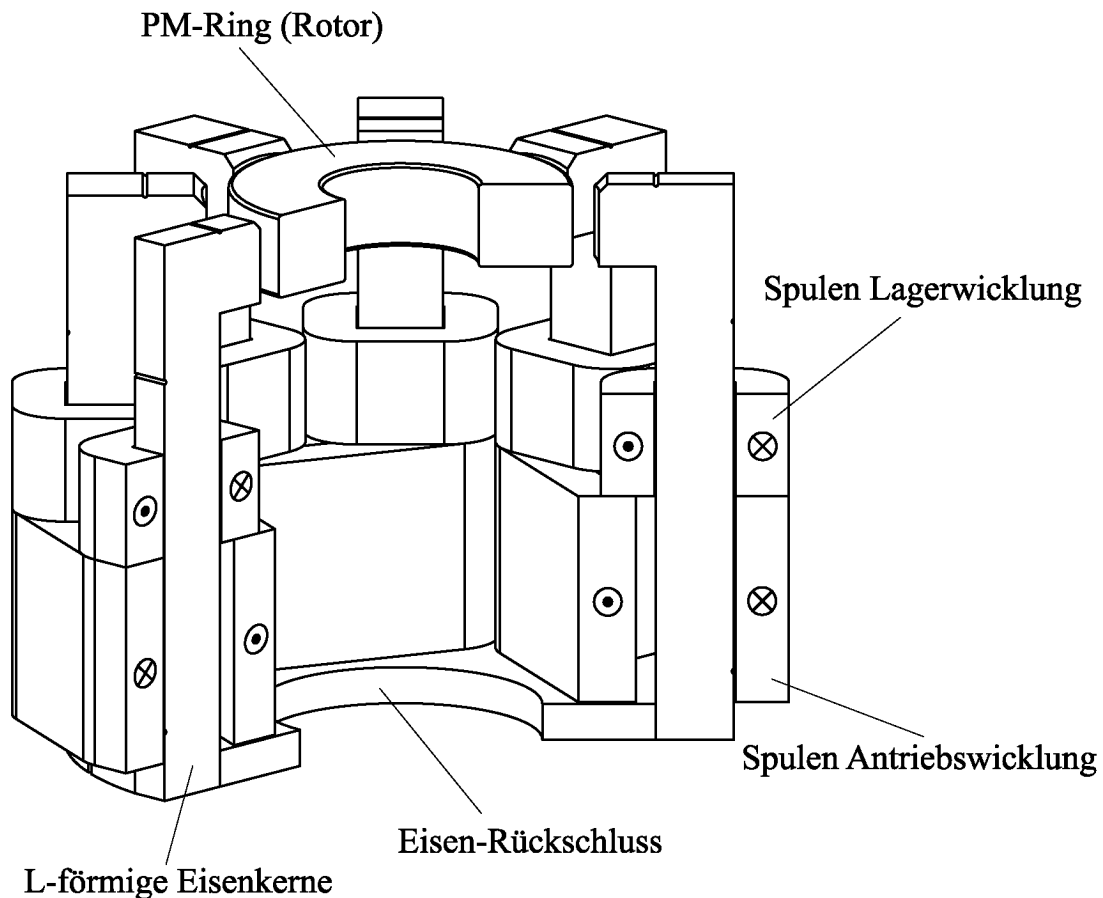


Abb. 2.12: Tempelmotor mit konzentrierten Wicklungen

halb konstruktive Freiheiten bei der Gestaltung einer Kreiselpumpe. Die Wicklungssysteme von Lager und Antrieb sind abgesehen vom gemeinsam genutzten Magnetkreis unabhängig voneinander. Dies hat den Vorteil, dass sie auch unabhängig voneinander betrieben werden können. Grundsätzlich ist es aber auch möglich, Lagerkräfte und Drehmoment mit einem einzigen Wicklungssystem aufzubringen [Silb00].

2.2.2 Modellierung und Regelung

Nachfolgend werden die Grundlagen des lagerlosen Permanentmagnet-Synchronmotors beschrieben. Die mathematischen Zusammenhänge sind aus mehreren Arbeiten entnommen worden [Barl98, Bich90, Schö93, Bicl99]. In erster Linie soll ein Systemüberblick gegeben werden, welcher die Grundlage bildet für die weiteren Kapitel.

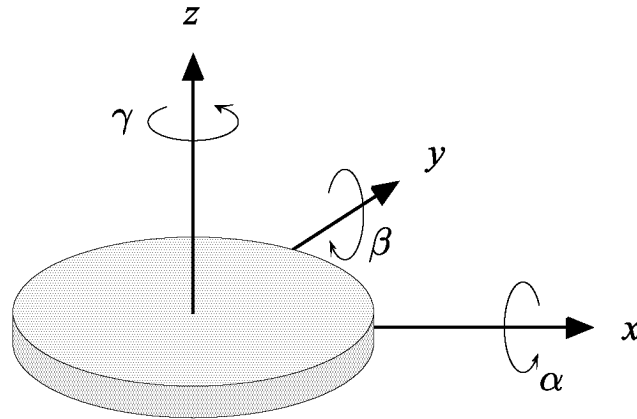


Abb. 2.13: Koordinatensystem für die Lage des Rotors

Koordinatensysteme

Die Lage des Rotors wird mit den Positionskoordinaten xyz und den Winkeln $\alpha\beta\gamma$ angegeben (Abb. 2.13). In der Nulllage (Ursprung) schwebt der Rotor in der geometrischen Mitte der Motorbohrung wie in Abb. 2.12. Bei vollständiger Symmetrie des Magnetfeldes und der Mechanik entspricht dies dem instabilen Kräftegleichgewichtspunkt, der so genannten magnetischen Mitte, und dem Schwerpunkt des Rotors. Im realen System liegen die geometrische Mitte, die magnetische Mitte und der Schwerpunkt nicht im selben Punkt, was im Betrieb zu Vibrationen führt und nötigenfalls kompensiert werden kann [Bets90]. Die elektrischen Grössen des lagerlosen Motors werden als Vektorgrössen im Statorkoordinatensystem S oder im Feldkoordinatensystem F dargestellt, wobei es sich um orthogonale dq -Zweiphasenersatzsysteme handelt. Die Umrechnung zwischen Stator- und Feldkoordinatensystem erfolgt über eine Drehtransformation um den Feldwinkel γ_F :

$$\underline{\underline{a}}^{(F)} = \underline{\underline{D}}(\gamma_F) \cdot \underline{\underline{a}}^{(S)} \quad (2.14)$$

$$\underline{\underline{D}}(\gamma_F) = \begin{pmatrix} \cos(\gamma_F) & \sin(\gamma_F) \\ -\sin(\gamma_F) & \cos(\gamma_F) \end{pmatrix} \quad \underline{\underline{D}}(\gamma_F)^{-1} = \underline{\underline{D}}(-\gamma_F) \quad (2.15)$$

$$\underline{\underline{a}}^{(S)} = \underline{\underline{D}}(\gamma_F)^{-1} \cdot \underline{\underline{a}}^{(F)} = \underline{\underline{D}}(-\gamma_F) \cdot \underline{\underline{a}}^{(F)} \quad (2.16)$$

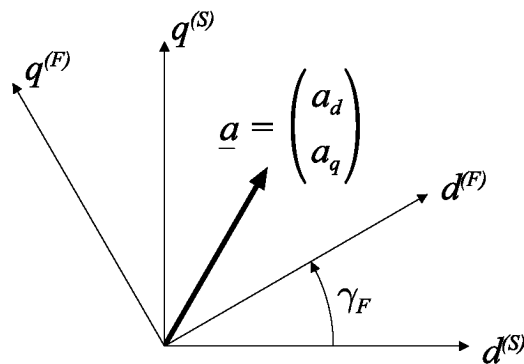


Abb. 2.14: Zusammenhang zwischen Stator-^(S) und Feldkoordinatensystem^(F)

Diese Winkeltransformation wird insbesondere für die feldorientierte Regelung benötigt. Abb. 2.14 zeigt den Zusammenhang zwischen Stator- und Feldkoordinaten grafisch. Das gültige Koordinatensystem wird bei allen Vektorgrößen hochgestellt in Klammern angegeben. Die Komponenten im Feldkoordinatensystem werden mit den Indizes d , q und die Komponenten im Statorkoordinatensystem mit den Indizes D , Q gekennzeichnet.

Für die Beschreibung des lagerlosen Motors interessieren zwei verschiedene elektrische Systeme; das Antriebssystem mit der Polpaarzahl p_1 und das Lagersystem mit der Polpaarzahl $p_2 = p_1 \pm 1$. Die Größen des Antriebssystems sind mit dem Index 1, jene des Lagersystems mit dem Index 2 gekennzeichnet.

Der mechanische Rotorwinkel γ und der Feldwinkel γ_F stehen in folgender Beziehung zueinander:

$$\gamma_F = p_1 \cdot \gamma \quad \omega_e = p_1 \cdot \omega_m \quad (2.17)$$

Entsprechend sind auch die mechanische und die elektrische Winkelgeschwindigkeit (ω_m und ω_e) über die Polpaarzahl p_1 gekoppelt.

Antrieb

Beim Antrieb handelt es sich um einen permanentmagnetisch erregten Synchronmotor. Ausgehend von der durch den Magnetrotor erzeugten sinusförmigen Feldverteilung, kann die Flussdichte B_{PM} im Luftspalt

abhängig vom geometrischen Winkel φ und dem Rotordrehwinkel γ vereinfacht angegeben werden:

$$B_{\text{PM}}(\varphi) = \hat{B}_{\text{PM}} \cdot \cos(p_1\varphi - \gamma) \quad (2.18)$$

Aufgrund der kurzen Rotorlänge l ergeben sich erhebliche Streuflüsse, welche zum Beispiel über eine dreidimensionale Magnetfeldsimulation quantifiziert werden können. Eine Abschätzung der Flussdichte B_{PM} kann auch aufgrund von Messungen an bestehenden Systemen gemacht werden.

Aus der sinusförmigen Feldverteilung im Luftspalt ergibt sich für den Betrag des umlaufenden Magnetisierungsflusses $\underline{\Phi}_{\text{PM}}$, wobei r den Radius und l die Länge bzw. Höhe des Scheibenrotors bezeichnen:

$$\Phi_{\text{PM}} = 2 \cdot l \cdot r \cdot \hat{B}_{\text{PM}} \quad (2.19)$$

Der verkettete Fluss $\underline{\Psi}_{\text{PM}}$ berechnet sich mit der Windungszahl w und der Polpaarzahl p des Wicklungssystems gemäss:

$$\underline{\Psi}_{\text{PM}} = \frac{w}{p} \cdot \xi \cdot \underline{\Phi}_{\text{PM}} \quad (2.20)$$

Dabei gibt der Wicklungsfaktor ξ den Anteil des Magnetisierungsflusses Φ_{PM} an, welcher durch das Wicklungssystem erfasst wird [Vogt88].

Das rotierende Feld des Magnetings induziert eine sinusförmige Spannung in den Antriebswicklungen. Im feldorientierten Koordinatensystem verschwindet die d -Komponente dieses Vektors \underline{u}_{i1} und die q -Komponente berechnet sich mit der Spannungskonstanten c_u nach:

$$u_{i1q} = p_1 \cdot \Psi_{\text{PM}} \cdot \omega_m = c_u \cdot \omega_m \quad (2.21)$$

Da der Magnetisierungsfluss $\underline{\Phi}_{\text{PM}}$ permanentmagnetisch erzeugt wird, liefert die d -Komponente des feldorientierten Stromes \underline{i}_1 keinen Beitrag zum Drehmoment und wird deshalb null gesetzt ($i_{1d} = 0$). Das Drehmoment M hängt somit alleine von der q -Komponente des Antriebsstromes \underline{i}_1 ab und beträgt mit der Drehmomentkonstanten c_m :

$$M = \frac{m_1 \cdot p_1}{2} \cdot i_{1q} \cdot \Psi_{\text{PM}} = c_m \cdot i_{1q} \quad (2.22)$$

Ein Vergleich zwischen Gl. (2.21) und Gl. (2.22) ergibt, dass die Spannungskonstante c_u und die Drehmomentkonstante c_m gekoppelt sind:

$$c_m = \frac{m_1}{2} \cdot c_u = \frac{m_1 \cdot p_1}{2} \cdot \Psi_{\text{PM}} \quad (2.23)$$

Dieser Zusammenhang kann auch anschaulich bei verlustfreier Leistungsübertragung im Motor gezeigt werden. Die vom Motor aufgenommene elektrische Antriebsleistung P_e entspricht der auf den Rotor übertragenen mechanischen Antriebsleistung P_m :

$$P_e = P_m \quad (2.24)$$

$$\frac{m_1}{2} \cdot u_{i1q} \cdot i_{1q} = M \cdot \omega_m \quad (2.25)$$

$$\frac{m_1}{2} \cdot c_u \cdot \omega_m \cdot i_{1q} = c_m \cdot i_{1q} \cdot \omega_m \quad (2.26)$$

Bei den realisierten Systemen sind sowohl Antrieb, als auch Lager als zweiphasige Wicklungssysteme ausgeführt ($m_1 = m_2 = 2$). Die Abbildung der feldorientierten Grössen auf die statororientierten Wicklungssysteme benötigt deshalb nur eine einfache Drehtransformation um den Feldwinkel γ_F (Gl. (2.14)).

Drehzahlregelkreis

Um bei Kreiselpumpen eine hohe Dynamik zu erreichen, wird die Drehzahl im feldorientierten Koordinatensystem geregelt [Blas72]. Grundsätzlich unterscheidet man zwei Arten der feldorientierten Regelung:

- Bei *indirekter Feldorientierung* werden die Stromregler in Statorkoordinaten realisiert. Dabei muss jedoch dauernd dem sinusförmigen Sollstrom nach geregelt werden.
- Bei *direkter Feldorientierung* werden die Stromregler im Feldkoordinatensystem gerechnet, wobei nur Amplitudenänderungen des Sollstromzeigers nachzuregeln sind.

Abb. 2.15 zeigt die Struktur des Drehzahlregelkreises mit unterlager-tem Stromregelkreis, welcher in erster Näherung als Verzögerungsglied

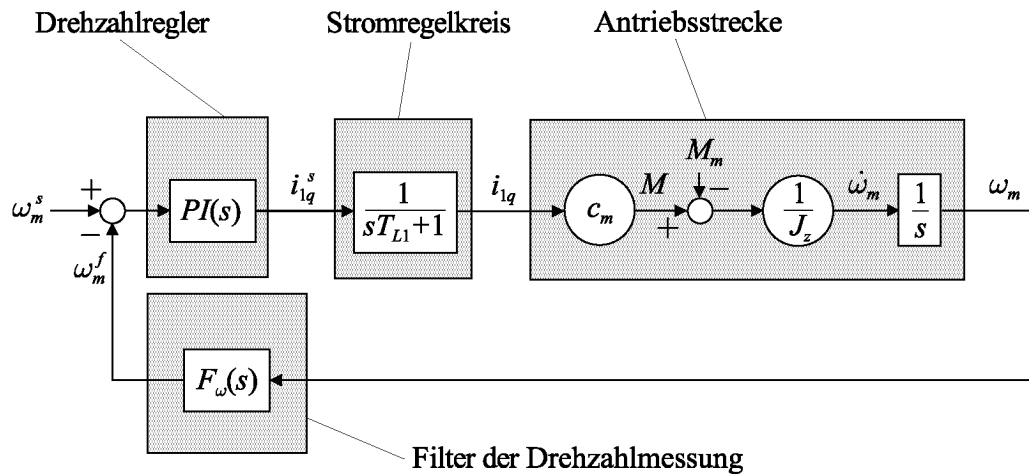


Abb. 2.15: Struktur des Drehzahlregelkreises

erster Ordnung modelliert werden kann. Der Feldwinkel γ_F und damit die Drehzahl wird indirekt über eine Feldmessung mit Hallensoren bestimmt. Gemessen wird dabei die Streuinduktion \underline{B}_s des Permanentmagnetrotors. Unter Vernachlässigung der Ankerrückwirkung gilt bei sinusförmiger Feldverteilung für den Feldwinkel γ_F :

$$\gamma_F = \arctan \left(\frac{B_{sQ}}{B_{sD}} \right) \quad (2.27)$$

$$\omega_m = \frac{1}{p_1} \cdot \frac{d\gamma_F}{dt} \quad (2.28)$$

Aus der zeitlichen Ableitung des Feldwinkels γ_F ergibt sich die Winkelgeschwindigkeit ω_m des Rotors, welche noch entsprechend gefiltert wird.

Die radiale Lagerung

Die radiale Position (xy -Ebene) des Scheibenrotors wird aktiv magnetgelagert. Die magnetische Kraftwirkung kann analog Kap. 2.1.2 modelliert werden. Die auf den Rotor wirkende Lagerkraft \underline{F}_m berechnet sich gemäss:

$$\underline{F}_m = k_i \cdot \underline{i}_2^{(F)} + k_s \cdot \underline{s} = k_i \cdot \begin{pmatrix} i_{2d} \\ i_{2q} \end{pmatrix} + k_s \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (2.29)$$

$$k_i = (k_M + k_L) \cdot \frac{m_2}{4 \cdot r} \cdot w_2 \cdot \xi_2 \cdot \Phi_{PM} \quad (2.30)$$

Der Kraft-Strom-Faktor k_i setzt sich aus dem Maxwell-Faktor k_M und dem Lorentz-Faktor k_L zusammen. Da für die Realisierung die Polpaarzahl $p_2 = p_1 + 1 = 2$ gewählt wurde, addieren sich die beiden Faktoren (Kap. 2.1.3). Der Kraft-Weg-Faktor k_s modelliert den magnetischen Zug im Motor.

Positionsregelkreise

Aus Gl. (2.29) ist ersichtlich, dass im lagerlosen Motor der feldorientierte Lagerstrom i_2 direkt eine statororientierte Magnetlagerkraft F_m erzeugt. Das heisst, die d -Komponente i_{2d} erzeugt eine Kraft in x -Richtung und die q -Komponente i_{2q} erzeugt eine Kraft in y -Richtung. Dies ermöglicht eine einfache feldorientierte Positionsregelung.

Die radiale Rotorposition wird für jede Achse (x und y) differentiell durch zwei gegenüberliegende Positionssensoren erfasst, wodurch die Linearität des Messsignals verbessert wird. Da die Achsen x und y unabhängig voneinander regelbar sind, ist in Abb. 2.16 nur die Struktur des Positionsregelkreises für die x -Achse abgebildet.

Die Kaskadenstruktur mit unterlagertem Stromregelkreis sowohl für

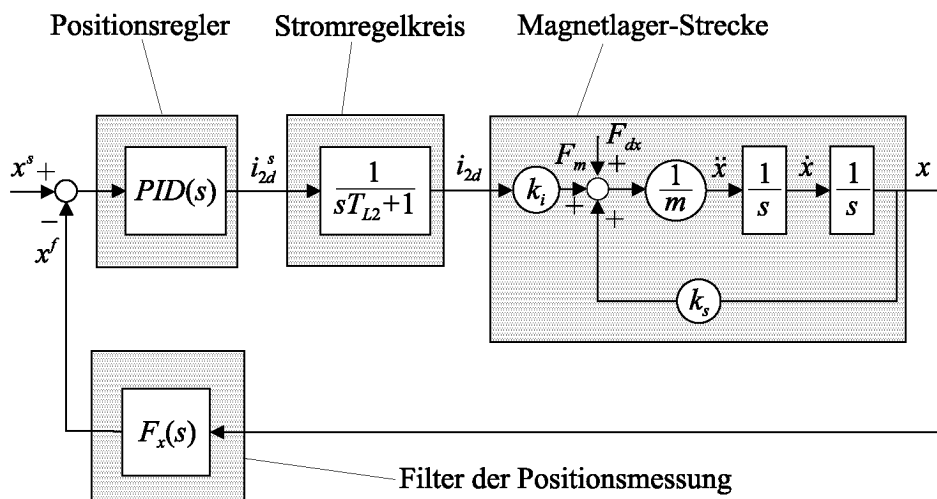


Abb. 2.16: Struktur des Positionsregelkreises für eine Achse des lagerlosen Motors

die Drehzahl als auch für die Position ermöglicht eine einfache Inbetriebnahme, weil die einzelnen Regelkreise sequentiell in Betrieb genommen werden können.

2.2.3 Lagerlose Kreiselpumpe

Abb. 2.17 zeigt als Schnittbild den prinzipiellen Aufbau einer Kreiselpumpe basierend auf dem lagerlosen Scheibenmotor. Das hermetisch dichte Pumpengehäuse ist in die Bohrung des Tempelmotors eingelassen. Der Rotor schwebt innerhalb des Gehäuses, wobei die Magnetlagerung ein Berühren des Pumpengehäuses verhindert. Direkt auf den Scheibenrotor ist das Flügelrad montiert. Eine entsprechende Rotorummantelung schützt den Permanentmagnet vor aggressiven Chemikalien. Im Betriebszustand dreht sich der Rotor um die eingezeichnete Achse, wobei Flüssigkeit vom Einlass zum Auslass gefördert wird.

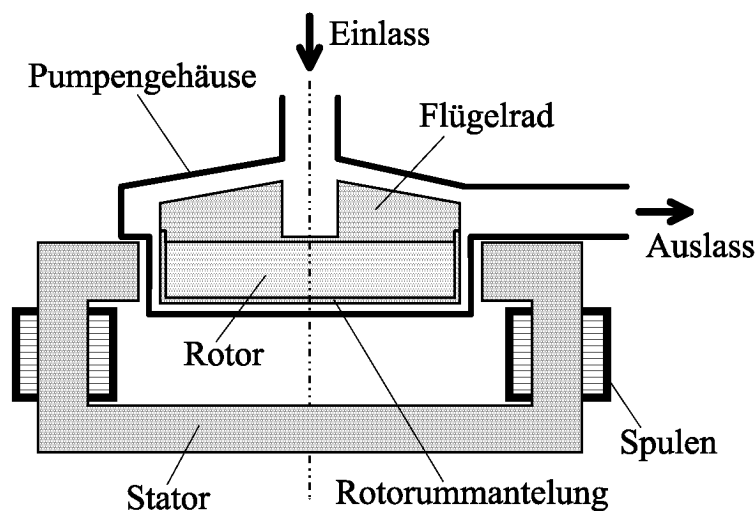


Abb. 2.17: Prinzipieller Aufbau der lagerlosen Kreiselpumpe

2.2.4 Systemübersicht

Abb. 2.18 bietet eine Übersicht über das Gesamtkonzept eines lagerlosen Pumpsystems. Wie in Kap. 2.1.2 können auch hier die selben vier Komponenten unterschieden werden:

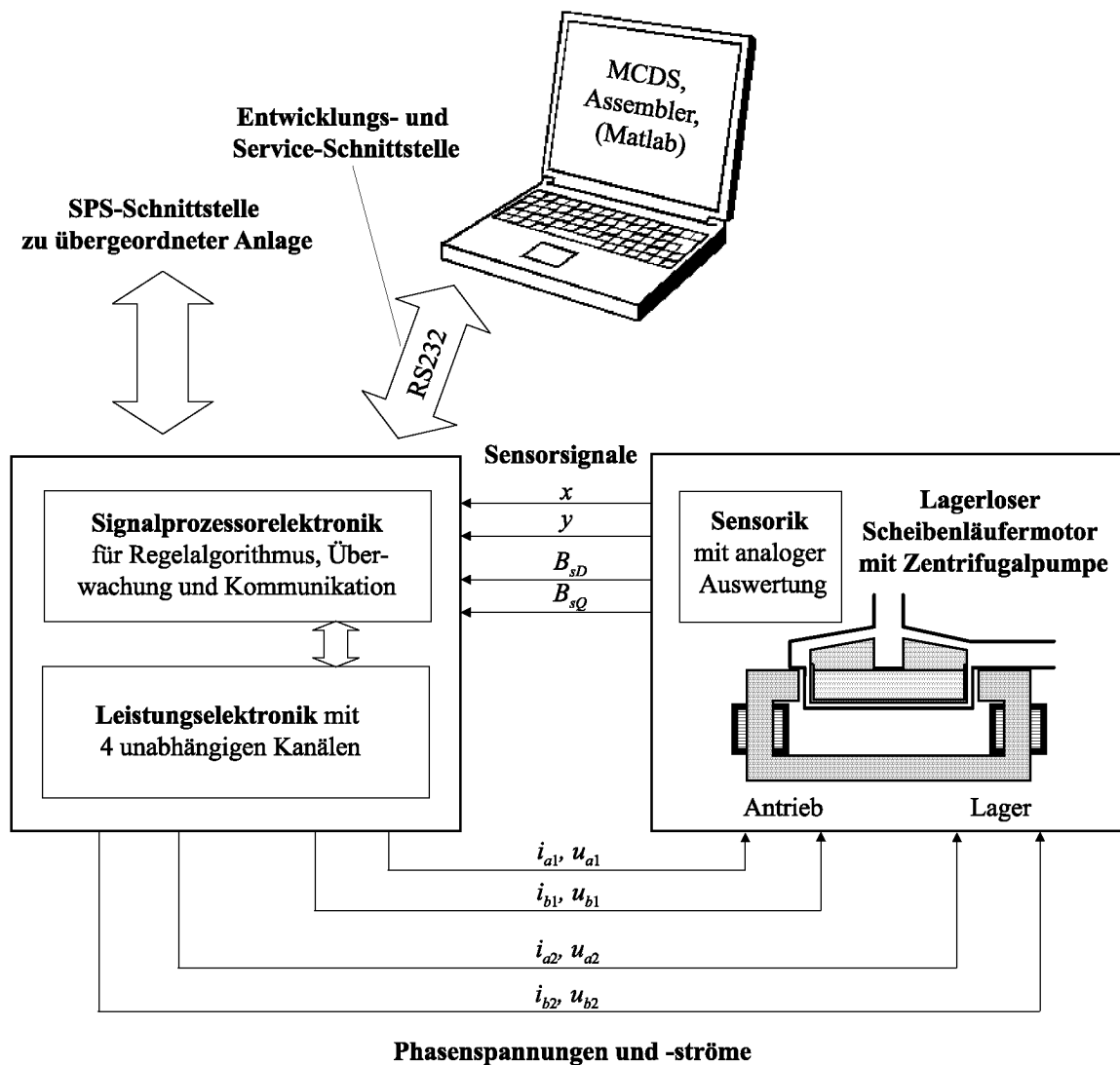


Abb. 2.18: Gesamtkonzept des lagerlosen Pumpsystems

- **Aktor:** Der lagerlose Scheibenmotor erbringt die Förderleistung durch das im hermetischen Gehäuse rotierende Flügelrad.
- **Sensorik:** Die für Lagerung und Antrieb notwendigen Signale werden durch die Sensorelektronik im Motor erfasst, aufbereitet und zum Prozessor übertragen.
- **Regler:** Die Signalprozessorelektronik führt neben dem Regelalgorithmus auch Überwachungs- und Kommunikationsaufgaben aus.

- **Leistungsverstärker:** Die zweiphasigen Wicklungssysteme von Antrieb und Lager werden durch entsprechende Leistungsverstärker angesteuert.

Für die Softwareentwicklung wird eine serielle Schnittstelle zwischen PC und Signalprozessorelektronik benutzt. Diese Schnittstelle kann im Betrieb zudem für Wartungszwecke genutzt werden. Zusätzlich ist eine Kommunikation zur übergeordneten Anlage vorgesehen.

2.2.5 Schlussfolgerungen

Kann das beschriebene Konzept eines magnetgelagerten Pumpsystems auf der Basis des lagerlosen Scheibenmotors die Anforderungen an ein Fördersystem in der Halbleiterfertigung erfüllen? Nachfolgend werden die in Kap. 1.2.2 auf S. 8 aufgeführten Anforderungen diskutiert:

Chemikalienbeständigkeit Durch die Verwendung entsprechender Fluorkunststoffe für die Pumpenteile kann die nötige Chemikalienbeständigkeit erreicht werden (Kap. 5). Der Einsatz bei Temperaturen über 90°C bedarf noch einer Weiterentwicklung des Systems.

Atomare/molekulare Verunreinigung Die hochreinen Flüssigkeiten werden vom metallischen Magnetring getrennt durch eine Rotorummantelung, wobei eine ausreichende Dicke der Ummantelung und somit ein grosser magnetischer Luftspalt entscheidend sind. Auf die Problematik einer dichten Rotorummantelung geht Kapitel 5 näher ein.

Partikelverunreinigung Da der Rotor mit dem Flügelrad berührungslos innerhalb der Kreiselpumpe dreht, werden keine Partikel abgerieben. Entsprechend werden kaum Partikel an die Chemikalien abgegeben und ein Trockenlauf ist problemlos möglich (Kap. 5).

Reproduzierbarkeit Magnetgelagerte Kreiselpumpen liefern im Gegensatz zu Balgpumpen einen kontinuierlichen, regulierbaren Flüssigkeitsstrom, womit gleichmässige Prozessergebnisse erreicht werden.

Hydraulische Leistungsfähigkeit Da der Rotor in axialer Richtung passiv gelagert ist, ist der in einer Kreiselpumpe auftretende Axial Schub hydrodynamisch auszugleichen, um einen berührungslosen Betrieb bei unterschiedlicher hydraulischer Belastung der Kreiselpumpe zu gewährleisten (Kap. 4).

Baugrösse Die Leistungsfähigkeit des Scheibenmotors wird hauptsächlich durch die Verluste limitiert. Entsprechend ist die Baugrösse bestimmt durch die Anwendung und die Kühlung. Für eine Auslegung sind daher Modelle für Verluste und Erwärmung des Scheibenmotors notwendig (Kap. 3).

Zuverlässigkeit Wegen der Magnetlagerung arbeitet das System verschleissfrei und zuverlässig. Eine Auswertung der vorhandenen Messsignale von Position, Winkellage und Strom hilft frühzeitig eine Fehlfunktion zu detektieren und damit Prozessfehler zu vermeiden (Kap. 6).

Sicherheit Der lagerlose Scheibenmotor kann explosionsgeschützt aufgebaut werden, womit ein Betrieb mit brennbaren Chemikalien problemlos ist (Kap. 6).

Lärm, Vibrationen Wegen der elektromechanischen Leistungsübertragung und der kontinuierlichen Drehbewegung entstehen wenig Lärm und Vibrationen. Zusätzlich können Unwuchtkräfte bei Magnetlagern einfach kompensiert werden [Bets90].

Zusatzfunktionen Die Auswertung der Messsignale erlaubt nicht nur eine kontinuierliche Überwachung, sondern auch eine Berechnung von Prozessgrössen, wie Druck, Durchfluss oder Viskosität [Hahn02].

Kapitel 3

Verluste und Erwärmung im Scheibenmotor

Ein Pumpsystem ist ein Energiewandler, welcher die elektrische Versorgungsenergie in hydraulische Förderarbeit umwandelt. Die elektrische Energie vom Netz wird durch Umrichter und Motor in mechanische Energie des rotierenden Flügelrades übertragen. In der Kreiselpumpe wird hydrodynamisch Druck erzeugt, wobei sich entsprechend der hydraulischen Last ein Flüssigkeitsstrom einstellt. Bei jeder Energiewandlung entstehen Verluste, welche meist in Wärme umgesetzt werden. Da durch Verluste einerseits Nutzenergie verloren geht und andererseits die entstehende Wärme abgeführt werden muss, ist bei Energiewandlern ein hoher Wirkungsgrad gewünscht.

Im Scheibenmotor begrenzt die *beschränkte Temperaturfestigkeit von Komponenten der integrierten Sensorik* den Betriebsbereich. Deshalb sind Modelle zur Berechnung der Verluste und Erwärmung im Scheibenmotor erforderlich, welche die Grundlage zur Auslegung des Motors bilden. In Abhängigkeit der Last lassen sich damit die Betriebsgrenzen bzw. die erforderliche Kühlung des Motors ermitteln.

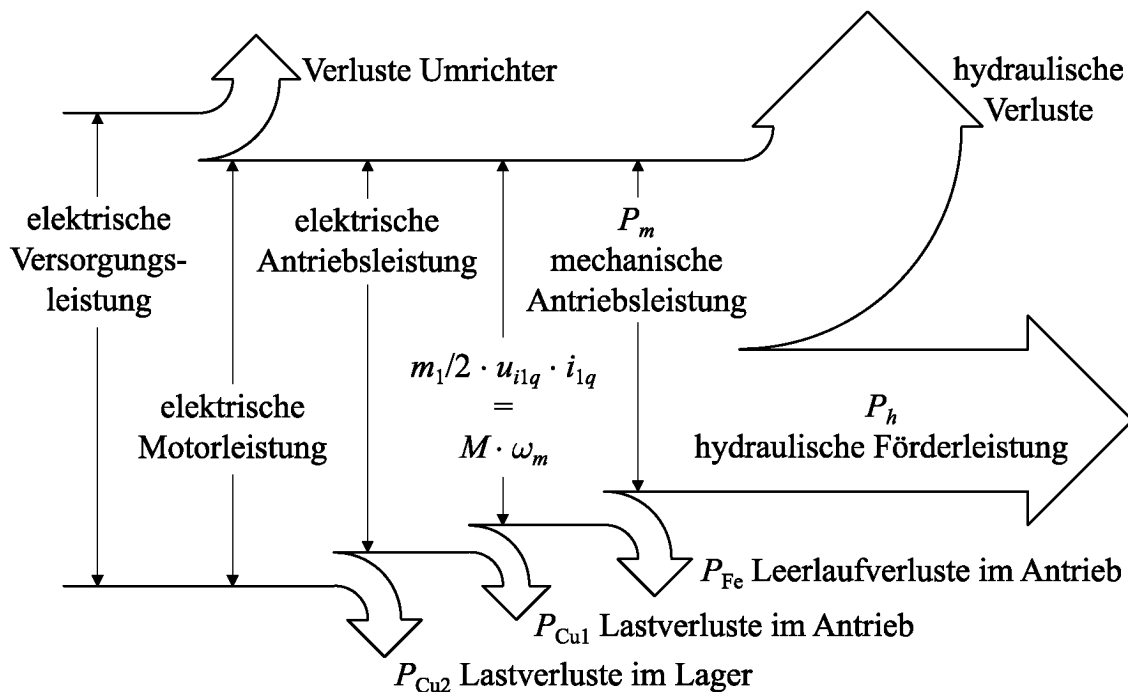


Abb. 3.1: Quantitative Leistungsaufteilung eines magnetgelagerten Pumpsystems ($H = 13 \text{ m}$, $Q = 40 \text{ l/min}$, $n = 6000 \text{ U/min}$)

Verluste im Pumpsystem

Abb. 3.1 zeigt die Leistungsaufteilung für ein magnetgelagertes Pumpsystem basierend auf dem lagerlosen Scheibenmotor, wobei *Verluste im Umrichter, in der Kreiselpumpe und im Motor* auftreten. Da ein Pumpsystem für einen bestimmten hydraulischen Arbeitspunkt (H, Q) und damit für eine gewisse Förderleistung P_h ausgelegt wird, müssen für die Auslegung des Antriebs die hydraulischen Verluste bzw. der Wirkungsgrad der Pumpe η_h bekannt sein (Kap. 4). Entsprechend ergibt sich die mechanische Antriebsleistung P_m , welche an das Flügelrad übertragen werden muss.

Die Motorverluste P_{ML} werden unterteilt in Leerlaufverluste und Lastverluste. Die Leerlaufverluste hängen nur von der Drehzahl n ab und erzeugen ein lastunabhängiges Bremsmoment. Entsprechend nimmt das überwindbare Lastmoment M_m gegenüber dem Drehmoment M bei verlustfreier Energieübertragung ab.

3.1 Verluste

In permanentmagnetisch erregten Synchronmotoren, insbesondere bei reinen Permanentmagnet-Rotoren wie beim Scheibenmotor, ist hauptsächlich die Drehung des Rotors für Magnetfeldänderungen im Eisenkreis und damit für die Leerlaufverluste verantwortlich [Hend94]. Durch drehzahlharmonische Spulenströme induzierte Feldänderungen sind deshalb vernachlässigbar.

Höherfrequente Feldänderungen, erzeugt durch Stromschwankungen des geschalteten Umrichters, lassen sich durch Ansteuerung mit Drei-Punkt-Pulsweitenmodulation (3-level PWM, Kap. 6) stark reduzieren und werden daher vernachlässigt [Zhan95]. Aufgrund dieser Vereinfachungen hängen die Eisenverluste einzig von der Drehzahl des Scheibenmotors ab und sind daher identisch mit den Leerlaufverlusten.

Bei den lastabhängigen Verlusten handelt es sich um Kupferverluste, welche beim Scheibenmotor in den Wicklungssystemen des Stators auftreten.

In Abb. 3.2 sind die Motorverluste P_{ML} nach verschiedenen Kriterien unterteilt. Die bei der elektromechanischen Energiewandlung im lagerlosen Scheibenmotor entstehenden Verluste haben folgende physikalischen Ursachen:

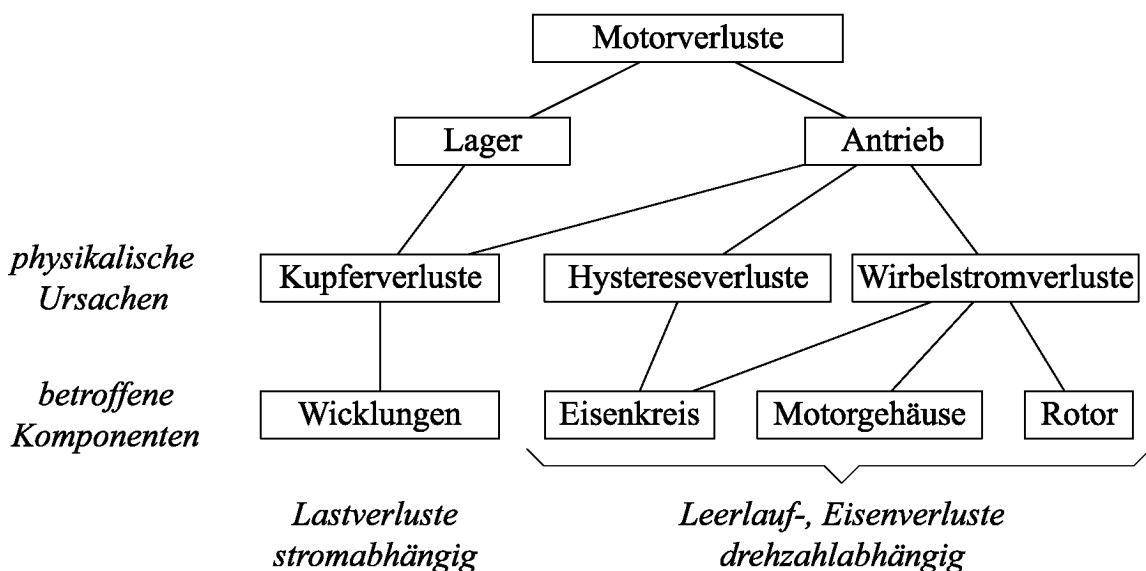


Abb. 3.2: Aufteilung der Motorverluste nach verschiedenen Kriterien

Kupferverluste Aufgrund des ohmschen Widerstands der Wicklungen geht ein Teil der elektrischen Motorleistung verloren. Diese Verluste werden auch als *Stromwärmeverluste* bezeichnet.

Hystereseverluste Das sich zeitlich ändernde Magnetfeld des Motors verursacht in ferromagnetischen Werkstoffen Ummagnetisierungsverluste.

Wirbelstromverluste In elektrisch leitenden Werkstoffen werden durch das sich zeitlich ändernde Magnetfeld Wirbelströme induziert, was zu ohmschen Verlusten führt.

Die Summe von Hysterese- und Wirbelstromverlusten wird auch als **Eisenverluste** bezeichnet. Aufgrund der berührungslosen Lagerung entstehen zwar keine mechanischen Reibungsverluste. Im Luftspalt ist jedoch mit erheblichen hydraulischen Radreibungsverlusten zu rechnen (Kap. 4).

Die Motorverluste P_{ML} werden in Wärme umgewandelt, was beim Scheibenmotor folgende Komponenten betrifft:

Wicklungen Die Kupferverluste des Scheibenmotors erwärmen die Wicklungssysteme von Lager und Antrieb.

Eisenkreis Das magnetische Drehfeld des Permanentmagnet-Rotors erzeugt im Eisenkreis Hysterese- und Wirbelstromverluste.

Motorgehäuse Magnetische Streufelder des Rotors verursachen im metallischen Motorgehäuse Wirbelstromverluste.

Permanentmagnet-Rotor Aufgrund der offenen Nuten des Motors entstehen im Rotor so genannte Pulsationsverluste. Dabei werden durch das mit der Nutzahl pulsierende Feld Wirbelströme im Permanentmagnet-Rotor induziert.

Bei metallischen Spaltrohren ist mit zusätzlichen Wirbelstromverlusten im Spaltrohr zu rechnen [Gemp97], was hier jedoch entfällt, da Pumpengehäuse für Anwendungen in der Halbleiterindustrie aus elektrisch nicht leitenden Kunststoffen hergestellt werden.

Nachfolgend werden für den lagerlosen Scheibenmotor die einzelnen Motorverluste modelliert und identifiziert.

3.1.1 Verluste im Lager

Die ans Lager abgegebene Wirkleistung geht fast ausschliesslich als Kupferverluste in den Lagerwicklungen verloren. Durch die Lagerströme werden Störkräfte kompensiert, wobei der Rotor nur sehr kleine Bewegungen ausführt und deshalb kaum radiale Reibungsverluste auftreten. Störkräfte weisen sowohl dynamische als auch stationäre Komponenten auf und haben folgende Ursachen:

- In Kreiselpumpen treten erhebliche **hydraulische Störkräfte** auf. Die stationäre Komponente hängt vom Volumenstrom durch die Pumpe ab, wobei die Form des Pumpengehäuses für Richtung und Grösse der Störkraft entscheidend ist [Hahn02]. Die dynamischen Komponenten sind dagegen über einen grossen Bereich durchflussunabhängig, bis bei einsetzender Kavitation die Störkräfte massiv zunehmen.
- **Magnetische Störkräfte** entstehen bei einer Auslenkung aus der magnetischen Mitte, was zu einer inhomogenen Feldverteilung im Luftspalt führt.
- Bei **mechanischen Störkräften** werden stationäre Kräfte, wie die Gewichtskraft, und dynamische Kräfte, wie Unwuchtkräfte unterschieden. Zusätzlich wirken bei einer Beschleunigung des gesamten Motors auch entsprechende Kräfte auf den Rotor, welche das Magnetlager aufnehmen muss.

Sowohl stationäre Störkräfte als auch Unwuchtkräfte können durch entsprechende Algorithmen kompensiert werden, womit sich auch die Verluste im Lager reduzieren.

3.1.2 Modell für Eisenverluste

Die Eisenverluste hängen von der Drehzahl des Scheibenmotors ab und setzen sich aus Wirbelstrom- und Hystereseverlusten zusammen (Abb. 3.3). Da der drehende Permanentmagnet-Rotor zeitlich nahezu sinusförmige Flussdichteänderungen erzeugt, ist für die Verluste nur die Grundswingungsfrequenz f_e des Synchronmotors zu berücksichtigen.

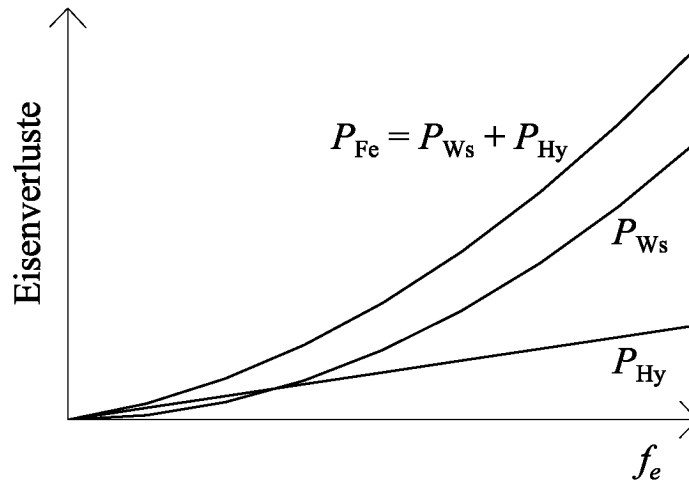


Abb. 3.3: Eisenverluste zusammengesetzt aus Wirbelstrom- und Hystereseverlusten

$$f_e = p_1 \cdot \frac{\omega_m}{2\pi} \quad (3.1)$$

Die Wirbelstromverluste P_{W_s} für sinusförmige Flussdichteänderungen in geblechtem Eisen werden nach Gl. (3.2) berechnet [Heck75]. Dabei wird davon ausgegangen, dass im Eisenstück mit der Masse m_{Fe} die magnetische Flussdichte \underline{B} parallel zur Blechung verläuft und homogen verteilt ist. Die Wirbelstromverluste nehmen quadratisch mit der Frequenz f_e und der Amplitude \hat{B} des Magnetfeldes zu.

$$P_{W_s} = c_{W_s} \cdot f_e^2 \cdot \hat{B}^2 \cdot d_{Fe}^2 \cdot \underbrace{\delta_{Fe} \cdot V_{Fe}}_{=m_{Fe}} \quad (3.2)$$

Der Wert der Materialkonstante c_{W_s} wird vor allem von der Leitfähigkeit des Eisens beeinflusst. Deshalb werden Motorenbleche häufig mit Silizium legiert, was den spezifischen Widerstand erhöht und damit die Wirbelstromverluste verringert. Zusätzlich können Wirbelstromverluste durch eine Anpassung der Blechdicke d_{Fe} reduziert werden.

Für Eisen in einem magnetischen Wechselfeld mit einer Amplitude zwischen 0.2 T und 1.5 T gilt für die Hystereseverluste P_{Hy} gemäss Steinmetz [Ste91]:

$$P_{\text{Hy}} = c_{\text{Hy}} \cdot f_e \cdot \hat{B}^{1.6} \cdot \underbrace{\delta_{\text{Fe}} \cdot V_{\text{Fe}}}_{=m_{\text{Fe}}} \quad (3.3)$$

Die Hystereseverluste hängen linear von der Frequenz f_e und der Materialkonstanten c_{Hy} ab.

Um die Eisenverluste im Tempelmotor zu berechnen, müssen die spezifischen Verluste über die gesamte Masse des Eisenkreises integriert werden. Zur Vereinfachung wird der Eisenkreis des Tempelmotors in eine beschränkte Anzahl Teile i separiert. Dabei werden die Teile i so gewählt, dass darin eine homogene Flussdichteverteilung angenommen werden kann. Aus der Integration ergeben sich folgende Summen:

$$P_{\text{Ws}} = c_{\text{Ws}} \cdot f_e^2 \cdot d_{\text{Fe}}^2 \cdot \sum_i \hat{B}_i^2 \cdot m_{\text{Fe}_i} \quad (3.4)$$

$$P_{\text{Hy}} = c_{\text{Hy}} \cdot f_e \cdot \sum_i \hat{B}_i^{1.6} \cdot m_{\text{Fe}_i} \quad (3.5)$$

Daraus ergibt sich das drehzahlabhängige Bremsmoment M_{Fe} des Scheibenmotors:

$$\begin{aligned} M_{\text{Fe}} &= \frac{P_{\text{Ws}} + P_{\text{Hy}}}{\omega_m} \\ &= \left(\frac{p_1}{2\pi}\right)^2 \cdot \omega_m \cdot c_{\text{Ws}} \cdot d_{\text{Fe}}^2 \cdot \sum_i \hat{B}_i^2 \cdot m_{\text{Fe}_i} + \\ &\quad + \frac{p_1}{2\pi} \cdot c_{\text{Hy}} \cdot \sum_i \hat{B}_i^{1.6} \cdot m_{\text{Fe}_i} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Die Materialkonstanten für Wirbelstrom- und Hystereseverluste können entweder Datenblättern entnommen werden oder sind anhand von Messungen zu identifizieren. Nachfolgend sind beide Wege beschrieben, um die Resultate am Beispiel des Scheibenmotors zu vergleichen.

Identifikation der Eisenverluste anhand von Herstellerdaten

Um einen Anhaltspunkt über die zu erwartenden Eisenverluste zu erhalten, können die Koeffizienten c_{Ws} und c_{Hy} mit der Methode der

kleinsten Quadrate [Nipp93] aus Verlustangaben in Datenblättern identifiziert werden. Tab. 3.1 zeigt die identifizierten Materialkonstanten für verschiedene Blechsorten.

Blechsorte	d_{Fe} [mm]	c_{Hy}	$\frac{\text{mW}}{\text{T}^{1.6} \cdot \text{Hz} \cdot \text{kg}}$	c_{Ws}	$\frac{\text{m}^2}{\Omega \cdot \text{kg}}$
M330-35A	0.35		7.37		3390
M270-35A	0.35		8.02		2530
NO20	0.20		18.56		1740

Tab. 3.1: Materialkonstanten verschiedener Elektrobleche identifiziert nach Herstellerangaben

In Abb. 3.4 sind die spezifischen Verluste sowohl von Standard-Elektroblechen **M270-35A** und **M330-35A** (je 0.35 mm) [EBG 97], als auch für Hochfrequenzbleche **NO20** (0.2 mm) [EBG] aufgezeichnet. Zusätzlich sind die spezifischen Verluste für Hochfrequenzbleche der Qualität **NO10** (0.1 mm) eingezeichnet, welche anhand der für NO20 identifizierten Werte, jedoch mit der Blechdicke 0.1 mm berechnet wurden.

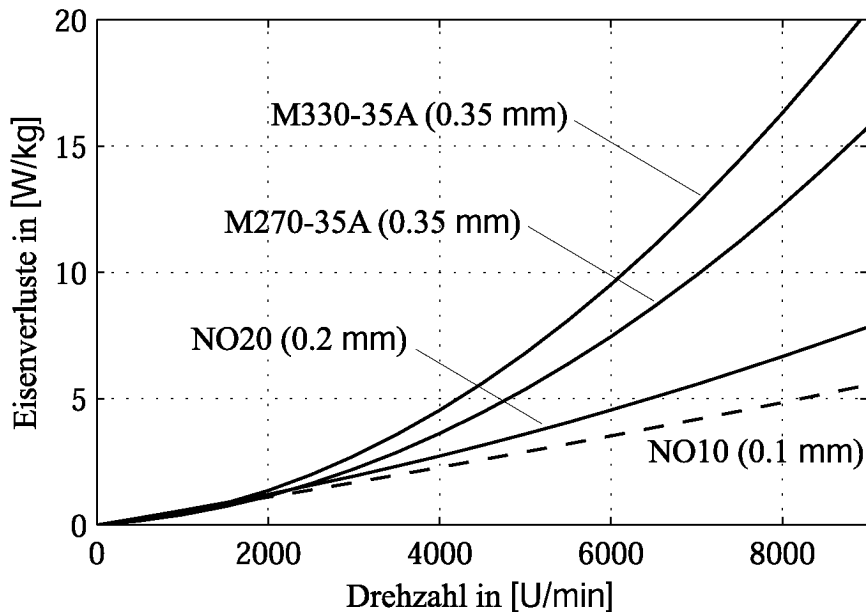


Abb. 3.4: Spezifische Eisenverluste verschiedener Blechsorten berechnet nach Herstellerangaben für eine Flussdichte $\hat{B} = 1.4 \text{ T}$

In den Standard-Elektroblechen sind die Wirbelstromverluste dominant, weshalb im betrachteten Bereich die Eisenverluste nahezu quadratisch mit der Drehzahl zunehmen. In den Hochfrequenzblechen sind dagegen die Hystereseverluste dominant, was eine Zunahme der Eisenverluste beinahe linear mit der Drehzahl zur Folge hat. Dies ist auch daraus ersichtlich, dass trotz dünnerer NO10-Bleche, welche die Wirbelstromverluste gegenüber NO20-Blechen auf einen Viertel reduzieren, die Eisenverluste gesamthaft nur wenig abnehmen.

Identifikation der Verluste anhand von Leerlaufmessungen

Um die theoretisch berechneten Eisenverluste zu verifizieren wurden Messungen an Motoren mit Eisenkreisen aus Standard-Elektroblech **M330-35A** (0.35 mm) und aus Hochfrequenzblech **NO20** (0.2 mm) vorgenommen.

Zur Identifizierung der Materialkonstanten c_{W_s} und c_{H_y} ist in einem ersten Schritt die Flussdichte im Eisen zu bestimmen. Anhand von Messungen der induzierten Spannung in den Antriebswicklungen lässt sich mit Gl. (2.20) und (2.21) auf S. 34 zurück rechnen auf den magnetischen Fluss Φ_{PM} und unter Annahme einer homogenen Flussverteilung auf die Flussdichten \hat{B}_i in den einzelnen Teilen des Eisenkreises.

Mit Gl. (2.19) auf S. 34 lässt sich auch die Amplitude der magnetischen Flussdichte \hat{B}_{PM} im Luftspalt bestimmen. Tab. 3.2 gibt die identifizierten Werte der Flussdichte im Luftspalt an. Dabei ist trotz identischer Geometrien und Permanentmagnete die Flussdichte im Hochfrequenzblech wesentlich kleiner, was nur durch den unterschiedlichen magnetischen Widerstand der beiden Blechsarten erklärt werden kann. Diese Reduktion der Flussdichte hat, wie in Kap. 3.1.3 gezeigt wird, einen erheblichen Einfluss auf die Kupferverluste im Scheibenmotor.

Blechsorte	d_{Fe} [mm]	\hat{B}_{PM} [T]
M330-35A	0.35	0.693
NO20	0.20	0.632

Tab. 3.2: Magnetische Flussdichte im Luftspalt für verschiedene Elektrobleche

Im zweiten Schritt wurden in Leerlaufmessungen die Eisenverluste bei verschiedenen Drehzahlen aufgenommen. Da bei magnetgelagerten Rotoren die im Leerlauf vorhandene Luftreibung vernachlässigbar ist, können die Eisenverluste direkt aus dem feldorientierten Drehmomentstrom i_{1q} und der induzierten Spannung u_{i1q} des Antriebs berechnet werden. Mit der Methode der kleinsten Quadrate lassen sich die Koeffizienten c_{Ws} und c_{Hy} in Tab. 3.3 berechnen.

Blechsorte	d_{Fe} [mm]	c_{Hy}	$\frac{mW}{T^{1.6} \cdot Hz \cdot kg}$	c_{Ws}	$\frac{m^2}{\Omega \cdot kg}$
M330-35A	0.35		21.1		7870
NO20	0.20		40.4		13120

Tab. 3.3: Materialkonstanten verschiedener Elektrobleche identifiziert anhand von Messungen

Abb. 3.5 zeigt sowohl die aus Herstellerangaben, als auch die mit Messungen identifizierten Kurven der Eisenverluste. Für beide Blechsorten ergeben sich erhebliche Differenzen zwischen den aus Herstellerangaben berechneten und den gemessenen Verlusten. Entsprechend unterschei-

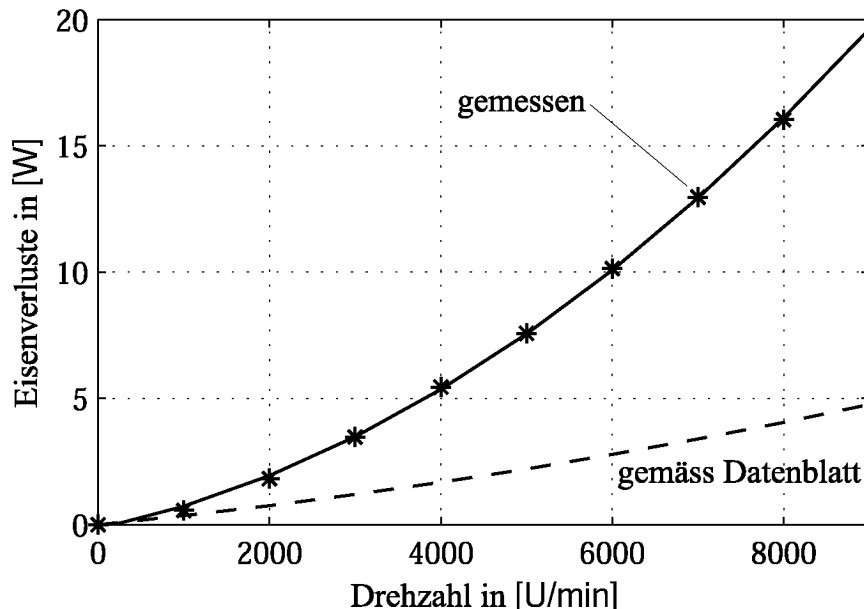


Abb. 3.5: Vergleich der gemessenen mit den theoretischen Eisenverlusten für Hochfrequenzblech NO20

den sich auch die identifizierten Materialkonstanten in Tab. 3.1 und Tab. 3.3.

Diskussion der Resultate

In Abb. 3.6 sind für NO20 die Eisenverluste aufgeteilt in Hysterese- und Wirbelstromverluste. Vor allem bei den Wirbelstromverlusten weichen die gemessenen Werte und die aus Herstellerangaben berechneten Werte stark voneinander ab. Was sind die Gründe für diese Differenz?

- Sowohl die Bleche der L-förmigen Eisenkerne, als auch die Bleche des Rückschlusses sind an diskreten Stellen miteinander verschweisst und bilden eine **leitende Verbindung zwischen den Blechen**. Dies führt zusammen mit der unvollständigen Isolierung entlang der Blechkanten zu zusätzlichen Wirbelströmen. Messungen mit geklebten, also gegeneinander isolierten Blechen zeigten, dass damit die Wirbelstromverluste um knapp 20 % reduziert werden können.
- Aufgrund der dreidimensionalen Geometrie des Tempelmotors (vergleiche mit Abb. 2.12 auf S. 31) verlaufen die Feldlinien insbesondere dort, wo die L-förmigen Kerne in den Rückschluss eingesetzt werden, teilweise senkrecht zur Blechung. In Abb. 3.7

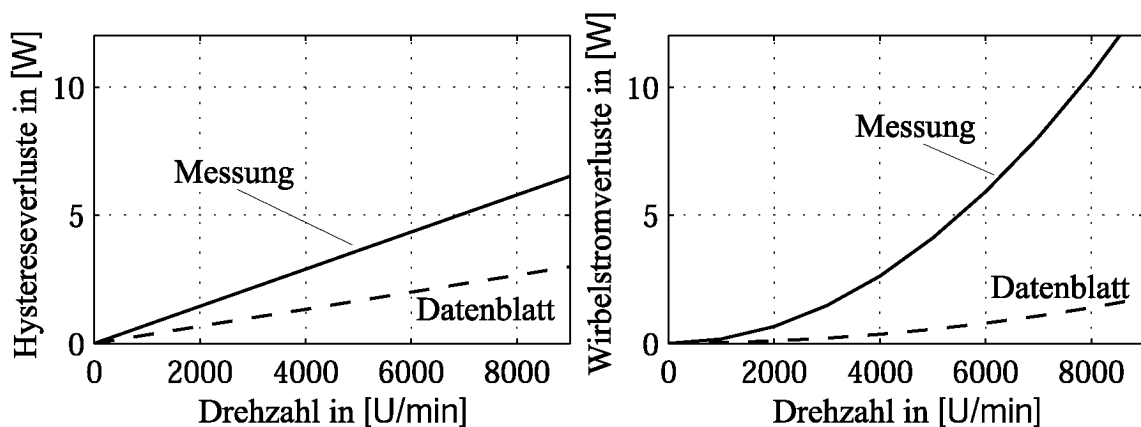


Abb. 3.6: Aufteilung der gemessenen und theoretischen Eisenverluste in Hysterese- und Wirbelstromverluste für Hochfrequenzblech NO20

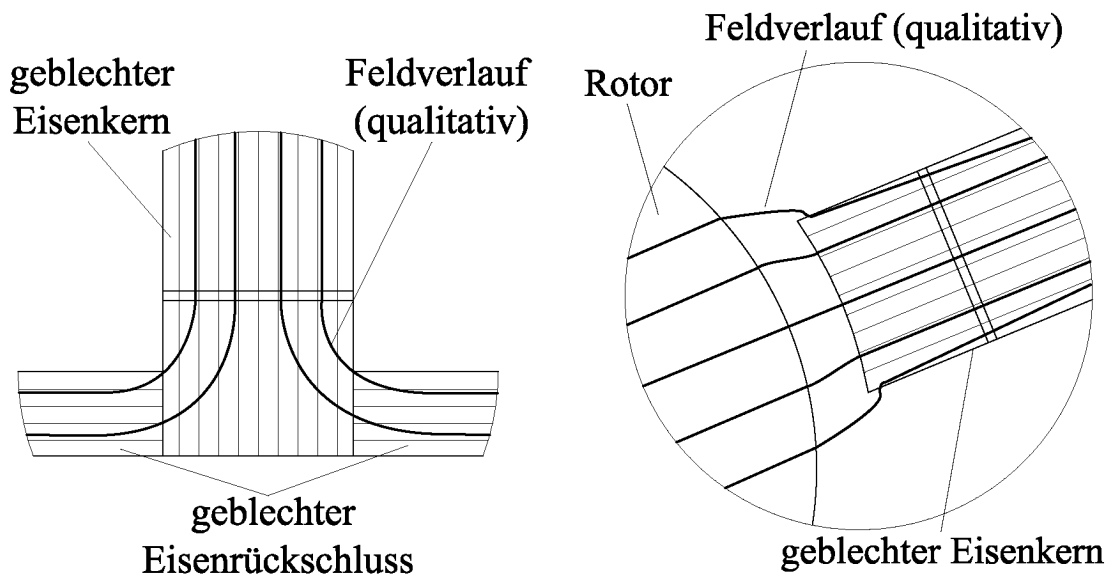


Abb. 3.7: Qualitativer Feldverlauf zwischen Eisenkern und Eisenrückschluss (links) und im Luftspalt zwischen Magnetring und Eisenkern (rechts)

links ist der Feldverlauf in diesem Bereich qualitativ dargestellt. Wegen der offenen Nuten treten auch an den Flanken der L-förmigen Kerne Feldlinien senkrecht zur Blechung ins Eisen ein (Abb. 3.7 rechts). Diese **senkrecht zur Blechung verlaufenden Feldanteile** verursachen zusätzliche Wirbelstromverluste, was einen Grossteil der Differenz erklärt.

- Die offenen Nuten haben im weiteren den Nachteil, dass im Permanentmagnet-Rotor **Pulsationsverluste** entstehen. Da es sich dabei physikalisch um Wirbelstromverluste handelt, ist eine einfache messtechnische Trennung gegenüber den Verlusten im Eisenkreis nicht möglich. Bei Leerlaufmessungen werden die Pulsationsverluste mitgemessen und tragen zur Differenz zwischen Theorie und Messung bei.
- Abb. 3.8 zeigt eine Gegenüberstellung der gemessenen Eisenverluste für die Blechsorten M330-35A und NO20. Zusätzlich ist eine Leerlaufmessung eines Motors ohne Aluminium-Gehäuse aufgezeichnet. Daraus ist ersichtlich, dass **magnetische Streufelder im Motorgehäuse** Wirbelstromverluste bis zu 4 W erzeugen.

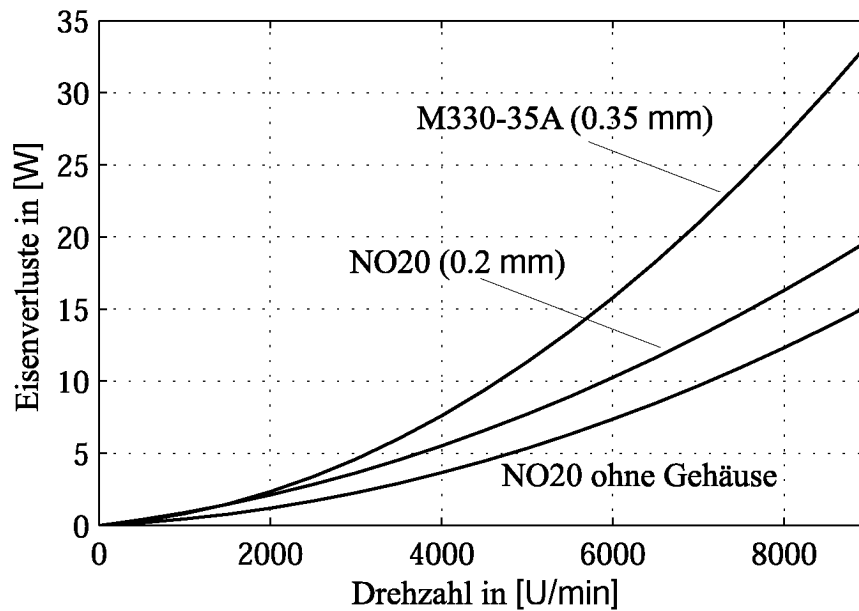


Abb. 3.8: Gemessene Eisenverluste für verschiedene Bleche

Ein elektrisch nicht leitendes Gehäuse (z. B. Kunststoff) würde zwar die Eisenverluste reduzieren, bildet aber gleichzeitig eine thermische Barriere gegenüber der entstehenden Verlustwärme.

Bei Scheibenmotoren in Tempelbauweise sind für eine genaue Identifikation der Eisenverluste *Messungen empfehlenswert*. Der Vergleich von Messresultaten verschiedener Bleche zeigt, dass die Eisenverluste durch dünnere Bleche zwar reduziert werden können, aber weniger stark als nach Theorie zu erwarten. Dies liegt in erster Linie daran, dass sich die Gesamt-Eisenverluste aus verschiedenen Anteilen zusammensetzen, welche nur teilweise mit der Blechdicke beeinflusst werden können.

3.1.3 Modell für Kupferverluste

Stromwärme- oder Kupferverluste treten im lagerlosen Scheibenmotor in den Wicklungssystemen des Antriebs und des Lagers auf. Dabei ist der ohmsche Widerstand R_S einer Wicklungsphase entscheidend, welcher sich aus der Windungszahl w , der mittleren Windungslänge l_w , dem Füllfaktor f und dem zur Verfügung stehenden Wicklungsquerschnitt A berechnet.

$$R_S = \frac{\rho_{\text{Cu}} \cdot l_w \cdot w^2}{A \cdot f} \quad (3.7)$$

Kupferverluste im Antrieb

Mit dem Phasenwiderstand R_{S1} und dem Phasenstrom I_{S1} ergeben sich die Kupferverluste für den Antrieb aus folgender Gleichung:

$$P_{\text{Cu1}} = m_1 \cdot I_{S1}^2 \cdot R_{S1} = \frac{m_1}{2} \cdot \hat{I}_{S1}^2 \cdot R_{S1} \quad (3.8)$$

Aus den Gl. (2.19), (2.20) und (2.22) auf S. 34 kann folgende Beziehung zwischen dem Phasenstrom I_{S1} und dem Lastmoment M_m abgeleitet werden:

$$\hat{I}_{S1} = \frac{M}{c_m} = \frac{(M_m + M_{\text{Fe}})}{m_1 \cdot w_1 \cdot \xi_1 \cdot l \cdot r \cdot \hat{B}_{\text{PM}}} \quad (3.9)$$

Verwendet man nun Gl. (3.7) und (3.9) anstelle von Strom und Widerstand in Gl. (3.8), können die Kupferverluste in Abhängigkeit des Lastmoments M_m berechnet werden.

$$P_{\text{Cu1}} = (M_m + M_{\text{Fe}})^2 \frac{\rho_{\text{Cu}} \cdot l_{w1}}{2 \cdot A_1 \cdot f_1 \cdot m_1 \cdot \xi_1^2 \cdot l^2 \cdot r^2 \cdot \hat{B}_{\text{PM}}^2} \quad (3.10)$$

Neben dem Lastmoment M_m erhöht das von den Eisenverlusten herführende Bremsmoment M_{Fe} die Kupferverluste des Antriebs. Dagegen nehmen die Kupferverluste mit zunehmender Feldstärke \hat{B}_{PM} der permanentmagnetischen Erregung ab.

Der Antrieb überträgt mechanische Leistung an den Rotor, deren Wert sich aus den Anforderungen an die Förderleistung und dem hydraulischen Wirkungsgrad ergibt. Um die Kupferverluste zu beurteilen, werden sie deshalb für die geforderte mechanische Antriebsleistung P_m betrachtet. Aus Gl. (3.11) für die mechanische Leistung folgt, dass die Kupferverluste gegen höhere Drehzahlen abnehmen, da weniger Drehmoment M_m benötigt wird, um eine konstante mechanische Leistung zu übertragen.

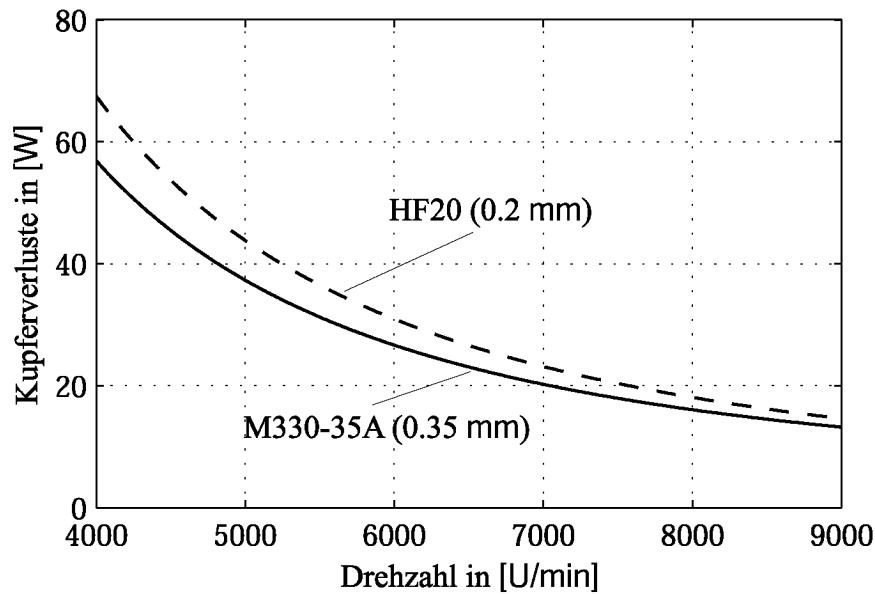


Abb. 3.9: Kupferverluste im Antrieb für eine mechanische Antriebsleistung $P_m = 300 \text{ W}$

$$P_m = M_m \cdot \omega_m \quad (3.11)$$

Für die Blechsorten M330-35A und HF20 ergeben sich in Abb. 3.9 neben unterschiedlichen Eisenverlusten auch unterschiedliche Kupferverluste. Diese sind für HF20 höher, da sich bei diesen Blechen eine geringere Erregung einstellt (Kap. 3.1.2/Tab. 3.2). Dieser Einfluss dominiert gegenüber der Reduktion durch das kleinere Bremsmoment M_{Fe} .

Kupferverluste im Lager

Da lastabhängige stationäre Störkräfte und Unwuchtkräfte durch entsprechende Algorithmen in der Regelung kompensiert werden können (Kap. 6), verbleiben im interessierenden Bereich nur lastunabhängige dynamische Störkräfte. Der Effektivwert der Störkräfte wird deshalb zur Berechnung der Kupferverluste im Lager als konstant angenommen.

Ebenso wie in Gl. (3.8) für den Antrieb berechnen sich die Kupferverluste im Lager aus dem Phasenstrom I_{S2} und dem Phasenwiderstand

R_{S2} . Mit Gl. (2.29) und (2.30) auf S. 36 kann der Phasenstrom I_{S2} in Abhängigkeit des Effektivwerts der radialen Störkraft F_d beschrieben werden:

$$I_{S2} = \frac{F_d}{k_i} = \frac{F_d}{(k_M + k_L) \cdot \frac{m_2}{2} \cdot w_2 \cdot \xi_2 \cdot l \cdot r \cdot \hat{B}_{PM}} \quad (3.12)$$

Zusammen mit der Widerstandsberechnung in Gl. (3.7) ergeben sich die Kupferverluste P_{Cu2} im Lager, welche sich wie beim Antrieb mit zunehmender Erregung reduzieren.

$$P_{Cu2} = F_d^2 \frac{4 \cdot \rho_{Cu} \cdot l_{w2}}{A_2 \cdot f_2 \cdot (k_M + k_L)^2 \cdot m_2 \cdot \xi_2^2 \cdot l^2 \cdot r^2 \cdot \hat{B}_{PM}^2} \quad (3.13)$$

3.1.4 Motorverluste

In Abb. 3.10 und Abb. 3.11 sind die Eisen- und Kupferverluste zusammen mit ihrer Summe, den Motorverlusten P_{ML} , aufgezeichnet. Bei der Übertragung einer konstanten Antriebsleistung existiert ein Arbeitspunkt minimaler Motorverluste. Die Drehzahl mit dem optimalen Wirkungsgrad findet sich mit dem Schnittpunkt der Kurven der Eisenverluste und der Kupferverluste im Antriebs. Mit steigender Antriebsleistung P_m vergrößern sich nur die Kupferverluste im Antrieb, womit der optimale Arbeitspunkt zu höheren Drehzahlen verschoben wird.

Vergleicht man die Motorverluste für Standard-Elektrobleche M330-35A mit den Verlusten für Hochfrequenzbleche HF20 zeigt sich, dass der optimale Arbeitspunkt für HF20 bei wesentlich höheren Drehzahlen liegt. Dies ist einerseits erklärbar mit den geringeren Eisenverlusten und andererseits mit den höheren Kupferverlusten, aufgrund der schwächeren Erregung. Erst oberhalb einer Drehzahl von 6000 rpm entstehen im Motor mit den dünnen Hochfrequenzblechen weniger Verluste.

Die Motorverluste hängen stark vom permanentmagnetisch erregten Fluss ab, was auch bei Betrachtungen im Pumpbetrieb beachtet werden muss. Beim Scheibenmotor besteht eine beschränkte axiale Bewegungsfreiheit, da der Rotor in diese Richtung nur durch ein passives Magnetlager stabilisiert wird. In einer Kreiselpumpe kann der Rotor

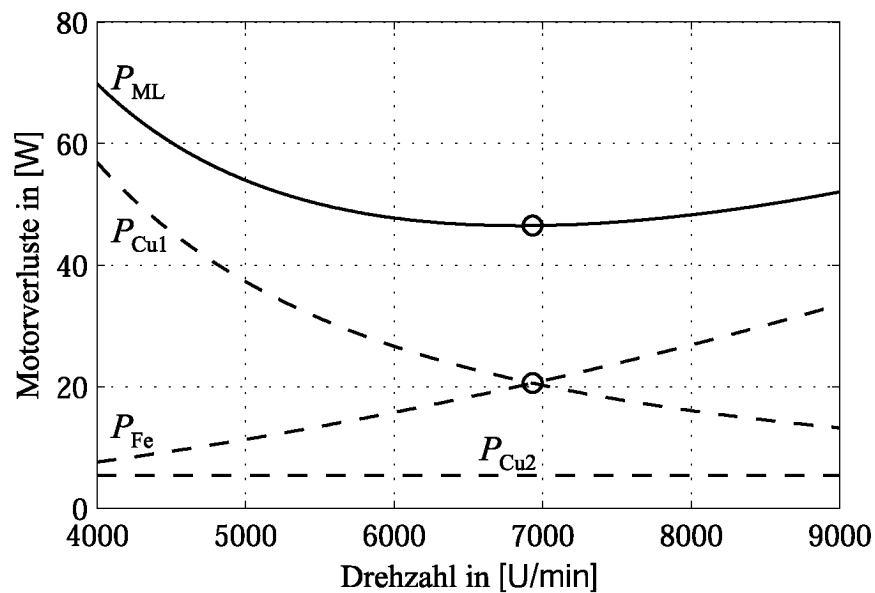


Abb. 3.10: Motorverluste für Standard-Elektrobleche M330-35A bei konstanter Antriebsleistung $P_m = 300 \text{ W}$

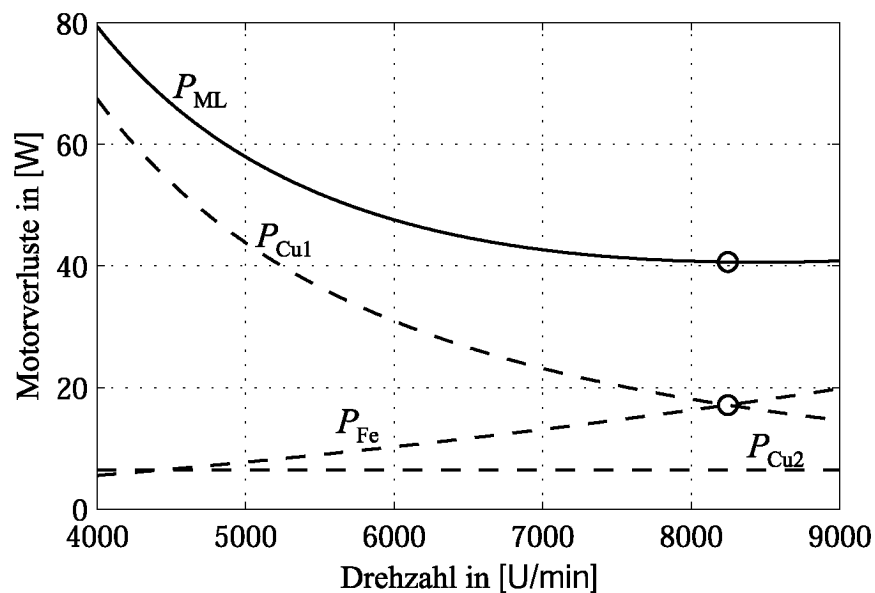


Abb. 3.11: Motorverluste für Hochfrequenzbleche HF20 bei konstanter Antriebsleistung $P_m = 300 \text{ W}$

durch hydrodynamische Kräfte aus der unbelasteten Lage $z = 0$ (siehe Abb. 2.13 auf S. 32) ausgelenkt werden, wobei sich der magnetische Fluss im Motor reduziert und sich die Motorverluste erhöhen. In

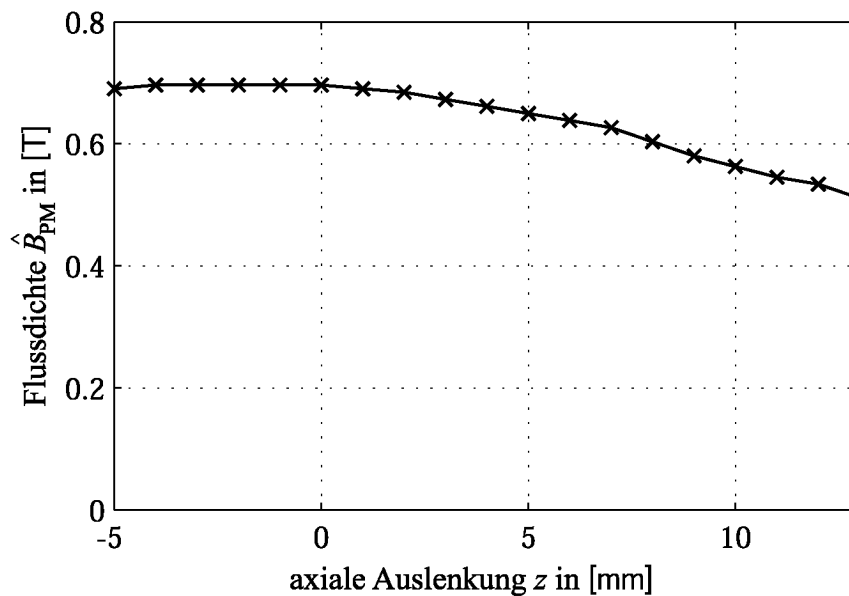


Abb. 3.12: Rückgang der Flussdichte im Luftspalt bei einer axialen Auslenkung des Rotors

Abb. 3.12 ist der Rückgang der Flussdichte in Abhängigkeit der axialen Position z aufgezeichnet. Dieser Rückgang ist nicht symmetrisch zur Nulllage, weil sich beim Einsinken in den Tempelmotor mehr Feldlinien über den Eisenkreis schliessen, als bei einer Auslenkung aus dem Motor heraus.

3.2 Erwärmung

Die im Scheibenmotor entstehenden Verluste sind abzuführen, damit der Motor nicht überhitzt. Denn eine Überhitzung kann insbesondere elektronische Komponenten der internen Sensorik beeinträchtigen oder zerstören. Deshalb ist für einen zuverlässigen Betrieb der Motor entsprechend zu kühlen. Um dabei beurteilen zu können, welche Art der Kühlung für eine bestimmte Anwendung nötig ist und wo die Grenzen des Einsatzes liegen, ist ein thermisches Modell des Scheibenmotors erforderlich.

Wärmeleitungsvorgänge werden durch die Wärmeleitungsgleichung von *Fourier* beschrieben [Gott54]. Für komplexe Materialstrukturen

kann diese nur über finite Elemente sinnvoll gelöst werden, was eher aufwändig ist. In Analogie zur Elektrotechnik werden Wärmeleitvorgänge deshalb mit diskreten Komponenten berechnet. Anstelle von Strom und Spannung wird in der Wärmelehre mit Wärmeflüssen P und Temperaturdifferenzen $\vartheta_{ij} = \vartheta_i - \vartheta_j$ gerechnet. Entsprechend dem ohmschen Gesetz in der Elektrotechnik ergibt sich in der Wärmelehre folgende Gleichung :

$$P = \frac{\vartheta_i - \vartheta_j}{R_{ij}} = \frac{\vartheta_{ij}}{R_{ij}} \quad (3.14)$$

Beim thermischen Widerstand R_{ij} handelt es sich entweder um einen Leitungswiderstand R_λ oder um einen Übergangswiderstand R_α zwischen zwei Werkstoffen. Diese thermischen Widerstände können für einen Wärmeübergang der Länge l und der Fläche A anhand der spezifischen Wärmeleitfähigkeit λ beziehungsweise dem Wärmeübergangskoeffizienten α berechnet werden:

$$R_\lambda = \frac{l}{\lambda \cdot A}, \quad R_\alpha = \frac{1}{\alpha \cdot A} \quad (3.15)$$

In Tab. 3.4 ist für die im Scheibenmotor verwendeten Werkstoffe die spezifische Wärmeleitfähigkeit λ bei Raumtemperatur angegeben. Für

Werkstoff	$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$	Referenz
Eisen (rein)	80	[Lide00]
Eisen (4% Si)	20	[Lide00]
Kupfer (rein)	401	[Lide00]
Epoxidharz	1.0	[EpoX03]
Aluminium (rein)	237	[Lide00]
ETFE	0.23	[Syma93]
Luft	0.026	[Grig63]
POM	0.31	[Angs99]
PVDF	0.19	[Syma93]
PTFE	0.24	[Syma93]

Tab. 3.4: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Werkstoffe bei $\vartheta = 20^\circ\text{C}$

gängige Übergänge zwischen verschiedenen Medien findet man in der Literatur Anhaltswerte für den Wärmeübergangskoeffizienten α . Die genaue Bestimmung bei speziellen Konfigurationen muss aber experimentell erfolgen¹.

3.2.1 Thermisches Modell des Scheibenmotors

Abb. 3.13 zeigt ein Schnittbild durch den Scheibenmotor mit eingesetzter Kreiselpumpe. Der Motor aus Abb. 2.12 auf S. 31 mit Eisenkreis, Lager- und Antriebswicklungen befindet sich im Motorgehäuse aus Aluminium. Zur mechanischen Stabilisierung und zur verbesserten Wärmeübertragung werden die Zwischenräume mit Epoxidharz vergossen. Dadurch wird auch erreicht, dass keine explosiven Gemische in den Motor gelangen, welche bei einer Fehlfunktion gezündet werden könnten.

Die Kreiselpumpe mit dem umkapselten Permanentmagnet-Rotor besteht aus einem Fluorkunststoff und ist gefüllt mit dem Fördermedium. Unterhalb der Kreiselpumpe ist eine Leiterplatte angebracht, welche die Positions- und Hallsensoren mit der analogen Signalverarbeitung trägt. Da einzelne elektronische Bauteile nur bis zu einer Temperatur von 90°C spezifiziert sind, ergibt dies die thermische Begrenzung des Scheibenmotors. Aus sicherheitstechnischen Überlegungen und um den Arbeitsbereich des Motors vollständig auszunutzen, wird die Temperatur der Sensorik gemessen und überwacht.

Der Motor ist schichtweise aufgebaut; innen befinden sich die Wärmequellen Eisenkreis und Kupferwicklung, aussen umgeben von der Vergussmasse und dem Motorgehäuse. Aufgrund der guten thermischen Leitfähigkeit von Aluminium bestehen an der Gehäuseoberfläche nur kleine Temperaturdifferenzen. Deshalb werden zur Vereinfachung die einzelnen thermischen Leitungs- und Übergangswiderstände des Motors zusammengefasst zu einem Widerstand R_{MG} zwischen Motorinnenraum und Gehäuse. In Serie dazu modelliert der Widerstand R_{GU} den Übergang zwischen Gehäuse und Umgebung.

¹In [Gott54] findet sich eine Näherungsformel für den thermischen Widerstand innerhalb einer Wicklung. Diese hat jedoch nur Gültigkeit, wenn keine Luft zwischen den Kupferlackdrähten eingeschlossen ist. Andernfalls wird eine experimentelle Bestimmung des thermischen Widerstands vorgeschlagen.

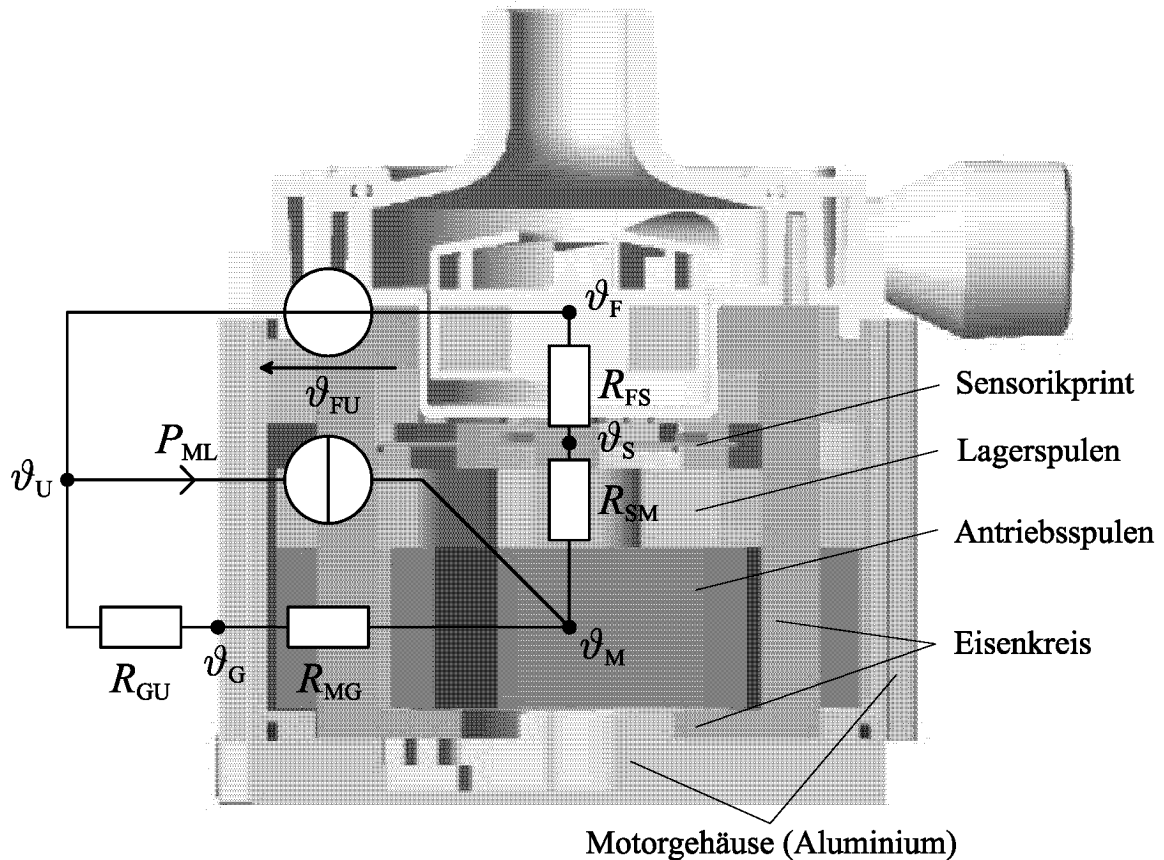


Abb. 3.13: Schnittbild des Scheibenmotors mit vereinfachtem thermischem Netzwerk

Wegen der grossen Kontaktfläche zwischen Kreiselpumpe und Motor und erheblicher Temperaturdifferenzen ist der Wärmeaustausch zwischen Fördermedium und Motorinnenraum zu berücksichtigen. Dabei ist der thermische Widerstand zwischen Fördermedium und Motorinnenraum aufgeteilt in zwei Seriewiderstände R_{FS} und R_{SM} mit der begrenzenden Sensoriktemperatur dazwischen. Die konstante Temperatur des Fördermediums wird als thermische Spannungsquelle ϑ_{FU} modelliert und die Motorverluste P_{ML} werden als thermische Stromquelle im Motorinnenraum angenommen.

Da in Prozessanlagen der Halbleiterindustrie die Chemikalien fortlaufend umgewälzt werden müssen, arbeiten die Fördersysteme im Dauerbetrieb. Im thermische Modell werden deshalb nur stationäre Vorgänge betrachtet.

3.2.2 Identifikation des thermischen Modells

Um die thermischen Widerstände zu identifizieren benötigt man neben der vom System gemessenen Sensoriktemperatur ϑ_S zusätzlich die Flüssigkeitstemperatur ϑ_F , die Umgebungstemperatur ϑ_U und die Temperatur der Gehäuseoberfläche ϑ_G . Mit Messwerten bei verschiedenen Belastungen und Flüssigkeitstemperaturen können die thermischen Widerstände identifiziert werden.

R_{FS}	3.41 K/W
R_{SM}	1.30 K/W
R_{MG}	0.42 K/W
R_{GU}	1.99 K/W

Tab. 3.5: Identifizierte Werte der thermischen Widerstände

Bei Konvektionskühlung ergibt die Identifikation die Widerstandswerte in Tab. 3.5. Der Hauptanteil der Motorverluste wird über das Gehäuse an die Umgebung abgegeben, wobei der thermische Widerstand des Motors wesentlich kleiner ist als der Übergangswiderstand zwischen Gehäuse und Umgebung.

Die Obergrenze der Motortemperatur ϑ_M hängt gemäss Gl. (3.16) bei festgelegter Sensoriktemperatur ϑ_S nur von der Flüssigkeitstemperatur ϑ_F ab. Eine erhöhte Flüssigkeitstemperatur reduziert deshalb das Temperaturgefälle zwischen Motorinnenraum und Umgebung, womit weniger Verlustwärme abgeführt werden kann.

$$\vartheta_M = \vartheta_S - \vartheta_{FS} \frac{R_{SM}}{R_{FS}} \quad (3.16)$$

3.2.3 Thermische Begrenzung der Motorleistung

Anhand des identifizierten Modells kann die thermische Begrenzung des Arbeitsbereichs bestimmt werden. Dabei lässt sich für verschiedene Umgebungs- und Flüssigkeitstemperaturen die Obergrenze der Motorverluste bestimmen. Mit dieser Obergrenze kann im Modell der Motorverluste zurückgerechnet werden auf die mechanischen Grössen Lastmoment, Drehzahl und Leistung.

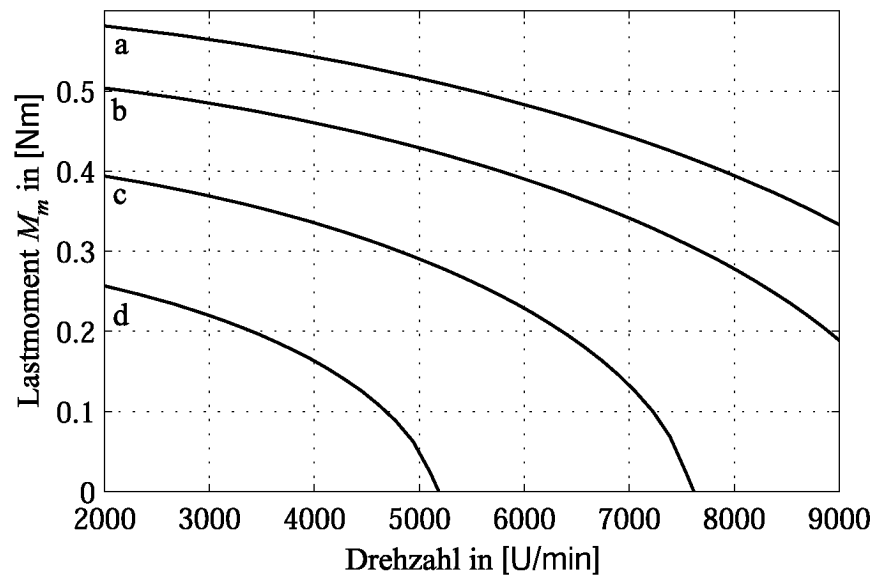


Abb. 3.14: Maximales Lastmoment für verschiedene Umgebungstemperaturen ϑ_U und Flüssigkeitstemperaturen ϑ_F
 a: $\vartheta_U = 20^\circ\text{C}$, $\vartheta_F = 20^\circ\text{C}$, b: $\vartheta_U = 50^\circ\text{C}$, $\vartheta_F = 20^\circ\text{C}$,
 c: $\vartheta_U = 20^\circ\text{C}$, $\vartheta_F = 85^\circ\text{C}$, d: $\vartheta_U = 50^\circ\text{C}$, $\vartheta_F = 85^\circ\text{C}$

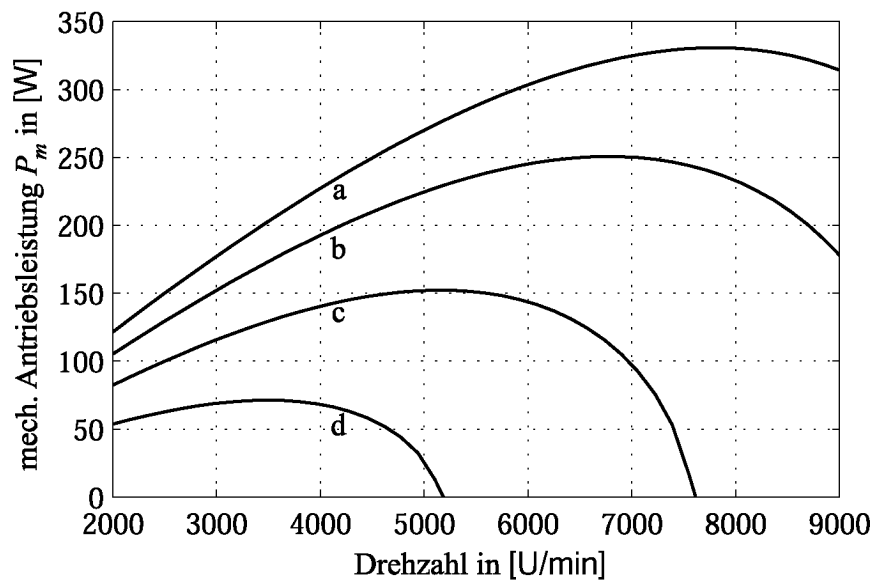


Abb. 3.15: Maximale Antriebsleistung für verschiedene Umgebungstemperaturen ϑ_U und Flüssigkeitstemperaturen ϑ_F
 a: $\vartheta_U = 20^\circ\text{C}$, $\vartheta_F = 20^\circ\text{C}$, b: $\vartheta_U = 50^\circ\text{C}$, $\vartheta_F = 20^\circ\text{C}$,
 c: $\vartheta_U = 20^\circ\text{C}$, $\vartheta_F = 85^\circ\text{C}$, d: $\vartheta_U = 50^\circ\text{C}$, $\vartheta_F = 85^\circ\text{C}$

In Abb. 3.14 und 3.15 sind das maximale Lastmoment und die entsprechende mechanische Leistung bei verschiedenen Umgebungs- und Flüssigkeitstemperaturen für Konvektionskühlung aufgetragen. Aus den Abbildungen ist ersichtlich, dass eine erhöhte Flüssigkeitstemperatur den Arbeitsbereich erheblich einschränkt.

3.2.4 Höhere Flüssigkeitstemperaturen

Weil die temperaturempfindliche Sensorik nahe an der Kreiselpumpe liegt, reduzieren erhöhte Flüssigkeitstemperaturen den Arbeitsbereich des Pumpsystems. Wird die Sensorik mit den empfindlichen Bauteilen ausserhalb des Motors platziert, erlaubt dies eine wesentlich höhere Temperatur im Motorinnenraum und damit eine Vergrösserung der abführbaren Verlustwärme.

Auch mit einer verbesserten Kühlung des Motors lässt sich der thermische Arbeitsbereich des Scheibenmotors vergrössern. Dabei wird vor allem der Übergangswiderstand zwischen Motor und Umgebung reduziert, indem entweder die Wärmeübergangsfläche vergrössert wird oder forciert gekühlt wird. Häufig gilt, wenn mehr Wärme abgeführt werden soll, wird die Kühlung aufwändiger. Somit sollte die maximal zulässige Temperatur ausgenutzt werden, um den Einsatz des Pumpsystems möglichst wirtschaftlich zu gestalten.

Damit möglichst wenig Verlustwärme abgeführt werden muss, sollte der Scheibenmotor nahe am optimalen Arbeitspunkt betrieben werden. Dabei ist zu beachten, dass sich der optimale Punkt bei reduzierender Erregung zu höheren Drehzahlen verschiebt. Neben der axialen Auslenkung beeinflusst vor allem die Flüssigkeitstemperatur die permanentmagnetische Erregung. Ebenso ist die Motortemperatur zu berücksichtigen, welche die Leitfähigkeit des Kupfers und des Eisen beeinflusst. Mit zunehmender Temperatur ergeben sich daher grössere Kupferverluste, jedoch geringere Wirbelstromverluste, womit sich der optimale Punkt zu höheren Drehzahlen verschiebt.

Im Pumpsystem ist es zudem wichtig, dass Kreiselpumpe und Scheibenmotor auf die Anwendung abgestimmt sind. Denn ein hoher Wirkungsgrad der Kreiselpumpe reduziert die erforderliche mechanische Leistung P_m und damit auch die Motorverluste.

Kapitel 4

Hydrodynamik magnetgelagerter Kreiselpumpen

Aufgrund der in Anlagen der Halbleiterfertigung eingesetzten dichten Filter haben Prozesspumpen eine relativ grosse Förderhöhe bei geringem Fördervolumen zu liefern. Dabei müssen Pumpen kavitationsfrei arbeiten, weil sonst durch Kavitationserosion Partikel freigesetzt werden, welche das Medium verunreinigen. Die zu fördernden Medien sind teilweise hochviskos, was insbesondere den Leistungsbedarf stark beeinflusst.

Ausgehend von diesen Anforderungen sind Motor und Pumpe so zu entwerfen, dass der hydraulische Anwendungsbereich mit einem optimalen Wirkungsgrad abgedeckt wird. Radius, Drehzahl und Form des Laufrades sind dabei die wichtigsten Entwurfsparameter. Um Pumpe und Motor möglichst kompakt zu bauen, ist eine hohe Drehzahl n vorteilhaft, wobei jedoch höhere Strömungsgeschwindigkeiten auftreten, welche die Gefahr von Kavitation bergen. Das bestmögliche Design wird deshalb in einem Kompromiss gefunden.

Abb. 4.1 zeigt die Kreiselpumpe basierend auf dem Scheibenmotor. Gegenüber herkömmlichen Kreiselpumpen wird beim Scheibenmotor das

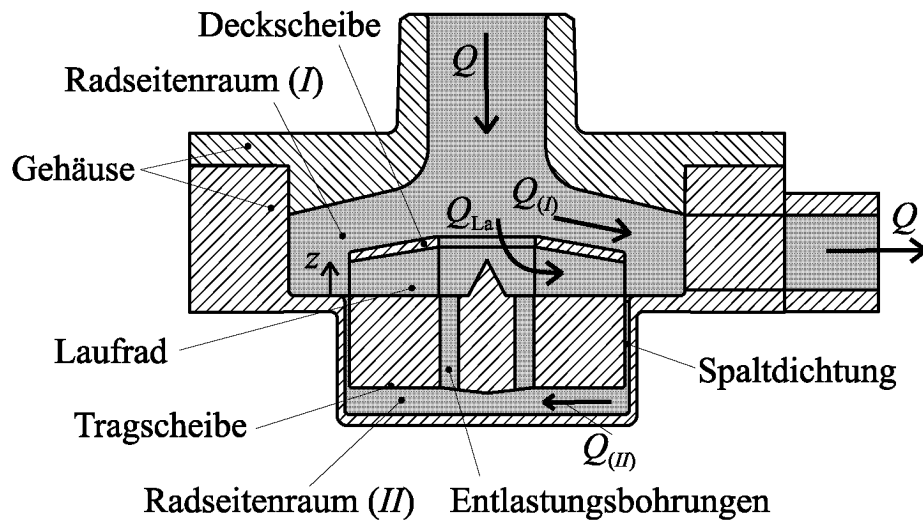


Abb. 4.1: Schnitt durch magnetgelagerte Kreiselpumpe

Laufrad in axialer Richtung durch ein passives Magnetlager stabilisiert. Ein hydraulischer Axial Schub wird aufgenommen, indem das Laufrad in z -Richtung auslenkt und eine entsprechende Reluktanzkraft dem Axial Schub entgegen wirkt. Dies bedingt eine grosse axiale Bewegungsfreiheit und Massnahmen wie Entlastungsbohrungen oder Rückenschaukeln, um die hydraulischen Axialkräfte zu reduzieren.

Die Berechnung hydrodynamischer Vorgänge ist schwierig. Deshalb wurde für den Entwurf der Kreiselpumpe ein zweistufiges Vorgehen gewählt. Erst ist anhand der vereinfachten Stromfadentheorie die Pumpe ausgelegt worden. Danach sind die problematischen Bereiche, wie Kavitation und passives Axiallager, durch empirisches Vorgehen am Modell betrachtet worden. Die nachfolgenden Seiten zeigen die qualitativen Zusammenhänge, welche aus den dabei gesammelten Erfahrungen ermittelt wurden.

4.1 Flüssigkeiten und Anlagen

Da in der Halbleiterindustrie verschiedenste Chemikalien eingesetzt werden, sind deren physikalischen Eigenschaften für die Beurteilung von Pumpen und Anlagen sehr wichtig. Die Flüssigkeiten werden charakterisiert durch

- die Dichte ρ und
- die Viskosität.

Die Viskosität beschreibt die Schubspannung, welche einer parallelen Verschiebung von Flüssigkeitsteilchen gegeneinander entgegenwirkt. Es wird dabei zwischen der *dynamischen Viskosität* η und der auf die Dichte bezogenen *kinematischen Viskosität* ν unterschieden.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (4.1)$$

In Tab. 4.1 sind die physikalischen Eigenschaften einiger gebräuchlicher Chemikalien aufgeführt, wobei die grossen Unterschiede der Viskositätswerte auffallen. Bei den meisten Chemikalien handelt es sich um Newton'sche Flüssigkeiten, bei welchen die Viskosität unabhängig vom Geschwindigkeitsgefälle in Strömungen ist. Vernachlässigbar sind meist auch der Druck und die vorausgegangene Behandlung der Flüssigkeiten. Eine wichtige Rolle spielt dagegen die Prozesstemperatur ϑ_F , da die Viskosität dieser Flüssigkeiten mit steigender Temperatur stark abnimmt.

Substanz	η [cP]	ρ [g/cm ³]	bei [°C]
Wasser (H ₂ O)	1.002	0.998	20
Schwefelsäure (H ₂ SO ₄ , 95%)	17.681	1.833	25
Phosphorsäure (H ₃ PO ₄ , 40%)	3.856	1.254	20
Kaliumhydroxid (KOH, 50%)	7.892	1.502	20
Ethylenglycol (C ₂ H ₆ O ₂)	16.1	1.109	25

Tab. 4.1: Physik. Eigenschaften einiger Chemikalien [Lide00, Bart55]

Die Flüssigkeitsviskosität hat einen grossen Einfluss auf die Förderhöhe, mit welcher in einer Anlage der gewünschte Durchfluss erreicht wird. So ist beispielsweise in Rezirkulationsprozessen nur wenig statische Förderhöhe zu überwinden, weshalb sich die Förderhöhe der Anlage H_A hauptsächlich aus viskositätsabhängigen Druckverlusten an den Komponenten des Kreislaufs zusammensetzt (beachte Abb. 1.4 auf S. 7). Die zunehmende Integrationsdichte von Halbleiterbausteinen er-

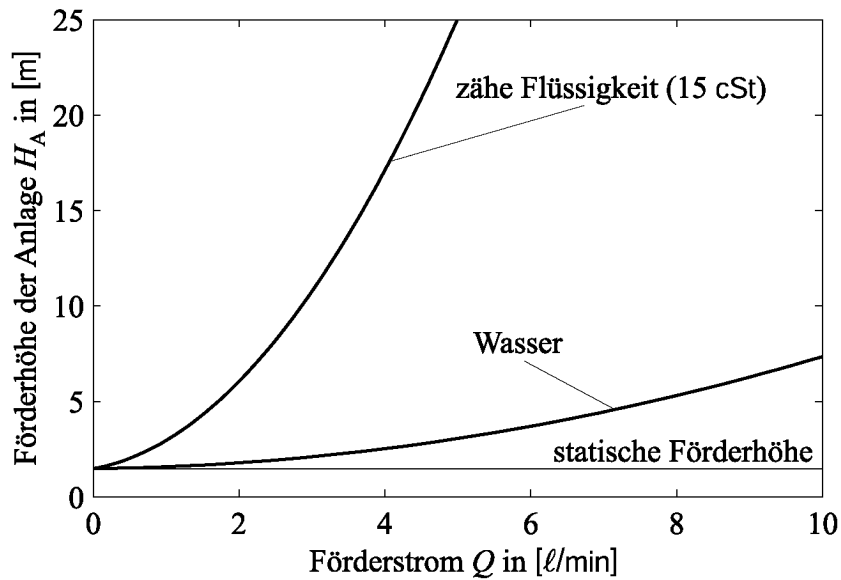


Abb. 4.2: Kennlinie einer Anlage

fordert sehr *feine Filter*, wobei deren Eigenschaften hauptsächlich den Förderhöhenbedarf einer Anlage bestimmen:

- Filter weisen wie Rohrleitungen eine überproportionale Zunahme des Förderhöhenverlusts mit dem Durchfluss auf.
- Näherungsweise nimmt der Förderhöhenverlust eines Filters linear mit der kinematischen Viskosität des Fördermediums zu.

Abb. 4.2 zeigt schematisch die Kennlinie einer Anlage für Wasser und eine hochviskose Flüssigkeit. Um einen identischen Förderstrom der hochviskosen Flüssigkeit zu erzeugen, ist von der Prozesspumpe wesentlich mehr Förderhöhe zu liefern.

4.2 Grundlagen der Hydrodynamik

Kreiselpumpen sind Strömungsmaschinen¹ zum Fördern von Flüssigkeiten, deren Aufgabe darin besteht, einen bestimmten Volumenstrom

¹Der Energieumsatz in Strömungsmaschinen beruht auf hydrodynamischen Vorgängen, welche dadurch gekennzeichnet sind, dass alle Druck- und Energiedifferenzen proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit sind [Güli99].

durch eine Anlage zu treiben. Entsprechend ergibt sich die Förderhöhe aus der Kennlinie der Anlage. Mit Ausnahme von Sonderbauarten sind Kreiselpumpen nicht selbstansaugend, können also die Saugleitung nicht evakuieren. Im Gegensatz dazu stehen Verdrängerpumpen (z. B. Balgpumpen), die rein hydrostatisch wirken und deren Druckerhöhung sich allein entsprechend dem Gegendruck einstellt. Sie können meist Flüssigkeit über eine gewisse Höhe ansaugen.

Die *Erhaltungssätze für Masse, Energie und Impuls* bilden die Grundlage der Strömungsmechanik. Wendet man die Erhaltungssätze auf ein infinitesimales Volumenelement eines strömenden Fluids an, erhält man partielle Differentialgleichungen, die das dreidimensionale Strömungsfeld vollständig beschreiben. Diese sind aber im Allgemeinen nur numerisch lösbar, weshalb Strömungen vereinfacht mit der eindimensionalen Stromfadentheorie beschrieben werden.

4.2.1 Kennlinien

Im verlustfreien Fall, wenn eine inkompressible, reibungsfreie Flüssigkeit gefördert wird, wird die gesamte mechanische Antriebsleistung P_m in hydraulische Leistung P_h umgewandelt.

$$P_m = M_{\text{th}\infty} \cdot \omega_m = \rho \cdot g \cdot H_{\text{th}\infty} \cdot Q = P_h \quad (4.2)$$

Für ein fiktives Laufrad mit unendlich vielen Schaufeln, deren Dicke gegen Null strebt, stellt sich der Strömungszustand nach Abb. 4.3 ein. Dabei sind am Laufradeintritt und -austritt die Dreiecke aus Umfangs- ($\underline{u}_1, \underline{u}_2$), Relativ- ($\underline{w}_1, \underline{w}_2$) und Absolutgeschwindigkeit ($\underline{c}_1, \underline{c}_2$) eingezeichnet. Mit der *Euler'schen Turbinengleichung* lässt sich die theoretische Förderhöhe $H_{\text{th}\infty}$ berechnen, wobei c_{1u} und c_{2u} die Komponenten der Absolutgeschwindigkeiten in Umfangsrichtung, die so genannten Drallkomponenten darstellen.

$$H_{\text{th}\infty} = \frac{1}{g} (u_2 \cdot c_{2u} - u_1 \cdot c_{1u}) \quad (4.3)$$

Unter der Voraussetzung drallfreien Eintritts der Strömung am Laufrad ($c_{1u} = 0$) ergibt sich die theoretische Förderhöhe $H_{\text{th}\infty}$ aus dem

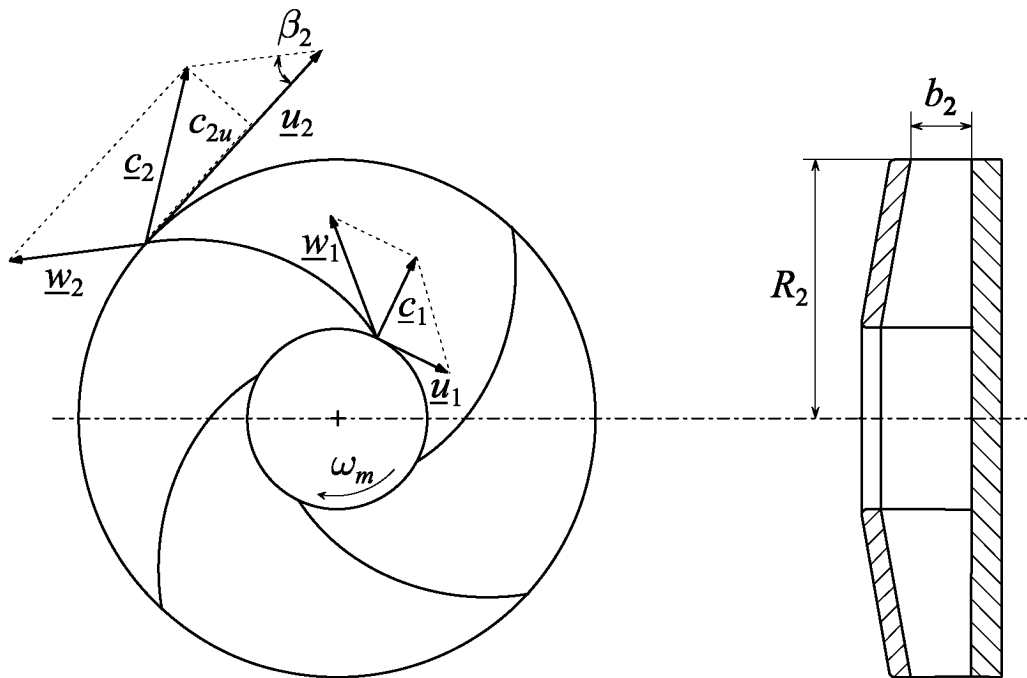


Abb. 4.3: Strömungsgeschwindigkeiten im Laufrad

Geschwindigkeitsdreieck am Austritt und der Geometrie des Flügelrades:

$$H_{\text{th}\infty} = \frac{1}{g} \left(u_2^2 - \frac{u_2 \cdot Q}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot b_2 \cdot \tan \beta_2} \right) \quad (4.4)$$

Bei endlicher Anzahl Laufschaufeln treten gegenüber der idealisierten Stromfadentheorie ungleichmässige Druckverteilungen und Strömungen im Schaufelkanal auf. Dieser Minderleistungseffekt kann durch den Minderleistungsfaktor μ_M modelliert werden, womit sich die theoretische Förderhöhe H_{th} für ein reales Laufrad ergibt:

$$H_{\text{th}} = \mu_M \cdot H_{\text{th}\infty} \quad (4.5)$$

Verluste

Im verlustbehafteten Fall reduziert sich die Förderhöhe H gegenüber den idealen Verhältnissen in Gl. (4.4) und (4.5). Zudem sind die Verluste durch eine erhöhte Leistungszufuhr zu decken. Aufgrund der fol-

genden Verluste ergeben sich die realen Kennlinien:

- Zwischen Saug- und Druckleitung (Einlass, Laufrad, Gehäuse und Auslass) treten in allen durchströmten Teilen *hydraulische Verluste* auf, welche die nutzbare Förderhöhe reduzieren. Dabei wird unterschieden zwischen
 - *Reibungsverlusten* und
 - *Verwirbelungsverlusten*.
- *Spaltverluste* oder *Leckageverluste* reduzieren den nutzbaren Förderstrom, da ein Teil des vom Flügelrad geförderten Volumenstroms durch Dichtspalt und Entlastungsbohrungen zum Laufradeintritt zurück gelangen.
- Vor allem im Teillastbereich treten am Laufradeintritt und -austritt Rückströmungen auf, welche zu so genannten *Rezirkulationsverlusten* führen. Diese beeinflussen einerseits die Förderhöhe H und erfordern andererseits zusätzliche Antriebsleistung.
- *Radreibungsverluste* treten zwischen dem rotierenden Laufrad und stehenden Gehäusewänden auf. Sie erfordern mehr Drehmoment und erhöhen entsprechend den mechanischen Leistungsbedarf.

Da die Lagerung des Flügelrades berührungslos erfolgt, treten im Gegensatz zu konventionellen Pumpen keine mechanischen Verluste in Lagern und Dichtungen auf. Die hydraulischen Verluste werden in Wärme umgesetzt und grösstenteils vom Fluid aufgenommen und abgeführt. Der Quotient zwischen mechanischer und hydraulischer Leistung ergibt den hydraulischen Wirkungsgrad η_h :

$$\eta_h = \frac{P_h}{P_m} \quad (4.6)$$

In Abb. 4.4 sind die realen Kennlinien einer Kreiselpumpe jeweils in Funktion des Förderstromes Q bei einer Drehzahl aufgetragen. Der hydraulische Wirkungsgrad weist ein Maximum $\eta_{h,\text{opt}}$ auf, das dem Betriebspunkt $(Q_{\text{opt}}, H_{\text{opt}})$ entspricht, welcher als *Bestpunkt* oder *Optimalpunkt* bezeichnet wird.

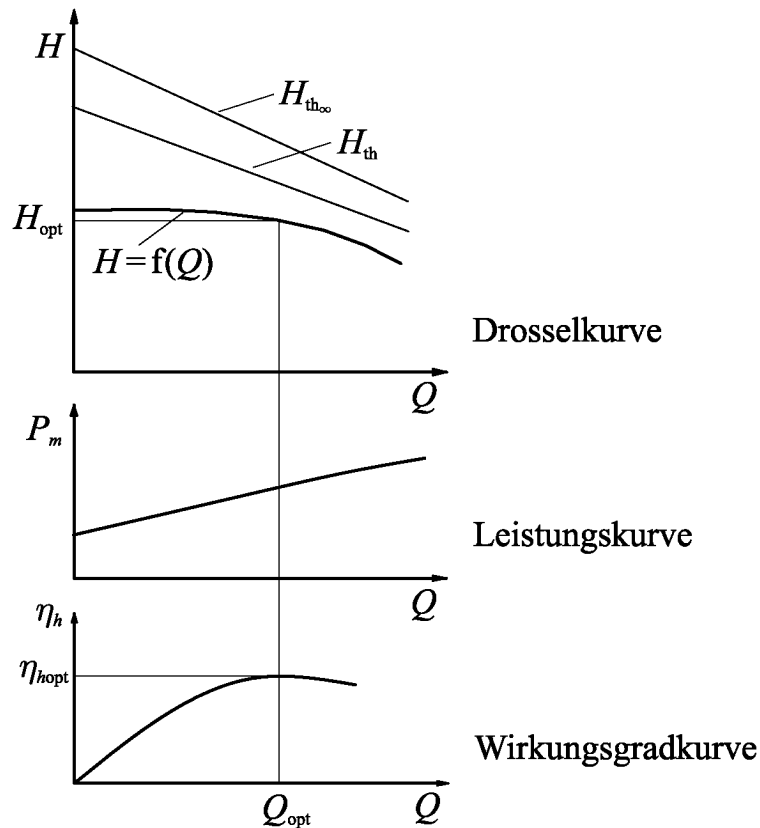


Abb. 4.4: Kennlinien einer Kreiselpumpe

4.2.2 Modellgesetze

Turbulente Strömungen in komplexen Geometrien wie einer Kreiselpumpe lassen sich kaum auf analytischem Wege exakt berechnen. Daher werden solche Strömungen in der Praxis mit Proportionalitäten und dimensionslosen Kennzahlen behandelt, mit denen man Versuche verallgemeinern und so auf unbekannte Situationen übertragen kann. Modellversuche und deren Umrechnung auf andere Drehzahlen und Pumpengrößen bilden im Pumpenbau eine wichtige Grundlage.

Für geometrisch ähnliche Pumpen gelten folgende *Proportionalitäten* bezüglich einer Änderung der Drehzahl n und der Pumpengröße mit dem Laufradradius R_2 :

$$Q \propto n \cdot R_2^3, \quad H \propto n^2 \cdot R_2^2, \quad P_h \propto n^3 \cdot R_2^5 \quad (4.7)$$

Um verschieden Bauformen grössenunabhängig miteinander zu verglei-

chen und die Auswahl des geeigneten Pumpentyps für eine Anwendung zu vereinfachen, wird jeweils die *spezifische Drehzahl* n_q angegeben. Sie ist auf den Bestpunkt zu beziehen, wobei in der Praxis die Werte in den Einheiten [U/min], [m³/s] und [m] eingesetzt werden und n_q als dimensionslose Grösse betrachtet wird.

$$n_q = n \frac{\sqrt{Q_{\text{opt}}}}{H_{\text{opt}}^{0.75}} \quad (4.8)$$

Für die beschriebenen Förderaufgaben werden Pumpen mit eher grosser Förderhöhe und geringem Durchfluss benötigt, was einer tiefen spezifischen Drehzahl ($n_q < 50$) entspricht. Pumpen mit radialer Strömung am Laufradaustritt eignen sich aufgrund ihrer spezifischen Drehzahl ($7 < n_q < 100$) für solche Förderaufgaben. Da sich zudem eine *Radialpumpe* einfach mit dem Scheibenmotor als Antrieb kombinieren lässt, wurde diese Bauform für die Pumpe gewählt².

4.2.3 Einfluss der Viskosität

Die Flüssigkeitsviskosität beeinflusst nicht nur die Anlagenkennlinie, sondern auch die Leistungsfähigkeit einer Kreiselpumpe. In Abb. 4.5 ist der Einfluss der Viskosität auf die Kennlinien aufgezeigt. Die Änderung der Kennlinien ist auf viskositätsabhängige Verluste zurückzuführen:

- Vor allem die *Reibungsverluste* nehmen mit höherer Viskosität zu, wogegen die *Verwirbelungsverluste* kaum von der Viskosität abhängen. Bei geschlossenem Schieber ($Q = 0$) bleibt die Förderhöhe unverändert. Die grössere Reibung führt jedoch dazu, dass die Förderhöhe $H_V(Q)$ mit dem Volumenstrom stärker zurück geht als bei Wasser $H_W(Q)$ und dass der Leistungsbedarf höher ist.
- Da die *Radreibungsverluste* stark viskositätsabhängig sind, entsteht bei einer Viskositätszunahme ein zusätzlicher förderstrom-unabhängiger Drehmomentbedarf und damit eine Parallelverschiebung der Leistungskurve $P_{mV}(Q)$ nach oben. Die Änderung

²Für sehr kleine spezifische Drehzahlen wären auch Peripheral- oder Seitenkanalpumpen denkbar, wobei jedoch für eine magnetgelagerte Lösung die grossen Lagerkräfte und die engen mechanischen Spalte problematisch sind.

der Radreibungsverluste hat damit grossen Einfluss auf den hydraulischen Wirkungsgrad η_h .

- Bei erhöhter Viskosität gehen die *Leckageverluste* zurück. Dieser Rückgang wird teilweise durch die Erwärmung des Fluids im Spalt und der damit verbundenen Viskositätsabnahme aufgehoben. Die Änderung der Leckageverluste beeinflusst die Kennlinien wenig und wird deshalb meist vernachlässigt.

Die Kennlinien für Medien höherer Viskosität (v) werden in der Literatur mit Korrekturfaktoren aus den Kennlinien von Wasser (w) berechnet:

$$Q_v = f_Q \cdot Q_w, \quad H_v = f_H \cdot H_w, \quad \eta_{hv} = f_\eta \cdot \eta_{hw} \quad (4.9)$$

Diese Korrekturfaktoren werden aus Diagrammen heraus gelesen, welche die Ergebnisse von Messungen verallgemeinert darstellen. Übliche

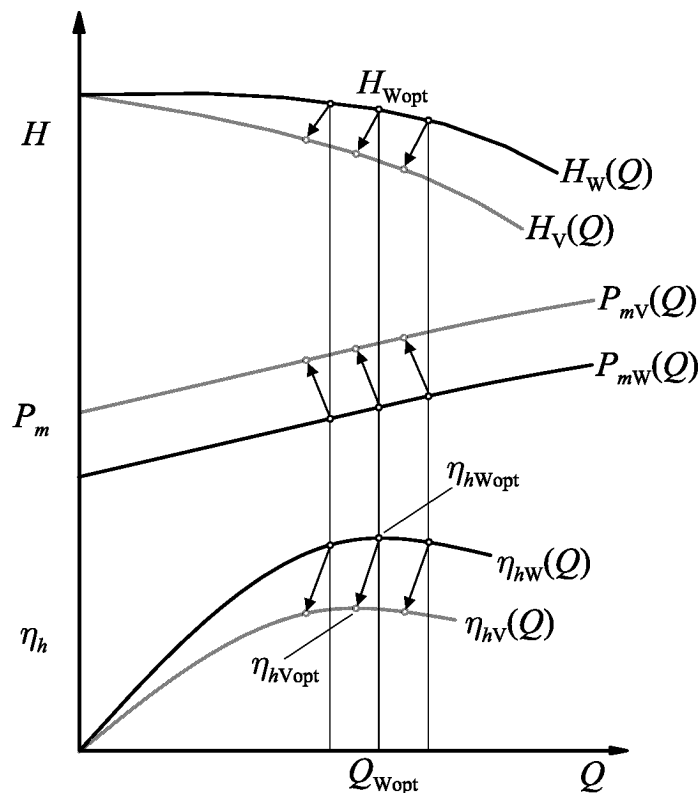


Abb. 4.5: Kennlinien einer Kreiselpumpe bei Förderung von Wasser (w) bzw. viskoser Flüssigkeit (v)

Methoden sind die Verfahren nach *Standards of the Hydraulic Institute* und nach *KSB* [Holz89]. Gülich beschreibt zudem einen Formelsatz, welcher diesen Methoden entspricht und sich zur Implementierung auf Rechnern eignet [Güli99]. Wichtig sind die Erkenntnisse für den Pumpenbau, welche aus diesen Verfahren gewonnen werden und sich auf magnetgelagerte Kreiselpumpen übertragen lassen.

- Pumpen mit einer *spezifischen Drehzahl* von $n_q = 20 \dots 35$ sind hinsichtlich des Wirkungsgrads am besten geeignet für hochviskose Medien.
- Da die Radreibung beim Pumpen hochviskoser Medien gegenüber Wasserförderung stark zunimmt, sind Rückenschaukeln ungünstig. Der Axialschubausgleich wird deshalb besser mit *Entlastungsbohrungen* hergestellt.
- Die Radreibungsverluste steigen bei laminarer Strömung eines hochviskosen Fluids umgekehrt proportional zum Abstand zwischen Gehäuse und Laufrad an. Hieraus folgt, dass *weite Radseitenräume* bei der Förderung hochviskoser Medien günstiger sind.

Die nach obigen Verfahren berechneten Faktoren liefern nur eine grobe Näherung für die Kennlinien. Insbesondere der hergeleitete Wirkungsgrad kann bei gemessenen Kennlinien stark abweichen. Das liegt hauptsächlich an den unterschiedlichen Bauformen und -größen von radialen Kreiselpumpen. Für die Bauform der magnetgelagerten Kreiselpumpe lässt sich der Verlauf der Kennlinien genauer aus Erfahrungswerten abschätzen.

4.2.4 Kavitation

Kavitation entsteht, wenn der statische Druck in einer Strömung infolge hoher Strömungsgeschwindigkeiten örtlich auf den Sättigungsdruck des Fluids absinkt, so dass Flüssigkeit verdampft. Dieser Dampf kondensiert schlagartig (implodiert), sobald er in Zonen transportiert wird, wo der statische Druck den Sättigungsdruck wieder übersteigt. Mit zunehmendem Ausmass der Kavitation werden Förderhöhe und Wirkungsgrad beeinträchtigt, sowie Lärm und Schwingungen angeregt. Unter

Umständen können auch Bauteile durch *Kavitationserosion* beschädigt und Partikel freigesetzt werden.

Entscheidend für die Kavitation sind die Zulaufverhältnisse am Saugstutzen einer Pumpe. Sie werden beschrieben durch die *Nettoenergiehöhe NPSH*, die als absolute Energiehöhe im Saugstutzen H_S minus der Verdampfungsdruckhöhe definiert ist:

$$\text{NPSH} = H_S - \frac{p_V}{\rho g} \quad (4.10)$$

Um Kavitation in einer Pumpe zu verhindern, muss von der Anlage ein minimaler NPSH-Wert gewährleistet werden, indem beispielsweise durch entsprechende Anordnung eine genügende, geodätische Zulaufhöhe erreicht wird. Der NPSH-Wert für ein bestimmtes Kavitationskriterium wird meist experimentell bestimmt und steigt mit zunehmendem Durchfluss an [Güli99].

4.3 Problematik des passiven Axiallagers

Auf das Laufrad wirken aufgrund von Druckdifferenzen hydraulische Kräfte, welche durch die Magnetlager aufgenommen werden. *Hydraulische Radialkräfte* werden durch die Druckverteilung am Laufradumfang bestimmt. Dabei ergeben sich neben dynamischen Kräften je nach Durchfluss und verwendeter Gehäuseform stationäre Kräfte, welche durch das aktive Magnetlager aufzunehmen sind³.

Im Gegensatz dazu ist die axiale Lage des Laufrades durch passive Reluktanzkräfte stabilisiert, welche mit der Auslenkung z zunehmen. Stationär betrachtet bilden die *axiale Reluktanzkraft* $F_m^{(z)}$ und der *hydraulische Axialschub* $F_h^{(z)}$ bei einer gewissen Auslenkung ein stabiles Kräftegleichgewicht.

$$F_m^{(z)} + F_h^{(z)} = 0 \quad (4.11)$$

³Durch Anpassung der radialen Position des magnetgelagerten Rotors lassen sich die stationären Kräfte in einem gewissen Rahmen kompensieren.

4.3.1 Axiale Reluktanzkraft

Das Prinzip der axialen Reluktanzkraft ist bereits in Abb. 2.11 auf S. 29 dargestellt worden, wobei die Überlegungen aus Kap. 2.1.1 gelten. Befindet sich der Rotor radial im Zentrum und tritt keine Verkippung auf, verläuft die Reluktanzkraft $F_m^{(z)}$ im nutzbaren Bereich nahezu linear:

$$F_m^{(z)} = -k_z \cdot z \quad (4.12)$$

Die Steifigkeit k_z hängt vom magnetischen Fluss im Luftspalt und damit vom verwendeten Magnetmaterial ab. Daneben beeinflussen die geometrischen Verhältnisse die Steifigkeit des Axiallagers, wobei der dreidimensionale Feldverlauf eine analytische Herleitung erschwert. Die maximal mögliche Auslenkung ist begrenzt durch die abnehmende Steifigkeit des Verkippungslagers. Zusätzlich ist die Funktion der Positions- und Winkelsensoren über den Bewegungsbereich zu gewährleisten.

4.3.2 Hydraulischer Axial Schub

Die Strömung im Radseitenraum und die daraus resultierende *Druckverteilung auf der Deck- und Tragscheibe* bestimmen den Axial Schub. Aufgrund der Rotation des Laufrades wird das Fluid in den Radseitenräumen (I) und (II) (siehe Abb. 4.1) einerseits vom Laufrad mitgenommen und andererseits vom Gehäuse abgebremst. Infolge der dadurch verursachten Fliehkräfte steigt der Druck im Radseitenraum mit zunehmendem Radius. In Abb. 4.6 sind die Druckverteilungen $p_{(I)}(r)$ und $p_{(II)}(r)$ an den Radscheiben schematisch eingezeichnet.

Der Verlauf des Druckes wird von den Spaltströmen $Q_{(I)}$ bzw. $Q_{(II)}$ beeinflusst, welche durch die Radseitenräume fließen. Die Integration dieser Druckverteilungen über den Radscheiben ergibt die auf das Laufrad wirkenden Axialkräfte $F_{(I)}$ und $F_{(II)}$.

Die *Impulskraft* $F_{(III)}$ entsteht infolge der Umlenkung der Strömung von der axialen in die radiale Richtung und wird bestimmt durch den Volumenstrom und durch die Differenz der Axialkomponenten c_{1m} , c_{2m} der Strömungsgeschwindigkeiten am Laufradeintritt und -austritt. Bei radialen Laufrädern verschwindet die Axialkomponente am Laufradaustritt, womit für die Impulskraft $F_{(III)}$ gilt:

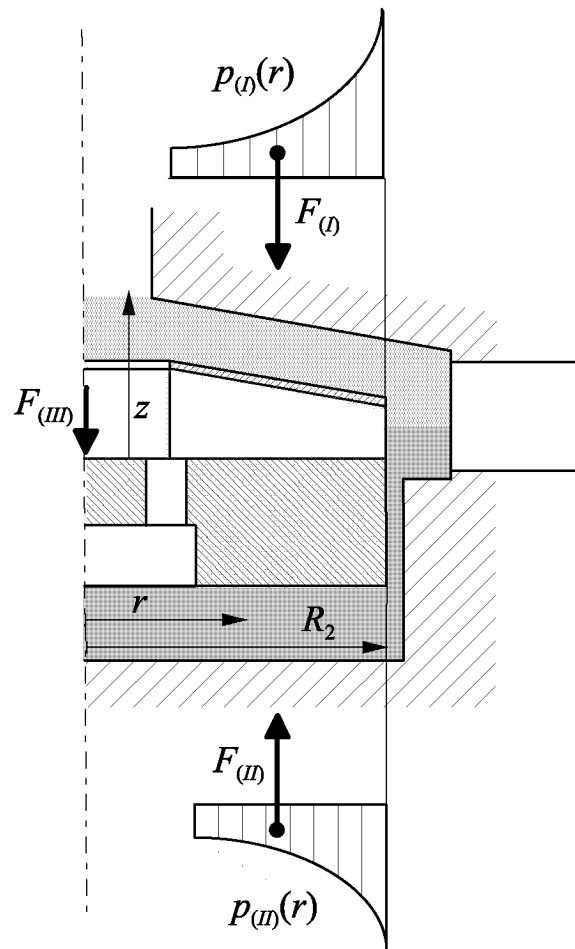


Abb. 4.6: Kräfte des hydraulischen Axialschubs

$$F_{(III)} = \rho \cdot Q \cdot c_{1m} \quad (4.13)$$

Der gesamte hydraulische Axialschub ergibt sich aus der Summe dieser drei Kräfte:

$$F_h^{(z)} = F_{(II)} - F_{(I)} - F_{(III)} \quad (4.14)$$

Die Druckverteilungen, die Impulskraft und damit die auf den Rotor wirkende Axialkraft sind abhängig von

- der Viskosität und Dichte der Flüssigkeit,
- der Geometrie der Kreiselpumpe,

- der Förderhöhe und dem Förderstrom,
- der Rauigkeit der Radscheiben und des Gehäuses,
- dem Impulsaustausch zwischen Haupt- und Radseitenraumströmung und
- der axialen Position des Laufrades.

Bei einer vorgegebenen Geometrie der Kreiselpumpe gilt somit für den stationären Axial Schub⁴:

$$F_h^{(z)} = f(H, Q, \rho, \eta, z) \quad (4.15)$$

4.3.3 Axialschubausgleich

Aufgrund der komplexen Verhältnisse, sowie der Vielzahl der Einflussgrößen ist die Berechnung der Axialkräfte schwierig und unsicher. Die begrenzte axiale Steifigkeit des Reluktanzlagers macht aber auf jeden Fall Massnahmen zur Reduktion des hydraulischen Axialschubs notwendig. Dabei führt ein empirisches Vorgehen am Modell zu den in Abb. 4.7 dargestellten Ergebnissen. Aus den dabei gewonnenen Erfahrungen lassen sich *Massnahmen* ableiten, welche den Betrieb einer Kreiselpumpe mit axialen Reluktanzlagern verbessern:

- Wie in Abb. 4.1 eingezeichnet, kann der Axialschub durch *Entlastungsbohrungen* reduziert werden. Dabei wird die Abhängigkeit der Druckverteilung $p_{(II)}$ vom Leckagestrom $Q_{(II)}$ ausgenutzt um die Kräfte $F_{(I)}$ und $F_{(II)}$ anzugleichen, damit sie sich gegenseitig aufheben. Mit dieser Massnahme kann für einen Betriebspunkt der stationäre Axialschub hydrodynamisch kompensiert werden, womit das Laufrad in der kräftefreien Axialposition $z = 0$ zu liegen kommt.
- Die Abhängigkeit des Axialschubs von der Viskosität kann reduziert werden, indem im Radseitenraum (*II*) ein *genügend grosser*

⁴Bei Abrupten Drehzahländerungen oder Lastwechseln stellen sich die stationären Strömungsverhältnisse erst nach einigen Sekunden ein. Dabei ist ein mechanischer Kontakt zwischen Laufrad und Gehäuse zu vermeiden.

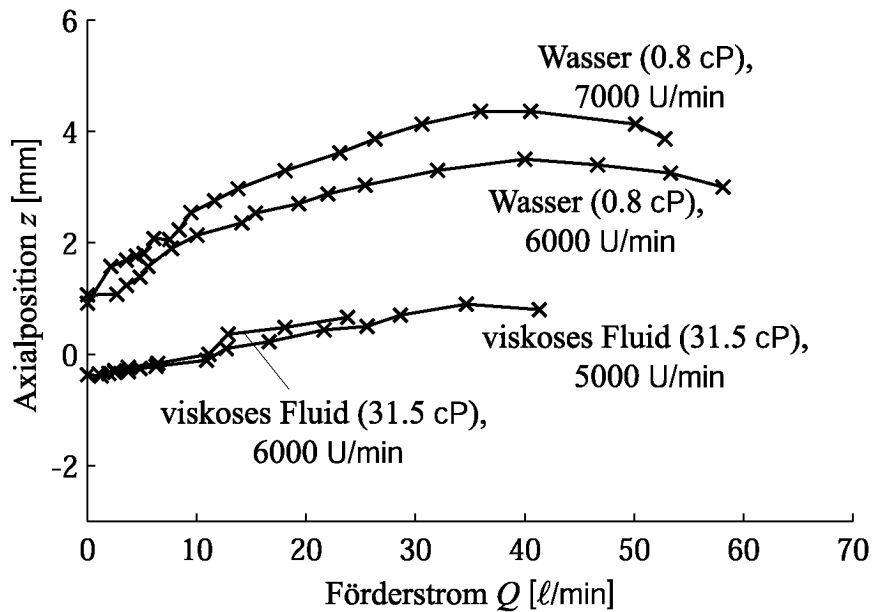


Abb. 4.7: Axiale Auslenkung bei Wasser (0.8 cP) und hochviskosem Fluid (31.5 cP)

Leckagestrom $Q_{(II)}$ zugelassen wird. Das heisst, dass insbesondere die Spaltdichtung zwischen Laufrad und Gehäuse genügend breit sein muss. Dieser Leckagestrom reduziert zwar den Wirkungsgrad der Pumpe mit Wasser. Bei hochviskosen Flüssigkeiten dominieren jedoch die Radreibungsverluste, welche stark abhängig sind von der Spaltweite. Entsprechend verbessert sich der Wirkungsgrad η_h für viskose Flüssigkeiten bei einem breiten Spalt. Zusätzlich ist bei der Spaltweite auch das Verhalten gegenüber einer Chemikalienpermeation durch die Rotorummantelung zu beachten (Kap. 5.3 auf S. 99).

- Trotz dieser Massnahmen wirken über den gesamten Arbeitsbereich betrachtet teilweise erhebliche Axialkräfte auf das Laufrad. Damit diese vom Reluktanzlager aufgenommen werden können, ist eine grosse axiale Bewegungsfreiheit zu ermöglichen, was entsprechend *weite Radseitenräume* erfordert.

Eine weitere Massnahme für einen Axialschubausgleich besteht darin an der Tragscheibe so genannte Rückenschaufeln anzubringen. Da sich diese in hochviskosen Flüssigkeiten jedoch ungünstig auf den Wirkungs-

grad auswirken (Kap. 4.2.3), wurde dies nicht genauer betrachtet.

4.4 Strömungsanalyse

Um die Pumpe bezüglich Kavitation und deren Ursachen zu beurteilen, können Strömungen durch Visualisierungsverfahren gemessen werden. Zur Analyse der Flüssigkeitsbewegung in Gehäuse und Laufrad werden beispielsweise Teilchenbahnen mit Hilfe der laseroptischen PTV-Technik⁵ sichtbar gemacht. Entsprechend wird dazu eine Kreiselpumpe aus einem transparenten Werkstoff benötigt, welche in Abb. 4.8 gezeigt ist. Die Strömungsanalyse liefert dabei folgende Resultate und Zusammenhänge:

- Die Strömung im Gehäuse bewegt sich weitgehend auf tangentialen Bahnen und rotiert deshalb nahezu *wie ein Festkörper*. Dadurch wird nur Fluid innerhalb einer schmalen Ringzone in den Auslassstutzen gefördert.
- Die Einlassströmung Q wird durch die Schleppwirkung der Lauf-

⁵PTV (engl. *particle tracking velocimetry*); Methode zur Messung eines Vektorfeldes der Strömungsgeschwindigkeiten im Fluid.



Abb. 4.8: Kreiselpumpe hergestellt aus transparentem PMMA-Kunststoff für die optische Strömungsanalyse

raddeckscheibe in zwei radiale Teilströme, den Laufradstrom Q_{La} und den Radseitenraumstrom $Q_{(I)}$, aufgeteilt. Der Laufradstrom beträgt etwa 35% des gesamten Förderstromes. Durch den axialen Schubausgleich im Laufrad wird zudem ein Leckagestrom $Q_{(II)}$ erzeugt, der um das Laufrad zirkuliert und etwa 5% des Förderstromes Q beträgt.

- Durch die Schleppwirkung des Laufrades wird ein intensiver Längswirbel erzeugt, der sich stromaufwärts bis in die Zuführleitung fortpflanzt. Die Wirbelform beeinflusst die Teilströme von Laufrad und Radseitenraum und damit auch das Verhalten in Bezug auf Kavitation.

Ein Abrunden der Kanten des Einlasses am Gehäusedeckel vermindert die Kavitationsgefahr in der Pumpe, womit ein höherer Volumenstrom ohne Kavitation gefördert werden kann. Durch eine Reduktion der Querschnittsfläche am Austritt verringert sich die starke, instationäre Verwirbelung im Auslassstutzen, was den Wirkungsgrad verbessert.

4.5 Schlussfolgerungen

Aus der kontinuierlichen Drehbewegung des Laufrades einer lagerlosen Kreiselpumpe (Abb. 4.9) ergibt sich in einer Prozessanlage ein kontinuierlicher Förderstrom. Das Fördervolumen ist durch Vorgabe der

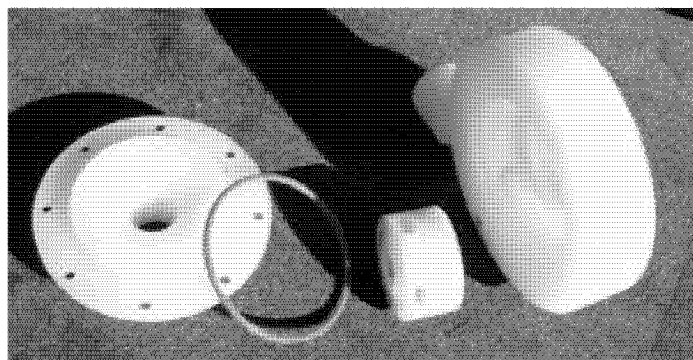


Abb. 4.9: Lagerlose Kreiselpumpe für Anlagen der Halbleiterfertigung

Drehzahl einfach einzustellen. Gegenüber Balgpumpen wird eine wesentlich höhere Reproduzierbarkeit von Prozessen erreicht. Trotz der beschränkten axialen Steifigkeit decken magnetgelagerte Kreiselpumpen mit Axialschubausgleich einen grossen Arbeitsbereich ab.

Aufgrund der hohen Drehzahl ergibt sich für die Kreiselpumpe eine kompakte Baugrösse, womit auch die benetzte Oberfläche innerhalb der Pumpe gering ist. Dies ist vor allem für die Reinheit des Fördermediums entscheidend, da Kontaminationen direkt mit der benetzten Oberfläche zusammenhängen. Ebenso bewirkt die vollkommene Umströmung des Laufrades eine schnelle Reinigung, da sich Verunreinigungen nicht in strömungsarmen Zonen ansammeln können (Kap. 5.4 auf S. 109). Damit eignet sich die magnetgelagerte Kreiselpumpe besonders auch für CMP-Anwendungen (Kap. 1.2 auf S. 4).

Für grosse Förderströme ist eine weitere Verbesserung des Entwurfs nötig, um die beginnende Kavitation zu reduzieren. Zudem ist die Abhängigkeit des Axialschubs vom Förderstrom zu verringern. Dabei spielt die radiale Position der Entlastungsbohrungen bzw. deren Gestaltung im Bereich des Laufradeintritts eine grosse Rolle.

Kapitel 5

Chemikalienpumpe für die Halbleiterfertigung

Bei der Fertigung von Halbleiterbausteinen werden äusserst aggressive Chemikalien eingesetzt. Es handelt sich dabei um Mischungen verschiedener Säuren, Basen, Oxidations- und Lösungsmittel, welche je nach Anwendung auf hohe Temperaturen erwärmt werden. Damit eine hohe Produktionsausbeute erreicht wird, unterliegen diese Medien extremen *Reinheitsanforderungen*.

Entsprechend müssen auch die flüssigkeitsberührenden Teile einer Prozessanlage chemikalienbeständig sein und einen hohen Reinheitsgrad aufweisen. Aufgrund dieser Anforderungen werden für Fördersysteme in der Halbleiterindustrie fast ausschliesslich *hochreine Fluorkunststoffe* eingesetzt. So sind beispielsweise Balgpumpen erhältlich, welche vollständig aus PTFE gefertigt sind.

Bei einer Chemikalienpumpe basierend auf dem lagerlosen Scheibenmotor befindet sich der metallische Rotor innerhalb der Pumpe. Er ist, wie aus Abb. 5.1 ersichtlich, komplett von Flüssigkeit umgeben. Der Einsatz magnetgelagerter Pumpsysteme in der Halbleiterindustrie wird daher erst bei *vollständiger Kapselung des metallischen Rotors* möglich. Dabei muss die Rotorummantelung dafür sorgen, dass über

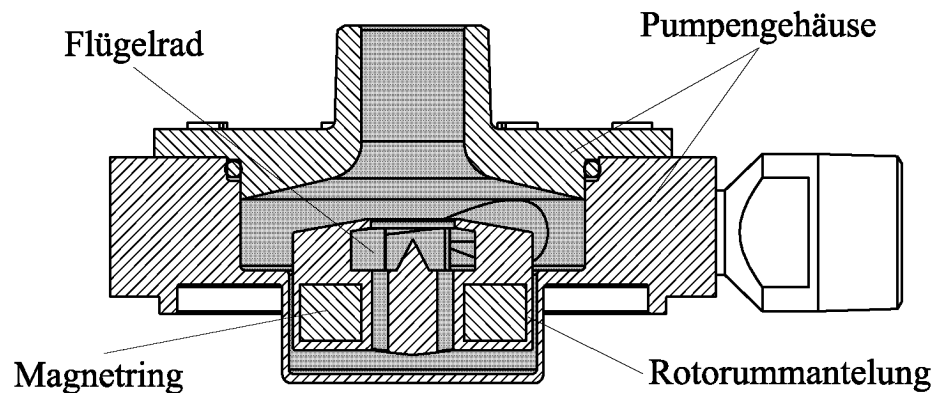


Abb. 5.1: Schnittbild der Chemikalienpumpe

einen langen Zeitraum

- vom Magnetring keine Metalle in die Flüssigkeit gelangen und
- der Rotor geschützt ist vor Korrosion durch aggressive Chemikalien.

Für die Rotorummantelung ist die *Chemikalienpermeation* in Kunststoffen zu berücksichtigen. Um diese Permeation durch die Ummantelung und damit die Korrosion des Magnetrings zu vermindern, muss die Ummantelung genügend dick sein. Erst der Einsatz hochenergetischer Permanentmagnete ermöglicht einen grossen magnetischen Luftspalt und damit eine genügend dicke Permeationsbarriere.

Für die *Realisierung* einer dichten Rotorummantelung werden verschiedene Herstellverfahren, insbesondere Schweissverfahren, diskutiert. Ein wichtiger Punkt ist dabei die Zuverlässigkeit der Rotorummantelung, da ein Leck fatale Folgen für die Halbleiterproduktion hat. Trotz vielseitiger Möglichkeiten einer Prüfung, kann erst durch das zeitintensive Einlegen umkapselter Rotoren in Chemikalien die Permeation überprüft werden.

Mit einer dichten Umkapselung bestätigen sich die *günstigen Reinheitseigenschaften* einer lagerlosen Chemikalienpumpe:

- Wegen der berührungslosen Lagerung entsteht kein Abrieb, womit nur wenige Partikel abgegeben werden.

- Verglichen mit Balgpumpen wird innerhalb der Chemikalienpumpe eine kleinere Oberfläche benetzt, weshalb weniger Materialverunreinigungen von den Chemikalien ausgewaschen werden.

Aufgrund der vielseitigen Aspekte einer Chemikalienpumpe für die Halbleiterfertigung, werden in erster Linie die Zusammenhänge bezüglich des magnetgelagerten Rotors aufgezeigt. Diese *interdisziplinäre Betrachtung* verknüpft dabei die Magnetlagertechnik mit Kenntnissen aus den Wissensgebieten Chemie und Kunststofftechnologie.

5.1 Ätz- und Reinigungschemikalien

Für die in der Halbleiterfertigung mit Flüssigkeiten durchgeführten Prozessschritte (Kap. 1.2 auf S. 4), werden Gemische äusserst aggressiver Chemikalien verwendet, wobei manche Medien die Fähigkeit besitzen Edelmetalle zu ätzen. Einige gebräuchliche Chemikalien sind in Tab. 5.1 aufgeführt.

Typ	Name (Summenformel)
Säuren	Salzsäure (HCl), Flusssäure (HF), Schwefelsäure (H ₂ SO ₄), Salpetersäure (HNO ₃), Phosphorsäure (H ₃ PO ₄)
Basen	Kaliumhydroxid (KOH), Ammoniak (NH ₄ OH)
Oxidationsmittel	Wasserstoffperoxid (H ₂ O ₂)
Lösungsmittel	Wasser (H ₂ O), Aceton (C ₃ H ₆ O), Isopropanol (C ₃ H ₈ O), Ethylenglycol (C ₂ H ₆ O ₂), Hexamethyldisilazan (C ₆ H ₁₉ NSi ₂)

Tab. 5.1: Gebräuchliche Chemikalien [Nish00]

Wegen der chemischen Reaktionsfähigkeit dieser Ätz- und Reinigungschemikalien, müssen *strenge Sicherheitsnormen* [SEMI96a, SEMI96b, SEMI98, SEMI00a, SEMI00b] erfüllt werden, um Personal und Anlagen zu schützen. Viele Flüssigkeiten sind auch leicht brennbar oder explosiv, weshalb die in einer Anlage verwendeten Werkstoffe unbrennbar sein sollten.

5.1.1 Reinheitsanforderungen

Da die Entwicklung zu höherer Integrationsdichte weiter voranschreitet, nehmen die Reinheitsanforderungen an Ätz- und Reinigungsmikalien weiter zu, wobei unterschieden wird zwischen Partikelverunreinigungen und atomaren/molekularen Verunreinigungen.

Fremdstoff	Spezifikation
Li, K, Na	< 300 ppt
Fe, Cu	< 150 ppt
andere Metalle	< 300 ppt
TOC (total organic carbon)	< 30 ppt
Partikel (> 0.05 μm)	< 0.5/ml

Tab. 5.2: Typische Spezifikation der Reinheit von Flusssäure (HF) [Nish00]

Partikelverunreinigungen werden angegeben für Partikel über einer kritischen Grösse, welche von den Strukturabmessungen auf Halbleiterbausteinen abhängt. Die Partikelkonzentration in Chemikalien ist trotz aufwändiger Filtertechnologie zu beachten. Denn die Menge der Partikel, welche einen Filter passieren, hängt direkt von der Partikelkonzentration vor dem Filter ab.

Atomare und molekulare Verunreinigungen durch *Metalle*, *Anionen* und *organische Kohlenstoffverbindungen* (engl. *TOC: total organic carbon*) können dagegen nicht herausgefiltert werden, weshalb die Chemikalien Spezifikationen wie beispielsweise in Tab. 5.2 einhalten müssen.

5.1.2 Einsatzbedingungen

In der Halbleiterfertigung werden je nach gewünschtem Ergebnis verschiedenste Gemische von Chemikalien eingesetzt. Neben der Zusammensetzung werden Prozessergebnisse hauptsächlich von der Temperatur beeinflusst. Dies soll mit dem folgenden Beispiel eines Ätzprozesses [Chri00] gezeigt werden. Die vielseitigen Einsatzbedingungen von Chemikalien verlangen somit von Fördersystemen und den darin verwendeten Werkstoffen, dass sie sowohl *temperatur-* und *chemikalienbeständig*,

als auch *hochrein* sind.

Siliziumnitrid (Si_3N_4) und Siliziumdioxid (SiO_2) sind allgemein gebräuchliche Dünnschichten in Halbleiterbausteinen. Bei einigen Prozessschritten ist es deshalb nötig, dass sowohl das Nitrid, als auch das Oxid mit einer ähnlichen Ätzrate abgetragen wird. Traditionell wird dabei in Nassätzprozessen mit heisser Phosphorsäure (H_3PO_4 , $> 130^\circ\text{C}$) gearbeitet. Aufgrund der hohen Viskosität und Temperatur der Phosphorsäure ist das Herausfiltern von Partikeln problematisch und es kommt deshalb zu erhöhtem Produktionsausfall.

Als Alternative dazu kann mit Flusssäurelösungen gearbeitet werden. Bei Raumtemperatur ätzt Flusssäure (HF) das Oxid wesentlich schneller als das Nitrid. Wird die Temperatur jedoch erhöht auf 80°C , gleichen sich die Ätzraten an. Aufgrund der Einsatztemperatur nahe am Siedepunkt von Wasser wird meist Ethylenglycol als Lösungsmittel verwendet.

5.2 Beständige, hochreine Fluorkunststoffe

Aufgrund der aggressiven Chemikalien und den extremen Reinheitsanforderungen werden für flüssigkeitsberührende Teile in Prozessanlagen ausschliesslich *chemikalienbeständige Fluorkunststoffe* eingesetzt. Die ausserordentlichen Eigenschaften von Fluorkunststoffen beruhen dabei auf der chemisch sehr stabilen Bindung zwischen Kohlenstoff und Fluor. Die CF-Bindung kann auch von aggressiven Chemikalien kaum gelöst werden und behält ihre Stabilität über einen weiten Temperaturbereich.

Um die Reinheit der Chemikalien zu gewährleisten, müssen Fluorkunststoffe *hochrein* sein, denn Verunreinigungen werden durch die Chemikalien aus dem Kunststoff herausgelöst und gelangen so in die Flüssigkeit. Diese Anforderung schliesst somit den Einsatz von Füllstoffen, zur mechanischen Verstärkung oder zur Farbgebung aus.

Fluorkunststoffe sind hochmolekulare Werkstoffe, so genannte Polymere, welche die Eigenschaft des vierwertigen Kohlenstoffatoms ausnutzen, mit sich selbst unter Kettenbildung Bindungen einzugehen. Sie sind aus langen Kettenmolekülen aufgebaut und werden mit Ausnah-

me des Thermoelasts¹ PTFE den *Thermoplasten* zugeordnet, welche thermisch formbar sind.

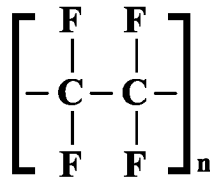


Abb. 5.2: Polytetrafluorethylen PTFE

Abb. 5.2 zeigt den chemischen Aufbau von Polytetrafluorethylen PTFE, welches sich aus vollständig fluorierten Kohlenstoffketten zusammensetzt. Bei anderen Fluorkunststoffen wird Fluor teilweise ersetzt durch fluorierte Seitenketten (vollfluoriert) oder Wasserstoff bzw. Chlor (teilfluoriert). Die chemische Struktur der gebräuchlichen Fluorkunststoffe in Tab. 5.3 kann der Literatur [Domi92] entnommen werden.

Kurzform	Typ	Polarität [Hell01]
PTFE	vollfluoriert	unpolar
FEP	vollfluoriert	unpolar
PFA	vollfluoriert	unpolar
ETFE	teilfluoriert	unpolar
ECTFE	teilfluoriert	polar
PVDF	teilfluoriert	polar

Tab. 5.3: Gebräuchliche Fluorkunststoffe

Neben dem chemischen Aufbau beeinflussen bei Thermoplasten vor allem die *zwischenmolekularen Kräfte*, die so genannten Nebenvalenzverbindungen die Eigenschaften eines Kunststoffes. Bei Fluorkunststoffen bestimmen dabei folgende Kräfte den Zusammenhalt der Makromoleküle:

¹Unter einem Thermoelast versteht man einen aus Kettenmolekülen aufgebauten Kunststoff, der bei Erwärmung zwar in einen thermoelastischen Bereich übergeht, jedoch nicht genügend fließfähig wird um thermoplastisch verarbeitet zu werden. [Hell01]

- Van der Waalsche Kräfte sind massgebend bei unpolaren Kunststoffen, wie PTFE, FEP, PFA und ETFE.
- Polare Kräfte (Dipoleffekt) sind massgebend bei polaren Kunststoffen, wie ECTFE und PVDF.

Aufgrund dieser Kräfte bilden sich kristalline und amorphe Bereiche im Kunststoff. Fluorkunststoffe werden deshalb den teilkristallinen Thermoplasten zugeordnet werden. Der Kristallinitätsgrad hängt dabei stark von der Temperatur und der Verarbeitung ab.

Aus dem chemischen Aufbau, den zwischenmolekularen Kräften und der Kristallinität ergeben sich die Eigenschaften von Fluorkunststoffen. Abb. 5.3 zeigt relevante Eigenschaften für den Einsatz als Werkstoff in einer Chemikalienpumpe mit magnetgelagertem Flügelrad.

5.2.1 Elektrische und magnetische Eigenschaften

Fluorkunststoffe sind elektrisch isolierend und nicht magnetisch. Mit diesen Eigenschaften eignen sie sich hervorragend als Werkstoff für das

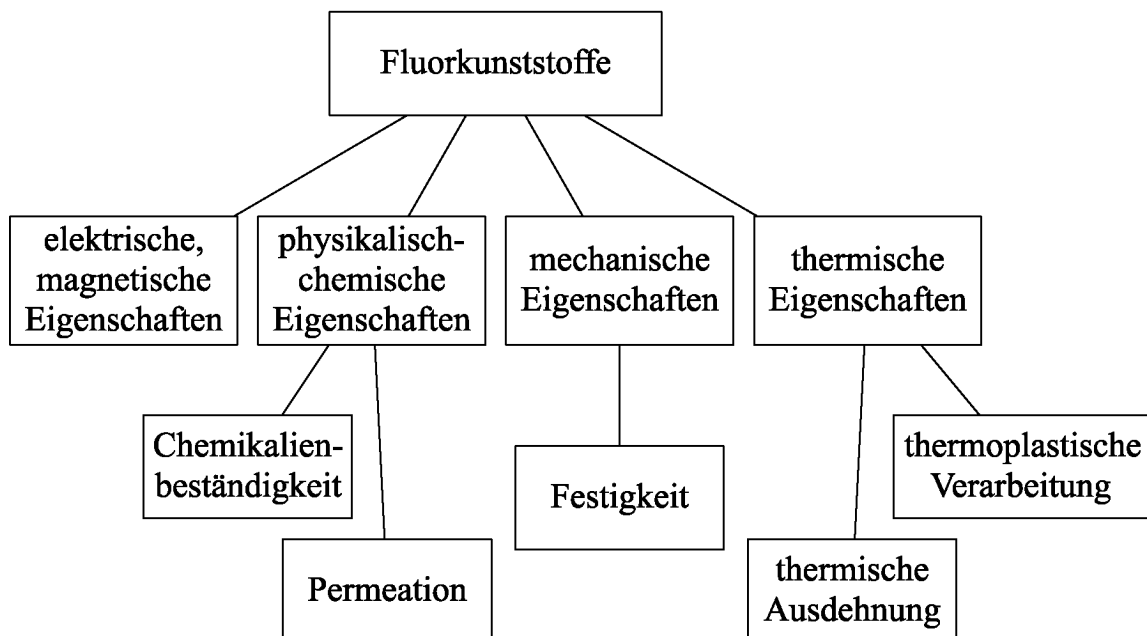


Abb. 5.3: Wichtige Eigenschaften von Fluorkunststoffen als Werkstoffe in lagerlosen Chemikalienpumpen

Spaltrohr des Pumpengehäuses. Messtechnisch ergeben sich gegenüber einer Positionsmessung in Luft weder für induktive oder kapazitive Sensoren noch für Wirbelstrom- oder Magnetfeldsensoren wesentliche Änderungen. Zudem beeinflussen Fluorkunststoffe den magnetischen Kreis nicht, weshalb die Wirbelstromverluste im Spaltrohr vernachlässigbar sind.

5.2.2 Chemikalienbeständigkeit

Fluorkunststoffe besitzen eine hohe Chemikalienbeständigkeit und sind unbrennbar oder selbstverlöschend. In Abb. 5.4 ist ein qualitativer Vergleich der Beständigkeit von voll- und teilfluorierten Kunststoffen aufgezeichnet. Die vollfluorierten Typen (PTFE, PFA, FEP) weisen gegenüber allen Substanzen eine hohe Beständigkeit auf, was sie zum bevorzugten Werkstoff für Förderanlagen der Halbleiterindustrie macht. Die etwas schlechtere Beständigkeit von ECTFE und PVDF liegt einerseits am chemischen Aufbau, andererseits aber auch an ihrem polaren Charakter. Für genaue Angaben zu verschiedenen Substanzen sei auf die Beständigkeitstabellen verwiesen, welche bei Herstellern erhältlich sind.

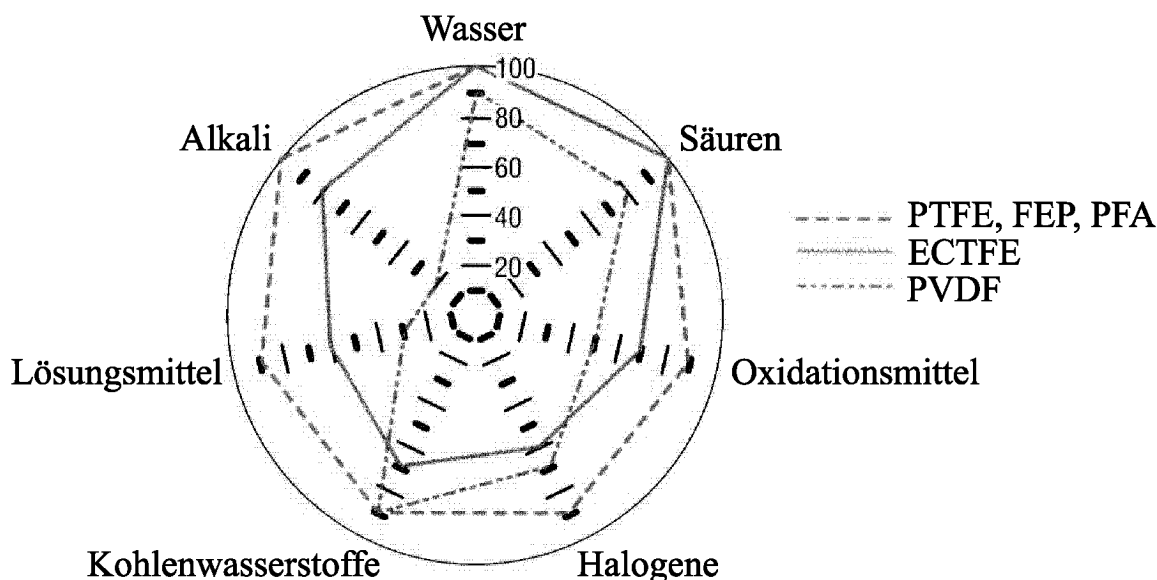


Abb. 5.4: Chemische Beständigkeit von Fluorkunststoffen innerhalb ihres Anwendungstemperaturbereichs [Ausi99]

5.2.3 Gas- und Dampfpermeation

Kunststoffe besitzen im Gegensatz zu Metallen eine wesentlich höhere Gas- und Dampfpermeation. Sie können deshalb nicht als dicht betrachtet werden, sondern bilden eine *Permeationsbarriere*, welche von Gasen und Dämpfen mit der Zeit durchdrungen wird.

Da Permeationsvorgänge von verschiedensten Faktoren abhängen, ist eine theoretische Beschreibung eher schwierig. Es ist jedoch wichtig die Zusammenhänge zu kennen, um mittels Permeationstests die *Einsatzdauer des Rotors* abzuschätzen. Deshalb werden zuerst für konstante Diffusions- und Absorptionskoeffizienten die Zusammenhänge aufgezeigt. Danach wird auf die Einflussfaktoren der Koeffizienten eingegangen.

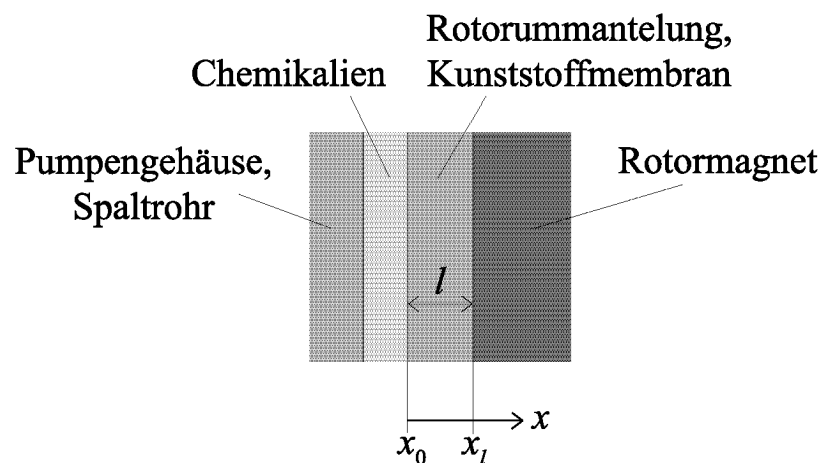


Abb. 5.5: Kunststoffmembran zwischen Chemikalien und Magnet

Eine Rotorummantelung aus Kunststoff ist vergleichbar mit einer Membran wie in Abb. 5.5, welche die flüssigen Chemikalien vom Magnetmaterial trennt. Die Permeation einer Substanz durch diese Kunststoffmembran setzt sich aus den physikalischen Prozessen *Absorption und Diffusion* zusammen. Durchgedrungene Chemikalien reagieren dabei vollständig mit dem Magnetmaterial.

Diffusion

Grundlage der mathematischen Behandlung der Diffusion bilden die *Fickschen Gesetze*. Bei einer räumlich isotropen und isothermen Diffu-

sion in einem Polymer gilt für die Diffusionsströmung $j^{(x)}$ einer Substanz durch eine Fläche senkrecht zur Raumrichtung x das erste Ficksche Gesetz:

$$j^{(x)} = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (5.1)$$

Die Strömung $j^{(x)}$ ist mit dem Diffusionskoeffizienten D proportional zum Konzentrationsgefälle $\partial c / \partial x$ des Stoffes in x -Richtung. Aus der Kontinuitätsgleichung der Masse wird mit Gl. (5.1) das zweite Ficksche Gesetz (Diffusionsgleichung), welches die raum-zeitliche Änderung der Konzentration c in x -Richtung beschreibt:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (5.2)$$

Betrachtet man in Abb. 5.5 die Membran der Dicke l , dessen Oberflächen bei einer konstanten Konzentration $c(x_0) = c_0$ und $c(x_l) = 0$ gehalten werden, so stellt sich nach einer gewissen Zeit eine stationäre Diffusionsströmung $j^{(x)}$ ein. Die Menge Q der Substanz, welche durch die Membran diffundiert, gleicht sich mit der Zeit sich für grosse Zeiten der Asymptoten mit der Steigung $j^{(x)}$ an [Cran68, Neog96]:

$$Q(t) \simeq D \cdot \frac{c_0}{l} \left(t - \frac{l^2}{6D} \right) = j^{(x)} \left(t - \frac{l^2}{6D} \right) \quad (5.3)$$

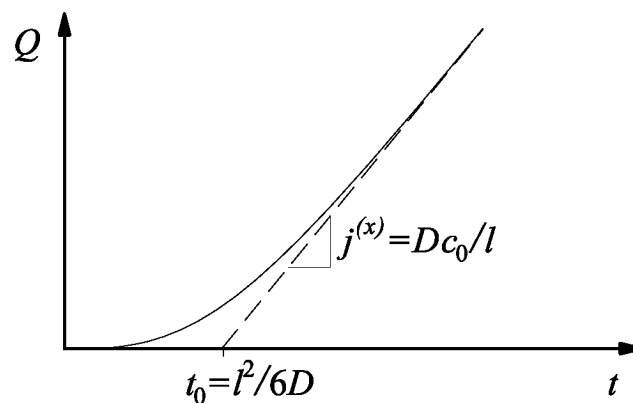


Abb. 5.6: Diffusionsmenge durch eine Membran

In Abb. 5.6 ist der zeitliche Verlauf der Menge Q skizziert. Die Zeit t_0 kann als Verzögerung betrachtet werden und nimmt quadratisch mit der Membrandicke l zu. Die Steigung der Asymptoten nimmt dagegen nur linear mit der Dicke l ab. Die Dauer, bis eine kritische Menge der Substanz durch die Ummantelung diffundiert ist, hat also sowohl einen Term linearer als auch einen Term quadratischer Abhängigkeit von der Membrandicke l .

Absorption

Gilt für die Absorption einer Polymer/Permeant-Kombination das Henrysche Gesetz, hängt die Konzentration c_0 an der Oberfläche einer Membran linear vom Druck p_0 ab:

$$c_0 = S \cdot p_0 \quad (5.4)$$

wobei S der Absorptionskoeffizient ist. Bei Gasgemischen wird mit dem Partialdruck der interessierenden Substanz gerechnet und bei Flüssigkeitsgemischen entsprechend mit dem partiellen Dampfdruck der Substanz. In beiden Fällen nimmt der Partialdruck einer Substanz mit steigender Konzentration zu.

Permeation

Für die Permeation in obiger Membran berechnet sich die stationäre Permeationsströmung $j^{(x)}$ aus folgender Gleichung, wobei der Permeationskoeffizient P das Produkt des Diffusions- und des Absorptionskoeffizienten ist:

$$j^{(x)} = P \cdot \frac{p_0}{l}, \quad P = D \cdot S \quad (5.5)$$

Die Permeation einer Substanz durch eine Membran hängt bei konstanten Koeffizienten vom Druck und von der Konzentration der Substanz ab und kann mit einer dickeren Membran reduziert werden.

Die Permeation in realen Polymer/Permeant-Systemen wird jedoch von weiteren Faktoren beeinflusst. Wegen der notwendigen thermischen

Aktivierung genügen die Koeffizienten D , S und P einer Arrhenius-Beziehung. Bei erhöhter *Temperatur* ist deshalb meist mit einer erhöhten Permeation zu rechnen. Vielfach hängen die Koeffizienten auch von der Konzentration c des Permeanten oder von der Zeit ab. Zudem verringert sich die Permeation bei erhöhter *Kristallinität*.

In der Literatur sind mathematische Modelle zu finden, welche diese Zusammenhänge beschreiben. Für die praktische Beurteilung von Substanzen und Kunststoffen, welche in der Halbleiterindustrie eingesetzt werden, existieren jedoch kaum Daten. Sie können einzig dem Vergleich verschiedener Fluorkunststoffe dienen und sind durch Daten aus Permeationstests zu ergänzen.

5.2.4 Mechanische Eigenschaften

Unverstärkte Fluorkunststoffe besitzen eine relativ *niedrige Festigkeit*. Gegenüber gebräuchlichen Stählen haben sie eine etwa zehnmal geringere Zugfestigkeit und einen etwa hundertmal kleineren Elastizitätsmodul (Steifigkeit). Abb. 5.7 zeigt den Zug-Elastizitätsmodul verschiedener Fluorkunststoffe, wobei sich die Werte wegen der variablen Kristallinität teilweise in einem weiten Bereich bewegen. Um die Festigkeit zu verbessern, kann deshalb durch langsames Abkühlen oder Tempern der Kristallinitätsgrad erhöht werden.

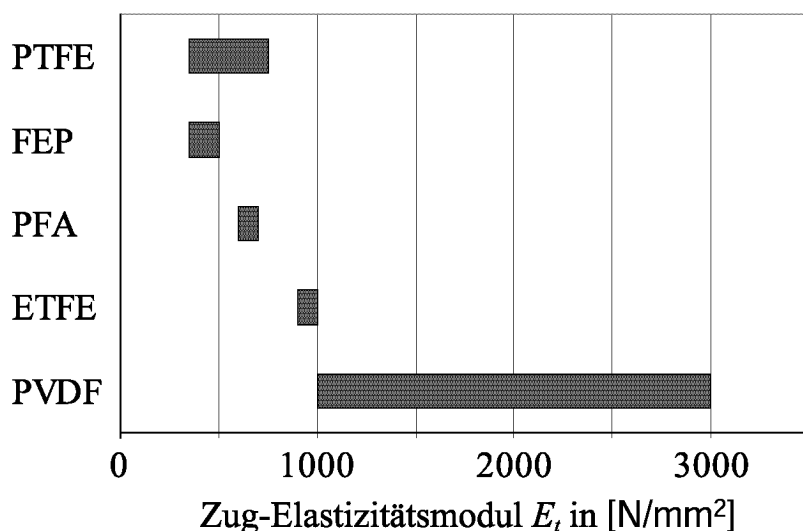


Abb. 5.7: Steifigkeit von Fluorkunststoffen [Hell01]

Kunststoffe, insbesondere Thermoplaste, zeigen schon bei Raumtemperatur ein mehr oder weniger starkes Kriechen. Sie verformen sich unter Belastung im Laufe der Zeit. Zudem sind die mechanischen Eigenschaften stark *temperaturabhängig*, weshalb bereits bei wenig erhöhten Temperaturen die Festigkeit abnimmt und sich das Kriechen verstärkt.

Fluorkunststoffe eignen sich deshalb nur bedingt für tragende Teile. Bei Pumpen betrifft dies hauptsächlich das Gehäuse, welches den Pumpendruck aufnehmen muss. Da eine Verstärkung durch Füllstoffe wegen der Reinheit nicht erlaubt ist, muss das Pumpengehäuse entsprechend massiv gefertigt oder aussen durch andere Werkstoffe gestützt werden.

5.2.5 Thermische Eigenschaften

Die oberen Einsatztemperaturen von Fluorkunststoffen liegen je nach Typ zwischen 150°C und 260°C, weshalb sie für heisse Medien, wie Phosphorsäure (H_3PO_4 , $> 130^\circ\text{C}$) verwendet werden können. Dabei sind jedoch die reduzierten mechanischen Eigenschaften zu berücksichtigen. Werden teilkristalline Thermoplaste weiter erwärmt, gehen sie bei der Kristallitschmelztemperatur in einen thermoplastischen Zustand über, wodurch sie form- und schweisbar werden.

Die *Längenausdehnung* von Fluorkunststoffen ist um etwa eine Zehnerpotenz grösser als diejenige von Metallen. Da sich eine Rotorummantelung aus Fluorkunststoff bei höheren Temperaturen stark ausdehnt (ca. 1 % bei einer Temperaturänderung um 75 K bei PFA), das Pumpengehäuse jedoch von aussen gestützt wird, verengt sich der mechanische Luftspalt. Dies kann gemäss Kap. 4.3 zu hydrodynamischen Problemen beim passiven Axiallager führen und den Einsatz magnetgelagerter Pumpsysteme für hohe Temperaturen begrenzen.

5.3 Rotorummantelung

Aufgrund der hohen Reinheitsanforderungen und der aggressiven Chemikalien muss der metallische Magnetring durch eine Rotorummantelung vor Korrosion geschützt und damit eine Metallkontamination der Chemikalien verhindert werden. Bei der Realisierung der Rotorumman-

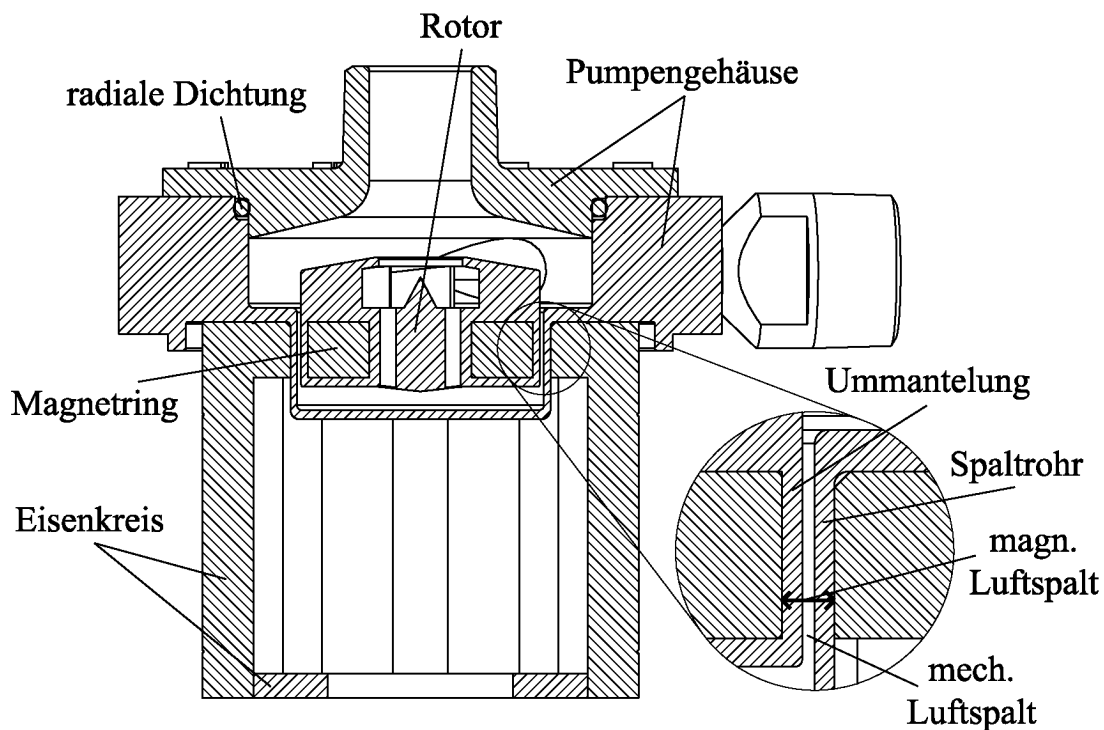


Abb. 5.8: Schnittbild der Chemikalienpumpe mit Eisenkreis

telung hat sich insbesondere das Infrarot-Spiegelschweißen wegen seiner guten Reproduzierbarkeit und Sauberkeit als zuverlässiges Herstellungsverfahren herausgestellt. Durch zerstörungsfreies Prüfen der Schweißnaht kann deren Qualität im Einzelfall nicht garantiert werden, weshalb als zweite Sicherheit eine Beschichtung mit Parylene den Magnetring bei einem Leck vor direktem Kontakt mit Chemikalien schützt. Diese doppelte Ummantelung und regelmässige Inspektionen garantieren eine hohe *Zuverlässigkeit* des Fördersystems.

Rotor mit Flügelrad

Abb. 5.8 zeigt ein Schnittbild der Chemikalienpumpe mit dem Eisenkreis des Scheibenmotors. Der Magnetring ist eingekapselt in einer Kunststoffummantelung, welche zudem das Flügelrad der Kreiselpumpe trägt.

Beim Magnetring handelt es sich um einen *gesinterten Seltenerd-ermagneten*. Er besteht grösstenteils aus Eisen (Fe) und unedlen Sel-

tenerdmetallen, welche sehr reaktionsfähig sind². Bei einem Kontakt mit Chemikalien korrodieren die Metalle, was zu einer Volumenzunahme des Magnetings führt. Die Kunststoffummantelung wird dadurch verformt und aufgebläht. Durch die mechanische Spannung kann die Ummantelung reißen, womit Metalle in die hochreinen Chemikalien austreten und Wafer sowie die Anlage verunreinigt werden.

Die Permeation von Chemikalien durch die Kunststoffummantelung und die damit verbundene Korrosion des Magnetings beschränken somit die Einsatzdauer des Rotors in der Chemikalienpumpe. Der Rotor muss nach einer gewissen Zeit, welche durch die kritische Menge eingedrungener korrosiver Chemikalien bestimmt wird, ausgetauscht werden. Damit ein Rotor möglichst lange verwendet werden kann, muss die Ummantelung eine *dichte Permeationsbarriere* bilden. Neben den verwendeten Materialien und deren Verarbeitung, wird die Permeation hauptsächlich von der Dicke der Ummantelung beeinflusst.

Die Detailansicht in Abb. 5.8 zeigt den magnetischen Luftspalt zwischen Magnetring und Eisenkreis. In diesem Bereich kann die Rotorummantelung und das Spaltrohr, welches den Motor schützt, nicht beliebig dick gemacht werden. Denn sowohl ein vergrößerter magnetischer Luftspalt, als auch ein reduzierter mechanischer Luftspalt verstärken gemäss Kap. 4.3 auf S. 78 die axiale Auslenkung des Rotors beim Pumpen und schränken somit den Arbeitsbereich der Pumpe ein. Es ist deshalb ein *Kompromiss zwischen der Einsatzdauer des Rotors und der Beschränkung des Arbeitsbereichs* zu finden.

Pumpengehäuse

Das Pumpengehäuse in Abb. 5.8 besteht aus einem Gehäusebecher, welcher mit dem Spaltrohr in die Motorbohrung eingelassen ist, einem Gehäusedeckel und einem O-Ring, welcher zwischen Becher und Deckel radial dichtet. Diese statische Dichtung ermöglicht eine einfache *Inspektion* und allenfalls ein Austausch des Rotors. Rotor und Pumpengehäuse lassen sich dabei einfach vom Scheibenmotor trennen.

Da aus Reinheits- und Beständigkeitsgründen als Dichtungsmaterial teils kostspielige Perfluorelastomere eingesetzt werden müssen, ist auch

²Elektronegativität (Pauling) der Elemente im Magnetmaterial: Fe 1.83, Nd 1.14, Dy 1.22, Pr 1.13, Co 1.88, B 2.04

ein Verschweissen von Pumpengehäuse und -deckel denkbar. Dies verunmöglicht jedoch eine optische Kontrolle des Rotors und verlangt entsprechende *Erfahrungswerte* bezüglich der Einsatzdauer und der Zuverlässigkeit der Rotorummantelung.

5.3.1 Realisierung

Da es sich bei den für eine Ummantelung verwendbaren Werkstoffen grösstenteils um Thermoplaste handelt, kann deren Eigenschaft des thermischen Formens und Fügens genutzt werden. Abb. 5.9 zeigt eine Übersicht über thermische Verfahren zur Realisierung einer Kunststoffummantelung des Magnetings. Aufgrund der besseren Flexibilität bei der Prototypenherstellung werden hauptsächlich Schweissverfahren betrachtet.

Seltenerd-Dauermagnete

Bei der Realisierung der Rotorummantelung sind die Eigenschaften von Permanentmagneten zu berücksichtigen. Dies betrifft einerseits die erlaubten Höchsttemperaturen und andererseits die Handhabung der magnetisierten Ringe.

Seltenerddauermagnete bestehen aus fein gemahlene Magnetkörnern,

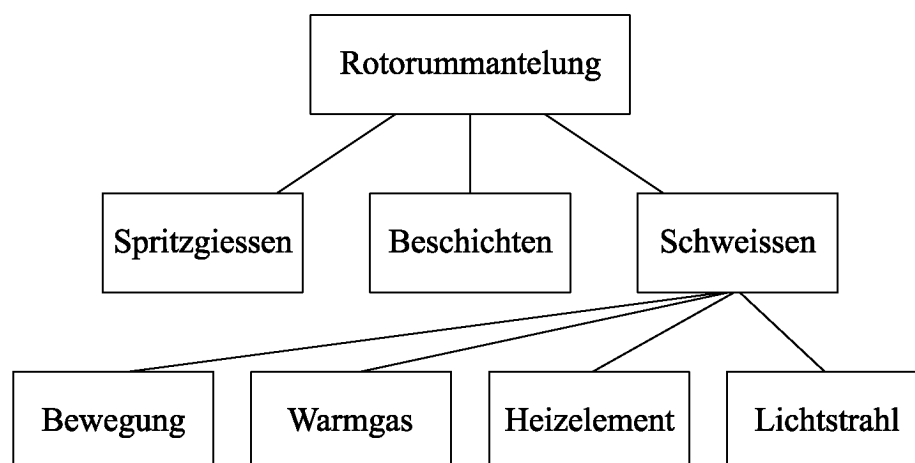


Abb. 5.9: Thermische Verfahren zur Kunststoffummantelung des Rotors

welche vor dem Sinterprozess in einem Magnetfeld ausgerichtet werden. Die entstehende Mikrostruktur kann in dieser Vorzugsrichtung auf eine sehr hohe Feldstärke magnetisiert werden. Bei NdFeB-Magneten wird die Mikrostruktur über 400°C irreversibel geschädigt, weshalb bei der Herstellung diese Temperatur nicht überschritten werden darf [Vacu00]³.

Aufgrund irreversibler Verluste bei erhöhten Temperaturen und der aufwändigeren Handhabung magnetisierter Teile ist es sinnvoll die Rotoren erst nach der Herstellung der Ummantelung zu magnetisieren. Magnetisierte Rotoren ziehen dann ferromagnetische Partikel an, weshalb auf eine saubere Umgebung zu achten ist. Da solche Verunreinigungen nicht gänzlich ausgeschlossen werden können, müssen die Rotoren zur *Reinigung in eine Säurelösung* eingelegt werden, um die Metallpartikel aufzulösen.

Spritzgussverfahren

Viele Kunststoffteile werden durch Spritzgussverfahren hergestellt. Mit entsprechendem Aufwand ist es möglich Körper vollständig zu umspritzen. Dabei wird der Magnetring während dem Spritzen durch Stützstifte gehalten, welche vor dem Verfestigen des Kunststoffes zurückgezogen werden. Diese Technologie eignet sich gut zur Herstellung grosser Stückzahlen, ist jedoch für erste Prototypen eher unflexibel.

Beschichtungsverfahren

Für Beschichtungen aus Fluorkunststoffen werden meist *Pulverbeschichtungsverfahren* angewendet. Der Magnetring muss auf eine Temperatur über der Kristallitschmelztemperatur erhitzt werden, damit die Kunststoffteilchen verschmelzen. Um alle Poren zu schliessen, müssen diese Beschichtungen eine gewisse Mindestdicke aufweisen. Die resultierende Permeationsbarriere ist jedoch aufgrund der *ungleichmässigen Schichtdicke* nur ungenügend.

³Da vielfach die Vorzugsrichtung in einer schwachen Vormagnetisierung gespeichert wird, darf dann die Curie-Temperatur von 330°C bei der Herstellung nicht überschritten werden oder die Vorzugsrichtung muss durch eine Markierung gekennzeichnet sein.

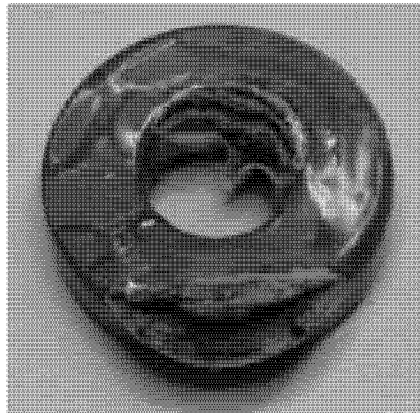


Abb. 5.10: Beschichteter Magnetring nach 28 Tagen eingelegt in Chemikalien

Abb. 5.10 zeigt einen mit ETFE beschichteten Magnetring, welcher 28 Tage in Chemikalien (Ethylenglykol/HF 5:1 85°C) eingelegt wurde. In dieser Zeit drangen Chemikalien durch die Beschichtung und korrodierten das Magnetmaterial, bis die Beschichtung an dünneren Stellen entlang der Kanten aufgerissen wurde.

Eine Alternative zu Pulverbeschichtungen sind *Parylene-Beschichtungen* [Parab, Paraa]. In einem Dampf-Auftragverfahren (engl. *vapor deposition*) bei Raumtemperatur werden unter Vakuum gasförmige Monomere direkt auf der zu beschichtenden Oberfläche polymerisiert. Bei diesem Verfahren wird ein dünner ($\sim 200 \mu\text{m}$), gleichmässiger Kunststofffilm aufgebracht, welcher ausgezeichnete chemische und mechanische Eigenschaften besitzt. Aufgrund dieser Eigenschaften eignen sich Parylene gut als primäre Beschichtung auf dem Magnetring.

Schweissverfahren

Indem zwei Kunststoffteile miteinander verschweisst werden, lässt sich der Magnetring einkapseln. Die wichtigsten Schweissverfahren für Thermoplaste sind in Abb. 5.9 eingeteilt nach der Art der Wärmezufuhr. Es wird dabei unterschieden zwischen Schweißen durch mechanische Bewegung, Warmgas, ein Heizelement oder einen Lichtstrahl. Um die Eignung als Herstellverfahren einer dichten Rotorummantelung zu prüfen, sind in Tab. 5.4 die Schweissverfahren nach den folgenden Kriterien beurteilt:

- Die Schweissnaht muss eine hohe *Qualität* aufweisen. Es muss auf der ganzen Breite der Schweissnaht eine homogene Verbindung entstehen, ohne Poren oder Einschlüsse, welche die Permeationsstrecke verkürzen.
- Das Schweissverfahren sollte eine *hochreine* Schweissnaht ergeben, aus welcher nicht mehr Verunreinigungen gelöst werden, als aus dem ursprünglichen Material.
- Mit dem Schweissverfahren sollte zuverlässig eine gleich bleibende Qualität erreicht werden. Es sollte einfach steuerbar und gut *reproduzierbar* sein.
- Falls obige Kriterien erfüllt werden, ist aus Kostengründen der *Zeitbedarf* zur Herstellung der Rotorummantelung interessant.

	Bewegung Ultraschall	Warmgas Draht	Heizelement Spiegel	IR	Licht Laser
Qualität	--	+	++	++	-
Reinheit	-	+	+	++	--
Reproduzierbarkeit	+	--	+	++	++
Zeitbedarf	++	--	-	-	+

Tab. 5.4: Beurteilung Schweissverfahren für Rotorummantelung

Beim **Bewegungsschweissen** im Ultraschallbereich (20 bis 25 kHz) werden die Fügezonen durch Reibung erwärmt, aufgeschmolzen und miteinander verschweisst. Dazu müssen die Fügezonen entsprechend gestaltet und genau gefertigt sein. Die entstehende Schweissnaht ist zwar dicht, aber nicht über die ganze Fügezone homogen. Nicht verschweisste Spalten verkürzen die Permeationsstrecke. Zudem besteht auch das Risiko einer Beschädigung des spröden Magnettrings, wie aus Abb. 5.11 ersichtlich.

Mit einer Art des **Warmgasschweissens**, dem Drahtschweissen, kann der Magnetring eingekapselt werden, indem aufgeschmolzener Schweissdraht in eine Nute gedrückt wird. Die Nute wird dabei umlaufend gefüllt und verschweisst. Beim Punkt, wo Anfang und Ende

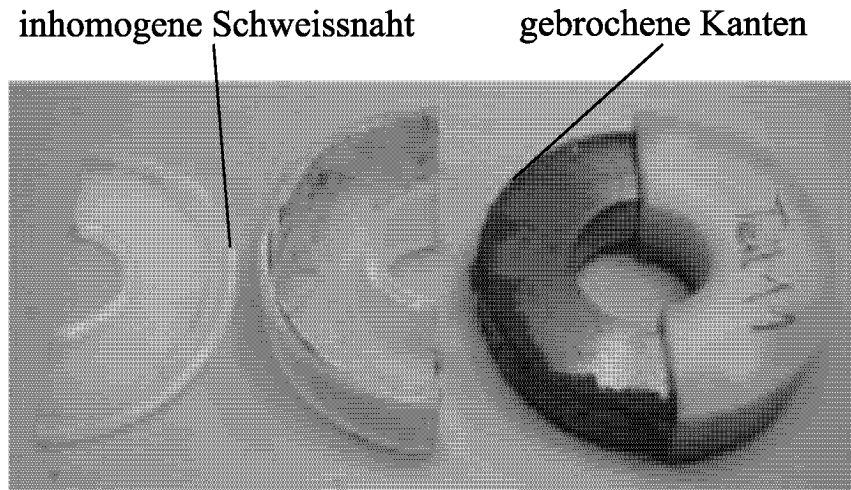


Abb. 5.11: Mit Ultraschall verschweisste Rotorummantelung

zusammen kommen, kann jedoch Luft eingeschlossen werden, was im schlimmsten Fall nach dem Überdrehen zu einer durchgehenden Pore führt. Das Drahtschweissen von Hand ist zudem schwierig zu reproduzieren.

Beim **Heizelementschweissen** erfolgt die Wärmezufuhr entweder durch Kontakt oder Wärmestrahlung (IR). Für die Rotorummantelung hat sich das aus dem Rohrschweissen adaptierte Verfahren mit einem planen Spiegel als Hezelement bewährt. Die Fügezonen werden dabei gleichmässig erwärmt, was beim nachfolgenden Zusammendrücken eine homogene Verbindung über der ganzen Breite der Schweissnaht ergibt. Insbesondere beim IR-Spiegelschweissen entsteht aufgrund der berührungslosen Wärmezufuhr eine sehr saubere Schweissnaht und der Schweissprozess ist einfach zu reproduzieren.

Beim **Laserdurchstrahlungschweissen** wird die Eigenschaft vieler Kunststoffe ausgenutzt, für Licht bestimmter Wellenlängen transparent zu sein. Um durch einen Laser die Wärme in die Fügezone zu bringen, muss dort ein Grossteil der Energie absorbiert werden. Dies wird erreicht, indem ein transparenter mit einem absorbierenden Kunststoff verschweisst wird oder indem eine absorbierende Flüssigkeit in die Fügezone gegeben wird. Zur Absorption wird vielfach Kohlenstoff in Form von Russ [Klei01] verwendet. Die entstehende Schweissnaht ist vor allem bei Verwendung der absorbierenden Flüssigkeit nicht homogen und es ist mit Verunreinigungen in der Schweissnaht zu rechnen.

5.3.2 Zuverlässigkeit

Die Komponenten in Prozessanlagen für die Halbleiterindustrie müssen eine hohe Zuverlässigkeit aufweisen, da ein Ausfall enorme Kosten nach sich zieht. Der magnetgelagerte Rotor in der Chemikalienpumpe ist eine besonders kritische Komponente, da neben einem Ausfall auch das Risiko einer massiven Metallkontamination besteht. Entsprechend ist bei der Realisierung auf eine *hohe Qualität und Zuverlässigkeit* zu achten. Abb. 5.12 zeigt Massnahmen, welche die Zuverlässigkeit der Rotorummantelung erhöhen.

Doppelte Ummantelung

Eine Parylene-Beschichtung als *redundante Schutzschicht* unter dem Fluorkunststoffmantel verbessert die Zuverlässigkeit der Ummantelung. Diese doppelte Ummantelung erlaubt, dass bei einem Leck im Fluorkunststoffmantel der Rotor ausgetauscht werden kann, bevor Chemikalien mit dem Magnetmaterial in Kontakt kommen. Eingesetzte Rotoren sind deshalb regelmässig zu kontrollieren, um eine fehlerhafte Ummantelung frühzeitig zu erkennen. Dabei wird das Inspektionsin-

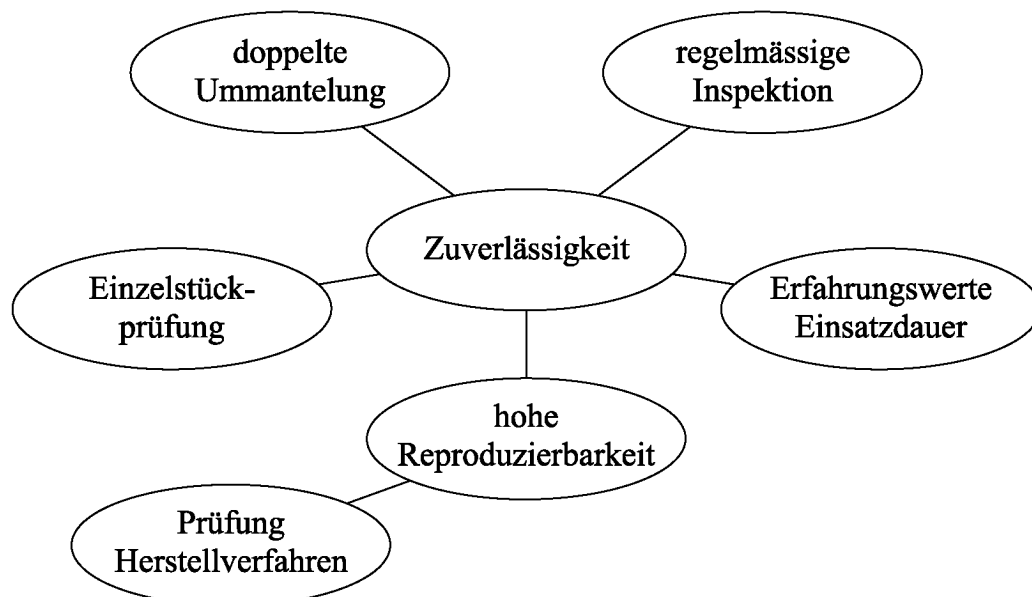


Abb. 5.12: Massnahmen für ein verbesserte Zuverlässigkeit der Rotorummantelung

tervall so festgelegt, dass die Primärbeschichtung in dieser Zeit den Chemikalien zu widerstehen vermag.

Erfahrungswerte der Einsatzdauer

Die Einsatzdauer und das Inspektionsintervall lassen sich ermitteln, indem Rotoren in Chemikalien eingelegt und beobachtet werden. Aufgrund von Verfärbungen unter der Ummantelung und der Volumenzunahme kann die Permeation von Chemikalien abgeschätzt werden. In Abb. 5.13 ist ein verfärbter und aufgeblähter Rotor gezeigt, an welchem die Volumenzunahme durch Messen des Durchmessers abgelesen werden kann.

Um zu überprüfen, ob dabei Metalle in die Chemikalien gelangen, wurden bei den eingelegten Rotoren jeweils Eluatanalysen durchgeführt. Die Ummantelung blieb auch dann dicht, wenn der Magnetring begann zu korrodieren und die Ummantelung aufgebläht wurde. Erst beim Aufreißen der Ummantelung werden die Chemikalien massiv durch Metalle kontaminiert.

Bei diesen Tests zeigte sich zudem, dass Ummantelungen aus ECTFE und PFA wesentlich permeationsdichter sind als ein PVDF-Mantel. Die Korrosion des Magnetrings setzte etwa zwei- bis viermal später ein. Eine weitere Verbesserung wird mit der Parylene-Primärbeschichtung erreicht. Für die aggressivsten Chemikalien wurde eine minimale Ein-

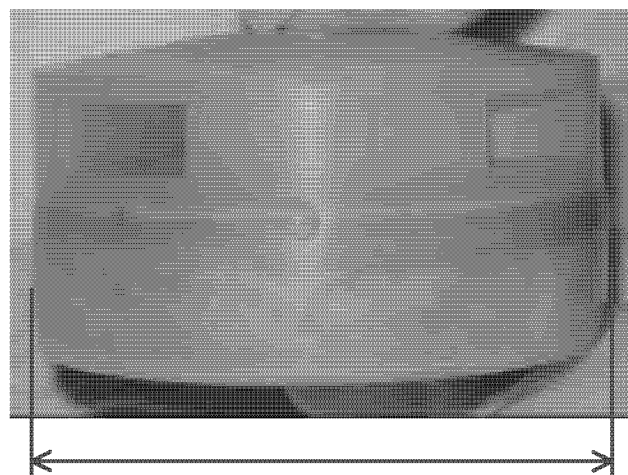


Abb. 5.13: Aufgeblähter und verfärbter Rotor

satzdauer von einem halben Jahr bestimmt. Für weniger aggressive Medien können Rotoren wesentlich länger eingesetzt werden.

Anhand des Modells der Permeation in Kap. 5.2.3 lässt sich die Einsatzdauer für verschiedene Temperaturen und Chemikalienkonzentrationen näherungsweise abschätzen. Um die genaue Einsatzdauer zu bestimmen, sind jedoch Versuche mit den zu pumpenden Chemikalien vorzunehmen. Dabei können diese Tests durch erhöhte Temperaturen und reduzierte Schichtdicken beschleunigt werden.

Qualitätssicherung

Durch Methoden der Qualitätssicherung wird einerseits das Risiko eines Leckes vermindert und andererseits erhalten die ermittelten Erfahrungswerte für alle Rotoren Gültigkeit. Denn jeder Rotor ist in einer vergleichbaren Ummantelung eingekapselt.

Kleinste Risse und Poren lassen sich durch Prüfverfahren mit *Penetrationsmittel* (beispielsweise Helium) erkennen. Die Qualität der Schweissnaht lässt sich damit jedoch nicht überprüfen. Auch andere zerstörungsfreie Prüfverfahren, wie Ultraschall-, Laser- oder Thermografieverfahren ermöglichen keine einwandfreie Beurteilung der Schweissnaht, dürften aber durch technologische Fortschritte zukünftig vermehrt einsetzbar werden [Sche97].

Weil die Qualität der einzelnen Rotoren nur beschränkt zerstörungsfrei geprüft werden kann, muss das Herstellverfahren eine *hohe Reproduzierbarkeit* aufweisen. Zusammen mit einer regelmässigen Kontrolle der Herstellung, kann damit eine gleich bleibende Qualität der Rotorummantelung erreicht werden.

Mit der Gesamtheit dieser Massnahmen können magnetgelagerte Rotoren bedenkenlos in Prozessanlagen eingesetzt werden.

5.4 Reinheit von Fördersystemen

Für die Beurteilung der Reinheit ist das Fördersystem bei Betriebsbedingungen zu betrachten. Erst mit dieser *Gesamtbetrachtung* kann die Kontamination innerhalb einer Anlage abgeschätzt und verschiedene Fördersysteme miteinander verglichen werden. Bei diesen Reinheits-

messungen werden die Vorteile der Kreiselpumpe mit magnetgelager-tem Flügelrad bestätigt.

Aufgrund der berührungslosen Lagerung werden gegenüber Balgpumpen erwartungsgemäss weniger Partikel abgegeben. Zusätzlich erlaubt die hohe Drehzahl des Rotors den Bau kompakter Kreiselpumpen. Diese Chemikalienpumpen weisen gegenüber Balgpumpen eine *geringere Oberfläche* auf, was die Kontamination stark verringert.

Der Aufbau der Pumpe mit wenig Ecken und Spalten ermöglicht eine einfache Entfernung von Rückständen. Zusätzlich sorgt die Strömung innerhalb der Pumpe dafür, dass bei der Inbetriebsetzung die benetzten Oberflächen gut gespült und damit *schnell gereinigt* werden.

Die kompakte Bauweise sowohl der Pumpe als auch des Antriebs erlaubt *kurze Förderleitungen* und reduziert damit die Kontamination durch Materialverunreinigungen.

5.4.1 Ursachen für Verunreinigungen

Sowohl bei Partikeln, wie auch bei Metall-, Anionen- und TOC-Verunreinigungen wird unterschieden, zwischen der oberflächlichen Verunreinigung, welche anfänglich abgewaschen wird, und der kontinuierlichen Kontamination während der Betriebszeit. Dabei können folgende Ursachen für Verunreinigungen unterschieden werden:

Betrieb Besonders bei aktiven Komponenten, wie Pumpen und Ventile, gelangen im Betrieb, wegen mechanisch bewegter Teile, Partikel in die Flüssigkeit. Neben diesem Abrieb wird die Partikelbelastung auch bei Kavitation in der Pumpe erhöht.

Verarbeitung Die Oberflächen weisen aufgrund der Verarbeitung und der Handhabung Fremdstoffe auf. Die Teile von Fördersystemen werden deshalb vor dem Einsatz gereinigt und entsprechend verpackt.

Material Durch die Chemikalien werden aus dem Material ständig Fremdstoffe gelöst.

5.4.2 Testverfahren

Zur Prüfung der Reinheit von Komponenten in Förderanlagen wurde von Grant [Gran01] ein Testverfahren vorgeschlagen, welches die Partikel- und die Metallkontamination unter Betriebsbedingungen erfasst.

Da noch keine Grenzwerte für Pumpen festgelegt wurden, sind in Tab. 5.5 die Reinheitsanforderungen an Ventile zusammengefasst. Diese können teilweise auf Pumpen übertragen werden, da beides aktive Komponenten sind. Bei Partikeln und Metallen werden Grenzwerte jeweils für die oberflächliche und für die kontinuierliche Kontamination spezifiziert.

Kontam.	Grenzwert	Flüssigkeit	Anmerkung
Partikel $\geq 0.1 \mu\text{m}$	$< 0.1 \text{ Part./ml}$	Reinstwasser	nach 300 l Spülflüssigkeit
Partikel $\geq 0.1 \mu\text{m}$	$< 100 \text{ Part./Zykl.}$	Reinstwasser	nach 500 Zyklen
Metalle	$< 20 \text{ ng/cm}^2$	HCl, HF oder HNO ₃	kumulierte Kontamination nach 40 Minuten
Metalle	$< 0.5 \text{ ng/cm}^2/\text{d}$	HCl, HF oder HNO ₃	Auswaschrates nach 7 Tagen

Tab. 5.5: Reinheitsanforderung für Ventile in Förderanlagen

Der Messwert für die *oberflächliche Partikelkontamination* wird durch passives Spülen des Ventils mit Reinstwasser ermittelt. Als Grenzwert wird dabei die Anzahl Partikel angegeben, welche nach einer gewissen Spülmenge noch der Flüssigkeit zukommen.

Da die *kontinuierliche Partikelbelastung* bei Ventilen hauptsächlich mit deren Schaltzyklen zusammenhängt, wird dieser Grenzwert in Anzahl Partikel je Zyklus angegeben. Dies kann auch ähnlich für Balgpumpen definiert werden, verunmöglicht jedoch einen einfachen Vergleich mit Kreiselpumpen.

Die Metallkontamination wird in einem Kreislauf mit Säure ermittelt. Die *oberflächliche Metallkontamination* wird dabei durch die kumu-

lierte Metallkontamination nach 40 Minuten Spülen beziehungsweise Pumpen angegeben. Nach dieser Zeit sind oberflächliche Verunreinigungen grösstenteils in Lösung gegangen.

Verunreinigungen im verwendeten Kunststoff verursachen eine *kontinuierliche Metallkontamination*, welche nach einer gewissen Zeit eine konstante Auswaschrates ergeben. Sowohl die Oberflächenkontamination, als auch die Auswaschrates hängen direkt von der benetzten Oberfläche ab, weshalb diese Messwerte jeweils flächennormiert angegeben werden.

5.4.3 Ergebnisse

Die magnetgelagerte Chemikalienpumpe wurde nach obigem Verfahren getestet. Die ermittelten Messwerte werden mit den Ergebnissen einer Balgpumpe ähnlicher Leistungsfähigkeit [Litc01, Chil01] verglichen.

Partikelkontamination

In Abb. 5.14 ist die kumulative Partikelkonzentration in Abhängigkeit des Durchflusses bei verschiedenen Drehzahlen aufgezeichnet. Bis 20 ℓ/min wurden durchflussunabhängig Werte unter 20 Partikel/ ml gemessen. Darüber steigt die Partikelkontamination schnell an, was wahrscheinlich auf Kavitation in der Pumpe zurückzuführen ist. Gesamthaft ist die Partikelverunreinigung ähnlich oder geringer als bei der Balgpumpe.

Beim erstmaligen Spülen einer Chemikalienpumpe mit Reinstwasser bestätigt sich der Vorteil der einfachen Bauweise. Da die Oberfläche in der Pumpe nur wenige Ecken aufweist, reinigt sich die Pumpe schnell und erreicht mit 420 ℓ Spülflüssigkeit beinahe den Grenzwert für Ventile in Tab. 5.5.

Metallkontamination

Der Vorteil der einfachen Reinigung wird auch mit den Messwerten der Metallkontamination in Tab. 5.6 bestätigt. Die kumulierte Metallkontamination nach 40 Minuten Pumpen von Salzsäure (HCl) zeigt einen wesentlich tieferen flächennormierten Wert als die Balgpumpe. Zieht

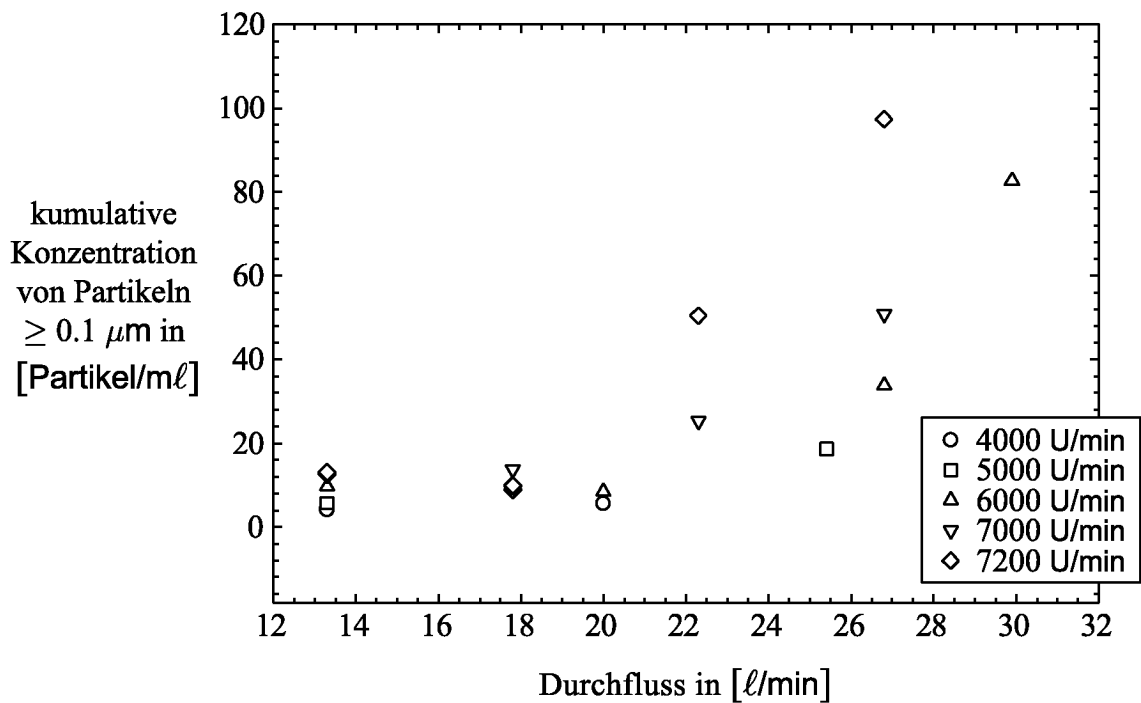


Abb. 5.14: Partikelkontamination der Chemikalienpumpe

	Chemikalienpumpe (magnetgelagert)	Balgpumpe [Litc01, Chil01]
Oberfläche	355 cm ²	3819 cm ²
Spülen (Partikel $\geq 0.1 \mu\text{m}$)	< 0.1 Part./ml nach 420 ℓ	< 1.0 Part./ml nach 3200 ℓ
Oberflächenkont. flächennormiert gesamt	2.5 ng/cm ² 0.89 μg	12.3 ng/cm ² 47.97 μg
Auswaschrates flächennormiert gesamt	0.18 ng/cm ² /d 64 ng/d	0.07 ng/cm ² /d 267 ng/d

Tab. 5.6: Ergebnisse der Reinheitsmessungen an Fördersystemen

man zudem die geringere Oberfläche in Betracht, wird der Unterschied frappant.

Nach 7 Tagen Pumpbetrieb mit Salzsäure werden bei der magnetgelagerten Chemikalienpumpe gesamthafte weniger Metalle ausgewaschen

als bei der Balgpumpen. Der höhere Wert der flächennormierten Kontamination kann mit der unterschiedlichen Reinheit der verwendeten Kunststoffe erklärt werden.

5.5 Schlussfolgerungen

Für den Einsatz magnetgelagerter Chemikalienpumpen in der Halbleiterindustrie ist eine dichte Rotorummantelung mit geringer Permeation entscheidend. Wegen der komplexen Problematik der Chemikalienpermeation liefern erst Tests aussagekräftige Resultate, um die Einsatzdauer eines Rotors zu ermitteln. Aufgrund dieser Resultate kann innerhalb gewisser Grenzen die Einsatzdauer auch für andere Flüssigkeitstemperaturen und Mischungsverhältnisse abgeschätzt werden.

Da eine Kreiselpumpe mit magnetgelagertem Flügelrad exzellente Reinheitseigenschaften besitzt, können die zunehmenden Anforderungen an Fördersysteme erfüllt werden. Damit wird auch bei erhöhter Integrationsdichte eine gute Ausbeute erreicht.

Kapitel 6

Realisierung des Pumpsystems

Lagerlose Antriebe sind typische mechatronische Systeme, welche Entwicklungen aus den Bereichen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik zusammenführen. Bei lagerlosen Pumpsystemen kommen die Gebiete Hydrodynamik und Materialwissenschaften dazu, womit Problemstellungen eine interdisziplinäre Betrachtung erfordern. Aufgrund der Komplexität können Probleme teilweise nur in praktischen Versuchen gelöst werden, wobei mit der Realisierung jeweils weitere Fragen auftauchen. Der Aufbau von Prototypen hat in dieser Arbeit das *Aufzeigen der Realisierbarkeit und Funktionsfähigkeit von lagerlosen Pumpsystemen in der Halbleiterfertigung* zum Ziel.

Da der industrielle Einsatz der Pumpsysteme im Vordergrund steht, sind bei der Realisierung auch wirtschaftliche Kriterien zu beachten. Neben kostengünstigen Herstellungsverfahren beinhaltet dies auch den Entwurf eines zuverlässigen, wartungsarmen Systems.

Anhand der aufgebauten Systeme wird nachfolgend auf einige Aspekte der Realisierung eingegangen:

- Aktive Magnetlagersysteme bieten bei prozessorgesteuertem Aufbau vielfältige Überwachungs-, Kompensations- und Messmöglichkeiten (Kap. 6.1).

- Der Einsatz als Pumpsystem in der Halbleiterfertigung verlangt aufgrund der aggressiven Umgebung in Prozessanlagen auch eine hohe Chemikalienbeständigkeit der weiteren Systemkomponenten (Kap. 6.2).
- Die Leistungsfähigkeit eines lagerlosen Pumpsystems ist begrenzt. Entsprechend sind für Anwendungen mit mehr Förderhöhe oder -volumen leistungsfähigere Pumpsysteme aufgebaut worden (Kap. 6.3).

6.1 Systemübersicht

Was in Abb. 2.18 auf S. 39 bereits schematisch gezeigt wurde, ist nun als reales System in Abb. 6.1 abgebildet. Das lagerlose Pumpsystem besteht dabei aus folgenden Komponenten:

- Der Scheibenmotor mit Kreiselpumpe und integrierter Sensorik wandelt die elektrische Energie in hydraulische Förderarbeit um.
- Die Ansteuerung des Motors erfolgt durch einen Wechselrichter mit entsprechender Signalprozessorelektronik.
- Ein Netzteil stellt die DC-Spannungsversorgung für den Wechselrichter sicher.

Die Ansteuerung des Pumpsystems kann auf drei Arten erfolgen:

- über die RS232-Schnittstelle des Wechselrichters vom PC aus,
- über die SPS-Schnittstelle der übergeordneten Anlage oder
- über eine handliche Bedienhilfe im Inselbetrieb.

Der Austausch eines Rotors wird durch ein Werkzeug erleichtert, mit welchem der Rotor bei geöffneter Pumpe aus der Motorbohrung gezogen wird.

Zusätzlich gehören auch die Regelungs- und Überwachungsrouninen, welche vom Prozessor abgearbeitet werden, zum System. Die zeitkritischen Routinen erfordern dabei eine hohe Effizienz, weshalb direkt in

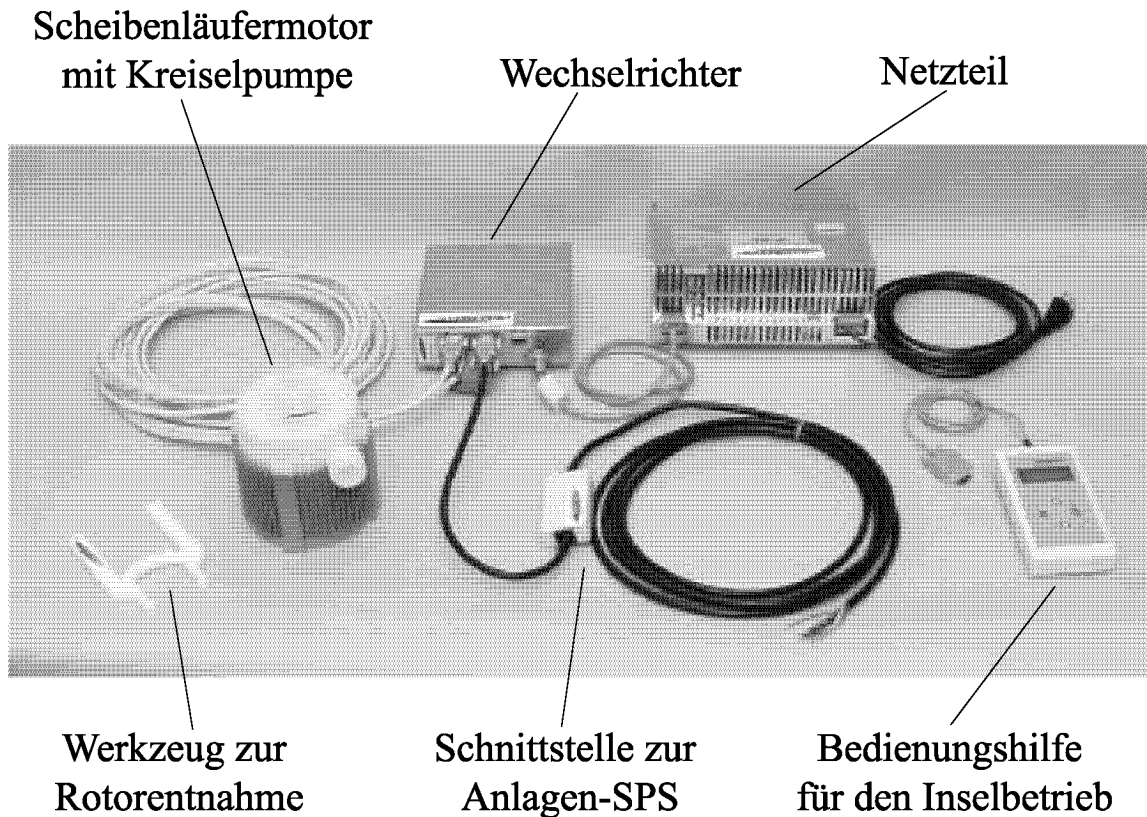


Abb. 6.1: Komponenten des lagerlosen Pumpsystems *BPS3*

Assembler programmiert wird. Die assemblierten Algorithmen werden vom PC mit dem Programm *MCDS* (*Magnetic Control Development Studio*) in den Signalprozessor geladen. Für eine einfache Inbetriebnahme ermöglicht *MCDS* den Online-Zugriff auf sämtliche Speicheradressen des Signalprozessors und damit auf alle Programmvariablen, wie Regelparameter, Skalierungsfaktoren und Messgrößen.

6.1.1 Prozessorgesteuerter Wechselrichter

Die Messsignale werden mittels A/D-Wandlern digitalisiert und daraus die erforderlichen Ströme in der Regelungsroutine berechnet. Im Wechselrichter der ersten Prototypsysteme (Abb. 6.2) wurde die unterlagerte Stromregelung in diskreter Schaltungstechnik ausgeführt. Die geschalteten Leistungsstufen werden dabei mit 2-Punkt-Pulsweitenmodulation angesteuert.

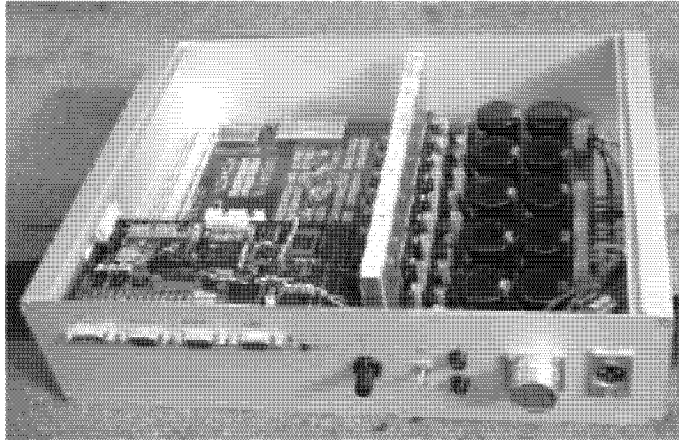


Abb. 6.2: Wechselrichter mit analoger Stromregelung (DSP: *TMS320 C50* von *TI*)

Digitale Stromregler lassen sich heute einfach in digitalen Signalprozessoren implementieren, was gegenüber dem diskreten Aufbau wesentliche Vorteile hat:

- Das Abtasten von Messsignalen während Schaltvorgängen im Wechselrichter kann durch eine entsprechende *Synchronisation* verhindert werden. Damit wird eine Ursache von Signalstörungen praktisch eliminiert.
- Die digitale Stromregelung lässt sich *direkt feldorientiert* und damit sehr dynamisch ausführen (Kap. 2.2.2 auf S. 31).
- Regelparameter lassen sich über die Software einfach ändern und ermöglichen damit einen *flexiblen Einsatz* des Wechselrichters. Zudem lassen sich auch neue Regelungskonzepte implementieren [Hütt03].
- Die digitale Stromregelung im Prozessor *reduziert die Anzahl benötigter Bauteile* im Wechselrichter. Dem gegenüber steht der zusätzliche Bedarf an Rechnerleistung und die erweiterte Software.
- Da die gemessenen Ströme digitalisiert werden, kann diese Information für die *Systemüberwachung* und zur Verbesserung des Betriebsverhaltens verwendet werden.

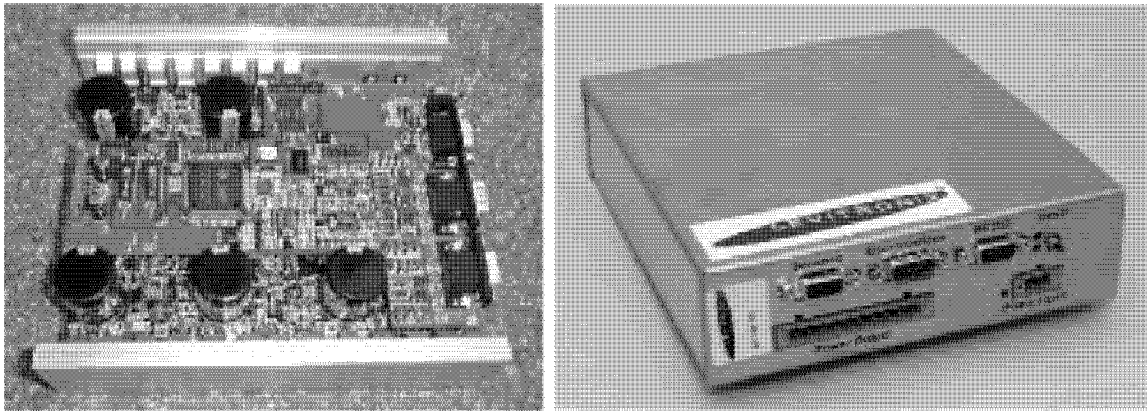


Abb. 6.3: Wechselrichter mit digitaler Stromregelung (DSP: *TMS320 F240* von *TI*)

Abb. 6.3 zeigt eine digitale Wechselrichterelektronik mit und ohne Abdeckung. Die Leiterplatte mit den geschalteten Leistungsstufen wird über eine Steckverbindung von der Prozessorplatine angesteuert. Damit lässt sich die Prozessorplatine auch mit anderen Leistungsstufen kombinieren.

Die diskreten Leistungsschalter (*MOSFET*) sind ans Aluminiumgehäuse montiert, welches gleichzeitig als Kühlkörper dient und als kostengünstiges Strangpressprofil hergestellt werden kann. Darüber wird ein gebogenes Gehäuseblech gestülpt, um die Elektronik zu schützen.

In Abb. 6.4 ist schematisch ein Stromkanal dieses Wechselrichters mit Spannungszwischenkreis abgebildet. Da die beiden Halbbrücken unabhängig voneinander angesteuert werden, kann die Phasenspannung mit-

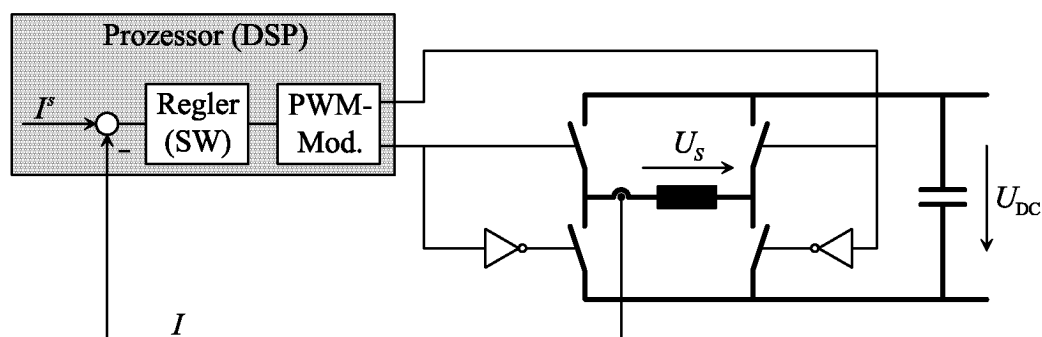


Abb. 6.4: Aufbau digitaler Stromkanal

tels 3-Punkt-Pulsweitenmodulation eingestellt werden [Zhan95]. Dies reduziert die Rippelströme und erlaubt damit die Schaltfrequenz zu verringern. Neben einem verbesserten Lagerverhalten ergeben sich damit auch geringere Schaltverluste im Wechselrichter.

6.1.2 Lagerloses Pumpsystem als Messinstrument

Mechatronische Systeme bieten aufgrund der digitalen Regelung vielfältige Überwachungsmöglichkeiten. Damit kann die Zuverlässigkeit erhöht und bei Fehlfunktionen frühzeitig reagiert werden. Nachfolgend sind einige Möglichkeiten herausgegriffen, welche im lagerlosen Pumpsystem implementiert wurden.

- Um ein Berührung zwischen Flügelrad und Gehäuse und damit den Abrieb von Partikeln zu verhindern, wird die radiale und axiale Rotorposition überwacht. Befindet sich der Rotor ausserhalb gewisser Grenzen wird die Drehzahl reduziert, womit die Störkräfte zurück gehen.
- Als Schutz vor einer Überhitzung des Motors und des Wechselrichters werden diese Temperaturen gemessen, überwacht und allenfalls gewarnt und abgeschaltet. Dies vereinfacht den Betrieb des Pumpsystems bis an die thermische Begrenzung.
- Durch Kompensationsalgorithmen lassen sich stationäre hydraulische oder mechanische Radialkräfte ausgleichen. Diese Massnahme reduziert die Lagerströme und entsprechend die Motorverluste.

Zudem kann das Pumpsystem auch als Messgerät genutzt werden. Dabei lassen sich aus den im System vorhandenen Messwerten Prozessgrössen, wie Förderhöhe und -volumen berechnen [Hahn02]. Von der Anlage kann nun direkt die Prozessgrösse (Förderhöhe oder -volumen) vorgegeben werden und das Pumpsystem regelt autonom auf den geforderten Wert. Eine separates Messinstrument wird damit nicht mehr benötigt.

Ebenso lassen sich Änderungen der hydraulischen Last einfach erkennen. So verstopfen Filter mit der Zeit. Anhand der benötigten Förder-

höhe kann nun bestimmt werden, wann der Filter ausgetauscht werden muss. Damit erreichen die Filter immer ihre maximale Einsatzdauer.

6.2 Chemikalienbeständigkeit Scheibenmotor

Die Luft in Halbleiter-Fabrikationsanlagen ist wegen der Verwendung aggressiver Chemikalien belastet durch korrosive Gase und Dämpfe. Zudem kann es vorkommen, dass beim Befüllen, bei Umbauten oder durch Lecks Chemikalien auf einzelne Komponenten in einer Anlage tropfen.

Anlagen werden deshalb so aufgebaut, dass der problematische Chemikalienbereich abgetrennt ist vom Steuerungsbereich. Im Chemikalienbereich werden Auffangbecken und Entlüftungsanlagen installiert, um Personen und Anlagen zu schützen. Da teils Chemikalien brennbar sind, gelten für elektrische Komponenten in diesem Bereich strenge Schutzbestimmungen, welche das Risiko einer Entladung und damit eines Brands reduzieren [SEMI96b, SEMI00a, SEMI00b].

Um diese Schutzbestimmungen mit angemessenem Aufwand zu erfül-

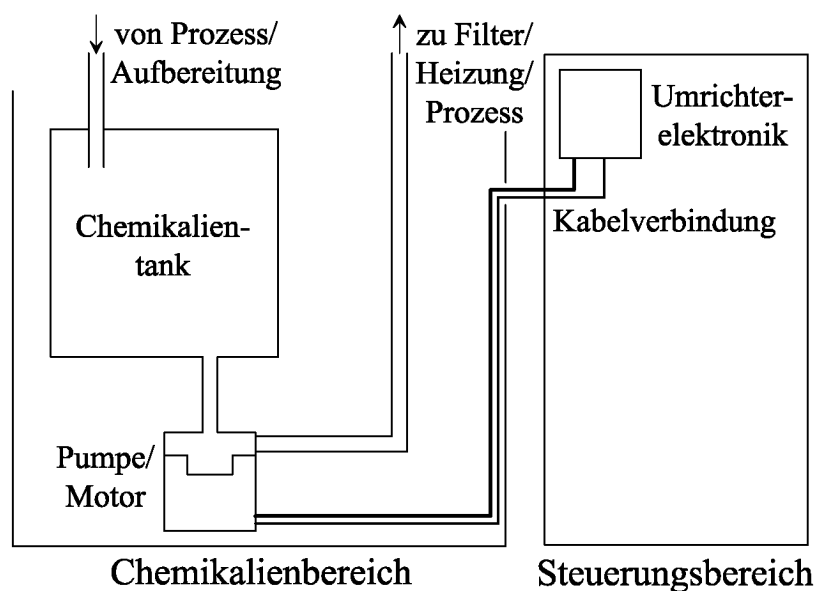


Abb. 6.5: Platzierung des Pumpsystems in einer Anlage

len, werden nur Antrieb und Pumpe im Chemikalienbereich platziert und der Umrichter wird im weniger kritischen Steuerungsbereich montiert, wie Abb. 6.5 schematisch zeigt. Die Leistungs- und Signalübertragung erfolgt über eine Kabelverbindung zwischen Antrieb und Umrichter.

Da sich der Scheibenmotor und die Kreiselpumpe innerhalb des Chemikalienbereichs befinden, sind diese entsprechend gegen Korrosion zu schützen. Mit einer *hermetischen Abdichtung*, *Fluorkunststoffbeschichtungen* und *resistenten Zuführungen* wird eine hohe Chemikalienbeständigkeit erreicht.

Diese Anforderungen sind beim ersten Prototypsystem, welches zur Evaluierung der Funktion und für Fördertests mit Chemikalien eingesetzt wurde, noch nicht erfüllt. Am Motor in Abb. 6.6 sind daher Korrosionsspuren sichtbar, die aufgrund eines Lecks entstanden sind.

6.2.1 Beschichtung Motorgehäuse

Um das Aluminiumgehäuse des Scheibenmotors vor Korrosion durch Chemikalien zu schützen ist eine Fluorkunststoffbeschichtung aufzubringen. Dabei werden gebräuchliche Fluorkunststoffe (Tab. 5.3 auf S. 92) mittels Pulverbeschichtungsverfahren verarbeitet. Um sämtliche



Korrosion durch
Chemikalien

Abb. 6.6: Motor und Pumpe des ersten Prototypsystems

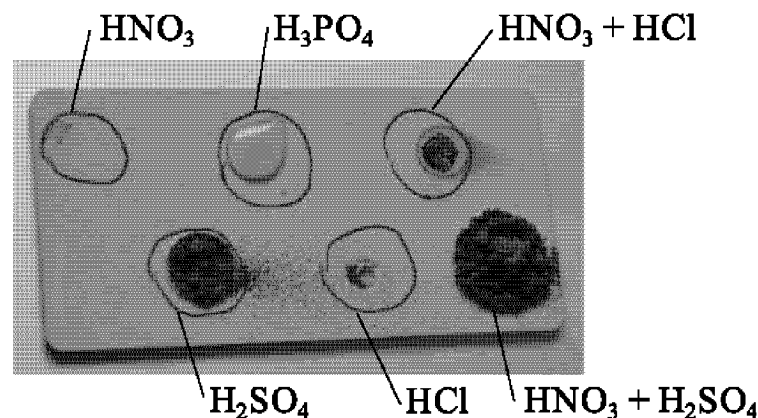


Abb. 6.7: FEP-beschichtetes Aluminiumblech nach Tropfentest

Poren dieser Pulverbeschichtungen zu schliessen, muss die Beschichtung in einer genügenden Dicke aufgetragen werden. Da Fluorkunststoffe gute thermische Isolatoren sind, ist jedoch eine möglichst geringe Schichtdicke erwünscht, damit die Verlustwärme des Motors gut abgeführt werden kann.

Verschiedene Beschichtungen und Verfahren wurden mittels eines Tropfentests auf ihre Resistenz und Dichtigkeit hin überprüft. Dabei werden Tropfen hochprozentiger Säuren und Säuremischungen auf beschichtete Aluminiumbleche aufgebracht, während 48 Stunden einwirken gelassen und danach begutachtet. Dieser einfache Test simuliert eine Situation, mit welcher in Anlagen zu rechnen ist. Abb. 6.7 zeigt ein beschichtetes Blech nach diesem Test, wobei teilweise eine starke Korrosion sowohl der Beschichtung, als auch des darunter liegenden Blechs aufgetreten ist. Aufgrund der Tropfentests stellte sich eine Pulverbeschichtung mit ETFE als sehr beständig bei geringer Schichtdicke ($\sim 120 \mu\text{m}$) heraus.

6.2.2 Hermetische Abdichtung des Motors

Um neben dem Gehäuse auch den Motor selbst vor Korrosion zu schützen, werden zwei Massnahmen getroffen. Einerseits ist der Antrieb so abgedichtet, dass keine Chemikalien ins Innere des Motors gelangen, und andererseits wird der Motor vergossen. Mit dem Dichtungskonzept in Abb. 6.8 wird der Motorinnenraum hermetisch abgeschlossen. Damit werden die folgenden Ziele erreicht:

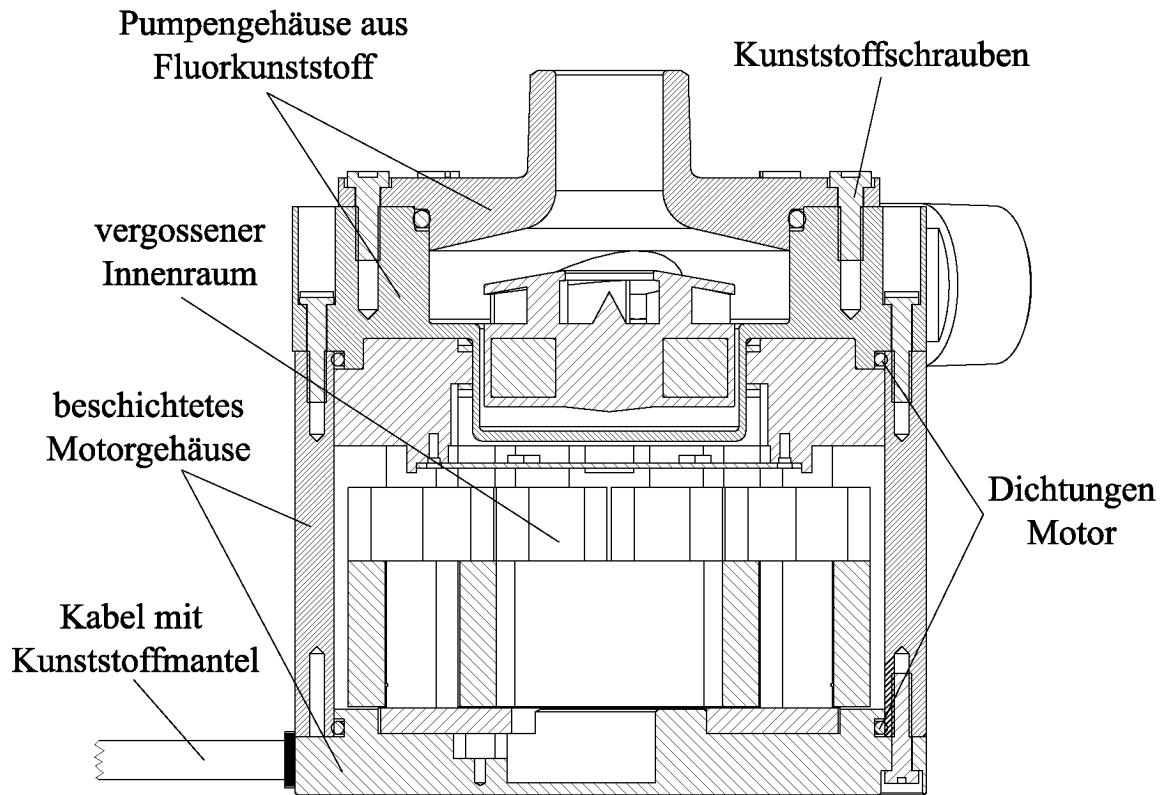


Abb. 6.8: Dichtungskonzept des Antriebs

- Da sowohl die Sensorelektronik, als auch die Wicklungen nicht mehr offen zugänglich sind, erfüllt der Antrieb die Sicherheitsnormen für elektrische Systeme im Chemikalienbereich.
- Das Vergiessen ergibt eine mechanisch stabile Verbindung zwischen den Komponenten des Motors. Dies reduziert einerseits Motorgeräusche und erhöht andererseits die Zuverlässigkeit des Antriebs.
- Die Vergussmasse hat eine wesentlich bessere Wärmeleitfähigkeit als Luft, womit sich die Abfuhr der Verlustwärme verbessert.
- Die hermetische Abdichtung macht sogar den Betrieb von Kreiselpumpe und Scheibenmotor in Abb. 6.9 getaucht in Wasser oder Chemikalien denkbar.

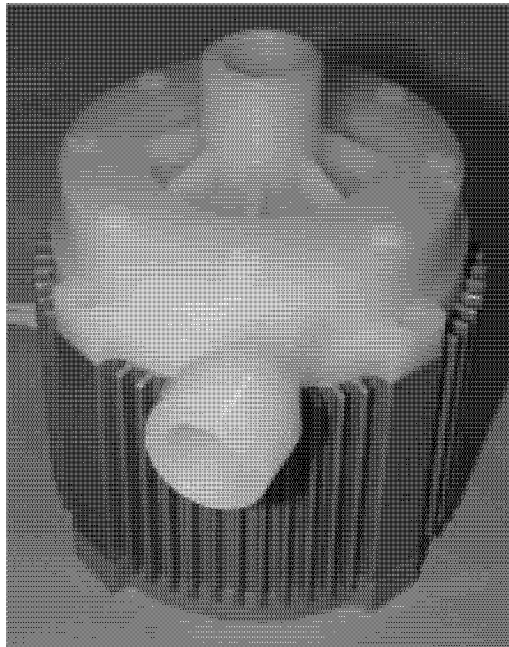


Abb. 6.9: Chemikalienbeständiger Scheibenmotor mit Kreiselpumpe

Rotor-Magnetring (zweipolig)		$D48.5 \times d22 \times 12 \text{ mm}$
magn. Luftspalt		3.75 mm
Motor mit Kreiselpumpe		$D130 \times 150 \text{ mm}$
Drehmomentkonstante	c_m	5.7 Ncm/A
Kraft-Strom-Faktor	k_i	6.0 – 6.4 N/A
Kraft-Weg-Faktor	k_s	11.6 – 23.3 N/mm
axiale Steifigkeit	k_z	5.7 N/mm
Zwischenkreisspannung	U_{DC}	72 V
max. Strom je Leistungskanal		8 A
PWM-Frequenz		17.5 kHz

Tab. 6.1: Daten zum Pumpsystem *BPS3*

6.3 Leistungsfähigkeit

Nachfolgend wird auf die begrenzte Förderleistung des lagerlosen Pumpsystems *BPS3* in Abb. 6.1 eingegangen, dessen Kenndaten in Tab. 6.1 aufgeführt sind. Die Bereiche beim Kraft-Strom-Faktor k_i und

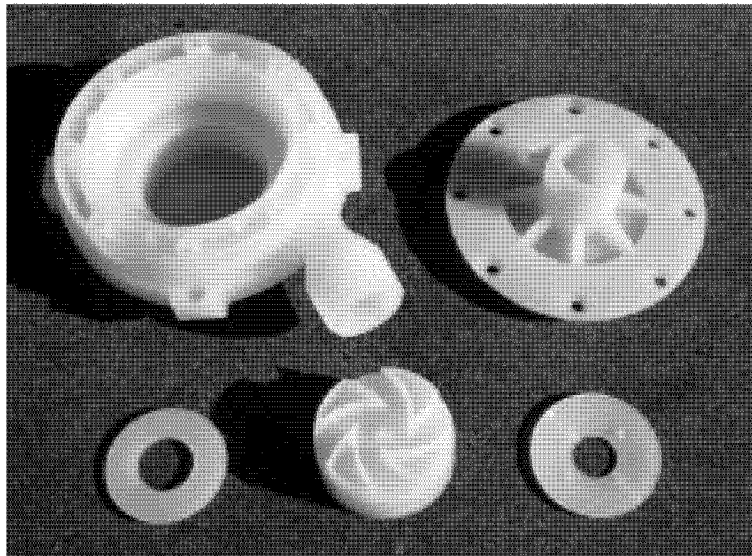


Abb. 6.10: Spritzgussteile aus PVDF einer lagerlosen Kreiselpumpe

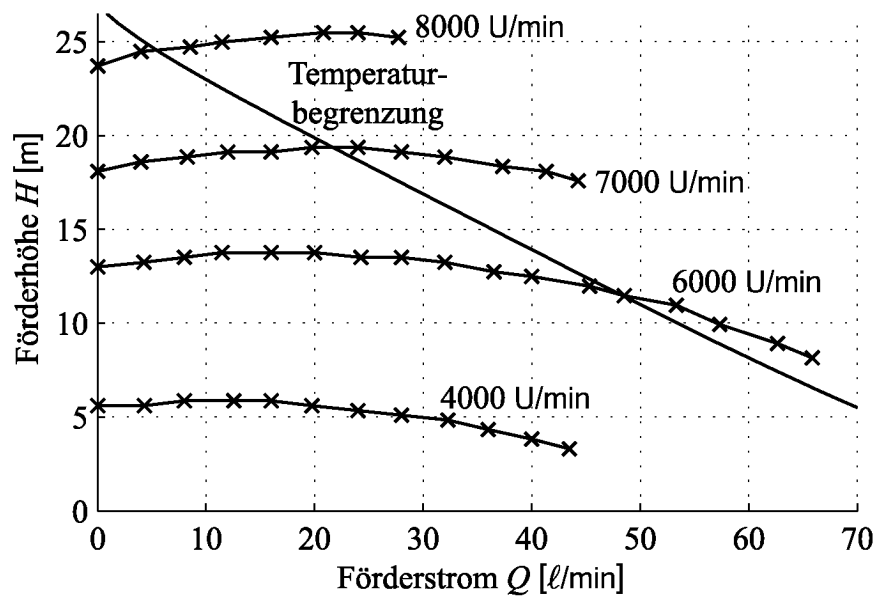
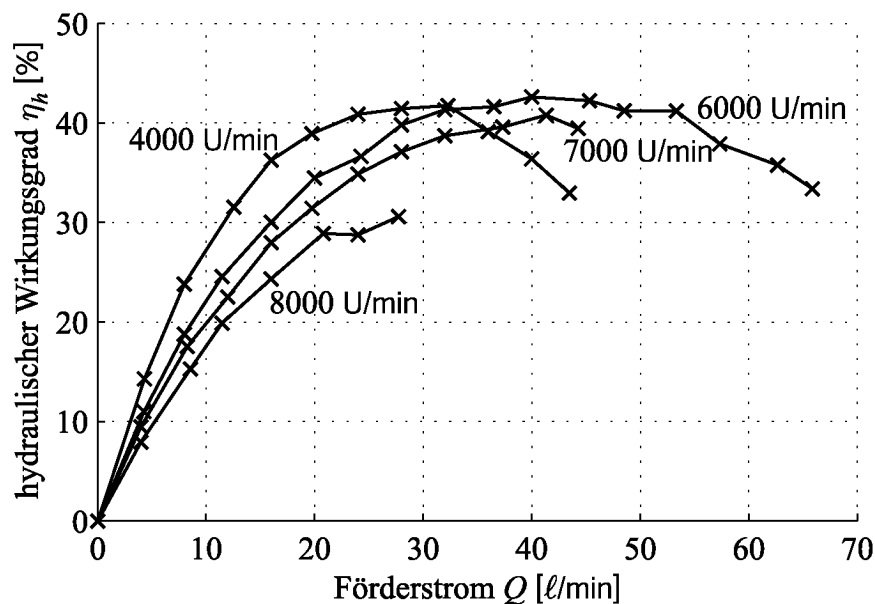
Kraft-Weg-Faktor k_s ergeben sich aus der Abhängigkeit vom Winkel zwischen Kraft- und Feldrichtung [Hütt02].

Die hydraulischen Messungen wurden dabei mit einer Kreiselpumpe bestehend aus den PVDF-Spritzgussteilen in Abb. 6.10 durchgeführt. Diese Kreiselpumpe erfüllt die hohen Beständigkeits- und Reinheitsanforderungen, welche die Halbleiterfertigung stellt, und kann kostengünstig in grösseren Stückzahlen hergestellt werden.

Abb. 6.11 zeigt die Drosselkurven des Systems *BPS3* für verschiedene Drehzahlen. Die Charakteristiken sind dabei nur wenig vom Förderstrom Q abhängig. Dies ist ein Zeichen dafür, dass die radialen Strömungsgeschwindigkeiten klein sind und die Förderhöhe H hauptsächlich durch Zentrifugalkräfte des rotierenden Flüssigkeitszylinders im Gehäuse erzeugt wird.

Die Förderleistung wird durch folgende Ursachen begrenzt:

- Wird der Scheibenmotor mit Konvektionskühlung bei einer Umgebungstemperatur von 25°C und einer Flüssigkeitstemperatur von 60°C permanent betrieben, werden die Drosselkurven durch die eingezeichnete Kurve begrenzt. Diese Kurve entspricht Verlusten von 40 W und ist mit den Modellen in Kap. 3 ermittelt worden.

Abb. 6.11: Drosselkurven des Systems *BPS3*Abb. 6.12: Hydraulischer Wirkungsgrad des Systems *BPS3*

- Wird mehr Verlustwärme durch eine bessere Kühlung abgeführt, verschiebt sich die Kurve zu grösseren Förderhöhen und überschreitet damit die Leistungsbegrenzung des Wechselrichters. Die Drosselkurven enden, da der Maximalstrom des Wechselrichters erreicht wird.

- Bei hochreinen Anwendungen in der Halbleiterindustrie begrenzt zudem die einsetzende Kavitation den Betriebsbereich des lagerlosen Pumpsystems (Kap. 5.4.3 auf S. 112). Ab 20 ℓ/min muss deshalb mit einer erhöhten Partikelverunreinigung gerechnet werden.

In Abb. 6.12 ist der hydraulische Wirkungsgrad η_h des Systems aufgezeichnet, welcher im Optimalpunkt über 40 % beträgt. Dies ist bereits nahe am maximalen hydraulischen Wirkungsgrad, der für Kreiselpumpen dieser spezifischen Drehzahl erreichbar ist. Die grossen Spalte in den Radseitenräumen verschlechtern den Wirkungsgrad nicht wesentlich. Für das Gesamtsystem ergibt sich im Optimalpunkt ein Wirkungsgrad von 30 %.

Die Anwendungen in der Halbleiterindustrie benötigen jedoch vielfach eine grosse Förderhöhe bei geringem Förderstrom. Lagerlose Pumpsysteme werden deshalb auch im Teillastbereich bei wesentlich geringerem Wirkungsgrad betrieben.



Abb. 6.13: Zweistufiges Pumpsystem in Anlage

6.3.1 Pumpsysteme höherer Leistung

Für Förderaufgaben ausserhalb des Arbeitsbereichs des Systems *BPS3* sind lagerlose Pumpsysteme höherer Leistung aufgebaut worden. Ist nur zusätzliche Förderhöhe erforderlich, besteht jedoch die Möglichkeit zwei Pumpsysteme *BPS3* in Serie zu betreiben, womit beinahe die doppelte Förderhöhe erreicht wird. Abb. 6.13 zeigt ein zweistufiges Pumpsystem in einer Spinätz-Anlage. Diese mehrstufigen Pumpsysteme erreichen bei geringen Förderströmen einen höheren Wirkungsgrad als eine einzelne leistungsstärkere Kreiselpumpe gleicher Bauart. Beim Scheibenmotor werden für die Zweistufigkeit jedoch viele Komponenten doppelt benötigt.

Die Anwendungen leistungsstarker Fördersysteme liegt insbesondere im Bereich der Tauchbecken (engl. *wet bench*). Bei diesen Prozessen sammeln sich Partikel auf der Flüssigkeitsoberfläche und jeweils beim Eintauchen bzw. Herausziehen der Horden lagern sich Partikel an die Waferoberfläche an. Deshalb werden die Becken bis zum Überlaufen gefüllt, wobei ein stetiger, hoher Förderstrom gefordert ist. Denn nach dem Entfernen einer Horde sinkt der Flüssigkeitsspiegel unter den Beckenrand und erzwingt damit eine Pause bis sich der Überlauf wieder eingestellt hat und die nächste Horde eingetaucht werden kann [Walt97].

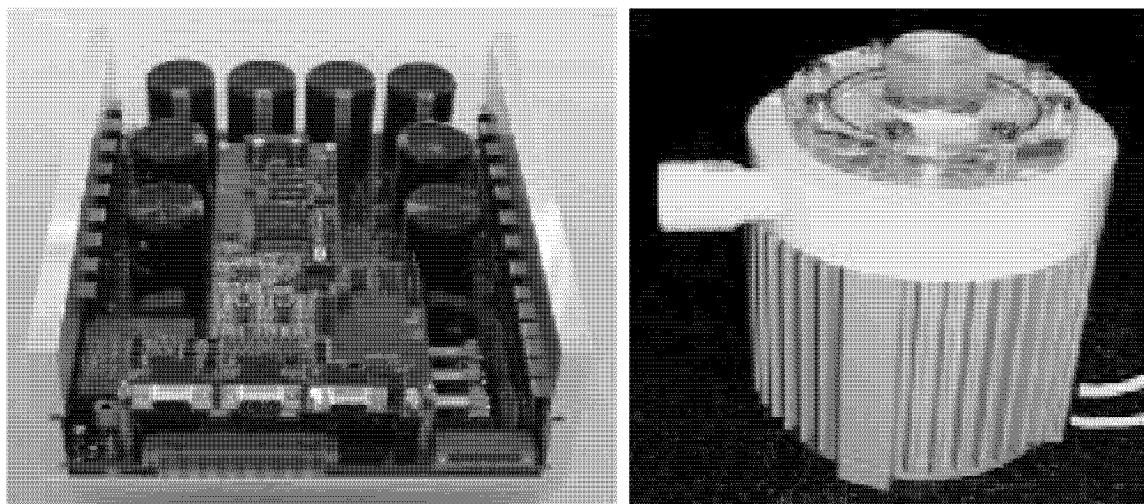


Abb. 6.14: Pumpsystem *BPS4* mit einer mechanischen Motorleistung von 1.2 kW

Rotor-Magnetring (zweipolig)		$D65 \times d29 \times 16 \text{ mm}$
magn. Luftspalt		4.35 mm
Motor mit Kreiselpumpe		$D180 \times 186 \text{ mm}$
Drehmomentkonstante	c_m	12.1 Ncm/A
Kraft-Strom-Faktor	k_i	11.1 N/A
Kraft-Weg-Faktor	k_s	41.4 N/mm
axiale Steifigkeit	k_z	10.1 N/mm
Zwischenkreisspannung	U_{DC}	160 V
max. Strom je Leistungskanal		15 A
PWM-Frequenz		17.5 kHz

Tab. 6.2: Daten zum Pumpsystem *BPS4*

Pumpsystem in zweiphasiger Ausführung

Ähnlich dem lagerlosen Pumpsystem *BPS3* wurden Prototypsysteme höherer Leistung aufgebaut. Abb. 6.14 zeigt rechts den grösseren Scheibenmotor in Tempelbauweise mit eingesetzter Kreiselpumpe und links die dazugehörige Umrichterelektronik. Das System ist auch zweiphasig und mit diskreten Leistungsschalter (MOSFET) aufgebaut. Gegenüber dem System *BPS3* kann der Umrichter direkt ans 115V-Netz angeschlossen werden. In Tab. 6.2 sind die entsprechenden Kenndaten dieses Systems notiert.

Ebenso wurden Systeme identischer Leistung und Bauform mit Versorgung ab dreiphasigem 115V-Netz oder einphasigem 230V-Netz aufgebaut. Dabei sind entsprechend eine höhere Spannungsfestigkeit des Umrichters und angepasste Wicklungssysteme nötig. Aufgrund der veränderten Regelstrecke sind auch Parameter in der Software anzupassen.

Pumpsystem in dreiphasiger Ausführung

Beim Pumpsystem in Abb. 6.15 ist der Motor radial gebaut, womit gegenüber der Tempelbauweise weniger Eisenverluste entstehen. Bei dieser Bauweise sind jedoch die Spulenköpfe problematisch, da sie einen radialen Auslass der Pumpe erschweren. Zudem ist mit zusätzlichen Kupferverlusten aufgrund der längeren mittleren Windungslänge zu

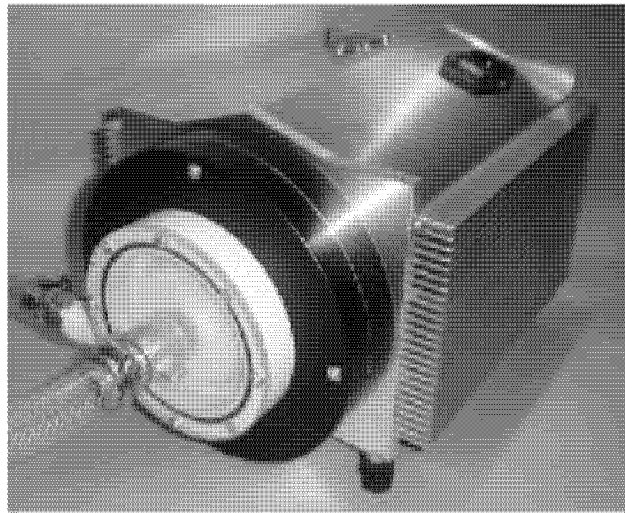


Abb. 6.15: Pumpsystem *RCP1* in dreiphasiger Ausführung mit einer mechanischen Motorleistung von 1.0 kW

Rotor-Magnetring (zweipolig)		$D80 \times d30 \times 20$ mm
magn. Luftspalt		3 mm
Motor mit Pumpe/Umrichter		$D210 \times 350$ mm
Drehmomentkonstante	c_m	16.9 Ncm/A
Kraft-Strom-Faktor	k_i	22.8 N/A
Kraft-Weg-Faktor	k_s	63 N/mm
axiale Steifigkeit	k_z	15.8 N/mm
Zwischenkreisspannung	U_{DC}	325 V
max. Strom je Leistungskanal		7 A
PWM-Frequenz		16 kHz

Tab. 6.3: Daten zum Pumpsystem *RCP1*

rechnen.

Dieser Scheibenmotor mit Frequenzumrichter ist dreiphasig aufgebaut. Die Umrichterelektronik kann dabei kompakte Standard-IGBT-Wechselrichtermodule nutzen. Der Umrichter ist bei diesem System im Pumpengehäuse integriert und wird direkt vom 230V-Netz gespeisen.

Kapitel 7

Zusammenfassung

Pumpensysteme in der Halbleiterindustrie haben aggressive Chemikalien zu fördern, ohne dass diese durch molekulare oder atomare Substanzen und Partikel kontaminiert werden. Der lagerlose Scheibenmotor als Antrieb einer resistenten Kreiselpumpe kann diese Anforderungen erfüllen und ermöglicht damit eine hohe Ausbeute bei der Halbleiterfertigung. Beim Aufbau eines einsatzfähigen Pumpensystems sind folgende Punkte zu beachten, welche im Rahmen dieser Arbeit behandelt wurden:

- Die aggressiven und hochreinen Medien verlangen, dass der metallische Rotor eingekapselt ist in einen dichten Fluorkunststoffmantel. Um die Permeation von Chemikalien und damit die Korrosion des Rotors zu verringern, ist eine möglichst dicke Um-mantelung und entsprechend ein grosser magnetischer Luftspalt nötig.
- Weil das passive Axialmagnetlager nur beschränkt Kräfte aufnehmen kann, ist in der Kreiselpumpe für das Flügelrad ein grosser Bewegungsbereich und ein hydrodynamischer Axialschubausgleich vorzusehen. Ein genügend grosser mechanischer Luftspalt reduziert die Abhängigkeit des Axialschubs von der Flüssigkeitsviskosität, was den Anwendungsbereich der magnetgelagerten Kreiselpumpe erweitert.

- Für die Verluste und Erwärmung im Scheibenmotor wurden Modelle erarbeitet. Die entstehende Verlustwärme hängt dabei stark vom Erregerfeld des Permanentmagnetrotors ab, weshalb ein kleiner magnetischer Luftspalt und geringe axiale Auslenkungen des Rotors vorteilhaft sind.

Aus diesen Gründen ist die Grösse des magnetischen Luftspalts entscheidend für den Einsatz des Scheibenmotors als Antrieb einer Chemikalienpumpe. Es muss ein Kompromiss zwischen der Lebensdauer des Rotors, dem hydraulischen Arbeitsbereich der Kreiselpumpe und dem Aufwand für die Motorkühlung gefunden werden.

Mit den realisierten Systemen konnten die Vorteile magnetgelagerter Kreiselpumpen gegenüber herkömmlichen Balgpumpen bestätigt werden:

- Magnetgelagerte Systeme mit Kreiselpumpen liefern eine kontinuierliche Strömung, weshalb eine hohe Reproduzierbarkeit von Prozessen erreicht wird. Dabei ist eine exakte Steuerung des Förderstromes bzw. -druckes möglich
- Mit einer hohen Drehzahl ergibt sich für den Antrieb und die Kreiselpumpe eine kompakte Baugrösse. Dies reduziert die benetzte Oberfläche innerhalb der Pumpe und ergibt zusammen mit der berührungslosen Lagerung exzellente Reinheitseigenschaften.

Magnetgelagerte Kreiselpumpen erfüllen die Anforderungen an Fördersysteme in der Halbleiterfertigung. Als mechatronisches System ermöglicht es zudem, Prozessgrössen (Druck, Durchfluss) zu berechnen und ohne zusätzliches Messgerät zu regeln.

Kapitel 8

Ausblick

Die realisierten Pumpsysteme haben sich bereits im industriellen Einsatz bewährt und eröffnen einen neuen Markt für die Magnetlagertechnologie. Da in der Halbleiterfertigung verschiedenste Förderaufgaben bestehen, kann der Einsatzbereich magnetgelagerter Pumpsysteme erheblich erweitert werden, was noch entsprechender Forschungs- und Entwicklungsarbeit bedarf.

So lässt sich die Beschränkung der Flüssigkeitstemperatur ($< 90^{\circ}\text{C}$) erhöhen, indem die temperaturempfindliche Sensorik ausserhalb des Motors platziert wird. Dies erlaubt auch eine höhere Motortemperatur, womit bei identischer Kühlung wesentlich mehr Verlustwärme abgeführt werden kann. Jedoch ist wegen der thermischen Ausdehnung der Rotorummantelung und der resultierenden Verengung des mechanischen Luftspalts mit Problemen beim Axialschubausgleich zu rechnen.

Auch bei leistungsfähigeren Systemen, welche eine grössere Förderhöhe erreichen, verstärkt sich die Problematik des passiven Axiallagers. Hier ist nach neuen Lösungen zu suchen, welche entweder die Steifigkeit des Axialmagnetlagers erhöhen oder den hydraulischen Axial Schub reduzieren und vom hydraulischen Betriebszustand entkoppeln. Zudem ist die Kreiselpumpe weiter zu optimieren, damit keine Kavitation bzw. eine geringe Partikelkontamination auch bei Förderströmen über $20 \ell/\text{min}$ auftreten.

Aufgrund der Serienherstellung der Pumpsysteme für die Halbleiterin-

dustrie senken sich die Produktionskosten. Mit einer zusätzlichen Kostenoptimierung werden in Zukunft magnetgelagerte Fördersystem auch für die Chemie- und Lebensmittelindustrie interessant.

Literaturverzeichnis

- [Angs99] Angst + Pfister, Zürich. *Technische Kunststoffe*, 1999.
- [Ausi99] Ausimont, Thorofare. *High Performance Fluoropolymer Coatings & Linings*, 1999.
- [Bara89] Werner Baran. Magnetische Kreise und ihre Berechnung. *Feinwerktechnik & Messtechnik*, 1989.
- [Barl98] Natale Barletta. *Der lagerlose Scheibenmotor*. Dissertation, ETH, Zürich, 1998. Nr. 12870.
- [Bart55] J. Bartels et al., Hrsg. *Landolt-Börnstein - Zahlenwerte und Funktionen*. Springer, Berlin, 6. Auflage, 1955.
- [Bass02] Michael J. Bass und Clayton M. Christensen. The Future of the Microprocessor Business. *IEEE Spectrum*, 39(4):34 – 39, April 2002.
- [Bets90] Felix Betschon. *Design Principles of Integrated Magnetic Bearings*. Dissertation, ETH, Zürich, 1990. Nr. 13643.
- [Bich90] Jürg Bichsel. *Beiträge zum lagerlosen Elektromotor*. Dissertation, ETH, Zürich, 1990. Nr. 9303.
- [Bikl99] Urs Bikle. *Die Auslegung lagerloser Induktionsmaschinen*. Dissertation, ETH, Zürich, 1999. Nr. 13180.
- [Blas72] Felix Blaschke. Das Verfahren der Feldorientierung zur Regelung der Asynchronmaschine. *Siemens Forschungs- und Entwicklungsberichte*, Bd. 1(Nr. 1/72):184 – 193, 1972.

- [Brau39] Werner Braunbek. Freischwebende Körper im elektrischen und magnetischen Feld. *Zeitschrift für Physik*, Bd. 112:753 – 763, 1939.
- [Chil01] Dennis D. Chilcote. *An Evaluation of Particle Shedding from the White Knight Pump*. CT Associates, Inc., Bloomington, Minnesota, July 2001. www.whiteknightpumps.com/documents/Particle_AP200.pdf.
- [Chri00] K. Christenson et al. The Effect of pH on the Uniformity of Ethylene Glycol-HF Etches of Si₃N₄. In R. E. Novak et al., Hrsg., *Cleaning Technology in Semiconductor Device Manufacturing: Proceedings of the Sixth International Symposium*. The Electrochemical Society, Pennington NJ, 2000. Volume 99-36.
- [Cran68] J. Crank und G. S. Park, Hrsg. *Diffusion in Polymers*. Academic Press, London, 1968.
- [Domi92] Hans Domininghaus. *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 4. Auflage, 1992.
- [Earn42] S. Earnshaw. On the Nature of the Molecular Forces which Regulate the Constitution of the Luminiferous Ether. In *Trans. Cambridge Phil. Soc.* 7, Seiten 97 – 112, Cambridge, 1842.
- [EBG] EBG Gesellschaft für elektromagnetische Werkstoffe mbH, Bochum. *Datenblatt zu Hochfrequenzblech HF20*. entspricht NO20.
- [EBG 97] EBG Gesellschaft für elektromagnetische Werkstoffe mbH, Bochum. *EBG Elektroblech-Katalog*, Januar 1997.
- [Epoxy03] Epoxylite Ltd., Bradford, England. *Datenblatt EIP5238*, 2003. www.epoxylite.co.uk/ler03.html.
- [Gemp97] Thomas Gemp. *Mechatronik einer lagerlosen Spaltrohrpumpe*. Dissertation, ETH, Zürich, 1997. Nr. 12325.

- [Güli99] Johann F. Gülich. *Kreiselpumpen: ein Handbuch für Entwicklung, Anlagenplanung und Betrieb*. Springer, Berlin, 1999.
- [Gott54] Gottfried Gotter. *Erwärmung und Kühlung elektrischer Maschinen*. Springer, Berlin, 1954.
- [Gran01] Donald C. Grant et al. Testing liquid-handling system components to ensure purity and reliability. *Micro Magazine*, May 2001. www.micromagazine.com/archive/01/05/Grant.html.
- [Grig63] Ulrich Grigull. *Die Grundgesetze der Wärmeübertragung*. Springer, Berlin, 3. Auflage, 1963.
- [Hahn02] Jürgen Hahn. *Sensorlose Bestimmung der Prozessgrößen magnetisch gelagerter Blutpumpen*. Dissertation, ETH, Zürich, 2002. Nr. 14563.
- [Hatt98] Takeshi Hattori, Hrsg. *Ultraclean Surface Processing of Silicon Wafers*. Springer, Berlin, 1998.
- [Heck75] Carl Heck. *Magnetische Werkstoffe und ihre technische Anwendung*. Dr. Alfred Hüthig, Heidelberg, 2. Auflage, 1975.
- [Hell01] Walter Hellerich, Günther Harsch und Siegfried Hänle. *Werkstoffführer Kunststoffe: Eigenschaften, Prüfungen, Kennwerte*. Carl Hanser Verlag, München, 2001.
- [Hend94] J. R. Hendershot Jr. und T. J. E. Miller. *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*. Magna Physics, Oxford, 1994.
- [Herm74] P. Hermann. *Deutsche Patent-Offenlegungsschrift P 24 57 0841-32*, 1974.
- [Herm75] P. Hermann. *Deutsche Patent-Offenlegungsschrift P 24 06 790.1-32*, 1975.
- [Heyn00] Marc Heyns et al. Advanced Cleaning Strategies for Ultraclean Silicon Surfaces. In R. E. Novak et al., Hrsg., *Cleaning Technology in Semiconductor Device Manufacturing: Proceedings of the Sixth International Symposium*. The Electrochemical Society, Pennington NJ, 2000. Volume 99-36.

- [Holz89] Kurt Holzenberger, Hrsg. *KSB-Kreiselpumpen-Lexikon*. KSB AG, Frankenthal, 3. Auflage, 1989.
- [Hütt02] Christian Hüttner. Nonlinear State Control of a left Ventricular Assist Device (LVAD). In Yohji Okada und Kenzo Nonami, Hrsg., *Proceedings of The Eighth International Symposium on Magnetic Bearings (ISMB-8)*, Mito, Japan, 2002. Dynamics and Control Lab., Dept. of Mechanical Eng., Ibaraki University, Hitachi.
- [Hütt03] Christian Hüttner. *Regelungskonzepte magnetisch gelagerter Scheibenmotoren*. Dissertation, ETH, Zürich, 2003. Nr. 15092.
- [Klei01] Heinrich Michael Klein. *Laserschweissen von Kunststoffen in der Mikrotechnik*. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen, 2001. sylvester.bth.rwth-aachen.de/dissertationen/2001/132/01_132.pdf.
- [Küpf93] Karl Küpfmüller und Gerhard Kohn. *Theoretische Elektrotechnik und Elektronik – Eine Einführung*. Springer, Berlin, 14. Auflage, 1993.
- [Lide00] David R. Lide, Hrsg. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 81. Auflage, 2000.
- [Litc01] Mark Litchy. *Trace Metal Dynamic Extraction from a White Knight Bellows Pump in Hydrochloric Acid*. CT Associates, Inc., Bloomington, Minnesota, June 2001. www.whiteknight-pumps.com/documents/Trace_metal_AP200.pdf.
- [Lysa00] Patrick S. Lysaght, Harry Sax et al. A novel Wafer Backside Spin-Process Contamination Elimination Technique for Copper Production Applications. In R. E. Novak et al., Hrsg., *Cleaning Technology in Semiconductor Device Manufacturing: Proceedings of the Sixth International Symposium*. The Electrochemical Society, Pennington NJ, 2000. Volume 99-36.
- [Maxw91] James Clerk Maxwell. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Volume 1. Clarendon Press, Oxford, 3. Auflage, 1891.

- [Neog96] P. Neogi, Hrsg. *Diffusion in Polymers*. Dekker, New York, 1996.
- [Neum94] Robert Neumaier. *Hermetische Pumpen: die ökologische Lösung bei Kreiselpumpen und rotierenden Verdrängerpumpen*. Faragallah, Sulzbach, 1994.
- [Nipp93] Kaspar Nipp und Daniel Stoffer. *Lineare Algebra*. vdf Verlag der Fachvereine, Zürich, 2. Auflage, 1993.
- [Nish00] Yoshio Nishi und Robert Doering, Hrsg. *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology*. Marcel Dekker, New York, 2000.
- [Paraa] Para Tech Coating, Inc., Aliso Viejo. *GALXYL(R) Chemicals for conformal coating*. www.parylene.com/parylene/pdf/Galxylfr.pdf.
- [Parab] Para Tech Coating, Inc., Aliso Viejo. *Understanding Parylene*. www.parylene.com/parylene/pdf/UnderstandingParylene.pdf.
- [Ruge91] Ingolf Ruge und Hermann Mader. *Halbleiter-Technologie*. Springer, Berlin, 3. Auflage, 1991.
- [Schö93] Reto Schöb. *Beiträge zur lagerlosen Asynchronmaschine*. Dissertation, ETH, Zürich, 1993. Nr. 10417.
- [Sche97] John Scheirs, Hrsg. *Modern fluoropolymers: high performance polymers for diverse applications*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 1997.
- [Schu91] Günter Schumicki und Peter Seegebrecht. *Prozesstechnologie: Fertigungsverfahren für integrierte MOS-Schaltungen*. Springer, Berlin, 1991.
- [Schu96] Jens Oliver Schulze. *Dynamisches Modell der Querkraft-Asynchronmaschine*. Dissertation, ETH, Zürich, 1996. Nr. 11607.

- [Schw94] Gerhard Schweitzer, Hannes Bleuler und Alfons Traxler. *Active Magnetic Bearings – Basics, Properties and Applications of Active Magnetic Bearings*. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Zürich, 1994.
- [SEMI96a] SEMI, Mountain View. *Standard E33-94: Specification for Semiconductor Manufacturing Facility Electromagnetic Compatibility*, 1996.
- [SEMI96b] SEMI, Mountain View. *Standard S3-91: Safety Guidelines for Heated Chemical Baths*, 1996.
- [SEMI98] SEMI, Mountain View. *Standard E51-0298: Guide for typical Facilities Services and Termination Matrix*, 1998.
- [SEMI00a] SEMI, Mountain View. *Standard S14-0200: Safety Guidelines for Fire Risk Assessment and Mitigation for Semiconductor Manufacturing Equipment*, 2000.
- [SEMI00b] SEMI, Mountain View. *Standard S2-0200: Environmental, Health, and Safety Guideline for Semiconductor Manufacturing Equipment*, 2000.
- [Silb00] Siegfried Silber. *Beiträge zum lagerlosen Einphasenmotor*. Dissertation, Johannes Kepler Universität, Linz, 2000.
- [Stei91] C. Steinmetz. Note on the law of hysteresis. *Electrician*, 26:261 – 262, Januar 1891.
- [Syma93] Symalit, Lenzburg. *Physikalische Eigenschaften von wichtigen Thermoplasten*, Juni 1993.
- [Vacu00] Vacuumschmelze GmbH, Hanau. *Rare-Earth Permanent Magnets VACODYM/VACOMAX*, 2000.
- [Vogt88] Karl Vogt. *Elektrische Maschinen: Berechnung rotierender elektrischer Maschinen*. Verlag Technik, Berlin, 1988.
- [Walt97] Alexander Walter. *Charakterisierung einer Partikelumverteilung bei Beckenprozessen in der Halbleiterfertigung*. Dissertation, Technische Universität, München, 1997.

-
- [Wied67] Eugen Wiedemann und Walter Kellenberger. *Konstruktion elektrischer Maschinen*. Springer, Berlin, 1967.
- [Yonn81] Jean-Paul Yonnet. Permanent Magnet Bearings and Couplings. *IEEE Transactions on Magnetics*, MAG-17(1):1169 – 1173, January 1981.
- [Zant00] Peter van Zant. *Microchip fabrication: a practical guide to semiconductor processing*. McGraw-Hill, New York, 4. Auflage, 2000.
- [Zhan95] Jing Zhang. *Power Amplifier for Active Magnetic Bearings*. Dissertation, ETH, Zürich, 1995. Nr. 11406.

Curriculum Vitae

Personalien

7.10.1972 Martin Neff
geboren in Wil (SG), von Appenzell (AI),
Sohn von Rösli und Martin Neff-Keller,
verheiratet mit Sabrina Albin Neff

Ausbildung

1979 – 1995 Primarschule, Wuppenau
1995 – 1988 Sekundarschule, Schönholzerswilen
1988 – 1991 Kaufmännische Berufsschule, Wil
1992 – 1994 Thurgauisch-Schaffhauserische Maturitätsschule für Erwachsene (TSME), Frauenfeld
1994 – 1999 Studium der Elektrotechnik an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) in Zürich

Berufstätigkeit

1988 – 1991 Kaufmännische Berufslehre bei Thyssen Edelstahl AG, Wil
1991 – 1994 Kaufmännischer Angestellter bei Häni-Proelectron AG, Bronschhofen
1999 – 2003 Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Assistent an der Professur für Elektrotechnische Entwicklungen und Konstruktionen (EEK) der ETH Zürich in Zusammenarbeit mit der Firma Levitronix, Zürich

.....

