

Technische Universität Darmstadt
Institut für Elektromechanische Konstruktionen



Mikrotechnische Systeme

Vorlesungsskript

von

Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak

und

Dipl.-Ing. Matthias Voit

Darmstadt 2003

Vorwort

Die Lehrveranstaltung Mikrotechnische Systeme (MS) wendet sich an Studierende der Elektrotechnik und Informationstechnik (ETIT), des Maschinenbaus sowie Interessenten aus anderen Fachbereichen bzw. Studiengängen. Sie ist als Kernfach in der Studienrichtung Mechatronik sowie als Wahlpflichtfach in einigen Studienrichtungen von ETIT, insbesondere bei „Mikro- und Feinwerktechnik (MFT)“ vorgesehen und kann ab dem 5. Studiensemester, vorzugsweise im 7. Studiensemester belegt werden.

Das Lernziel der Lehrveranstaltung besteht im Verstehen des Aufbaus, der Funktionsweise und dem Entwurf von Mikrosystemen wie Mikrosensoren, Mikroaktoren, mikrofluidischen und mikrooptischen Komponenten.

Zunächst werden die Grundlagen der relevanten Werkstoffe und der Mikrofertigungsverfahren erläutert. Der Entwurf und die Herstellung von mikromechanischen Formteilen und Funktionselementen wie Biegebalken und Membranen wird vorgestellt.

Die Wirkungsweise von verschiedenen Antriebsprinzipien und deren ingenieurmäßiger Entwurf anhand von mathematischen Näherungen bilden einen Schwerpunkt zum Verständnis vieler Mikrosysteme, wobei der Entwurf exemplarisch an Beispielen aus der Tintendrucktechnologie, der Faseroptik und DLP (Digital Light Processing) erlernt wird. Ein besonderer Aspekt der Mikroaktoren betrifft die Energiebilanzen und deren Auswirkung bei der Skalierung.

Weitere Themengebiete der Vorlesung betreffen die Mikrofluidik sowie das große Gebiet der Mikrosensoren, die hier weitgehend auf die Messung mechanischer Größen eingeschränkt werden. Ferner werden Mikrosysteme betrachtet, in denen sowohl Sensoren als auch Aktoren integriert sind, wie z.B. moderne Beschleunigungs- und Drehratensensoren in der Automobiltechnik.

Im Rahmen dieser Vorlesung erfolgt die Beschreibung, der Entwurf und die Berechnung von Mikrosystemen in einem engen Wechselspiel zwischen den ausgenutzten physikalischen Effekten, den eingesetzten Werkstoffen und der jeweils anwendbaren Mikrofertigungstechnologie.

Darmstadt, im Oktober 2002

Helmut F. Schlaak

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Verwendete Symbole	v
Abbildungsverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xv
1 Einführung und Definitionen	1
1.1 Definitionen zur Mikrosystemtechnik	2
1.2 Anwendungen der Mikrosystemtechnik	5
1.3 Wirtschaftliche Bedeutung	8
2 Werkstofftechnische Grundlagen	11
2.1 Konstruktionswerkstoffe	12
2.1.1 Halbleiterwerkstoffe	12
2.1.2 Glaswerkstoffe	21
2.1.3 Keramische Werkstoffe	23
2.1.4 Polymere	24
2.2 Funktionswerkstoffe	26
2.2.1 Mechanische Eigenschaften	26
2.2.2 Mechanisch-elektrische Wandlung	31
2.2.3 Thermisch-mechanische Wandlung	35
2.2.4 Thermisch-elektrische Wandlung	37
2.2.5 Magnetisch-elektrische Wandlung	41
3 Grundlagen der Technologien	44
3.1 Grundprozesse der Mikrotechnik	45
3.1.1 Schichtabscheidung	48
3.1.2 Schichtmodifikation	59
3.1.3 Photolithographie	63
3.1.4 Ätzverfahren / Strukturierungsverfahren	68
3.2 Silizium-Mikromechanik	74
3.2.1 Silizium-Bulk-Mikromechanik	74
3.2.2 Oberflächen-Mikromechanik	80

3.3	LIGA-Verfahren	82
3.4	Aufbau- und Verbindungstechnik	87
3.5	Mechanische Mikrofertigung	90
4	Funktionselemente und Grundstrukturen der Mikrotechnik	94
4.1	Passive mechanische Formelemente	94
4.1.1	Formätzteile in (100)-Silizium	94
4.1.2	Formätzteile in (110)-Silizium	100
4.1.3	Ausrichtung der Wafer zum Kristallgitter	104
4.1.4	Design und Herstellung von Formätzteilen	105
4.2	Mikromechanische Biegebalken	114
4.2.1	Biegebalken einseitig eingespannt	114
4.2.2	Biegebalken verschiebbar	116
4.2.3	Biegebalken in Bulk-Mikromechanik	117
4.2.4	Biegebalken in Oberflächenmikromechanik	119
4.3	Mikromechanische Platten (Membranen)	119
4.4	Mechanische Spannungen in dünnen Schichten	123
4.5	Elektrische Funktionselemente	129
4.5.1	Leiterbahnen	129
4.5.2	Kapazitäten	131
4.5.3	Flachspulen	131
5	Mikroaktoren	133
5.1	Feldaktoren	134
5.1.1	Elektrostatische Mikroaktoren	135
5.1.2	Elektromagnetische Mikroaktoren	141
5.1.3	Elektrodynamische Mikroaktoren	148
5.1.4	Skalierungsverhalten von Mikroaktoren	151
5.1.5	Anwendung von Feldaktoren	157
5.2	Dehnungsaktoren	185
5.2.1	Piezoelektrische Antriebe	185
5.2.2	Thermomechanische Aktoren	193
6	Mikrofluidik	198
6.1	Mikroventile	198
6.2	Mikropumpen	201
6.3	Tintendrucktechnologie	203
6.4	Mikrofluidische Sonderanwendungen	208
7	Mikrosensoren	210
7.1	Piezoresistive Sensoren	210
7.2	Drucksensoren	212
7.2.1	Piezoelektrischer Drucksensor	212
7.3	Beschleunigungssensor	213
7.4	Drehratensensor	213

7.5	Luftmassensensor	216
8	Grundlagen des Entwurfsprozesses	217
	Literaturverzeichnis	219

Verwendete Symbole

Variablen	Einheit	Beschreibung
a, b, c		Translationsvektoren im Kristall
h, k, l		Miller-Indices der Kristallebenen
u, v, w		Schnittpunkte der Kristallebenen
x, y, z		Koordinaten
a, b, d, h, l, w	m	Geometrische Abmessungen
a, b	m	Abmessungen einer Kondensatorelektrode
a	m	Maskierungsbreite
a	m	Plattenradius
a	m/s ²	Beschleunigung
b	m	Strukturbreite
b	m	Behälterdurchmesser
b	m	Breite des Pyramidenstumpfs
b	m	Schichtdicke
c	GPa	Elastische Konstante
c	N/m	Federkonstante
c_{rot}	Nm	Torsionssteifigkeit
c_{R}	N m ²	Biegesteifigkeit
d	m	Plattenabstand einer Kondensatorelektrode / Luftspalt
d	m	Tiefe einer Pyramidenstruktur
d	m	Dicke
d_0	m	Isolatordicke
d_{a}	m	Aktive Schichtdicke
d_{s}	m	Passive Schichtdicke
d_{ij}	As/N	Piezoelektrischer Koeffizient
d_{m0}^2	m	Mittlerer effektiver Abstand
d_{max}	m	Maximale Tiefe einer (110)-Si-Grube
d_{min}	m	Minimaler Luftspalt an der Einspannstelle
d_{Feder}	m	Federdicke
d_{J}	m	Jochlänge
d^*	m	Effektiver Abstand
d'	m	Effektiver Abstand
Δd	nm, μm	Ätzabtrag
f_0	1/s	Resonanzfrequenz

h	m	Ätztiefe
h	m	Plattendicke
Δh_E	m	Leerlaufauslenkung piezoelektrischer Längseffekt
Δh_F	m	Ausdehnung piezoelektrischer Längseffekt durch äußere Kraft
Δh_{ges}	m	Gesamtauslenkung
i	A/mm ²	Stromdichte
k		Gage-Faktor
k		Korrekturfaktor für quadratische Membrane
k		Korrekturfaktor zur magnetischen Pfadlänge
l	m	Länge
Δl_E	m	Leerlaufauslenkung piezoelektrischer Quereffekt
Δl_F	m	Ausdehnung piezoelektrischer Quereffekt durch äußere Kraft
l_m	m	Mittlere Weglänge
l_{ne}	m	Versatz der festen Steuerelektrode gegenüber der Einspannstelle
l_0	m	Bezugslänge
l_W	m	Windungslänge
Δl	m	Längenänderung
m	kg	Masse
n		Brechzahl
n		Anzahl
n	m/N	Mechanische Nachgiebigkeit
n		Schichtanzahl
p	Pa, mbar	Druck
p_{kap}	Pa, mbar	Von der Skalierung invarianter Druck
p_{mag}	Pa, mbar	Von der Skalierung invarianter Druck
p_s	Pa, bar	Sättigungsdampfdruck
r	μm/h	Ätzrate
r	m	Radius
s	GPa	Elastische Koeffizient
s	m	Auslenkung
$\vec{s}$	m	Länge des Leiters im Magnetfeld
t	s	Zeit
t_f	s	Schaltzeit: fall-time, Abfallzeit
t_r	s	Schaltzeit: rise-time, Anstiegszeit
u		Unterätzrate
$\vec{v}$	m/s	Geschwindigkeit
w	m	Länge
w	m	Auslenkung
w	1/s	Kreisfrequenz
w	m	Federbreite
w	W/m ³	Energiedichte
w_0	1/s	Resonanzfrequenz
w	m	Biegelinie einer Platte
w''	1/m	Krümmung einer Platte

x	m	Unterätzweite
x	m	Schichtdicke
x	m	Auslenkung
x_0	m	Leerlaufauslenkung
x_c	m	Kontaktabstand
z	m	Federdicke
z	m	Abstand
A	m ²	Fläche, Querschnittsfläche
A_{el}	m ²	Elektrostatisch wirksame Fläche
A		Anisotropie
A_{Pol}	m ²	Polfläche
A_J	m ²	Fläche des Jochs
A_K	m ²	Kühlfläche
A_W	m ²	Querschnitt der Wicklung
AR		Aspektverhältnis
$\vec{B}$	T	Magnetische Flussdichte
B_J	T	Magnetische Flussdichte im Joch
B_L	T	Magnetische Flussdichte im Luftspalt
B_S	T	Sättigungsinduktion / Sättigungsflussdichte
B_R	T	Remanenzinduktion
C	F	Kondensatorkapazität
D	As/m ²	Dielektrische Verschiebung
D	(μm) ² / h	Diffusionskonstante
E	V/m	Elektrisches Feldstärke
E	N/m ²	Elastizitätsmodul
E_a	N/m ²	Aktiver E-Modul
E_s	N/m ²	Passiver E-Modul
E_{BR}	V/m	Durchbruchfeldstärke
E_C	V/m	Depolarisierungsfeldstärke
$\vec{F}$	N	Kraft
F_{max}	N	Blockierkraft / Maximalkraft
F_a	N	Kraft auf Aufhängung
F_C	N	Corioliskraft
F_x	N	Transversalkraft
F_y	N	Transversalkraft
F_z	N	Normalkraft
F_s	N	Federkraft
F_{ges}	N	Gesamtkraft
G	N/m ²	Schubmodul des Federmaterials
H	A/m	Magnetische Feldstärke
H_C	A/m	Koerzitivfeldstärke
I	A	Elektrischer Strom

I	kg m^2	Flächenträgheitsmoment
I_t	kg m^2	Flächenträgheitsmoment einer Torsionsfeder
K_{max}	$1/\text{m}$	Maximale Krümmung einer Platte
L	m	Länge
L	H	Induktivität
M	Nm	Biegemoment
M_{el}	Nm	Elektrostatisch verursachtes Drehmoment
M_{torsion}	Nm	Durch Torsionsfedern verursachtes Drehmoment
M_S	T	Sättigungsmagnetisierung
N		Dotierungsatomkonzentration
N_0		Maximale Teilchenkonzentration
P	W	Elektrische Leistung
P_{th}	W	Thermische Verlustleistung
P_V	W	Verlustleistung
Q	J	Wärmemenge
ΔR	Ω	Elektrische Widerstandsänderung
R	m	Krümmungsradius
R	Ω	Elektrischer Widerstand
$R_{\square}$	Ω	Flächenwiderstand
R_a	m	Oberflächenrauheit
R_{iso}	Ω	Isolationswiderstand
R_{th}	Ω	Elektrische Widerstandsänderung durch Temperaturerhöhung
R_M	$1/\text{H}$	Magnetischer Widerstand
R_K	Ω	Kontaktwiderstand
R_L	$1/\text{H}$	Magnetischer Widerstand des Luftspalt
R_L	Ω	Elektrischer Zuleitungswiderstand
R_J	$1/\text{H}$	Magnetischer Widerstand des Jochs
R_W	Ω	Spulenwiderstand
R_v		Abdampftrate
S		Mechanische Dehnung
S		Selektivität
S_A, S_B	mV/K	Seebeck-Koeffizienten
T	N/m^2	Mechanische Spannung
T	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$	Temperatur
ΔT	$^{\circ}\text{C}$	Temperaturerhöhung
T_i	$^{\circ}\text{C}$	Prozesstemperatur
T_g	$^{\circ}\text{C}$	Transformationstemperatur
T_{th}	N/m^2	Thermisch induzierte Spannung
T_C	$^{\circ}\text{C}$	Curie-Temperatur
T_A	$^{\circ}\text{C}$	Umwandlungstemperatur
T_R	$^{\circ}\text{C}$	Raumtemperatur
T_L, T_T		Längs- und Transversaldehnung
U	V	Elektrische Spannung
U_{ab}	V	Abfallspannung

U_{an}	V	Ansprechspannung
U_{D}	V	Durchbruchspannung
V	m^3	Volumen
W	J	Energie
W	J	Schaltarbeit
W_{el}	J	Elektrische Energie
W_{kin}	J	Kinetische Energie
W_{mech}	J	Mechanische Energie
Z_{te}	$10^{-6}/K$	Thermoelektrischer Gütefaktor
$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon$	$^\circ$	Winkel
α, β	$10^{-6}/K$	Thermische Ausdehnungskoeffizienten
α_{s}	K	Thermischer Ausdehnungskoeffizient des Substrat
$\pi_{\text{L}}, \pi_{\text{T}}, \pi_{\text{s}}$		Transformierte piezoresistive Koeffizienten
α	W/Km^2	Wärmeübergangskoeffizient
γ		E-Modul-Verhältnis
δ		Schichtdickenverhältnis
ϵ_0	pF/m	Absolute Dielektrizitätskonstante / Elektrische Feldkonstante
ϵ_{r}		Relative Dielektrizitätskonstante
θ	A	Magnetische Spannung / Magnetische Durchflutung
λ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
λ	m	Freie Weglänge
λ	m	Wellenlänge
μ_{n}	cm^2/Vs	Beweglichkeit der Elektronen
μ_{p}	cm^2/Vs	Beweglichkeit der Löcher
μ_0	Vs/Am	Absolute Permeabilität
μ_{r}		Relative Permeabilität
ν		Poisson'sche Querkontraktionszahl
ξ	m	Ortskoordinate
$\pi_{ij,km}$		Piezoresistive Koeffizienten
ρ	g/cm^3	Dichte
ρ	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	Spezifischer Widerstand
ϕ	Vs	Magnetischer Fluss
φ	rad	Drehwinkel
φ_{max}	rad	Maximaler Drehwinkel
φ_{an}	rad	Drehwinkel bei Durchzug
$\vec{\Omega}$	1/s	Drehachse / Drehrate
ω_{Det}	1/s	Pendelbewegung

Abbildungsverzeichnis

1.1	Technologieübersicht zur Mikrosystemtechnik	2
1.2	Dimensionen der Mikro- und Nanotechnik	3
1.3	Funktionsschema eines Mikrosystems	4
1.4	Aufbau und Einbindung von Mikrosystemen	5
1.5	Entwicklung des Weltumsatzes für Mikrosysteme	9
1.6	Aufteilung des Weltmarktes für Mikrosysteme nach Produkten	9
2.1	Einheitszellen von Kristallen und Silizium	13
2.2	Kristallebenen in einem kubischen Kristall	14
2.3	Kristallziehenanlage nach dem Czochralski-Verfahren	18
2.4	Kennzeichnung der Silizium-Wafertypen durch Fasen	19
2.5	Fehlerarten beim Silizium-Scheibenquerschnitt	20
2.6	Elastische Verformung eines Werkstoffs, Spannungs-Dehnungs-Diagramm .	27
2.7	Bezeichnung der Spannungszustände am Beispiel eines Werkstoffwürfels .	28
2.8	Richtungsabhängigkeit des E-Moduls und der Querkontraktionszahl) . . .	31
2.9	Piezoelektrische richtungsabhängige Verformung	32
2.10	Temperatur-Weg-Kennlinie beim Formgedächtnis-Zweiwegeffekt	37
2.11	Aufbau und Funktion eines Dünnschicht-Thermoelements	40
2.12	Kennlinien ferromagnetischer Werkstoffe	42
3.1	Piezoelektrischer Silizium-Drucksensor	45
3.2	Luftreinheitsklassen nach US Federal Standard 209 D	47
3.3	Schema einer Vakuum-Aufdampfanlage	50
3.4	Sättigungsdampfdruck als Funktion der Temperatur	51
3.5	Aufbau eines Elektronenstrahlverdampfers	52
3.6	Schema einer HF-Dioden-Sputteranlage	53
3.7	Prinzip der chemischen Abscheidung aus der Gasphase	54
3.8	Schematische Darstellung verschiedener CVD-Reaktoren	55
3.9	Prinzip der elektrolytischen Metallabscheidung	58
3.10	Schichtdickenverhältnis mit Volumenzunahme bei thermischer Oxidation .	60
3.11	Oxiddicke als Funktion der Oxidationszeit	61
3.12	Einfluss von Dotierungsdichte und Leitungstyp auf den spez. Widerstand .	62
3.13	Diffusion aus unerschöpflicher und erschöpflicher Quelle	63
3.14	Prinzip der Strukturierung von Mikrostrukturen durch Photolithographie .	64
3.15	Resistschichtdicken in Abhängigkeit von Schleuderzeit und Drehzahl . . .	66

3.16 Übersicht über Belichtungsverfahren	66
3.17 Querschnitt beim isotropen und anisotropen Ätzprozess	68
3.18 Querschnitt einer geätzten Struktur	69
3.19 Prinzipieller Aufbau von Trockenätzanlagen	71
3.20 Ätzstrukturen in Silizium hergestellt durch DRIE	72
3.21 Schematische Darstellung der Richtungsabhängigkeit der lateralen Ätzrate	75
3.22 Anisotrope Ätzstrukturen in Silizium	75
3.23 Ätzrate von KOH in (100)-Silizium als Funktion der KOH-Konzentration	76
3.24 Elektrochemisches Ätzbad mit Ätzstopp an einem pn-Übergang	78
3.25 Beschleunigungssensor mit geätzter seismischer Masse	79
3.26 Anodisches Bonden von Silizium und Glas	79
3.27 Ablauf der Herstellung einer Mikrobrücke in Oberflächen-Mikromechanik	81
3.28 Beschleunigungssensor in Oberflächen-Mikromechanik	81
3.29 Oberflächen-Mikromechanik durch SCREAM-Prozess	82
3.30 Fertigungsschritte des LIGA-Verfahrens	83
3.31 Teststruktur aus entwickeltem Röntgenresist	84
3.32 Prozessfolge bei der Herstellung beweglicher LIGA-Strukturen	85
3.33 Übersicht der Herstellungstechnologien für die Mikromechanik	86
3.34 Querschnitt eines Plastik-Chipgehäuses für SMT-Montage	88
3.35 Prinzipieller Verfahrensablauf beim Thermosonic-Drahtbonden	89
3.36 Verfahren und Werkzeuge der Mikrozerspanung	91
3.37 Herstellung eines mikrooptischen Trägers für eine Laser-LWL-Koppeleinheit	92
3.38 Mikrostrukturen hergestellt durch Laserbearbeitung	92
3.39 Mechanische Mikrostrukturen hergestellt durch Mikrofunkenerosion	93
4.1 Ätzprozess im (100)-Silizium-Wafer	96
4.2 Grundformen von Ätzstrukturen	97
4.3 Unterätzung bei unregelmäßiger Ätzmaskierung	97
4.4 Prozessablauf zur Herstellung von V-Nutstrukturen in (100)-Silizium	98
4.5 Unterätzung konvexer Ecken beim anisotropen Ätzen in (100)-Silizium	99
4.6 Kompensation der Eckenunterätzung mit vorgelagertem Quadrat	100
4.7 Ätzprozess in einem (110)-Si-Wafer	101
4.8 Richtungsabhängigkeit der Ätzraten von (110)-Silizium	101
4.9 Perspektivische Ansicht einer geätzten Grube	102
4.10 Prinzip eines Drehmomentsensors mit Kammkondensator	103
4.11 Kammstruktur für Kondensator geätzt in (110)-Silizium	103
4.12 Fehlwinkel bei einer LWL-Koppeleinheit	104
4.13 Teststruktur für Orientierungsätzung	104
4.14 Elektrostatisches Mikrofon in Silizium-Mikromechanik	105
4.15 Prozessablauf für das Siliziumformätzteil eines elektrostatischen Mikrofons	106
4.16 Faserlinsenkoppeleinheit	107
4.17 Doppellagen-Maskierung für unterschiedlich tiefe Formteile	109
4.18 REM-Aufnahme einer mehrlagigen geätzten Struktur	110
4.19 Prozessablauf Herstellung von Si-Formteilen mit verschiedenen Ätztiefen	111

4.20	Bubble-Jet-Tintendruckkopf	112
4.21	Prozessablauf einer Silizium-Deckelplatte für einen Bubble-Jet-Druckkopf	113
4.22	Biegebalken einseitig eingespannt	114
4.23	Verschiebbarer Biegebalken	116
4.24	Herstellung von Biegebalken in Silizium mit elektrochemischem Ätzstopp	117
4.25	Zweiseitig eingespannter Biegebalken (frei verschiebbar)	118
4.26	Zweiseitig eingespannter Biegebalken (geklemt)	118
4.27	Horizontal ausgelenkter Biegebalken in Oberflächen-Mikromechanik	119
4.28	Beschleunigungssensor in Oberflächen-Mikromechanik	119
4.29	Kreiszyklindrische Silizium-Membran	120
4.30	Querschnitt einer kreiszyklindrischen Silizium-Membran	121
4.31	Rechteckige Silizium-Membran	121
4.32	Vergleich quadratische und kreisförmige Membran	122
4.33	Membran mit Mittenverstärkung	122
4.34	Einspannungen von Biegebalken und Platten	123
4.35	Schematische Darstellung der Eigenspannung von dünnen Schichten	123
4.36	Druckspannung einer thermisch oxidierten Si-Scheibe	125
4.37	Biegebalken mit Vorkrümmung	126
4.38	Kenngößen eines Biegebalkens mit Vorkrümmung	127
4.39	Geometrie einer elektrischen Leiterbahn	130
4.40	Widerstandsbestimmung einer Leiterbahn mit Hilfe von Quadratelementen	130
4.41	Dünnschichtaufbau einer Kapazität	131
4.42	Flachspule in Dünnschichttechnik	132
4.43	Flachspule mit UV-LIGA-Technik	132
5.1	Plattenkondensator mit Koordinatensystem	135
5.2	Elektrostatischer Aktor mit Transversalkraft	136
5.3	Aufhängung mit Biegebalken zweiseitig eingespannt	137
5.4	Kraft-Weg-Kennlinie eines elektrostatischen Aktors	139
5.5	Federaufhängung der beweglichen Elektrode eines Plattenkondensators	139
5.6	Instabilität eines elektrostatischen Aktors mit Hysterese	141
5.7	Schema eines Magnetkreises mit Ersatzschaltbild	142
5.8	Magnetkreis mit versetzten Polflächen zur Erzeugung einer Transversalkraft	145
5.9	Elektromagnetischer Antrieb in Dünnschichttechnik	146
5.10	Vergleich eines Dünnschicht-Magnetkreises mit konventioneller Spule	146
5.11	Elektromagnetische Antriebe in der Mikrotechnik	149
5.12	Elektrodynamischer Antrieb mit Tauchspulsystem	149
5.13	Schwenkantrieb von Festplattenlaufwerken	150
5.14	Mikromechanischer Lautsprecher	150
5.15	Mikromechanischer Lautsprecher	152
5.16	Elektromagnetischer Dünnschichtantrieb mit zweilagiger Flachspule	154
5.17	Skalierungsverhalten von elektrost. und elektromag. Dünnschichtaktoren	158
5.18	Mikrooptischer 2x2-LWL-Schalter in Oberflächen-Mikromechanik	159
5.19	Torsionsspiegel	161

5.20	Maximaler Drehwinkel eines Torsionsspiegels	164
5.21	Vertikale Auslenkung der Torsionsfeder	165
5.22	Elektrostatisch angetriebenes Scannerarray	167
5.23	Kennlinien des elektrostatisch angetriebenen Scannerarrays	168
5.24	Optische Schaltmatrix mit mikromechanischem 3D-Spiegelsystem	169
5.25	Zweidimensional beweglicher Torsionsspiegel für optische Schalter	169
5.26	Digitale 2D-Bilderzeugung für HDTV-Projektion mit Digital Mirror Device	170
5.27	Spiegelement eines Digital Mirror Device	171
5.28	Herstellungsprozess eines DMD in Oberflächen-Mikromechanik	172
5.29	Mikromechanisches Relais mit Parallel-Plattenantrieb	176
5.30	Elektrostatischer Wanderkeilantrieb mit gebogener Federzunge	177
5.31	Ansprechverzögerung in einem elektrostatischen Wanderkeilantrieb	178
5.32	FEM-Analyse der mechanischen Spannungen einer Schaltfeder	180
5.33	Schematischer Aufbau eines elektrostatischen Silizium-Mikrorelais	181
5.34	Prozessablauf zur Herstellung einer vorgekrümmten Federzunge	182
5.35	Auslenkung der Federzunge	183
5.36	Elektrischer Lebensdauertest mit ohmscher Last	184
5.37	Elektromagnetisches Mikrorelais	184
5.38	Anordnung eines piezoelektrischen Scheibenaktors	186
5.39	Großsignal-Kennlinien von ferroelektrischen Materialien	188
5.40	Stellweg-Feldstärke-Kennlinie einer Piezo-Keramik	189
5.41	Grundkonfigurationen von piezoelektrischen Antrieben	189
5.42	Querschnitt und Kennlinie eines Biegewandlers	190
5.43	Abhängigkeit der Leerlaufauslenkung vom Schichtdickenverhältnis δ	192
5.44	Pneumatikventil mit piezoelektrischem Biegewandler	192
5.45	Thermischer Biegewandler	193
5.46	Bistabiles Mikrorelais mit thermischem Antrieb	195
5.47	Monostabiles Mikrorelais mit thermischem Antrieb	196
5.48	Mikromechanischer Faserschalter mit thermischem Bimorph	197
6.1	Thermomechanisches Mikroventil in Silizium-Mikromechanik	199
6.2	Schematischer Querschnitt eines thermomechanischen 3-Wege-Mikroventils	201
6.3	Mikropumpe aus Silizium mit Piezoscheibenaktor	202
6.4	Querschnitt einer Mikropumpe aus Polycarbonat mit Piezoscheibenaktor	203
6.5	Meilensteine der Tintendrucktechnologie	204
6.6	Piezo-Jet-Tintendruckkopf in planarer Aufbautechnik	205
6.7	Tropfenerzeugung für einen Tintenstrahl durch Dampfblasen	206
6.8	Aufbau eines Bubble-Jet-Tintendruckkopfs	206
6.9	Aufbau eines Tintendruckkopf-Mikrosystemchips - Backshooter-Prinzip	208
6.10	Thermokapillarer Schalter mit Dampfblase	209
6.11	32x32-Schaltmatrix mit thermokapillarem Schalter	209
7.1	Drehratenmessung nach dem Coriolisprinzip	214
7.2	Prinzip eines Drehratensensors mit eingepprägter Drehbewegung	216

Tabellenverzeichnis

1.1	Vergleich typ. Eigenschaften von Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik	5
1.2	Produktwandel durch Mikrotechnik	6
1.3	Einteilung von mikrotechnischen Systemen und Komponenten	7
1.4	Vor- und Nachteile hybrider und monolithischer Mikrosysteme	8
2.1	Systematisierung von Werkstoffen in der Mikrosystemtechnik	11
2.2	Substratwerkstoffe	12
2.3	Kristallographische Einheitszellentypen	13
2.4	Winkel zwischen den wichtigsten Ebenen im Silizium-Kristall	15
2.5	Stoffeigenschaften wichtiger Halbleiter	16
2.6	Mechanische und thermische Eigenschaften von Silizium	17
2.7	Standardabmessungen von Silizium-Wafern	20
2.8	Chemische Zusammensetzung und Eigenschaften von Glassubstraten	21
2.9	Verwendung, Anforderungen und Formen von Gläsern	22
2.10	Eigenschaften von Keramiken für Substrate und Gehäuse	23
2.11	Polymere Werkstoffe in der Mikrosystemtechnik und deren Eigenschaften .	25
2.12	Eigenschaften von Kunststoffen für Gehäuse, Umhüllungen und Kleber . .	25
2.13	Klassen von Wandlungseffekten bei Funktionswerkstoffen	26
2.14	Elastische Konstanten und Koeffizienten von einkristallinem Silizium . . .	30
2.15	Werte für E und ν für verschiedene Kristallrichtungen von Silizium	31
2.16	Piezoelektrische Werkstoffe	33
2.17	Eigenschaften magnetostriktiver Werkstoffe	34
2.18	Wärmeausdehnungskoeffizienten von Werkstoffen für Bimorphstrukturen .	36
2.19	Eigenschaften von Formgedächtnis-Legierungen	37
2.20	Temperaturkoeffizienten von Werkstoffen zur Temperaturmessung (PTC) .	38
2.21	Werkstoffe für Heizleiter in der Mikrosystemtechnik	39
2.22	Seebeck-Koeffizienten und thermoel. Gütefaktoren von Werkstoffpaarungen	41
2.23	Eigenschaften ferromagnetischer Werkstoffe	42
3.1	Beschichtungsverfahren in der Mikrosystemtechnik	49
3.2	Einteilung der technischen Vakuumbereiche	49
3.3	Ausgewählte CVD-Prozesse	56
3.4	Prozessparameter für galvanisch abgeschiedene Metallschichten	58
3.5	Anwendungen von SiO_2 -Schichten aus thermischer Oxidation	60
3.6	Arten des Photoresists und der Photomaskenpolarität	64

3.7	Ätzlösungen zum nasschemische Strukturieren von dünnen Schichten . . .	70
3.8	Zusammenfassung Ätzverfahren	73
3.9	Materialkombinationen für Opferschichten	86
3.10	Vergleich der Drahtbondverfahren	90
4.1	Übersicht der Form- und Funktionselemente in Mikrosystemen	95
5.1	Allgemeine Größenskalierung von Feldaktoren	153
5.2	Größenskalierung von Feldaktoren bei invariantem Arbeitsluftspalt	156
5.3	Einteilung von Anwendungen von Feldaktoren	158
5.4	Abmessungen und Kenndaten eines elektrostatischen Torsionsspiegels . . .	166
5.5	Kenndaten eines elektrostatischen Torsionsspiegels in einem DMD	173
5.6	Anforderungen an elektromechanische Kleinsignalrelais	174
5.7	Ergebnisse der FEM-Analyse von verschiedenen Federkonstruktionen . . .	179
5.8	Übersicht zu thermomechanischen Aktoren	193
6.1	Analogie von Fluidodynamik und Elektrotechnik	199
6.2	Klassifikation von Mikroventilen	200
6.3	Klassifikation von Mikropumpen	202
7.1	Systematik und Übersicht von Mikrosensorelementen (Beispiele)	210
7.2	Piezoresistive Koeffizienten bzw. k-Faktoren	212

Kapitel 1

Einführung und Definitionen

Die Erfindung des Transistors 1947 und die spätere Realisierung von integrierten Halbleiterschaltungen seit 1958 bewirkte eine komplette Umwälzung der gesamten Elektronik. Die Integration von vielen elektronischen Bauelementen auf einem Substrat führte zur Mikroelektronik, in der einerseits durch die ständig verkleinerte wiederholte Anordnung von gleichartigen Grundbausteinen die Integrationsdichte bei Speicherbausteinen erhöht wurde oder andererseits durch die Zusammenfassung vieler unterschiedlicher Schaltungsfunktionen komplette Systeme wie Prozessoren auf einem Chip realisiert werden. Somit werden durch die Steigerung der Speicherdichte die mikroelektronischen Fertigungstechnologien stets weiterentwickelt. Diese wachsende technologische Basis schafft die Voraussetzung für die Integration immer komplexerer Systeme auf einem gemeinsamen Substrat.

Parallel zur Entwicklung der Halbleitertechnik mit der Mikrointegration von rein elektronischen Funktionen sind die mikroelektronischen Fertigungsverfahren für die Herstellung neuer Komponenten und Bauelemente mit nichtelektrischen Funktionen angewendet worden. Bereits 1954 wurde der piezoresistive Effekt an Halbleitern entdeckt, der zur Herstellung von Mikrodrucksensoren auf Silizium führte. Nach der Erfindung des anisotropen Tiefenätzens in Silizium (1967) begann Ende der 70er Jahre die Entwicklung einer neuen Disziplin der Mikromechanik, d. h. der Herstellung mikromechanischer Bauteile und Bauelemente mit Hilfe der zum Teil adaptierten Fertigungsverfahren der Mikroelektronik.

Ab 1980 wurde das Spektrum der Anwendungen ausgehend von den Mikrosensoren zu den Mikroaktoren erweitert, so dass eine Vielzahl von Beispielen an *Mikroelektromechanischen Systemen* (*MEMS*) in der Forschung demonstriert und inzwischen als Produkte realisiert wurden.

Wie in der Halbleitertechnik und Elektronik vollzog sich in anderen Wirtschaftszweigen ebenfalls ein Wandel durch fortschreitende Miniaturisierung. Die Herstellung von Bauteilen, Komponenten und Systemen in der Feinwerktechnik bzw. Feingerätetechnik unterliegt seit mehreren Jahrzehnten einem Wandel in der Produktionstechnik, so dass sich die Produktgestaltung drastisch ändert.

Die ständige Verfeinerung konventioneller Fertigungsverfahren wie Umformen, Trennen und Fügen stößt an physikalische und wirtschaftliche Grenzen. Anstelle des seriellen Fügens

vieler zuvor durch mechanische Bearbeitung geformter Einzelteile werden zunehmend die funktionsbestimmenden Bauteile durch Fertigungsverfahren der Mikrotechnik hergestellt. Damit geht gleichzeitig ein Produktwandel zu höherer Leistungsfähigkeit und Miniaturisierung einher. Beispiele dieses Produktwandels sind in vielen wichtigen Industriebereichen, wie der Bürokommunikation (Drucker, FAX, Scanner), Magnetspeichertechnik, Kfz-Elektronik (Airbag), Industrieelektronik (Sensorik) und Medizintechnik zu finden.

1.1 Definitionen zur Mikrosystemtechnik

Für den Begriff „Mikrosystemtechnik“ gibt es noch keine allgemein verbindliche Definition. Hier soll eine weitgehend verbreitete Beschreibung verwendet werden [nach Gerlach]:

Die Mikrosystemtechnik umfasst den Entwurf, die Fertigung und die Applikation von miniaturisierten technischen Systemen, deren Bauteile und Komponenten typische Strukturgrößen bzw. Toleranzen im Mikrometer- bis Nanometerbereich besitzen.

Die Mikrosystemtechnik kann durch ihre Wortbestandteile „Mikrotechnik“ und „Systemtechnik“ näher charakterisiert werden. Bild 1.1 zeigt eine Zuordnung der angewendeten Technologien und Arbeitsgebiete.

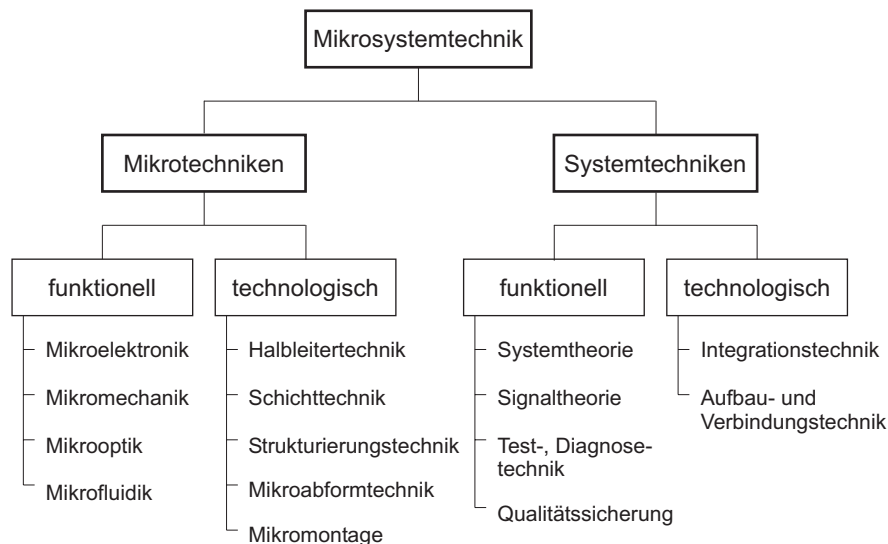


Abbildung 1.1: Technologieübersicht zur Mikrosystemtechnik [nach Gerlach]

Mikrotechnik

Unter dem Begriff *Mikrotechnik* verstehen wir die Fertigungstechnik für Bauteile und Komponenten in *Mikrotechnischen Systemen*, kurz genannt *Mikrosystemen*, deren funktionsbestimmenden Abmessungen im allgemeinen im *Mikrometer-* bis in den *Nanometerbereich*

liegen (siehe Abbildung 1.2). Funktionsbestimmende Abmessungen können sich entweder auf die Größe von zwei- oder dreidimensionalen *Strukturen* oder auch auf die *Maßtoleranzen* von präzisen Formteilen beziehen. Mikrotechnische Systeme können in ihrer gesamten Baugröße einen weiten Bereich von einigen Millimetern (z. B. integrierter Halbleiterchip) bis zu mehreren Zentimetern (z. B. Mikroanalysesystem) umfassen.

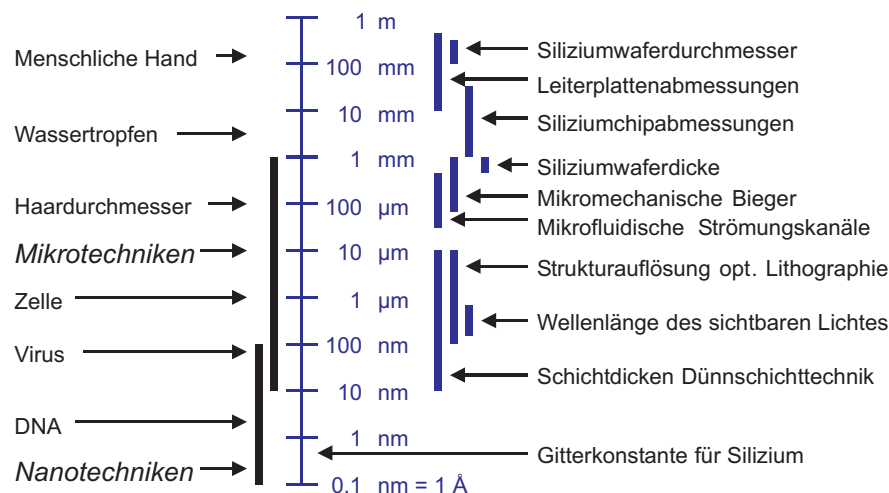


Abbildung 1.2: Dimensionen der Mikro- und Nanotechnik [nach Gerlach]

Ab 1995 wird zunehmend der Bereich unterhalb von 100 nm für technische Anwendungen erschlossen. Die Herstellung von Strukturen im molekularen bzw. atomaren Größenbereich wird als Nanotechnik bezeichnet.

Diese kleinen Abmessungen lassen sich durch direkt übernommene oder auch adaptierte Fertigungsverfahren aus der *Halbleitertechnologie* bzw. Mikroelektronik sowie durch speziell entwickelte mikrotechnische Herstellungsprozesse realisieren.

Dazu werden vorwiegend *Dünnsfilm-Herstellungsverfahren* auf *planaren Substraten* eingesetzt, so dass eine Vielzahl von Einzelbauteilen auf einer Scheibe (auch *Wafer* genannt) gefertigt werden (Nutzen- oder Batchfertigung). Die genaue Strukturierung erfolgt vorwiegend mit Hilfe der *Photolithographie*. Durch Vereinzeln (Trennen) entstehen die einzelnen Bauteile, wobei mehrere Bauteile durch *Mikromontageverfahren* zu Komponenten zusammengefasst werden können.

Die mit Hilfe der Mikrotechnik hergestellten Bauteile und Komponenten können *verschiedenartige Funktionen* ausüben:

- elektronisch
- mechanisch
- optisch
- thermisch

- fluidisch,

so dass die verschiedenen Arbeitsgebiete in Abbildung 1.1 analog zur Mikroelektronik mit Mikromechanik, Mikrooptik und Mikrofluidik bezeichnet werden.

Systemtechnik

Mikrosysteme bestehen aus mehreren Bauteilen und Komponenten sowie deren Beziehungen und Verknüpfungen untereinander, so dass das System als Ganzes mehr leisten kann als die Summe der Einzelteile. Die einzelnen Komponenten übernehmen unterschiedliche physikalische Funktionen, wie z.B. elektrische, mechanische oder optische. Die physikalisch definierten Grundfunktionen der Einzelkomponenten lassen sich nach Abbildung 1.3 hinsichtlich ihrer Systemfunktion in *Sensoren*, *Aktoren* und *Signalverarbeitung* einteilen. Abbildung 1.3 veranschaulicht ein Mikrosystem in einem vollständigen Umfang. Oft ist es aus physikalischen oder anwendungstechnischen Gründen nicht möglich, sowohl den Akteur, d.h. das Stellglied, als auch den Sensor in einem einzigen mikrotechnischen Aufbau zu realisieren, so dass auch Teile des Gesamtsystems als Mikrosystem angesehen werden, sobald verschiedene Funktionen miniaturisiert integriert werden.

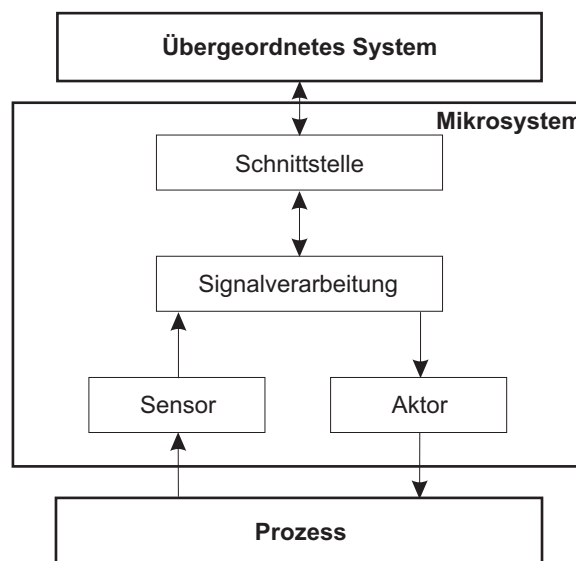


Abbildung 1.3: Funktionsschema eines Mikrosystems

Hinsichtlich der Funktion lässt sich nach Abbildung 1.4 eine Hierarchie im Mikrosystem definieren. Mit Hilfe mikrotechnischer Fertigungsverfahren werden einzelne Funktions- bzw. Formelemente, z.B. Biegebalken oder Membran, zu einer Komponente z.B. Beschleunigungssensor integriert, die zusammen mit (mikro-) elektronischen Komponenten ein Mikrosystem ergeben. Ein Beispiel dafür ist ein intelligentes Beschleunigungssensorsystem mit der Steuerung für ein Airbagsystem im Kfz.

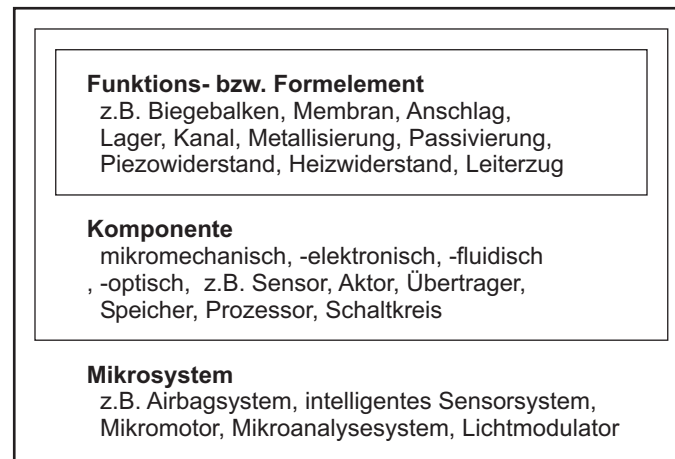


Abbildung 1.4: Aufbau und Einbindung von Mikrosystemen [Gerlach]

Die Mikrotechnik bzw. Mikrosystemtechnik fand ihren Ursprung in der Mikroelektronik auf Siliziumbasis durch die Integration verschiedener Schaltungselemente auf einem Chip, so dass zunächst die Kriterien der Funktion und Technologie eindeutig festgelegt waren. Seit etwa 1980 hat sich in der Mikrosystemtechnik hinsichtlich der Bauteil- und Komponenten-funktion als auch der angewendeten Technologien bzw. Materialsysteme eine große Vielfalt entwickelt, wie dies ein Vergleich typischer Merkmale der Mikroelektronik mit denen der Mikrosystemtechnik in Tabelle 1.1 zeigt.

Tabelle 1.1: Vergleich typischer Eigenschaften von Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik

Kriterium	Mikroelektronik	Mikrosystemtechnik
Komponenten	standardisiert z. B. Speicher, Prozessoren	vielgestaltig
Stückzahlen	$10^5 \dots 10^8$	$10^2 \dots 10^6$
Anwendungen	elektronisch	mechanisch, elektronisch, fluidisch, optisch ...
Strukturdimensionen	zweidimensional	dreidimensional
Entwurf	automatisiert	heterogen mit geringer Entwurfsunterstützung

1.2 Anwendungen der Mikrosystemtechnik

Seit etwa 1980 sind eine Vielzahl von mikrotechnischen Komponenten und Systemen in der Forschung und Entwicklung demonstriert worden. Einige gut bekannte Beispiele wie Drucksensoren in der industriellen Prozessautomatisierung und Beschleunigungssensoren in der Automobiltechnik sind in die industrielle Serienfertigung überführt worden. Mehr im

Verborgenen setzte seit etwa 1985 ein starker Produktwandel in der Feingeräteindustrie ein, der verschiedene Funktions- und Anwendungsbereiche umfasst. Dabei ersetzen *mikrotechnische Systeme* viele bekannte feinwerktechnische Komponenten und Geräte (Tabelle 1.2).

Tabelle 1.2: Produktwandel durch Mikrotechnik

Anwendung	Feinwerktechnisches Gerät	Mikrotechnisches System
Drucken	Nadeldruck	Tintendruckkopf
Speichern	Magnetlese-/Schreibkopf	HD-Laufwerk Dünnschicht-Schreib-/Lesekopf Dünnschicht-Speichermedium
Informationswiedergabe	Schallplatte	CD-Platten, CD-Laufwerk Schreib-/Lesekopf
Automobil-Sensorik	Beschleunigungsschalter	Mikrobeschleunigungssensor mit integrierter Signalverarbeitung
Industrie-Sensorik	Druckmessdose	Mikrodrucksensor
Lichtprojektion	Drehspiegelsystem	Mikroscanner, Spiegelarray
Schalten	Elektromagnetisches Relais	Mikrorelais integrierbar zu Schaltmatrizen

Die Anwendungen der Mikrosystemtechnik können nach verschiedenen Gesichtspunkten wie Wirtschaftszweigen oder technischer Funktion unterschieden werden. Die wesentlichen wirtschaftlichen Anwendungsgebiete sind:

- Automobiltechnik
- Peripherie-/Endgeräte der Informationstechnik
- Telekommunikation
- Industrieelektronik
- Prozessautomatisierung
- Medizintechnik
- Umwelttechnik

Die vielen in der Forschung demonstrierten und zum Teil bereits gefertigten Mikrotechnischen Systeme und Komponenten lassen sich auf Grund ihrer physikalischen Funktion nach Tabelle 1.3 einteilen. Nach dieser Systematik wird im Folgenden verfahren. Die Abgrenzungen der Komponentenarten sind durchaus fließend. Ein Mikroventil kann als Mikroaktor aber auch als Komponente der Mikrofluidik angesehen werden. Gebiete der Mikrooptik und Integrierter Optik lassen sich jedoch relativ klar abgrenzen: bei der integrierten Optik handelt es sich um die Integration von optischen Wellenleitern, Steuerelementen bzw.

optoelektronischen Wandlern (Laserdiode, Photodetektor) auf einem gemeinsamen Substrat, wogegen bei der Mikrooptik meistens Freistrahl-Lichtausbreitung vorliegt und die Schaltfunktionen durch mikromechanische Elemente hervorgerufen werden (z.B. Schalter zur optischen Verzweigung).

Tabelle 1.3: Einteilung von mikrotechnischen Systemen und Komponenten

Grundfunktion	Komponentenart	Exemplarische Beispiele
elektronisch	Mikroelektronik (meist Siliziumbasis)	Prozessoren, Speicherbausteine, Logik-Schaltkreise, Analog-Schaltkreise
mechanisch	Mikrosensorik	Sensoren für Druck, Beschleunigung, Drehmoment, Drehrate, Temperatur, Gasdurchfluss
	Mikroaktorik	Tintendruckkopf, Schreib-Lese-Kopf, Mikroschalter, Mikrogreifer, Mikropumpe, Mikroventil
	Mikrofluidik	Wärmetauscher, Mikroreaktor, Mikrodosiersystem, Mikroanalysesystem
optisch	Mikrooptik	Mikrooptischer Scanner, Mikrospiegelarray (DMD), Faseroptischer Schalter, mikromechanischer WDM-Filter
	Integrierte Optik	integriert optischer Schalter, abstimmbare elektrooptische Schalter, elektrooptischer Lichtmodulator

Die Vielzahl von Funktionen und Anwendungen mikrotechnischer Systeme bedingt, dass sich keine einheitliche Fertigungstechnologie wie bei der Mikroelektronik sondern diverse Technologien, wie z.B. Silizium-Mikromechanik, LIGA (Lithographie, Galvanik, Abformung) etc. (siehe Kapitel 3) mit verschiedenen Materialsystemen, z.B. Silizium, Glas, Keramik, Polymer, Metalle (siehe Kapitel 2) etabliert haben. Mitunter stellt sich die Frage nach der technischen Realisierbarkeit bzw. der wirtschaftlichen Umsetzbarkeit der Integration. Dazu werden als Integrationsarten unterschieden:

- monolithische Mikrosysteme (alle Funktionen auf einem Substrat)
- hybride Mikrosysteme (gr. hybris = gemischt, von zweierlei Herkunft)

Aus Gründen der „montagefreien“ Batchfertigung wird eine monolithische Integration aller zu realisierenden Funktionen auf einem gemeinsamen Substrat angestrebt, womit aber der Aufwand für den Gesamtprozess steigt.

Bei der hybriden Integration können die einzelnen Komponenten in verschiedenen Technologien bzw. Materialsystemen realisiert und optimiert werden, die anschließend auf einem gemeinsamen Träger zu einem Mikrosystem montiert werden. Die Vor- und Nachteile zeigt Tabelle 1.4.

Tabelle 1.4: Vor- und Nachteile hybrider und monolithischer Mikrosysteme

Systemtyp	Vorteile	Nachteile
hybrid	• Einzelchipausbeute höher • Second Source möglich • Varianten einfach möglich • Optimierung der Komponenten einfach möglich	• Mehr Anschlusskontakte (Risiko) • Handlingsprobleme • Platzprobleme
monolithisch	• Funktionalität höher • weniger Flächenbedarf • integrierte Selbstüberwachung möglich • preiswerter bei hohen Stückzahlen • Gesamtausbeute höher • widerstandsfähiger	• komplexere Fertigung (Abstimmungsaufwand) • wenig Kontrollmöglichkeiten während der Fertigung

1.3 Wirtschaftliche Bedeutung

Die wirtschaftliche Bedeutung der Mikrosystemtechnik wurde regelmäßig in den letzten zehn Jahren in diversen Studien analysiert. Die Prognosen waren nicht einheitlich und nicht immer entsprachen die optimistischen Prognosen den später tatsächlich erzielten Umsätzen. Eine Ursache dafür liegt in der bereits o.g. nicht klar definierten Abgrenzung der Mikrosystemtechnik. Ferner wurde bei den Umsätzen nicht deutlich der betrachtete Wertschöpfungsumfang, d.h. komplettes System oder Einzelkomponente, definiert.

Seit Mitte der 90er Jahre hat eine europäische Task Force „Market Analysis MST“ im Informationsnetzwerk NEXUS der EU die Marktentwicklung unter definierten Randbedingungen analysiert (Definition von MST nach Kap. 1.1). Ferner wurden bei der Wertentwicklung als Mikrosysteme die kleinsten wirtschaftlich handelbaren Einheiten betrachtet, z.B. beim Tintendruck wurde der montierte Druckkopf und nicht der komplette Drucker gewertet. Die Weltumsatzentwicklung für Mikrosysteme (Abbildung 1.5) zeigt ein deutliches Wachstum von 11 Mrd. Euro in 1996 auf über 30 Mrd. Euro in 2002. Diese Zahlen begründen sich zum überwiegenden Teil auf bereits vor 1995 eingeführten Produkten, so dass die Unsicherheit hinsichtlich der Einführung neuer Produkte reduziert ist. Die Aufschlüsselung des Weltumsatzes nach einigen wichtigen Produkten gemäß Abbildung 1.6 bestätigt einige Trends:

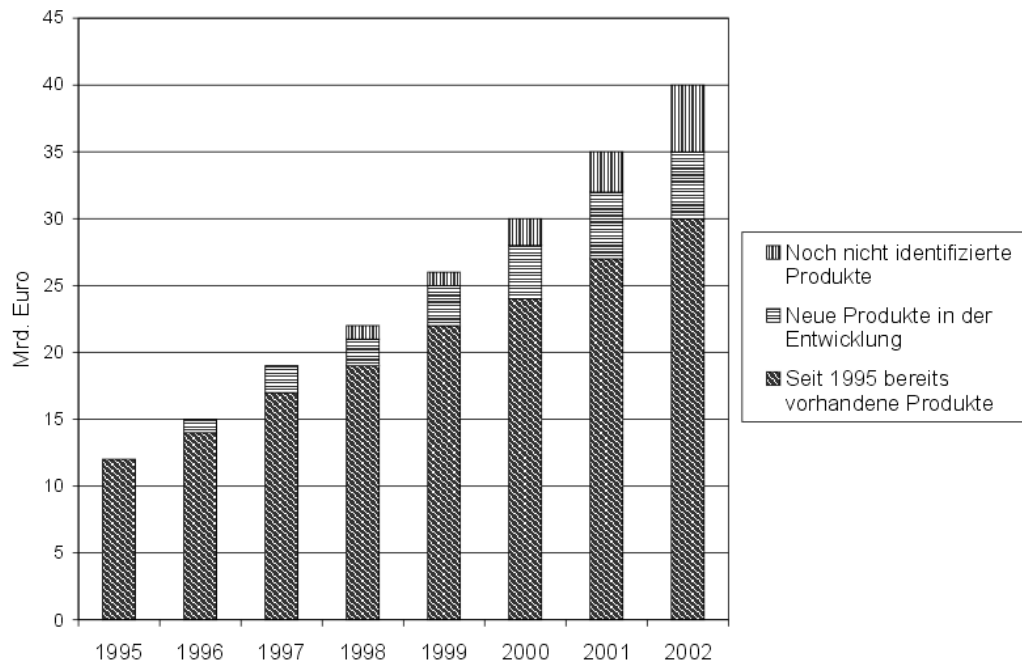


Abbildung 1.5: Entwicklung des Weltumsatzes für Mikrosysteme

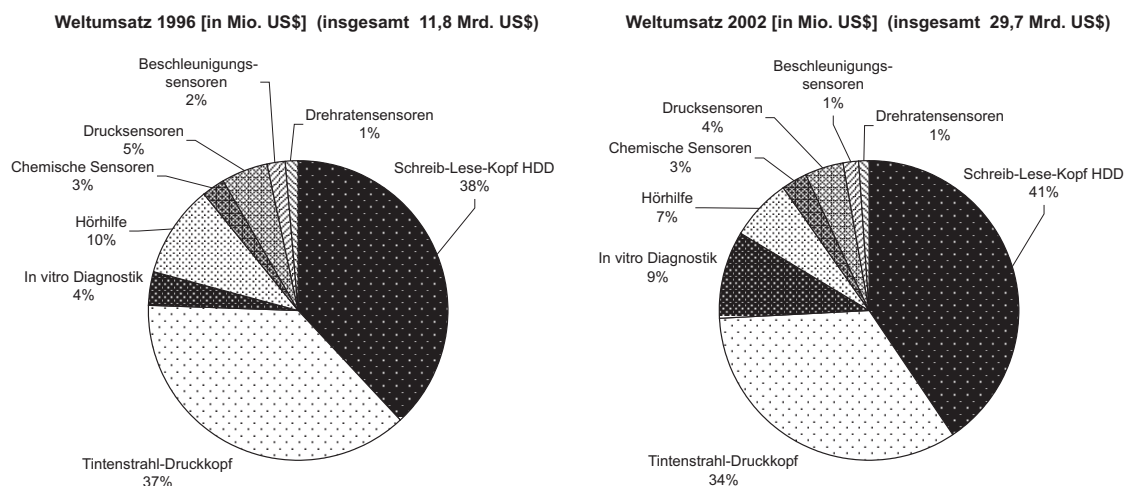


Abbildung 1.6: Aufteilung des Weltmarktes für Mikrosysteme nach Produkten mit der Entwicklung von 1996 bis 2002 [NEXUS]

- Die wertmäßig dominierenden Anwendungsgebiete liegen seit Beginn der Analysen 1996 und auch künftig im Bereich der Informationstechnik (Tintendruckkopf, Magnetspeicher)
- Motor der Entwicklung ist der Kfz-Markt (z. B. Silizium-Beschleunigungssensoren in Airbagsystemen)
- Ab 2000 werden Mikroanalyse- und Mikrodosiersysteme zunehmend wichtiger (z. B. Einsatz in der Mikrobiologie)

Für die Markteinführung von Mikrotechnischen Systemen sind Massenanwendungen je nach der eingesetzten Technologie günstig bzw. oft erforderlich. Bei Massenmärkten muss jedoch meistens von Anfang an die wirtschaftliche Hürde überwunden werden, dass das neue Mikrosystem gegen etablierte Produkte mit ausgereifter Fertigungstechnik konkurrieren muss. Nischenanwendungen können zwar wesentlich höhere Preise je Stück erzielen, sind aber für sich alleine nicht ausreichend, um eine eigene Mikrofertigung auszulasten, und können daher nur zusätzlich in einem Fertigungsverbund mitlaufen.

Kapitel 2

Werkstofftechnische Grundlagen

Mikrotechnische Systeme zeichnen sich durch eine hohe Funktionsvielfalt aus, wodurch eine Vielfalt an Herstellungstechnologien bedingt wird. Demzufolge finden viele verschiedene Werkstoffe ihren Einsatz. Aufbauend auf den Erfahrungen der Mikroelektronik soll das Prinzip der Batchfertigung, d. h. der parallelen Herstellung vieler gleichartiger Systeme auf einem gemeinsamen Substrat, möglichst durchgängig für Mikrosysteme angewendet werden. Um kostenintensive Montageprozesse einzusparen, müssen die Werkstoffe für die jeweilige Funktion optimal ausgewählt werden, um z. B. sowohl die dreidimensionale Strukturierung von Mikroformteilen zu ermöglichen und gleichzeitig noch physikalische Effekte wie druckempfindliche Widerstandsänderungen (piezoresistiver Effekt) auszunutzen. Die Vielfalt der einsetzbaren Materialien lässt sich nach verschiedenen Gesichtspunkten ordnen (Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Systematisierung von Werkstoffen in der Mikrosystemtechnik [nach Gerlach]

Einsatzzweck	Geometrie	Stoffart	Zustand
• Konstruktive Realisierung von Mikrobauteilen • Funktionen der Energie- und Signalwandlung	• Massivkörper • Schicht	• Metall • Halbleiter • Oxid • Anorganische Verbindung • Organische Verbindung	• Einkristall • Polykristallin • Keramik • Glas / amorpher Festkörper • Polymer

In der folgenden Darstellung werden die Werkstoffe der Mikrosystemtechnik eingeteilt in:

- Konstruktionswerkstoffe
- Funktionswerkstoffe (Werkstoffe mit Wandlerfunktion)

2.1 Konstruktionswerkstoffe

Die Konstruktionswerkstoffe der Mikrosystemtechnik umfassen in erster Linie Substratwerkstoffe und weiterhin Formmassen (z. B. Kunststoffe) zur Herstellung von Mikroformteilen aber auch Dünnschichtmaterialien, die als Hilfsmittel zur Herstellung von Formteilen (z. B. Ätzmaskierung) dienen. Als Substrat werden die ebenen Unterlagen bezeichnet, auf deren Oberflächen Funktionsschichten abgeschieden oder Funktionsstrukturen hineingeätzt werden bzw. deren Oberflächen anderweitig modifiziert werden (z. B. Dotierung). Gemäß der Systematik aus Tabelle 2.1 zeigt Tabelle 2.2 einige Beispiele von Substratwerkstoffen.

Tabelle 2.2: Substratwerkstoffe (Beispiele)

Substratmaterial	Stoffart	Zustand	Anwendung
Silizium (Si) Germanium (Ge) Galiumarsenid (GaAs) Indiumphosphid (InP)	Halbleiter	Einkristall	Mikroelektronik, Mikromechanik Elektronik MW-Elektronik, Optoelektronik MW-Elektronik, Optoelektronik
Aluminiumoxid (Al_2O_3) Aluminiumnitrid (AlN) Siliziumcarbid (SiC)	Oxid, anorganische Verbindung	polykristallin	Schichtschaltung, Gehäusebauteile, Träger für LIGA
Gläser	Oxid, anorganische Verbindung	amorph	Mikromechanik
PMMA	organische Verbin- dung	Polymer	Abformmasse, Substrat für Heiß- prägen

Bedingt durch die rasante Entwicklung der Mikroelektronik nimmt Silizium als Substratwerkstoff nach wie vor eine hohe Bedeutung in der Mikrosystemtechnik ein.

2.1.1 Halbleiterwerkstoffe

Halbleiterwerkstoffe bestehen aus Einkristallen, so dass die gesamte Substratscheibe (meistens als *Wafer* bezeichnet) aus einem periodischen Kristallgitter besteht. In vielen Fällen ist beim Entwurf und beim Fertigungsprozess von Mikrosystemen die Kristallographie des Substratmaterials zu beachten, so dass die wichtigsten Grundbegriffe kurz vorgestellt werden.

Grundlagen der Kristallographie

Ein idealer Kristall entsteht durch die unendliche regelmäßige Wiederholung von Einheitszellen im dreidimensionalen Raum. Diese Wiederholung wird durch drei linear unabhängige Translationsvektoren a , b , c beschrieben, die zueinander die Winkel α , β , γ einschließen. Dabei bezeichnet α den Winkel zwischen den Vektoren b und c . Die Einheitszelle bildet die Grundstruktur des Kristalls mit der Anordnung der im Werkstoff enthaltenen Atome

und wird durch die drei Vektoren a , b und c aufgespannt, die daher als Einheitsvektoren bezeichnet werden. Die Länge der Einheitsvektoren bezeichnet man als Gitterkonstanten. Die Variation der verschiedenen möglichen Symmetrien der Einheitszelle führt zu sieben Zelltypen, die in Tabelle 2.3 charakterisiert sind. Silizium gehört zum kubischen Kristalltyp, wobei neben den Ecken der Einheitszelle auch die Flächenmittelpunkte mit Atomen besetzt sind (Abbildung 2.1). Somit gehört Silizium zur Klasse der kubisch flächenzentrierten Kristalle (kfz, engl. fcc: face centered cubic), die auch als Diamantstruktur bezeichnet wird.

Tabelle 2.3: Kristallographische Einheitszellentypen

Kristallsystem	Achsen	Winkel
triklin	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma$
monoklin	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma \neq \beta$
orthorhombisch	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
tetragonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
kubisch	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
rhomboedrisch	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
hexagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$

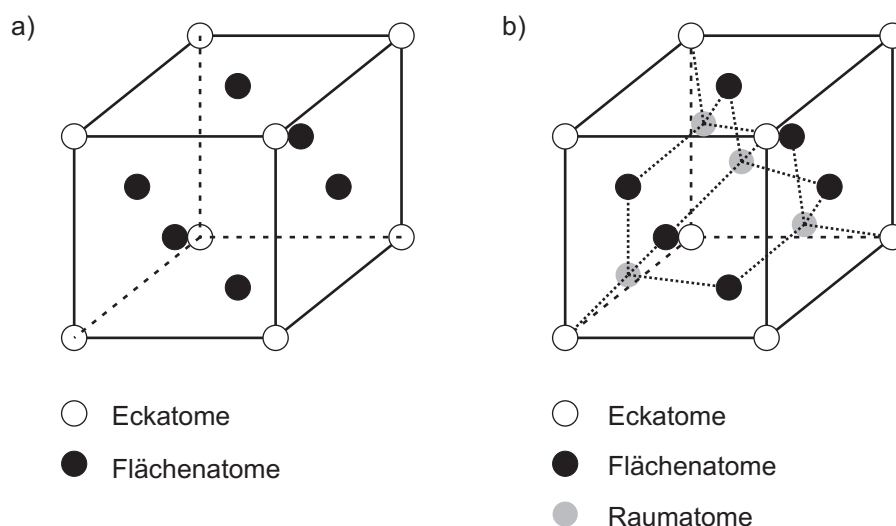


Abbildung 2.1: a) Einheitszelle eines kubisch flächenzentrierten Kristalls (kfz, Diamantgitter)
b) Einheitszelle von Silizium, Gitterkonstante $|a| = |b| = |c| = 0,543 \text{ nm}$

Einige physikalische und chemische Eigenschaften von einkristallinen Substratmaterialien hängen von der Kristallrichtung oder Kristallebene ab. Zur Kennzeichnung von Richtungen und Ebenen im Kristall wird ein Koordinatensystem verwendet, dessen Einheitsvektoren a , b , c auf die Gitterkonstanten normiert ist. Abbildung 2.2 zeigt als Beispiel den kubischen

Kristall mit den wichtigsten Kristallebenen. Kristallebenen werden durch die Miller-Indices ($h\ k\ l$) mit Hilfe des folgenden Vorgehens gekennzeichnet:

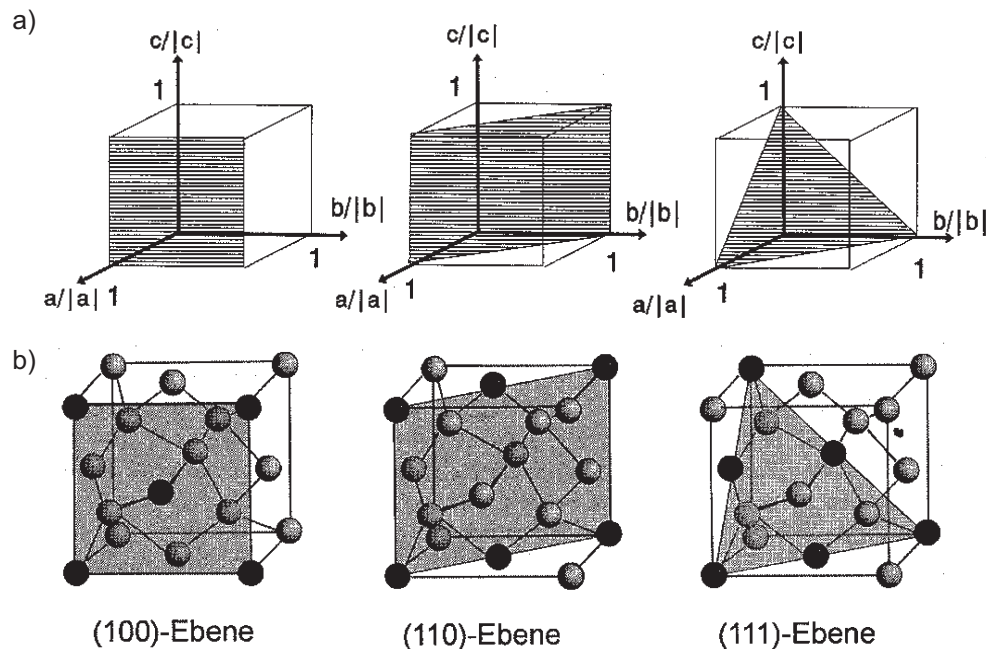


Abbildung 2.2: a) Wichtige Kristallebenen in einem kubischen Kristall
b) Einheitszelle von Silizium mit Kristallebenen

- Bestimmung der Schnittpunkte u , v , w der zu indizierenden Ebene mit den Koordinatenachsen.
Beispiel: Die (100)-Ebene schneidet die Achsen bei $a = 1$ und $b = \infty$ und $c = \infty$
- Bildung der Kehrwerte der Schnittpunkte $(1/u, 1/v, 1/w)$.
Beispiel: aus $(1, \infty, \infty)$ wird $(1, 0, 0)$
- Berechnung der kleinsten ganzen Zahlen (h, k, l) , die im gleichen Verhältnis zueinander stehen wie die Kehrwerte $(1/u, 1/v, 1/w)$.
Beispiel: aus $(1/1, 1/2, 1/4)$ wird $(4, 2, 1)$

Aufgrund der Symmetrien sind die Kristallebenen (100), (001) und (010) zueinander äquivalent, so dass diese Klasse als $\{100\}$ -Ebene bezeichnet wird. Die Kristallrichtungen mit der verallgemeinerten Klassenbezeichnung $\langle h\ k\ l \rangle$ stehen senkrecht auf den Kristallebenen; sie bilden die Flächennormalen.

Die Winkel zwischen verschiedenen Kristallrichtungen bzw. den Kristallebenen $\{h_1\ k_1\ l_1\}$ und $\{h_2\ k_2\ l_2\}$ lassen sich folgendermaßen berechnen:

$$\cos \varphi = \frac{(h_1 h_2) + (k_1 k_2) + (l_1 l_2)}{\sqrt{(h_1^2 + k_1^2 + l_1^2)(h_2^2 + k_2^2 + l_2^2)}} \quad (2.1)$$

Für das kubische Diamantgitter des Silizium-Kristalls sind in Tabelle 2.4 die Winkel zwischen den wichtigsten Kristallebenen zusammengestellt.

Tabelle 2.4: Winkel zwischen den wichtigsten Ebenen im Silizium-Kristall (kubisches Gitter)

1. Ebene $\{h_1 \ k_1 \ l_1\}$	2. Ebene $\{h_2 \ k_2 \ l_2\}$	Winkel		
100	100	0°	90°	
	110	45°	90°	
	111	54,74°		
	211	35,26°		
	311	25,24°		
	411	19,47°		
110	110	0°	60°	90°
	111	35,26°		90°
111	111	0°	70,53°	

Von besonderer Bedeutung für die Herstellung mikromechanischer Strukturen in Silizium ist der Winkel zwischen den $\{100\}$ - und $\{111\}$ -Ebenen, der nach Gleichung 2.1 definiert ist als:

$$\varphi = \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) = \arctan\left(\sqrt{2}\right) = 54,74^\circ \quad (2.2)$$

Werkstoffdaten von Halbleitern

In der Mikrosystemtechnik ist Silizium das meistbenutzte Substratmaterial, da es sowohl elektronische Funktionen als auch Wandlerfunktionen (z. B. Sensorik) ausübt und außerdem ausgezeichnete Eigenschaften als mechanischer Konstruktionswerkstoff besitzt. In Tabelle 2.5 sind die wesentlichen Materialeigenschaften im Vergleich zu anderen Halbleitermaterialien zusammengestellt, welche in hybridintegrierten Mikrosystemen besondere Funktionen ausüben wie:

- GaAs, GaP: Höchstfrequenzelektronik
 Optoelektronische Wandler
- InP: Optoelektronische Wandler
 OEIC (Optoelectronic Integrated Circuit)
- Ge: Höchstfrequenzelektronik

GaAs, GaP und InP gehören zur Gruppe der III-V-Verbindungshalbleiter, die aus einem dreiwertigen (Gruppe III) und einem fünfwertigen (Gruppe V) Element bestehen. Die Prozessierung von Schaltkreisen ist im Vergleich zu Silizium sehr aufwendig, so dass sie nur für die oben genannten Spezialfunktionen eingesetzt werden.

Tabelle 2.5: Stoffeigenschaften wichtiger Halbleiter bei 300 K [Gerlach]

Eigenschaft	Einheit	Si	Ge	GaAs	GaP	InP
Kristallstruktur		Diamant	Diamant	Zinkblende	Zinkblende	Zinkblende
Atomdichte	10^{22} cm^{-3}	5,00	4,42	4,42	4,96	4,00
Gitterkonstante	10^{-10} m	5,43072	5,65754	5,654	5,45	5,869
Dichte ρ	g/cm^3	2,3290	5,3234	5,316	4,130	4,787
Schmelzpunkt T_s	$^{\circ}\text{C}$	1417	937	1238	1467	1062
Dampfdruck der B-Komponente bei T_s	MPa	entfällt	entfällt	0,089	2,5	3,5
spezifische Wärme	$\text{J}/(\text{kg K})$	695	316	350	434	
Wärmeleitfähigkeit λ	W/mK	146,5	59,9	46	77	68
linearer Wärmeausdehnungskoeffizient	$10^{-6}/\text{K}$	2,3	5,75	6,86	5,3	
MOHS-Härte		7,00	6,25	4,5		
Bruchfestigkeit	GPa	< 6		< 2,7		
Elastische Konstanten: c_{11}	GPa	165,6	128,8	118,8	141,2	
c_{12}	GPa	63,98	67,05	53,8	62,5	
c_{44}	GPa	79,51	48,25	58,9	70,5	
Elastizitätsmoduli: $E_{<100>}$	GPa	130	83	85	103	
$E_{<110>}$	GPa	169	109	121	145	
$E_{<111>}$	GPa	188	122	140	167	
Energie Bandübergang W_g	eV	1,106 ⁱ	0,67 ⁱ	1,424 ^d	2,261 ⁱ	1,351 ^d
Beweglichkeit der Elektronen μ_n	cm^2/Vs	1350	3900	10000	300	5300
Beweglichkeit der Löcher μ_p	cm^2/Vs	480	1900	450	150	650
rel. Dielektrizitätskonstante ϵ_r		11,7	16,3	13,1	11,1	12,4
Brechzahl n ($\lambda \approx 6 \mu\text{m}$)		3,42	4,01	3,655	3,45	3,45

ⁱ indirekter Bandübergang

^d direkter Bandübergang

Wegen der hohen Bedeutung von Silizium für mikrotechnische Systeme werden die Eigenschaften der Substratscheiben exemplarisch vorgestellt.

Silizium als mechanisches Material

Silizium ist ein Element der 4. Gruppe (wie Kohlenstoff) und nach Sauerstoff am zweithäufigsten (ca. 25 %) in der Erdkruste vorhanden. Die fertigen Substrate stehen in Form von einkristallinen Scheiben (Wafern) zur Verfügung. Die Waferoberfläche wird parallel zu einer der drei Hauptkristallebenen nach Abbildung 2.2 ausgerichtet, wobei in der Mikromechanik Wafer in (100)-Orientierung am meisten verbreitet sind.

Im Vergleich zu klassischen Konstruktionswerkstoffen aus Metall oder Nichtmetallen besitzt Silizium nach Tabelle 2.6 einige interessante mechanische und thermische Eigenschaften; es vereint dabei die Vorteile einiger metallischer und nichtmetallischer Werkstoffe:

- leicht wie *Aluminium*
- federnd und hart (E-Modul) wie *Stahl*

Tabelle 2.6: Mechanische und thermische Eigenschaften von Silizium im Vergleich zu anderen Werkstoffen

Werkstoff	Dichte [g/cm ³]	Härte (Knoop) [kg/mm ²]	Bruchfestigkeit [GPa]	Elastizitätsmodul [GPa]	Thermische Ausdehnung [10 ⁻⁶ /K]	Thermische Leitfähigkeit [W/mK]
Si	2,3	850	7	170	2,33	157
Al	2,7	130	0,17	70	25	<u>236</u>
Fe	7,8	400	12,6	196	12	80
Stahl (max. Härte)	7,9	1500	4,2	<u>210</u>	12	97
Stahl (rostfrei)	7,9	<u>660</u>	2,1	200	17,3	32,9
Diamant	3,5	7000	53	1035	1	200
SiC	3,2	2480	21	700	3,3	350
SiO ₂ (Quarz)	2,5	820	8,4	73	0,55	1,4
Borosilikat-Glas	<u>2,2</u>			61...66	<u>3...5</u>	1,1
Si ₃ N ₄	3,1	3486	14	385	0,8 ¹	19
Al ₂ O ₃ (Keramik)	4,0	2100	15,4	370	5,4	50

¹ keramischer Festkörper, Dünnschichten $\alpha = 3...6 \cdot 10^{-6}/K$

- geringe thermische Ausdehnung wie *Glas*
- sehr gute Wärmeleitung fast wie *Aluminium*

Die Herstellung von einkristallinen Silizium-Wafern für die Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik erfolgt in einer hochautomatisierten Großserienfertigung mit höchster Präzision und umfasst folgende Fertigungsschritte:

- Gewinnung von hochreinem Silizium durch Reduktion von Quarz (SiO₂) und weitere chemische Aufbereitung
- Ziehen von Silizium-Einkristallen
Aus einer hochreinen Silizium-Schmelze wird ein einkristalliner Silizium-Stab vertikal gezogen (Czochralski-Verfahren, Abbildung 2.3)
- Rundschleifen
Der gezogene Einkristall (Durchmesser bis zu 300 mm, Länge bis zu 2m) wird mit Hilfe des Topfschleifverfahrens auf den gewünschten Außendurchmesser rundgeschliffen
- Orientierung/Kennzeichnung
Durch Röntgenbeugung wird die Kristallorientierung gemessen und durch Schleifen einer Fase am Kristallaußenrand gekennzeichnet

- Sägen der Wafer
Die Siliziumscheiben werden mit einer Innenlochsäge aus dem Siliziumstab getrennt. Die Innenlochsäge gestattet das Trennen großer Waferdurchmesser (bis zu 300 mm) bei minimaler Säge-Schnittbreite, um den Verschchnitt zu minimieren
- Kantenverrundung
- Läppen
Das Läppen beider Oberflächen erfolgt in Doppelscheiben-Läppmaschinen, wobei die Siliziumscheiben in Käfigläuferscheiben geführt werden
- Polieren der Waferoberfläche

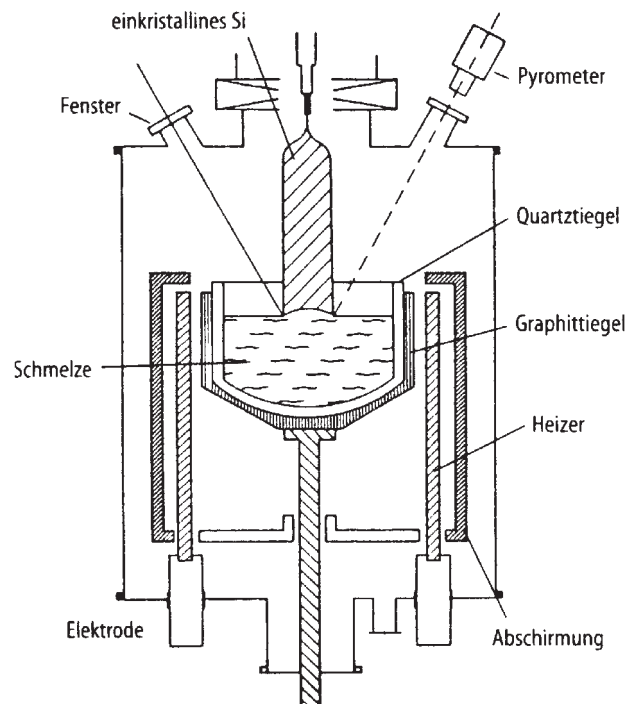


Abbildung 2.3: Schema einer Kristallziehanlage für einkristallines Silizium nach dem Czochralski-Verfahren [Obermeier]. Kristallstab und Tiegel werden jeweils gedreht.

Durch Zugabe von Dotierstoffen bereits in der Schmelze werden die Scheiben mit einer schwach p- oder n-leitenden Dotierung (Ladungsträgerdichte meistens $10^{15}/\text{cm}^3$) versehen. Zur Markierung der Kristallorientierung und Dotierungsart werden die Scheiben mit Haupt- und Nebenfasen (*Flat*) gekennzeichnet (Abbildung 2.4). In der Mikromechanik werden (100)-Wafer am meisten verwendet (Abbildung 2.4 c und d). Nach Abbildung 2.2 liegen die (110)-Achsen parallel zur Waferoberfläche mit vierzähliger Symmetrie (90°), so dass die Flächennormale des Hauptflats in eine (110)-Achse zeigt.

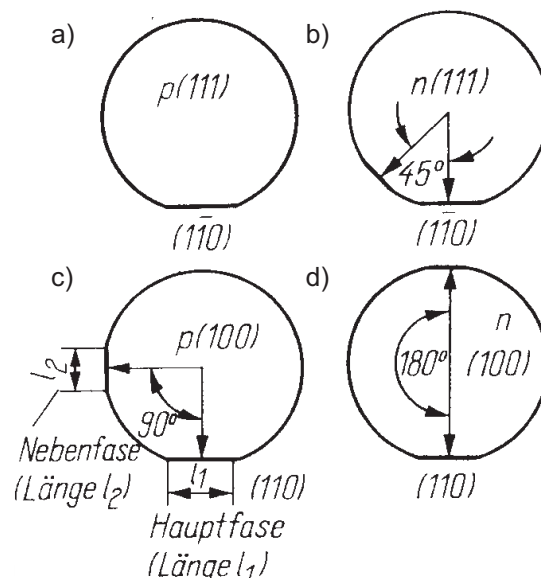


Abbildung 2.4: Kennzeichnung der Silizium-Wafertypen durch Fasen (*Flats*)

- a) (111)-Orientierung, p-leitend
- b) (111)-Orientierung, n-leitend
- c) (100)-Orientierung, p-leitend
- d) (100)-Orientierung, n-leitend

Die Abmessungen sowie Form- und Oberflächenqualitäten von Silizium-Wafern für die Halbleiterindustrie sind nach internationalen Standards genormt:

- SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International)
- ASTM (American Society for Testing and Materials)

Tabelle 2.7 zeigt die standardisierten Werte für Waferdurchmesser und -dicken, wobei die Spezifikation des Waferdurchmessers ab 100 mm von Zoll auf metrisch umgestellt wurde, so dass die umgangssprachlichen Bezeichnungen 6", 8" oder 12" unzutreffend sind und die exakten metrischen Durchmesser 150, 200 bzw. 300 mm gelten. Die minimalen, doch unvermeidbaren Fehler und Toleranzen werden von den Silizium-Waferherstellern gemäß Abbildung 2.5 spezifiziert. Für den Einsatz in der Mikromechanik ist die totale Dickenva-riation (*total thickness variation TTV*) nach Abbildung 2.5 e maßgebend.

Abweichende Waferdicken, insbesondere dünne Wafer bis zu 200 μm Dicke, sind als Sonderanfertigungen lieferbar. Für Bauelemente der Leistungselektronik (Vertikal-MOS-Transistoren), Chipkarten und viele Anwendungen in der Mikrosystemtechnik werden dünne Wafer benötigt, die auch nach der Prozessierung von der Rückseite her bis herunter zu Dicken von 100 μm abgedünnt werden.

Tabelle 2.7: Standardabmessungen von Silizium-Wafern

Waferdurchmesser		Dicke [μm]	Abweichung Parallelität [μm]	Durchbiegung [μm]	Ebenheit [μm]	Rauheit (poliert) [nm]
nominal	Toleranzbereich [mm]					
2"	$50,8 \pm 1$	275 ± 15	15	15	< 7	30
3"	$76,2 \pm 1$	375 ± 25	8...25	15	< 7	30
100 mm	$100 \pm 0,2$	525 ± 15	10...25	40	< 7	30
125 mm	125 ± 1	625 ± 25	15...20	25	< 7	30
150 mm	$150 \pm 0,2$	675 ± 20		60		
200 mm	$200 \pm 0,2$	725 ± 20		65		
300 mm						

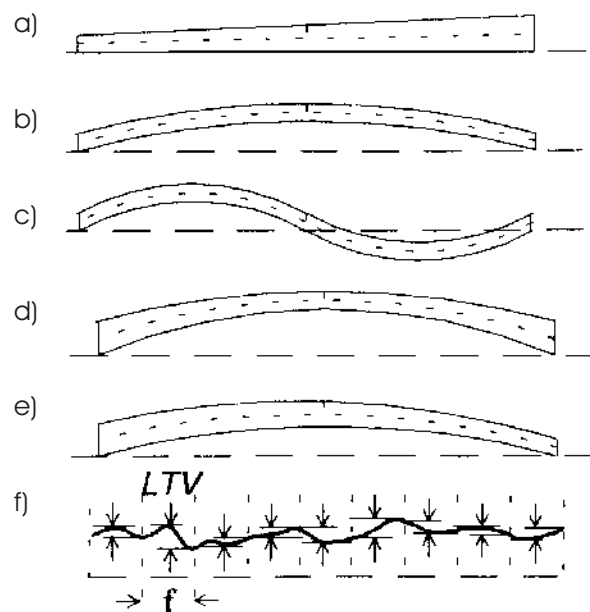


Abbildung 2.5: Fehlerarten beim Silizium-Scheibenquerschnitt
a) Parallelitätsabweichung (Keiligkeit, *Taper*)
b) Durchbiegung (*Bow*)
c) Verwerfung (*warp*)
d-e) Beispiele von Fehlerkombinationen aus (a) bis (c)
f) Welligkeit (lokale Dickenvariation, *local thickness variation LTV*)
bezogen auf ein Teilgebiet der Größe f

2.1.2 Glaswerkstoffe

Gläser sind feste Werkstoffe mit einer amorphen Struktur, in denen eine Nahordnung der Atome vorhanden ist, aber keine periodische Gitterstruktur wie in einem Kristall existiert. Sie besitzen deshalb isotrope Eigenschaften. Ferner haben sie keinen definierten Schmelzpunkt; mit zunehmender Temperatur verringert sich ihre Viskosität (Erweichung). Der Übergang vom festen in den weichen Zustand ist durch die Transformationstemperatur T_g , auch Erweichungstemperatur oder Glastemperatur genannt, charakterisiert.

Die physikalischen Eigenschaften von Glaswerkstoffen sind in hohem Maße durch die Zusammensetzung beeinflussbar, woraus eine große Variationsbreite von Glassorten resultiert. Tabelle 2.8 gibt eine Übersicht über wichtige Glassorten. Der Hauptbestandteil von Gläsern bildet SiO_2 , das ähnlich zu Abbildung 2.1 ein tetradrisches Netzwerk in der Nahordnung bildet (Glasbilder). Natron-Kalkglas wird als Standardflachglas für Fenster eingesetzt und spielt in der Mikrosystemtechnik eine untergeordnete Rolle und dient nur zum Vergleich.

Tabelle 2.8: Chemische Zusammensetzung und wichtige Eigenschaften von Glassubstraten

Glastyp	Einheit	Quarzglas	Natron-kalkglas	Dünnglas (D263), Alkali-Zink-Boro-Silikatglas	Alkalifreies Dünnglas (AF45)	Low-Alkali-Borosilikatglas (Pyrex [®] , Borofloat [®])	Li-Al-Silikatglas (Foturan [®] , in Klammern keramische Form)
SiO ₂ -Gehalt	%	100	68	64,1	49,6	81	75-85
Al ₂ O ₃ -Gehalt	%	-	3	4,2	11,4	2	3-6
B ₂ O ₃ -Gehalt	%	-	2	8,4	14,2	13	
N ₂ O-Gehalt	%	-	16	6,4	-	4	1-2
K ₂ O-Gehalt	%	-	≈ 1	6,9	-	1,15	3-6
Li ₂ O-Gehalt	%	-	-	-	-	-	7-11
Sonstiges		-	≈ 10 % MgO, BaO	5,9 % ZnO 4 % TiO ₂ 0,1 % Sb ₂ O ₃	24 % BaO 0,9 % As ₂ O ₃	-	≈ 1 % Ag ₂ O ≈ 0,3 % Sb ₂ O ₃ ≈ 0,02 % CeO ₂
Dichte	g/cm ³	2,2	2,47	2,51	2,72	2,23	2,37 (2,41)
Elastizitätsmodul	GPa	7,4	70	72,9	66	63	78 (88)
Erweichungstemperatur	°C	1400	696	736	883	820	450 (750)
Therm. Ausdehnungskoeffizient	10 ⁻⁶ /K	0,58	9,2	7,2	4,5	3,3	8,6 (10,5)
Wärmeleitfähigkeit	W/mK	1,4	> 0,8	-	-	1,15	1,35 (2,37)
Spez. elektr. Widerstand	Ω cm	> 10 ¹⁶	> 10 ⁵	> 10 ⁸	> 10 ¹³	> 10 ⁷	> 10 ¹² (> 10 ¹⁶)
Dielektrizitätskonstante (1 MHz, 20 °C)		3,8	6,5	6,7	6,2	4,6	6,5 (5,7)

Glassubstrate finden in verschiedenen Qualitäten, Zusammensetzungen und Abmessungen in der Mikrosystemtechnik verschiedene Anwendungen (Tabelle 2.9). Borosilikatgläser gehören zu den hochwertigen Gläsern mit SiO_2 und B_2O_3 (Boroxid) als Glasbildner, die sich durch hohe optische Transparenz, hohe chemische Resistenz und niedrige Ausdehnungskoeffizienten auszeichnen. Für den Aufbau von mikrotechnischen Systemen wird oft

ein Verbund von Silizium- mit Glaswafern hergestellt, wobei die mechanischen Bauteile aus dem Silizium herausgeätzt werden und das Glassubstrat isolierende Funktionen übernimmt (z.B. Druck- und Beschleunigungssensor). Für die Herstellung des Verbundes werden Glassubstrate benötigt, die in ihrer thermischen Ausdehnung dem Silizium mit $\alpha = 2,33 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ angepasst sind. Seit etwa 1990 werden von der Glasindustrie Glaswafer nach SEMI-Standard aus Low-Alkali-Borosilikatglas mit folgenden Handelsnamen angeboten:

- Pyrex 7740 (Corning)
- Borofloat (Schott DESAG Deutsche Spezialglas)

Tabelle 2.9: Verwendung, Anforderungen und Formen von Gläsern in der Mikrosystemtechnik [Gerlach]

Anwendungsfall	Anforderungen	Glassorte	Form Abmessungen
Masken für die Photolithografie (<i>Mask Blanks</i>)	Transparenz im UV-Licht	Quarzglas	quadratisch größer als der zu strukturierende Wafer
Glaswafer zum Bonden auf Siliziumwafern	thermischer Ausdehnungskoeffizient angepasst an den Wert von Silizium	Borosilikatglas (z. B. Borofloat, Pyrex, Corning 7740) ¹	rund Wafergröße nach SEMI-Standard
Substrate für die Dünnschichttechnik	hoher elektrischer Widerstand, geringer $\tan \delta$, thermische Belastbarkeit, geringe Dielektrizitätskonstante	alkaliarmes Glas (DIN 41850), Quarzglas	rechteckig Dicken: 0,5; 0,8; 1,2 mm Kantenlängen: 25,4; 50,8; 76,2 und 101,6 mm
Formkörper	Photostrukturierbarkeit	Lithium-Aluminium-Silikatglas z. B. Foturan ¹	rund Waferdurchmesser: 100; 125 und 150 mm; Dicke: 1 mm

¹ Handelsbezeichnungen

Glaswafer mit polierten Oberflächen können bereits bei der Herstellung mit Löchern durch Ultraschallbohren versehen werden, so dass ein höherer Gestaltungsspielraum für Mikrosysteme vorliegt.

Eine weitere interessante Gruppe bilden die photostrukturierbaren Gläser, z.B. FOTURAN (Schott). Durch UV-Belichtung ändert sich der Bindungszustand von Keimbildnern. Nach einer Wärmebehandlung wandeln sich die belichteten Bereiche in Glaskeramik um, die in Flusssäure im Verhältnis 20 : 1 schneller ätzbar ist als das im Glaszustand verbliebene Material in den nicht belichteten Bereichen. Auf diese Weise lassen sich beliebig geformte Löcher und Gräben mit nahezu senkrechten Flanken herstellen.

2.1.3 Keramische Werkstoffe

Als Keramik bezeichnet man anorganische nichtmetallische Werkstoffe, die eine polykristalline Struktur aufweisen. Keramik entsteht durch Formen (z. B. Pressen) einer dickflüssigen oder knetbaren Rohmasse aus Pulver und Bindemittel und der anschließenden Verfestigung unter hohen Temperaturen (meistens über 800 °C). Dabei backen die nach der Formgebung mechanisch getrennten Pulverteilchen zusammen, bis ein nahezu porenfreier Festkörper entsteht. Dieser Vorgang wird als Sintern bezeichnet. Tabelle 2.10 zeigt eine Übersicht verschiedener Keramikwerkstoffe für Substrate und Gehäuse.

Tabelle 2.10: Eigenschaften von Keramiken für Substrate und Gehäuse [Gerlach]

Eigenschaft	Einheit	Al ₂ O ₃ (96 %)	Al ₂ O ₃ (99,5 %)	AlN	BeO (99,5 %)	BN	SiC
rel. Dielektrizitätskonstante		9...10	9,8	10	6,9	4,1	15...45
dielektr. Verlustfaktor (1MHz)	10 ⁻⁴	1	3	5	2	45	500
Durchschlagsfeldstärke	kV/mm	10...28	9...33	10			0,07
elektr. Durchgangswiderstand	Ω cm	10 ¹² ...10 ¹⁴	10 ¹⁴	4 · 10 ¹¹	10 ¹⁵	10 ¹¹	10 ¹³
Wärmeleitfähigkeit	W/mK	21...24	35	110...170	250	25	90...270
spezifische Wärme	J/kg K	795	795	738			
linearer Wärmeausdehnungskoeffizient	10 ⁻⁶ /K	6,8...8	8	3,8	7,5	≈ 0	3,7
Elastizitätsmodul	GPa	340	370	300...310	≈ 300	43	380
Biegefestigkeit	MPa	500	380	270...360	220	53	
max. Einsatztemperatur	°C	1700	1750	> 1000		> 1000	

Substrate und Bauteile aus Keramik werden in der Mikrosystemtechnik dann eingesetzt, wenn eine hohe Temperaturbeständigkeit, eine geringe Wärmeausdehnung, eine gute elektrische Isolation und eine hohe mechanische Härte erforderlich sind. Ferner sind die Herstellungskosten für Keramiksubstrate etwa um den Faktor 10 günstiger als von einkristallinem Silizium. Die Anwendungen und Einsatzgebiete der verschiedenen Keramikwerkstoffe bestehen in:

- Al₂O₃ (Aluminiumoxid):
Standardmaterial (am meisten verbreitet), hybrid integrierte Dickschichtschaltungen
- AlN (Aluminiumnitrid):
Substrate für IC's mit hoher Verlustleistung wegen geringer thermischer Ausdehnung (gute Anpassung an Si) und hoher Wärmeleitung
- BeO (Berylliumoxid):
Substrate mit extrem hoher thermischer Leitfähigkeit

Eine besondere Rolle spielen piezoelektrische Keramiken auf der Basis von Bleizirkonat-Bleititanat (PZT), die aber als Funktionswerkstoff zu betrachten sind.

Keramiksubstrate werden in der Regel rechteckig oder quadratisch mit den nach DIN 41850 empfohlenen Vorzugsabmessungen hergestellt:

- Länge / Breite [mm]: 25,4 / 50,8 / 76,7 / 101,6 (Zollmaße)
- Dicken [mm]: 0,25 / 0,38 / 0,51 / 0,63 / 1,00 / 1,27

2.1.4 Polymere

Polymere Werkstoffe werden in der Mikrosystemtechnik zur Herstellung von Formteilen, für Umhüllungen und Gehäuse sowie als Kleber eingesetzt. Polymere bzw. Kunststoffe bestehen aus fadenförmigen Makromolekülen und können hinsichtlich ihrer Struktur in Thermoplasten, Duroplasten und Elastomeren unterschieden werden.

- **Thermoplaste** bestehen aus nicht vernetzten Kettenmolekülen und sind nahezu beliebig oft aufschmelzbar. Formteile werden durch Spritzgießen, Heißprägen oder Pressen hergestellt.
- **Duroplaste** bestehen aus vernetzten Kettenmolekülen, wobei die Vernetzung bei der Reaktion zur Umformung der Monomere in Makromoleküle erfolgt. Somit sind Duroplaste nicht schmelzbar und relativ spröde. Sie können nur einmalig in eine Form gebracht werden.
- **Elastomere** weisen eine lose Vernetzung auf und sind dauerelastisch. Ihre Formgebung ist wie bei den Duroplasten an die Makromolekülreaktion gekoppelt.

In Tabelle 2.11 sind einige Thermoplasten zur Herstellung von Formteilen zusammengestellt, deren Eigenschaften sich auf den reinen Polymerwerkstoff beziehen. Zur Verbesserung der physikalischen Eigenschaften werden Füllstoffe (pulverförmige Mineralien, Glasfaserbruchstücke, Ruß, etc.) bis zu Füllgraden von 30...50 % beigemischt. Beispielsweise lässt sich durch Glasfasern der Elastizitätsmodul um den Faktor 3...5 erhöhen und gleichzeitig der thermische Ausdehnungskoeffizient um den Faktor 2...3 verringern.

Verglichen mit anorganischen Konstruktionswerkstoffen sind polymere Mikrostrukturen hinsichtlich Festigkeit und thermischer Belastbarkeit unterlegen. Andererseits ist aber die vielfache Replikation durch Spritzgießen oder Heißprägen aus einer einmal erzeugten Mutterstruktur (dem Formeinsatz) vorteilhaft.

Duroplasten und Elastomere finden ihren Einsatz in Gehäusen und Umhüllungen von mikrotechnischen Komponenten. In der Mikroelektronik bildet das Umspritzen von kontaktierten Silizium-Chips mit Duroplasten auf Epoxidharzbasis ein etabliertes vollautomatisiertes Fertigungsverfahren. Zur Chipmontage werden Epoxidharzkleber eingesetzt, die zur besseren Wärmeleitung bzw. zur elektrischen Kontaktierung mit Metallpartikeln gefüllt sind. Ferner wird bei Leistungsmodulen die Wärmeableitung innerhalb des Gehäuses mit Hilfe dauerelastischer Elastomerfüllungen gewährleistet. Die physikalischen Kennwerte gebräuchlicher Polymerwerkstoffe für die Gehäusetechnik sind in Tabelle 2.12 zusammengestellt.

Tabelle 2.11: Polymere Werkstoffe in der Mikrosystemtechnik und deren Eigenschaften

Eigenschaft	Einheit	Polyimid	PMMA	PVDF	PTFE	ABS	PBT	PUR	LCP	PEEK
Dichte	g/cm ³	1,42	1,18		2...2,3	1,12	1,3	1,1...1,3	1,4	1,26...1,32
Elastizitätsmodul	GPa	3,0	3,3	2,6	0,3...0,6	2,5...3	2,5...2,8	0,4...2	8...15	
Wärmeleitfähigkeit	W/mK	0,4...0,5	0,19	0,19	0,24	0,19		0,35	0,2...0,35	0,25
spezifische Wärme	J/kg K		1500	960	1040	1420		1880		
lin. Wärmeausdehn. koef.	10 ⁻⁶ /K	35...100	80	106	100	85	130...160	170...200	40...75	47
Glasübergangstemperatur	°C		106	177						
Spez. elektr. Widerstand	Ω cm	10 ¹⁸	10 ¹⁵	10 ¹⁸	10 ¹⁸	10 ¹³	10 ¹⁵ ...10 ¹⁶	10 ¹⁸	10 ¹⁶	> 10 ¹⁶
rel. Dielektrizitätszahl (1 MHz)		3,4	2,9	11	2,1	2,9...4,1		3,4		
tan δ		0,005	2		0,01	1...8		4,7		
Brechzahl			1,49							

PMMA	Polymethylmethacrylat	PVDF	Polyvinylidenfluorid
PTFE	Polytetrafluorethylen (Teflon)	ABS	Polyacrylnitrilbutadienstyrol
PBT	Polybutylenterephthalat	PUR	Polyurethan
LCP	Liquid Crystal Polymer	PEEK	Polyetheretherketon

Tabelle 2.12: Eigenschaften von Kunststoffen für Gehäuse, Umhüllungen und Kleber [Gerlach]

Werkstoff	Verarbeitungstemperaturbereich [°C]	Zug-(Scher-)festigkeit [MPa]	spezifischer el. Widerstand [Ω cm]	Durchbruchfeldstärke [kV/mm]	Dielektrizitätskonstante (1 MHz)	Dielektr. Verlustfaktor (1 MHz)	linearer Wärmeausdehnungskoeff. [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
Epoxidharz-Basis	20...170	7...75	3 · 10 ¹⁵	19 · 10 ⁵	≈ 4	90 · 10 ⁻⁴	20...100	0,65
Epoxidharz + Ag ¹	50...150	6...15	2 · 10 ⁻⁴				≈ 30	0,8...3,7
Silikonharz-Basis	150	1...7	10 ¹⁴	20 · 10 ⁵	≈ 3,5	25 · 10 ⁻⁴	20...240	0,4
Silikonharz + Ag ¹	50...150	1,3	10 ⁻⁴				95	4,2
Polyimid	20	55...70	10 ¹⁸		3,4	50 · 10 ⁻⁴	35...70	1,3
Silikonkautschuk	20		10 ¹⁴ ...10 ¹⁵	23 · 10 ⁵	2,8	20 · 10 ⁻⁴	300	0,2

¹ mit Silber gefüllt

2.2 Funktionswerkstoffe

Funktionswerkstoffe besitzen physikalische Eigenschaften, die Wandlerfunktionen ausüben. Dabei wird eine Einwirkung auf den Werkstoff in einen Effekt umgewandelt. Haben Einwirkung und Effekt Signalcharakter, dann übt der Werkstoff eine Sensorfunktion aus. Bestehen Einwirkung und Effekt aus Energiebeträgen, handelt es sich um eine Aktorfunktion mit einer Energiewandlung von zugeführter Energie in geleistete Arbeit. Signale und Energien können verschiedene physikalische Erscheinungsformen wie

- elektrisch
- magnetisch
- mechanisch
- thermisch
- optisch
- chemisch

aufweisen. In der Regel erfolgt bei einer Sensorfunktion eine Wandlung von nichtelektrischen Größen in elektrische und bei Aktoren liefert die zugeführte elektrische Energie eine nichtelektrische Wirkung. Die Vielzahl der Wandlungseffekte von Funktionswerkstoffen lässt sich nach Tabelle 2.13 in einige hier näher behandelte Klassen gliedern.

Tabelle 2.13: Klassen von Wandlungseffekten bei Funktionswerkstoffen

Klasse	Wandlungseffekt
mechanisch	elastische Verformung
mechanisch-elektrisch	piezoelektrischer Effekt piezoresistiver Effekt magnetostriktiver Effekt
thermisch-mechanisch	thermische Ausdehnung Bimetalleffekt Formgedächtnis-Effekt
thermisch-elektrisch	temperaturabhängiger elektrischer Widerstand elektrische Wärmeerzeugung thermoelektrische Effekte (Seebeck-Effekt, Peltier-Effekt)

2.2.1 Mechanische Eigenschaften

Die meisten Werkstoffe zeigen in einem begrenzten Dehnungs- und Stauchungsbereich ein linear elastisches Verhalten (Abbildung 2.6), das durch zwei Merkmale gekennzeichnet ist:

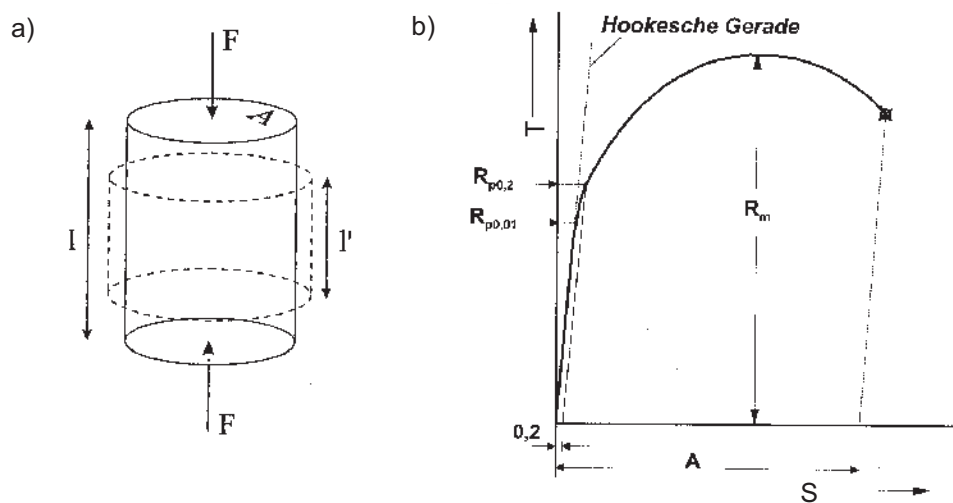


Abbildung 2.6: a) Elastische Verformung (Stauchung) eines Werkstoffs
b) Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit Übergang vom elastischen in den plastischen Bereich

- Es herrscht ein linearer Zusammenhang zwischen Werkstoffdehnung S und der mechanischen Spannung T
- Nach Ende der Belastung kehrt der Werkstoff vollständig in den Ausgangszustand zurück

Wird eine werkstoffspezifische Grenze der Spannung T überschritten, weicht die Verformung (Dehnung bzw. Stauchung) vom linearen Zusammenhang ab und geht in eine plastische Verformung über (Abbildung 2.6 rechts, z.B. Metalle, Kunststoffe) oder führt bei spröden Werkstoffen zum Bruch. Der Zusammenhang zwischen der relativen Längenänderung $S = (L - L')/L = \Delta L/L$ und der mechanischen Spannung $T = F/A$ mit der Belastungsfläche A wird durch das Hookesche Gesetz beschrieben:

$$\boxed{T = E S} \quad (2.3)$$

Hierbei bedeutet E der Elastizitätsmodul oder auch Young's Modulus mit der Einheit $[\text{Pa} = \text{N/m}^2]$.

Die skalare Form des Hookeschen Gesetzes (Gleichung 2.3) gilt nur für isotrope Werkstoffe. In einem Kristall sind die mechanischen Werkstoffkennwerte in der Regel richtungsabhängig und werden mit Hilfe der Tensorrechnung beschrieben. Eine beliebige mechanische Spannung T in einem kristallinen Körper lässt sich nach Abbildung 2.7 in neun Komponenten zerlegen. Die Achsen des Koordinatensystems wählt man zweckmäßigerweise in Richtung der Achsen der Einheitszelle des Kristalls.

Jede mechanische Belastung kann in die unterschiedlichen Komponenten T_{ij} zerlegt werden, wobei der Index i die Richtung der Belastung und der Index j die Belastungsfläche

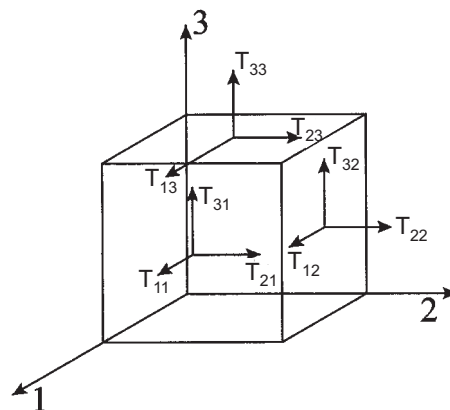


Abbildung 2.7: Bezeichnung der Spannungszustände am Beispiel eines Werkstoffwürfels
[nach Mescheder]

angibt. T_{ij} bildet also eine 3×3 -Matrix und somit einen Tensor 2. Stufe. Die Hauptdiagonalelemente mit $i = j$ bezeichnen die Normalspannungen (Belastungsrichtung steht senkrecht zur Belastungsfläche), die anderen Komponenten mit $i \neq j$ kennzeichnen Scherspannungen. Eine analoge Betrachtung gilt für den Tensor der mechanischen Verformung S_{ij} . In Tensorschreibweise gilt für das Hookesche Gesetz:

$$T_{ij} = \sum_{k,l=1}^3 c_{ij,kl} S_{kl} \quad (2.4)$$

$$S_{ij} = \sum_{k,l=1}^3 s_{ij,kl} T_{kl} \quad (2.5)$$

Die Matrizen von T_{ij} und S_{ij} werden über Tensoren 4. Stufe der elastischen Konstanten $c_{ij,kl}$ (compliance) und der elastischen Koeffizienten $s_{ij,kl}$ verknüpft.

Unter Ausnutzung von Symmetrien mit

$$\begin{aligned} T_{ij} &= T_{ji} \\ S_{ij} &= S_{ji} \end{aligned} \quad (2.6)$$

lassen sich die 3×3 -Matrizen auf Vektoren mit nur noch sechs unabhängigen Komponenten nach folgender Vorschrift konzentrieren:

Indexpaar ij oder kl	11	22	33	32	13	21
				23	31	12
Einfachindex λ oder μ	1	2	3	4	5	6

Somit reduzieren sich die Tensoren 4. Stufe $c_{ij,kl}$ und $s_{ij,kl}$ auf 6×6 -Matrizen $c_{\lambda\mu}$ bzw. $s_{\lambda\mu}$ und die Gleichungen 2.4 und 2.5 vereinfachen sich zu:

$$T_\lambda = \sum_{\mu=1}^6 c_{\lambda\mu} S_\mu \quad (2.7)$$

$$S_\lambda = \sum_{\mu=1}^6 s_{\lambda\mu} T_\mu \quad (2.8)$$

In Gleichung 2.4 und 2.5 würden die Scherspannungskomponenten T_{ij} mit $i \neq j$ bei der Summation doppelte Beiträge liefern, die bei der konzentrierten Schreibweise nach Gleichung 2.7 und 2.8 nicht berücksichtigt werden würden. Dies wird durch die Definition des Verformungsvektors ξ_λ erfasst:

$$S_\lambda = \begin{cases} S_{ij} & \text{mit } i = j \\ 2 S_{ij} & \text{mit } i \neq j \end{cases} \quad (2.9)$$

mit $S_4 = 2 S_{23}$, $S_5 = 2 S_{13}$ und $S_6 = 2 S_{12}$.

Betrachten wir einen Verformungskörper nach Abbildung 2.7, der in Richtung 1 von einer Zugspannung T_1 belastet wird, ergeben sich die Verformungen in den drei Koordinatenrichtungen:

$$\begin{aligned} S_1 &= s_{11} T_1 \\ S_2 &= s_{12} T_1 \\ S_3 &= s_{13} T_1 \end{aligned} \quad (2.10)$$

In diesem Fall würde ein elastischer Körper sich in Richtung 1 verlängern und in den Richtungen 2 und 3 verjüngen. Das Verhältnis von relativer Quer- zu relativer Längsdehnung S_2/S_1 bzw. S_3/S_1 wird als Poisson'sche Querkontraktionszahl ν bezeichnet:

$$\nu = -\frac{s_{12}}{s_{11}} \quad (2.11)$$

Mechanische Festigkeit von Silizium

In kubischen Kristallen gelten auf Grund der Austauschbarkeit der drei Koordinatenachsen, die die Einheitszelle aufspannen, für die Matrizen der elastischen Konstanten c_{ij} folgende Vereinfachungen:

$$\begin{aligned} c_{11} &= c_{22} = c_{33} \\ c_{12} &= c_{21} = c_{13} = c_{31} = c_{23} = c_{32} \\ c_{44} &= c_{55} = c_{66} \end{aligned}$$

$$c_{ij} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{12} & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

Die gleichen Vereinfachungen gelten auch für die elastischen Koeffizienten s_{ij} . Somit werden bei kubischen Kristallen die mechanischen Eigenschaften nur durch drei unabhängige Konstanten beschrieben. Für Silizium sind die Werte in Tabelle 2.14 zusammengestellt.

Tabelle 2.14: Elastische Konstanten und Koeffizienten von einkristallinem Silizium

c_{ij} [GPa]		s_{ij} [10^{-12} Pa $^{-1}$]	
c_{11}	165,7	s_{11}	7,68
c_{12}	63,9	s_{12}	-2,14
c_{44}	79,6	s_{44}	12,56

Für Belastungen in Richtung der Koordinatenachsen der Einheitszelle können der Elastizitätsmodul E nach Gleichung (2.3) und die Querkontraktionszahl ν mit Hilfe der elastischen Konstanten und Koeffizienten definiert werden:

$$\frac{1}{E_{<100>}} = s_{11} = \frac{c_{11} + c_{12}}{(c_{11} - c_{12})(c_{11} + 2c_{12})} \quad (2.13)$$

$$\nu_{<100>} = -\frac{s_{12}}{s_{11}} = \frac{c_{12}}{c_{11} + c_{12}} \quad (2.14)$$

Mit Hilfe von Koordinatentransformationen [6] kann der Elastizitätsmodul für beliebige Kristallrichtungen $< h k l >$ berechnet werden:

$$\frac{1}{E_{<hkl>}} = s_{11} - s \frac{h^2 k^2 - k^2 l^2 + h^2 l^2}{(h^2 + k^2 + l^2)^2} \quad (2.15)$$

$$\text{mit } s = 2s_{11} - 2s_{12} - s_{44}$$

Für Silizium gilt: $s = 7,08 \cdot 10^{-12}$ Pa $^{-1}$. Die Richtungsabhängigkeit des Elastizitätsmoduls und der Querkontraktionszahl für Silizium sind bezogen auf die (100)-Ebene in Abbildung 2.8 veranschaulicht.

Gemäß Tabelle 2.4 sind die (110)-Ebenen gegenüber den (100)-Ebenen um 45° bzw. 90° geneigt, so dass in Abbildung 2.8 in der 45°-Richtung die größten Abweichungen gegenüber den Werten in $<100>$ -Richtung auftreten. Die Zahlenwerte von E und ν sind in Tabelle 2.15 für verschiedene Kristallrichtungen bei Silizium zusammengefasst. In der (111)-Ebene sind die Werte für E und ν richtungsunabhängig.

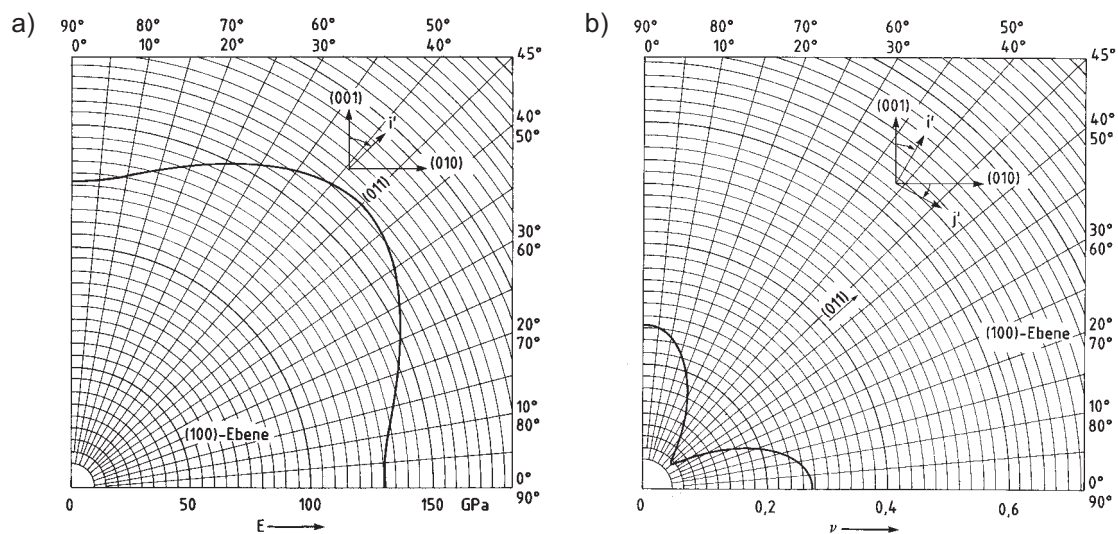


Abbildung 2.8: Richtungsabhängigkeit des E-Moduls (a) und der Querkontraktionszahl (b) bezogen auf die (100)-Ebene bei Silizium [Heuberger]

Tabelle 2.15: Berechnete Werte für E und ν für verschiedene Kristallrichtungen von Silizium

Kristall- ebene	$E_{\max}$ [GPa]	$\nu_{\min}$	Kristall- richtung	$E_{\min}$ [GPa]	$\nu_{\max}$	Kristall- richtung
(100)	169	0,064	$\langle 110 \rangle$	130	0,279	$\langle 100 \rangle$
(110)	188	0,143	$\langle 111 \rangle$	130	0,324	$\langle 100 \rangle$
(111)	169	0,262	alle	-	-	-

2.2.2 Mechanisch-elektrische Wandlung

Mechanisch-elektrische Wandlungseffekte liegen vor, wenn infolge einer Verformung oder einer Änderung des mechanischen Spannungszustands sich die elektrischen Eigenschaften des Funktionswerkstoffs verändern bzw. ein elektrisches Signal hervorgerufen wird.

Piezoelektrischer Effekt

Piezoelektrische Materialien zeigen bei einer elastischen Deformation infolge einer mechanischen Spannung T_j einen zusätzlichen Beitrag zur dielektrischen Verschiebung D_i , der auch ohne äußeres elektrisches Feld E_j auftritt. Diese Werkstoffe sind ausnahmslos elektrische Isolatoren. Analog zur mechanischen Deformation nach Gleichung 2.8 lässt sich die dielektrische Verschiebung D_i in der komprimierten Tensorschreibweise formulieren:

$$D_i = \sum_{j=1}^3 S_{ij} E_j + \sum_{j=1}^6 d_{ij} T_j \quad (2.16)$$

mit den piezoelektrischen Koeffizienten d_{ij} in $[\text{As/N} = \text{m/V}]$. Der piezoelektrische Effekt tritt nur in Kristallen ohne Inversionszentrum bzw. mit einer polaren Achse auf, anderenfalls sind alle Koeffizienten $d_{ij} = 0$. Wird ein piezoelektrischer Kristall entlang seiner polaren Achse (in der Regel die Koordinatenachse 3 der Einheitszelle) mit einer mechanischen Spannung T_3 belastet, so entsteht eine dielektrische Verschiebung

$$D_3 = d_{33} T_3 \quad (2.17)$$

die an Elektroden an den Enden des Kristalls in Form einer Spannung detektiert werden kann.

Umgekehrt kann durch Anlegen einer Spannung an den Elektroden des Kristalls eine elastische Verformung S_3 entlang der polaren Achse erzeugt werden. Analog zu Gleichung 2.16 gilt für die Verformung in Tensorschreibweise allgemein:

$$S_i = \sum_{j=1}^6 s_{ij} T_j + \sum_{j=1}^3 d_{ij} E_j \quad (2.18)$$

wobei (d_{ij}) aus einer 6×3 -Matrix besteht. Dieser Vorgang wird auch als reziproker piezoelektrischer Effekt bezeichnet. Die Wechselwirkung zwischen den mechanischen und den elektrischen Größen zeigt Abbildung 2.9, wobei je nach dem maßgeblichen piezoelektrischen Koeffizienten zwischen Längs-, Quer- und Schereffekt unterschieden wird.

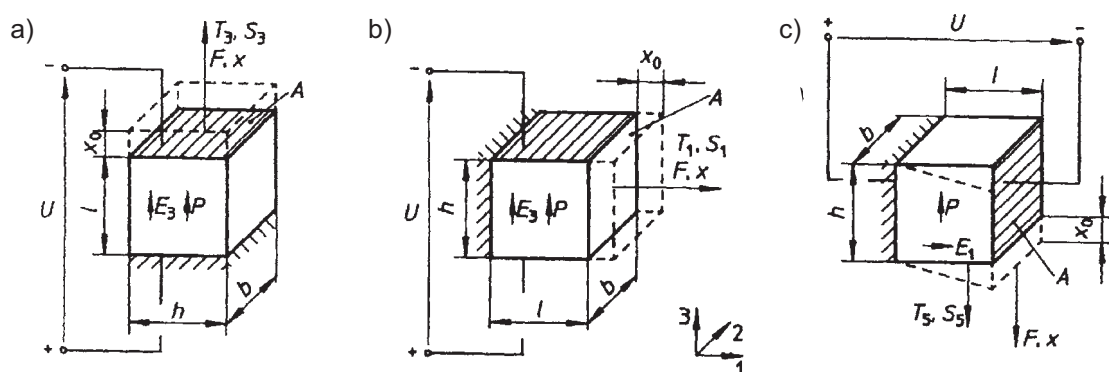


Abbildung 2.9: Piezoelektrische richtungsabhängige Verformung
(a) Längseffekt, (b) Quereffekt, (c) Schereffekt

Wichtige piezoelektrische Materialien sind Quarz, LiNbO_3 , ZnO , BaTiO_3 , PVDF (Polyvinylidenfluorid) und $\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ (genannt PZT), deren piezoelektrische Koeffizienten in

Tabelle 2.16 zusammengestellt sind. Quarz wird vorwiegend für Schwingquarze und Resonanzstrukturen eingesetzt und in Form von Wafern verarbeitet. Einkristalle aus LiNbO_3 (Lithiumniobat) werden als Substratmaterial für Filter und Sensoren auf der Basis von SAW (surface acoustic waves, akustischen Oberflächenwellen) genutzt.

Für piezoelektrische Schichtstrukturen wird meist ZnO (Zinkoxid) verwendet. Die Abscheidung von ZnO durch Sputtern (Kathodenzerstäuben) liefert ein polykristallines, texturiertes Gefüge, wobei der nutzbare Effekt durch die Schichtqualität bestimmt wird.

Bleizirkonat-Bleititanat (PZT) gehört wie LiNbO_3 zu den ferroelektrischen Werkstoffen und besitzt die höchsten piezoelektrischen Koeffizienten. Es wird als Keramik in beliebigen Anordnungen hergestellt, besitzt damit eine polykristalline Struktur und muss vor dem Einsatz elektrisch polarisiert werden (vgl. Kapitel 6). PZT wird vorwiegend für Aktoren in Formkörpern als Stapel, Bieger oder Röhrchen angewendet. Bei vielen piezoelektrischen Werkstoffen muss die Curie-Temperatur T_C beachtet werden, da nur unterhalb von T_C der piezoelektrische Effekt voll ausnutzbar ist.

Tabelle 2.16: Piezoelektrische Werkstoffe

Werkstoff	d_{ij} [10^{-12} C/N]				T_C [°C]
Quarz	$d_{11} = 2,31$	$d_{14} = -0,727$			
GaAs	$d_{14} = -2,69$				
ZnO	$d_{15} = -8,3$		$d_{31} = -5$	$d_{33} = 12,4$	
LiNbO_3	$d_{15} = 69,2$	$d_{22} = 20,8$	$d_{31} = -0,85$	$d_{33} = 6,0$	1145
PZT	$d_{15} \approx 265 \dots 765$		$d_{31} \approx -60 \dots -270$	$d_{33} \approx 380 \dots 590$	$\approx 190 \dots 360$
PVDF	$d_{32} \approx 6 \dots 10$		$d_{31} \approx 6 \dots 10$	$d_{33} \approx 13 \dots 22$	$\approx 170 \dots 200$

Piezoresistiver Effekt

Als piezoresistiven Effekt bezeichnet man die Änderung des elektrischen Widerstands eines Leiters

$$R = \varrho \frac{l}{A} \quad (2.19)$$

mit dem spezifischen Widerstand ϱ , der Länge l und der Querschnittsfläche A , infolge seiner Deformation beim Einwirken äußerer Kräfte. Zwei verschiedene Ursachen bewirken den Effekt:

- Änderung der Geometrie (dominant bei Metallen)
- Änderung im Leitungsmechanismus (dominant in Halbleitern)

Enthält der elektrische Widerstand R eines Quaders mit der Länge l in seinem Volumen n Ladungsträger mit der Beweglichkeit μ , dann führt eine Verlängerung des Quaders um Δl zu der Widerstandsänderung ΔR :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \varrho}{\varrho} + (2\nu + 1) S_l = \left(-\frac{\Delta n}{n} - \frac{\Delta \mu}{\mu} \right) + (2\nu + 1) S_l = k S_l \quad (2.20)$$

mit der relativen Dehnung $S_l = \Delta l/l$ in Längsrichtung und der Querkontraktionszahl ν und dem Gage-Faktor k . In Metallen sind n und μ unabhängig von der Dehnung, so dass $k \approx 2$ wird und die Widerstandsänderungen klein sind. In Halbleiterwerkstoffen treten unter Dehnung wesentlich größere Änderungen der Leitfähigkeit $\Delta \varrho/\varrho$ durch Änderung der Bandstruktur auf, so dass der Gage-Faktor $k \gg 2$ werden kann. Die Anisotropie der einkristallinen Halbleiterwerkstoffe erfordert eine Darstellung in Tensorschreibweise, die im Kapitel 7 näher behandelt wird.

Magnetostriktiver Effekt

Als Magnetostriktion wird die relative Längenänderung $\Delta l/l$ infolge einer Änderung der magnetischen Polarisation bezeichnet, die nur in ferromagnetischen Werkstoffen auftritt.

In einem polykristallinen Material liegt im Ruhezustand zunächst eine Isotropie auf Grund der Gleichverteilung der Domänen mit unterschiedlichen Magnetisierungsrichtungen vor. Durch Anlegen eines äußeren magnetischen Erregerfeldes setzt eine Ausrichtung der Domänen ein, die schließlich zur Änderung der Länge parallel zur Feldstärkerichtung führt.

Die erreichbare Längenänderung wird in der Regel bei magnetischer Sättigung angegeben. In Tabelle 2.17 sind die Eigenschaften von gebräuchlichen Materialien aus Nickel- bzw. Eisenlegierungen zusammengestellt, wobei Terfenol D (TbDyFe) einen besonders hohen Effekt zeigt. Mit diesen Werkstoffen können hohe Kräfte bei kleinen Wegen erzeugt werden (ähnlich wie beim piezoelektrischen Effekt).

Tabelle 2.17: Eigenschaften magnetostriktiver Werkstoffe [Gerlach]

Werkstoff	$\Delta l_s/l$ [10^{-6}]	H_C [A/cm]	T_C [°C]
Nickel	−34	1,5	360
Permalloy (FeNi77+Zusätze)	9	0,01	≈ 400
Vacoflux 50 (FeCo49+Zusätze)	70	1,1	950
FeSm38	ca. −350		
FeTb46	ca. 250		
Tb _x Dy _{1-x} Fe _y (Terfenol D) mit $x = 0,27\dots 0,3$; $y = 1,90\dots 1,98$	ca. 1500		

2.2.3 Thermisch-mechanische Wandlung

Funktionswerkstoffe üben eine thermisch-mechanische Wandlung aus, wenn infolge einer Temperaturänderung ein mechanischer Effekt, in der Regel eine Verformung oder mechanische Spannung, hervorgerufen wird.

Thermische Ausdehnung

Eine Erwärmung eines Festkörpers um ΔT gegenüber seiner Umgebungstemperatur führt zu einer relativen Längenausdehnung

$$S = \frac{\Delta l}{l} = \alpha \Delta T \quad (2.21)$$

mit dem linearen Ausdehnungskoeffizienten α [$10^{-6}/\text{K}$]. Die Längenausdehnung ist nur innerhalb von definierten Temperaturbereichen linear und wird bei hohen Temperaturen ($> 200^\circ\text{C}$) in der Regel nichtlinear. Dieser Effekt wird bei thermomechanischen Mikroaktoren in Dünnschichtstrukturen angewendet.

Bimetalleffekt

Die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Materialien, die in Form eines Schichtstapels (Sandwichstruktur) fest verbunden sind, führen zu einer Verbiegung des Bimorphs bzw. Multimorphs, wenn die Temperatur des Gesamtsystems verändert wird. Der Effekt kann auch bei Werkstoffen genutzt werden, deren Ausdehnung nicht thermisch, sondern auch piezoelektrisch, magnetostriktiv, etc. erreicht wird. Der relative Unterschied der Dehnungen ergibt sich zu:

$$\Delta S = (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T \quad (2.22)$$

Besonders hohe Verbiegungen erreicht man, wenn dünne Schichten aus Materialien mit stark unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten verwendet werden, z. B.

- Polymere mit hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten $(3...140) \cdot 10^{-6}/\text{K}$
(aktive Komponente)
- Metalle mit niedrigen Ausdehnungskoeffizienten $(4...20) \cdot 10^{-6}/\text{K}$
(passive Komponente)

Die Höhe der Verbiegung bzw. die entwickelten Kräfte hängen stark von der Geometrie und den mechanischen Eigenschaften (Elastizitätsmodul) der verwendeten Materialien ab. Einige typische Werkstoff-Beispiele von Werkstoffen in Schichtstrukturen sind in Tabelle 2.18 zusammengestellt. Typische Anwendungen sind:

- Aktoren mit elektrisch betriebener integrierter Heizung
- elektrische Schutzschalter
- temperaturabhängige Fluidschalter
- mechanische Thermometer
- Temperaturschreiber

Tabelle 2.18: Lineare Wärmeausdehnungskoeffizienten von Werkstoffen für Bimorphstrukturen [Gerlach]

Schicht 1	$\alpha_1 [10^{-6}/\text{K}]$	Schicht 2	$\alpha_2 [10^{-6}/\text{K}]$	$\alpha_1 - \alpha_2 [10^{-6}/\text{K}]$
Al	23	Si	2,6	20,4
Au	14	Si	2,6	11,4
FeNi20Mn6	≈ 15	FeNi42	≈ 7	≈ 8
PVDF-PTE	140	PI	3	137

PVDF Polyvinylidenfluorid
PTE Polytrifluorethylen
PI Polyimid

Formgedächtnis-Effekt

Einige Metall-Legierungen weisen die Fähigkeit auf, bei Erwärmung ihre Form und ihre elastischen Eigenschaften zu ändern. Diese Formänderung von sog. Formgedächtnis-Legierungen, z. B. Ni-Ti-Legierungen (*Shape Memory Alloys SMA*) beruht darauf, dass bei Überschreiten einer Umwandlungstemperatur T_A sich die Gitterstruktur von Martensit zum Austenitzustand umwandelt:

- $T > T_A$ Austenit-Gitterstruktur
Metall hart und hochfest
- $T < T_A$ Martensit-Gitterstruktur
Metall weich und leicht formbar

Wird im kühlen Martensitzustand eine plastische Formänderung vorgenommen, verschwindet diese beim Erwärmen in den Austenitzustand, so dass sich das Bauteil an seine ursprüngliche Form „erinnert“. Bei erneuter Abkühlung zur Martensitphase bildet sich jedoch die deformierte Form nicht wieder aus. Es liegt also ein Einweg-Effekt vor.

Ein Zweiweg-Effekt mit zwei Formzuständen kann realisiert werden, wenn in der Martensitphase eine starke Deformation und eine Alterungsbehandlung (Bildung anisotroper

Ti₃N₄-Ausscheidungen) durchgeführt werden und damit die Form in der Martensitphase stabilisiert wird. Bei wiederholter Abkühlung kehrt das Bauteil in der Martensitphase näherungsweise in die deformierte Form zurück, allerdings ist der Betrag der Formänderung gegenüber dem Einweg-Effekt um den Faktor 2 bis 4 geringer. Die Formänderung beim Zweiweg-Effekt weist nach Abbildung 2.10 eine Hysterese auf. Einige Eigenschaften von Formgedächtnis-Legierungen sind in Tabelle 2.19 zusammengestellt.

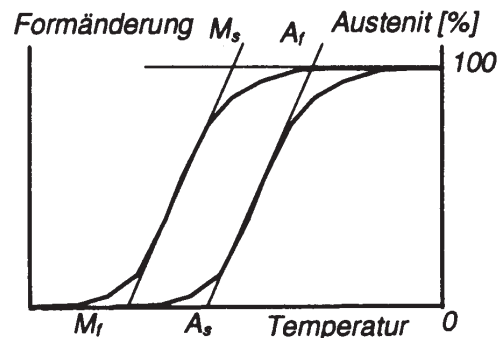


Abbildung 2.10: Temperatur-Weg-Kennlinie beim Formgedächtnis-Zweiwegeffekt;
Ms, Mf, As, Af; Start bzw. Ende der Martensit- bzw. Austenitbildung

Tabelle 2.19: Eigenschaften von Formgedächtnis-Legierungen

Legierung	ρ [$10^{-6} \Omega \text{ cm}$]	Max. Dehnung S [%]		T [°C]
		Einweg	Zweiweg	
Ni-Ti (50 %)	67...100	8	5	120
Cu-Zn-Al	8...12	4	1	120
Cu-Al-Ni	11...14	5	1,2	170

In Mikrosystemen finden Formgedächtnis-Legierungen in Form von dünnen Schichten, die durch Sputtern (Kathodenzerstäubung) aufgebracht werden, oder als dünne Folien bzw. Bleche, die z.B. durch Laserschneiden strukturiert werden, ihren Einsatz. Der elektrische Widerstand der Legierungen dient oft als direkte Heizung durch Stromfluss, um die jeweilige Struktur in den Austenitzustand zu führen. Meistens werden Formgedächtnis-Legierungen unter Nutzung des Einweg-Effekts in Aktoren eingesetzt, wobei nach der Abkühlung das Bauteil durch eine externe Feder in die andere geometrische Form gebracht wird.

2.2.4 Thermisch-elektrische Wandlung

Thermisch-elektrische Wandlungseffekte liegen vor, wenn infolge einer Temperaturänderung

sich die elektrischen Eigenschaften eines Funktionswerkstoffes verändern bzw. ein elektrisches Signal hervorgerufen wird.

Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands

Die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands kann für die genaue Temperaturmessung genutzt werden, wenn der Leiter aus einem Werkstoff mit möglichst hohem und definierten Temperaturkoeffizienten besteht. Der spezifische Widerstand von Metallen kann innerhalb eines begrenzten Temperaturbereichs durch einen linearen bzw. quadratischen Ansatz beschrieben werden:

$$\varrho(T) = \varrho_0 (1 + \alpha T + \beta T^2) \quad (2.23)$$

Zur Temperaturmessung ist erforderlich, dass der Widerstandswert ϱ_0 und die Temperaturkoeffizienten α und β mit hoher Reproduzierbarkeit hergestellt werden können und sich durch Alterung nicht verändern. Besonders geeignet sind reine Metalle, die einen ausreichend großen, positiven Temperaturkoeffizienten des Widerstands besitzen und im Temperaturmessbereich keine Phasenumwandlungen zeigen sowie thermodynamisch stabil sind (Tabelle 2.20). Das Edelmetall Platin besitzt zwar nicht den höchsten Temperaturkoeffizienten, erfüllt aber am besten die Stabilitätsanforderungen und ist in einem großen Temperaturbereich bis 1000 °C einsetzbar.

Tabelle 2.20: Temperaturkoeffizienten von Werkstoffen zur Temperaturmessung (PTC)

Werkstoff	α [$10^{-3}/\text{K}$]	β [$10^{-6}/\text{K}^2$]	Temperaturmessbereich [°C]
Platin	3,911	-0,58	-220...1000
Nickel	5,43	7,85	-60...200
Kupfer	4,33	≈ 0	0...200
Silber	4,1		20
Gold	3,98		20
Aluminium	4,3	≈ 0	-50...50
Wolfram	4,83		20

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Kaltleitern mit positiven Temperaturkoeffizienten (PTC), bei denen durch zunehmende Gitterschwingungen infolge der Erwärmung die Ladungsträgerbeweglichkeit eingeschränkt wird und damit der Widerstand ansteigt und Heißeleitern (Thermistor) mit negativen Temperaturkoeffizienten (NTC), bei denen bei zunehmender Temperatur die Ladungsträgerkonzentration und damit die Leitfähigkeit ansteigt. Typische Heißeleiter sind Oxidkeramiken und polykristalline Si- und Ge-Schichten. Oxidkeramische Thermistorwerkstoffe besitzen sehr hohe negative Temperaturkoeffizienten $\alpha = -20...50 \cdot 10^{-3}/\text{K}$.

Anstelle der klassischen Bauform von Temperaturmesswiderständen in Drahtform werden in der Mikrosystemtechnik dünne Schichten bevorzugt, die auf isolierenden Substraten abgeschieden und meistens mäanderförmig strukturiert werden.

Elektrische Wärmeerzeugung

Zur Wärmeerzeugung in thermomechanischen Aktoren unter Ausnutzung der thermischen Ausdehnung bzw. des Bimetalleffekts oder in fluidischen Systemen werden Heizleiter genutzt, die aus Dünnschicht-Widerstandsbahnen aus Metall bzw. hochdotierten oder polykristallinen Siliziumschichten bestehen. Die in einem Widerstand durch einen Strom I erzeugte Heizleistung beträgt

$$P_{\text{th}} = I^2 R = I^2 \frac{\varrho l}{A} \quad (2.24)$$

mit der Länge l und der Querschnittsfläche A . Bei der Vorgabe eines maximalen Heizstroms I kann die Heizleistung durch die Auswahl eines Widerstandsmaterials mit hohem spezifischen Widerstand ϱ gesteigert werden. Tabelle 2.21 gibt eine Übersicht einiger Metalle bzw. Metall-Legierungen. Grundsätzlich beziehen sich die Materialkenndaten auf Festkörper (*Bulk*). Bei dünnen Schichten (Dicke $< 1 \mu\text{m}$) hängt der spezifische Widerstand von der Schichtdicke ab und steigt meistens mit abnehmender Schichtdicke an.

Tabelle 2.21: Werkstoffe für Heizleiter in der Mikrosystemtechnik

Werkstoff	Spezifischer Widerstand ϱ [$10^{-6} \Omega \text{ cm}$]
Pt	10
Ni	7
Ti	47,5
Ni-Cr	100
Polykristalline Si-Schicht	$10^{-3} \dots 10^3$

Thermoelektrische Effekte

Befindet sich die Kontaktstelle von zwei verschiedenen Leitermaterialien A und B auf einer anderen Temperatur als ihre nicht miteinander verbundenen Enden, kann dort eine elektrische Spannung abgegriffen werden, die von der Temperaturdifferenz ΔT und den beiden Seebeck-Koeffizienten S_A und S_B abhängt (Seebeck-Effekt):

$$U = (S_A - S_B) \Delta T \quad (2.25)$$

Diese Anordnung bildet nach Abbildung 2.11 ein Thermoelement und wird in der klassischen Temperaturmesstechnik angewendet, wobei metallische Thermoelemente dominieren (PtRh-Pt, Ni-CrNi, Fe-Konstantan).

Die Höhe der Thermospannung und damit die Effizienz des Effekts wird durch die Differenz der für beide Materialien charakteristischen Seebeck-Koeffizienten $|S_A - S_B|$ bestimmt.

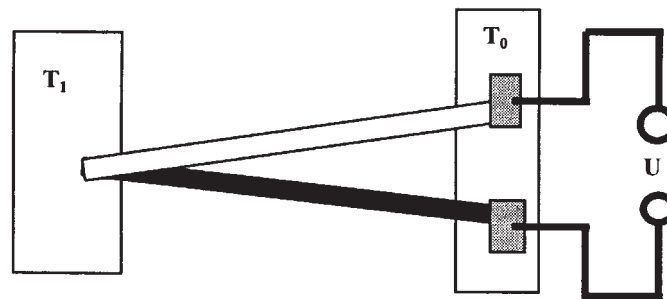


Abbildung 2.11: Aufbau und Funktion eines Dünnschicht-Thermoelements [Völklein]

Halbleitermaterialien weisen gegenüber Metallen wesentlich höhere Seebeck-Koeffizienten auf, die mit abnehmbarer Dotierung ansteigen und für p- und n-Leitungstypen positives bzw. negatives Vorzeichen besitzen. Bei einer Metall-Halbleiter-Kontaktstelle trägt das Metall nur wenig zur elektrischen Thermospannung bei und kann nach anderen Optimierungskriterien ausgewählt werden (z.B. reproduzierbare Herstellung in Dünnschichtstrukturen, Kosten etc.).

Mit Hilfe der mikrotechnischen Fertigung kann eine Vielzahl von Dünnschicht-Thermoelementen in Reihe geschaltet werden (Thermosäule, engl. *Thermopile*). Durch Bedecken der Kontaktstellen mit einer strahlungsabsorbierenden Schicht werden hochempfindliche Strahlungsdetektoren hergestellt. Leistungs-Thermoelemente liefern elektrische Energie durch Umwandlung von Wärme, die z.B. durch Verbrennung gewonnen wird oder anderweitig anfällt. Zur portablen elektrischen Energieversorgung gewinnen mikrostrukturierte Thermopiles zunehmend an Bedeutung, sog. „Power-MEMS“.

Die Umkehrung des Seebeck-Effektes wird zum Wärmetransport genutzt (Peltiereffekt). Fließt ein Gleichstrom I durch die Kontaktstelle eines Thermoelementes, die sich auf der Temperatur T befindet, wird die Wärmeleistung dQ/dt von der Kontaktstelle abgegeben oder aufgenommen (je nach Richtung des Stromes):

$$\frac{dQ}{dt} = (S_A - S_B) T I \quad (2.26)$$

Der Peltiereffekt wird zur thermoelektrischen Kühlung oder Temperaturstabilisierung (Peltier-Element) von empfindlichen elektronischen oder optoelektronischen Bauelementen eingesetzt (z.B. Temperaturstabilisierung von Laserdioden).

Die Optimierung der Differenz der Seebeck-Koeffizienten $|S_A - S_B|$ allein genügt nicht für die technischen Anwendungen. Entlang der Leiterbahnen nach Abbildung 2.11 wird je nach der Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK] der Materialien A und B Wärmeleistung transportiert und somit die Temperaturdifferenz $\Delta T = T_1 - T_0$ reduziert. Ferner entsteht beim Stromfluss durch die Leiter A und B nach Gleichung (2.24) eine Verlustleistung P_{th} , die dem gewünschten Wärmetransport entgegenwirkt. Somit sind die Materialpaarungen mit dem

thermoelektrischen Gütefaktor zu bewerten:

$$Z_{te} = \frac{|S_A - S_B|^2}{\rho \lambda} \quad (2.27)$$

Durch geeignete Auswahl der Leiterwerkstoffe bzw. des Substratmaterials oder durch geschickte geometrische Gestaltung der Thermoelemente muss die Wärmeleitfähigkeit λ minimiert werden, um einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen. Tabelle 2.22 zeigt die Seebeck-Koeffizienten gängiger Materialpaarungen.

Tabelle 2.22: Seebeck-Koeffizienten und thermoelektrische Gütefaktoren Z_{te} von Werkstoffpaarungen in Mikrosystemen [Gerlach]

Werkstoff A	Werkstoff B	$ S_A - S_B $ [mV/K]	Z_{te} [$10^{-6}/K$]
Al	p-Si (einkristallin)	≈ 700	27
Al	p-Si (polykristallin)	195	22
Al	n-Si (polykristallin)	110	22
p-Si (polykristallin)	n-Si (polykristallin)	190...320	18
p-Ge:H (polykristallin)	Metall	200...420	
p-Bi _{0,5} Sb _{1,5} Te ₃	n-Bi _{0,87} Sb _{0,13}	330	1357
ATO	Pt	38...74	
ITO	Pt	12...67	
PtRh 6	Pt	6,5	

ATO Antimon-Zinn-Oxid

ITO Indium-Zinn-Oxid

2.2.5 Magnetisch-elektrische Wandlung

Im Magnetfeld können sehr hohe Energiedichten erreicht werden, die zur Erzeugung von Kräften und größeren Stellwegen benötigt werden. Somit sind ferromagnetische Werkstoffe auch für Mikrosysteme von großer Bedeutung.

Ferromagnetismus

Der Zustand eines ferromagnetischen Werkstoffes wird durch die folgenden Kennwerte charakterisiert:

- relative Permeabilität μ_r
- Sättigungsmagnetisierung M_s bzw. Sättigungsinduktion B_s

- Remanenzinduktion B_R
- Koerzitivfeldstärke H_C
- Curie-Temperatur T_C

Die Magnetisierungs-Feldstärke-Kennlinie nach Abbildung 2.12a zeigt eine Hystere beim Ummagnetisieren. Mit steigender Temperatur sinkt die Sättigungsmagnetisierung (Abbildung 2.12b), bis bei Erreichen der Curie-Temperatur T_C die Magnetisierung verschwindet ($M_S = 0$), d.h. keine Ausrichtung der Domänen erfolgen kann. Die Kennwerte gängiger ferromagnetischer Werkstoffe sind in Tabelle 2.23 zusammengestellt.

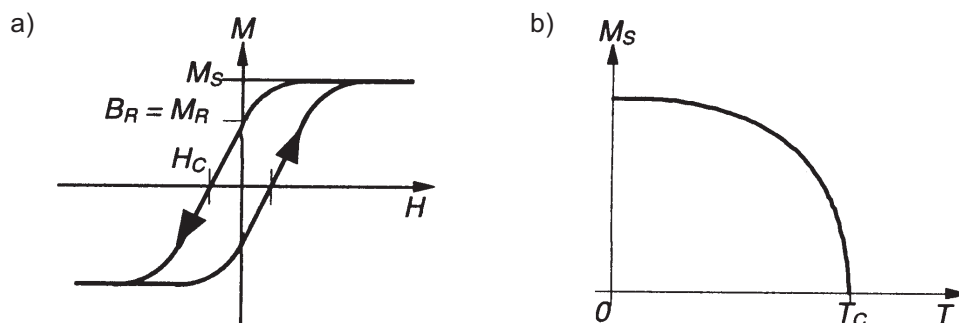


Abbildung 2.12: Kennlinien ferromagnetischer Werkstoffe [Gerlach]

- a) Hysterekurve mit Sättigungsmagnetisierung M_S , Remanenzinduktion B_R , Koerzitivfeldstärke H_C
b) Abhängigkeit der Sättigungsmagnetisierung von der Temperatur

Tabelle 2.23: Eigenschaften ferromagnetischer Werkstoffe

Werkstoff	μ_r	M_S [T]	B_R [T]	H_C [A/m]	T_C [°C]
Fe		2,15			770
Ni (galvanisch)	100	0,61		320...3200	360
Fe-Ni78 (galvanisch)	> 2000	0,7	≈ 0	< 80	310
Fe-Ta-N (gesputtert)	300...7500	1,6		46	
Fe-Al-Si (gesputtert)	1500	1,2		40	
SmCo5			0,85	$(1...2,5) \cdot 10^6$	717
NdFeB			1,1	$(0,6...1) \cdot 10^6$	≈ 300

Werkstoffe mit hohen Werten von B_R und H_C werden als hartmagnetisch bezeichnet und eignen sich als Permanentmagnete (z.B. NdFeB, SmCo5). Weichmagnetische Werkstoffe müssen dagegen niedrige Werte von B_R und H_C , dafür aber hohe Permeabilitäten μ_r aufweisen. Bei der Herstellung von Magnetsystemen in Dünnschichttechnik ist wie bei der

Leitfähigkeit von Leiterbahnen zu beachten, dass die Permeabilität und die Sättigungsmagnetisierung von abgeschiedenen Schichten niedriger als bei konventionell hergestellten Festkörpern sind.

Die Herstellung von magnetischen Bauteilen in Mikrosystemen kann durch folgende Verfahren realisiert werden:

- Montage miniaturisierter ferro- oder ferrimagnetischer Halbzeuge
- Siebdruck von ferro- oder ferrimagnetischen Pulvern in Pastenform
- Ganzflächiges Abscheiden (z. B. Sputtern) mit anschließender Strukturierung (Subtraktivtechnik)
- Galvanische Abscheidung ferromagnetischer Metalle in definierten Bereichen (Additivtechnik)

Kapitel 3

Grundlagen der Technologien

Für die Herstellung von mikrotechnischen Bauteilen, Komponenten und Systemen werden vorwiegend *Dünnschicht-Herstellungsverfahren* auf *planaren Substraten* eingesetzt, so dass eine Vielzahl von Einzelbauteilen auf einer Scheibe (auch Wafer genannt) gefertigt werden (Nutzen- oder Batchfertigung). Die genaue Strukturierung erfolgt mit Hilfe der Photolithographie. Durch Vereinzeln (Trennen) entstehen die einzelnen Bauteile, wobei mehrere Bauteile durch *Mikromontageverfahren* zu Komponenten zusammengefasst werden können.

Ausgehend von den Grundprozessen der Mikrotechnik werden die Prozessfolgen der Silizium-Mikromechanik, der LIGA-Technik (Lithographie, Abformung, Galvanik), der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) und der mechanischen Mikrofertigung vorgestellt. Abbildung 3.1 zeigt als repräsentatives Beispiel einen piezoresistiven Silizium-Drucksensor, der aus verschiedenen Schichten aufgebaut ist:

- Membranschicht (monokristallines Silizium)
- Piezoresistive Widerstände (dotiertes Silizium)
- Primäre Passivierung (SiO_2)
- Leiterbahn (Metall)
- Sekundäre Passivierung (SiO_2 oder Si_3N_4)

Bis auf die Membranschicht sind alle Funktionsschichten lateral (d. h. in der Ebene) in ihrer Form strukturiert. Somit setzt sich die mikrotechnische Scheibenfertigung aus Prozessmodulen zusammen, von denen jedes einzelne Modul alle Prozessschritte für eine strukturierte Ebene umfasst und aus folgenden drei Grundelementen besteht:

- Schichterzeugung
- Strukturierung durch Photolithographie
- Formgebung (Ätzen) der Schicht

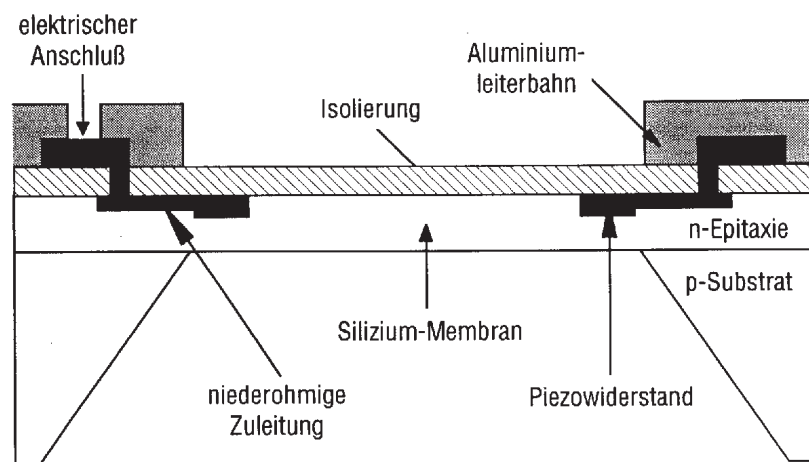


Abbildung 3.1: Piezoelektrischer Silizium-Drucksensor

Drucksensormembran von der Rückseite durch anisotropes Ätzen freigelegt; piezoresistive Messwiderstände an den Stellen mit höchster Biegung durch Dotierung in Silizium hergestellt.

3.1 Grundprozesse der Mikrotechnik

Für die wiederholte Ausführung von Prozessmodulen einer Schichtstrukturierung stehen vielseitig verwendbare Grundprozesse (auch Basistechnologien genannt) der Mikrotechnik zur Verfügung. In der folgenden Übersicht sind die Grundprozesse der Mikrotechnik zusammengestellt:

- **Schichtabscheidung**

Abscheidung einer neuen ganzflächigen Schicht auf dem Substrat oder dem vorangegangenen Schichtaufbau.

- Physikalische Dampfphasenabscheidung PVD (*physical vapour deposition*)
Aufdampfen, Kathodenzerstäubung (Sputtern)

Materialien:

- * Metalle
- * Dielektrika (z. B. SiO_2)

- Chemische Gasphasenabscheidung CVD (*chemical vapour deposition*)

Materialien:

- * polykristalline Schichten
z. B. Polykristallines Silizium (Poly-Si)
- * amorphe Schichten
z. B. SiO_2 , Si_3N_4

- Epitaxie

Monokristalline Schichtabscheidung (z. B. dotierte Si-Schicht auf Si-Substrat)

- Elektrolytische Schichtabscheidung
Galvanische Beschichtung, Chemische Beschichtung
Materialien:
 - * Metalle (z.B. Ni, Au, Cu)
- **Schichtmodifikation**
Umwandlung der Substratoberfläche oder einer bereits vorhandenen Schicht, so dass eine neue Schicht mit anderen physikalischen Eigenschaften gegenüber dem Ausgangszustand entsteht.
 - Thermische Oxidation
 - Thermische Diffusion (Dotierung)
 - Ionenimplantation (Dotierung)
Implantation von Fremdatomen durch Ionenstrahl in den Halbleiterkristall
- **Schichtstrukturierung**
Erzeugen einer örtlich definierten Schutzschicht (Photoresist) durch Photolithographie als Ätzmaske für den folgenden Ätzschritt:
 - Belackung
 - Belichtung
 - Entwicklung
- **Schichtabtragung**
Ätzen der von der Ätzmaske freigelegten Substrat- bzw. Schichtflächen mit anschließendem Entfernen der (Photoresist) Ätzmaske.
 - Nasschemisches Ätzen
 - * Tauchen
 - * Sprühen
 - Trockenätzen
 - * Plasmaätzen
 - * Reaktives Ionenätzen RIE (*reactive ion etching*)
 - * Ionenstrahlätzen
- **Vereinzeln**
Trennen der Bauteile (Chips) aus dem Substrat
- **Mikromontage**
Montage des Bauteils (Chip) auf Träger
- **Kontaktierung**
Drahtverbindungen zwischen Bauteil (Chip) und Träger
- **Gehäusung**

Reinraumtechnik

Produkte der Mikrotechnik müssen in einer hochreinen Umgebung, die sowohl die umgebende Luft als auch alle für den Prozess erforderlichen Medien wie Gase und Flüssigkeiten umfasst, gefertigt werden. Partikel, die normalerweise in der Außenluft sowie im Wasser zahlreich vorhanden sind, würden bei der photolithographischen Strukturierung die Mikrostrukturen zerstören. Somit erfolgt die Fertigung der Substrate (Waferfertigung) in Reinräumen.

Für die Konzeption und den Betrieb von Reinräumen werden Luftreinheitsklassen nach US Federal Standard 209 D bzw. VDI 2038 definiert, die eine spezifizierte Partikeldichte [Partikel/ft³] (1 ft³ = 1 Kubikfuß) in Abhängigkeit von der Partikelgröße nicht überschreiten dürfen (Abbildung 3.2), wobei die Partikeldichte mit kleiner werdender Partikelgröße zunimmt. Die Reinraumklassen 1 bis 100000 sind als Partikeldichte für eine Partikelgröße von $0,5\ \mu\text{m}$ definiert. Großstadtaußenluft besitzt Partikeldichten von > 10 Millionen Partikeln/ft³. Die Fertigung von mikroelektronischen Schaltkreisen erfolgt bei Reinraumklassen von 1 bis 10, wogegen bei der Mikrosystemtechnik in der Photolithographie Klasse 10 bis 100 und für die restlichen Prozessschritte meistens Klasse 1000 ausreichend sind.

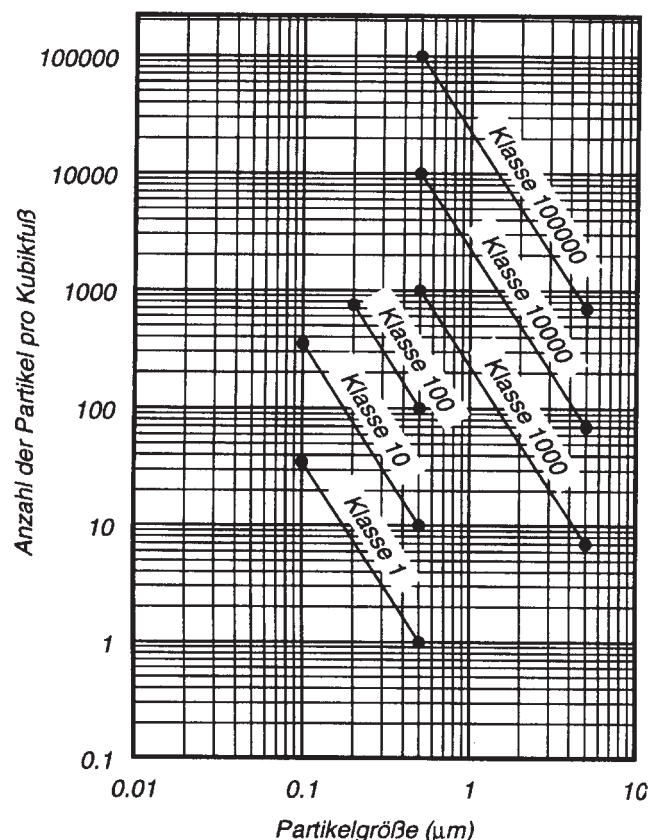


Abbildung 3.2: Luftreinheitsklassen nach US Federal Standard 209 D

Ein Reinraum besteht aus einer von der Außenwelt abgeschlossenen Zelle, die ständig

von gefilterter Luft unter einem leichten Überdruck (ca. 10 Pa) durchströmt wird, so dass Partikel in den Außenraum verdrängt werden.

Neben der Reinheit muss eine konstante Klimatisierung im Reinraum erfolgen, da insbesondere für viele Prozesse die relative Luftfeuchtigkeit konstant gehalten werden muss. Gängige Betriebsbedingungen für die Mikrosystemtechnik sind:

- Temperatur: $21\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$
- Relative Luftfeuchtigkeit: $45\text{ \%} \pm 5\text{ \%}$
- Luftströmungsgeschwindigkeit: $0,25\ldots0,35\text{ m/s}$

Die Anforderungen für die Mikroelektronik-Fertigung sind wesentlich enger toleriert.

3.1.1 Schichtabscheidung

Für Mikrosysteme werden Dünnschichten mit Schichtdicken von 10 nm bis zu $5\text{ }\mu\text{m}$ eingesetzt, die aus der Gasphase (PVD, CVD, Epitaxie) abgeschieden werden. Darüberhinaus findet die elektrolytische Abscheidung (Galvanik) aus der Flüssigphase mit Schichtdicken bis zu $500\text{ }\mu\text{m}$ zunehmend Anwendung. Die wesentlichen Beschichtungsverfahren der Mikrosystemtechnik sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt.

Physical Vapor Deposition (PVD)

Der Aufbau dünner Schichten erfolgt durch Kondensation eines Dampfes auf dem zu beschichtenden Substrat. Der aus Atomen, Molekülen oder Clustern bestehende Dampf wird physikalisch erzeugt (Verdampfen, Kathodenzerstäubung) und als physikalische Dampfphasenabscheidung bezeichnet (physical vapor deposition PVD). Ein PVD-Prozess wird beschrieben durch die Phasen:

- Teilchenerzeugung
- Transport der Teilchen zum Substrat
- Kondensation der Teilchen auf dem Substrat

Für den Transport der Teilchen von der Materialquelle zum Substrat ist ein Betrieb unter Vakuum erforderlich. Als Vakuum wird der Druckbereich unterhalb des normalen Luftdrucks (10^5 Pa) bezeichnet und in verschiedene technische Vakuumbereiche eingeteilt (Tabelle 3.2). Gasmoleküle bewegen sich frei im Raum, bis sie nach Durchlaufen ihrer mittleren freien Weglänge λ mit anderen Molekülen zusammenstoßen, wobei λ vom Druck p abhängt.

$$\lambda \sim \frac{1}{p} \quad (3.1)$$

Tabelle 3.1: Beschichtungsverfahren in der Mikrosystemtechnik

Verfahren		Materialien	Bemerkung
PVD	Aufdampfen • Elektronenstrahl- verdampfung	Metalle: Al, Ti, Au	Leiterbahnen
	Sputtern	Metalle: Al, Cu, Ti, Au, Pd, Nb Dielektrika: $\text{SiO}_2, \text{Si}_3\text{N}_4$	Leiterbahnen Widerstände Passivierungen Isolatoren
CVD	• LPCVD • PECVD	Polykristallin: Poly-Si	Federstrukturen Membranen
		Dielektrika (amorph): $\text{SiO}_2, \text{Si}_3\text{N}_4, \text{SiO}_x\text{N}_y$	Ätzmasken Isolatoren spannungserzeugende Schichten
Epitaxie	• MOCVD	Monokristallines dotiertes Si	Membranen Federstrukturen Messwiderstände
Elektrolytische Abscheidung	• Galvanik • Chemische Abscheidung	Metalle: Ni, NiFe, Cu, Au	Membranen Federstrukturen Kontaktflächen

PVD Physical Vapour Deposition
 CVD Chemical Vapour Deposition
 LPCVD Low-Pressure Chemical Vapour Deposition
 PECVD Plasma-Enhanced Chemical Vapour Deposition
 MOCVD Metal Organic Chemical Vapour Deposition

Tabelle 3.2: Einteilung der technischen Vakuumbereiche

Druckbereich	Druck [Pa]	Druck [mbar]	freie Weglänge λ (in Luft)	freie Weglänge λ
Großvakuum	$10^5 - 10^2$	$1000 - 1$	$60 \text{ nm} - 60 \mu\text{m}$	$l \ll b$
Feinvakuum	$10^2 - 10^{-1}$	$1 - 10^{-3}$	$60 \mu\text{m} - 60 \text{ mm}$	$l \approx b$
Hochvakuum	$10^{-1} - 10^{-5}$	$10^{-3} - 10^{-7}$	$60 \text{ mm} - 600 \text{ m}$	$l \gg b$
Ultrahochvakuum	$< 10^{-5}$	$< 10^{-7}$	$> 600 \text{ m}$	$l \gg b$

b Behälterdurchmesser

Bei hohen Drücken (Grob-, Feinvakuum) wäre die mittlere freie Weglänge so kurz, dass die verdampften Teilchen durch Stöße mit den Gasmolekülen abgebremst werden und das Substrat nicht erreichen. Daher ist das Aufdampfen nur im Hochvakuum $p < 10^{-1} \text{ Pa}$ möglich.

Aufdampfen

Unter Hochvakuum wird das Beschichtungsmaterial durch Erhitzen in die Dampfphase überführt, aus der es sich auf dem Substrat niederschlägt. Abbildung 3.3 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Aufdampfanlage.

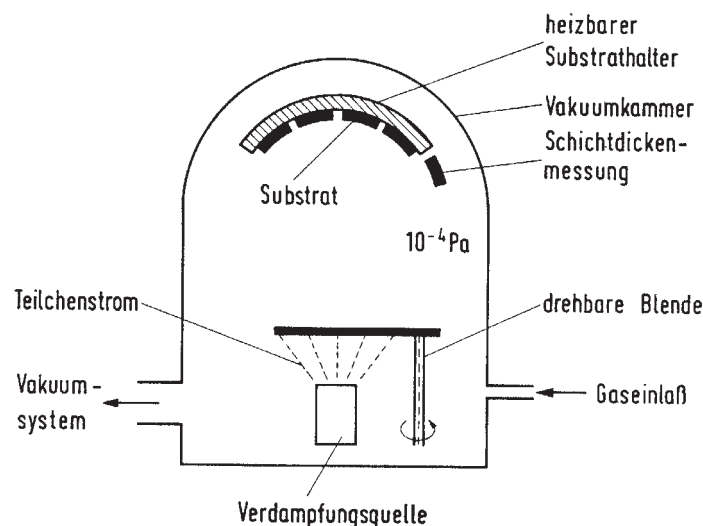


Abbildung 3.3: Schema einer Vakuum-Aufdampfanlage [Büttgenbach]

Das System besteht aus einer Verdampfungsquelle, einer Blende, mit der die Quelle abgedeckt werden kann, und einem beheizbaren Substrathalter. Die räumliche Verteilung des abgedampften Materials ist in der Regel inhomogen (Dampfkeule), so dass der Substrathalter drehbar bzw. zusätzlich mit Planetentellern ausgeführt ist. Während des Aufdampfens erfolgt eine Schichtdickenmessung (*in situ*) mit Hilfe eines Schwingquarzes, dessen Resonanzfrequenz sich durch die mechanische Belastung des aufgedampften Materials verschiebt.

Die Abdampftrate R_v ist proportional zum Sättigungsdampfdruck des aufzudampfenden Materials

$$R_v \sim p_s(T) \quad (3.2)$$

Nach Abbildung 3.4 hängt der Sättigungsdampfdruck p_s nahezu exponentiell von der Temperatur T in der Verdampfungsquelle ab. Die hohe Temperaturabhängigkeit von p_s führt beim praktischen Betrieb zu zwei wichtigen Konsequenzen:

- Die Forderung nach einer konstanten Aufdampfrate bedingt eine hohe Temperaturkonstanz in der Aufdampfquelle
- Beim Aufdampfen von Legierungen wird zunächst die Komponente mit dem höheren Dampfdruck bevorzugt verdampft. Dies führt zu einer Variation in der Schichtzusammensetzung

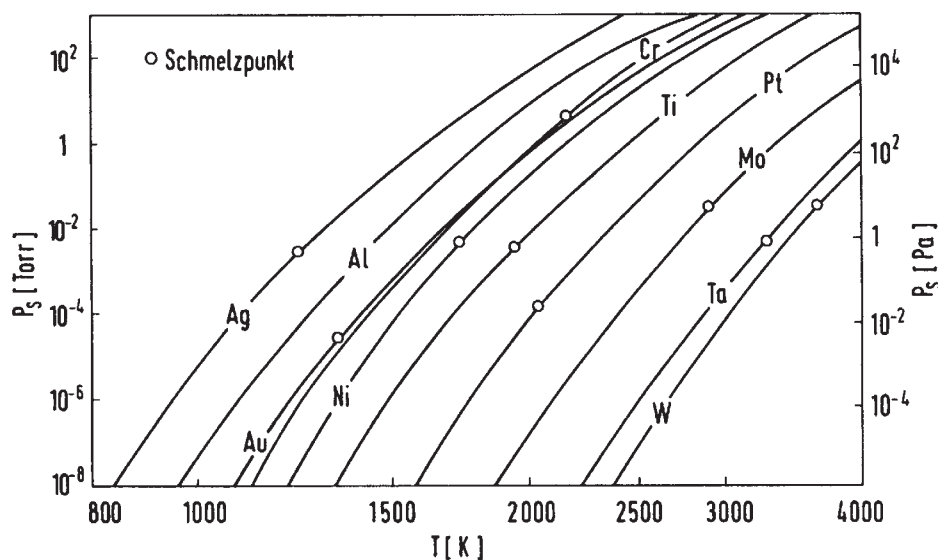


Abbildung 3.4: Sättigungsdampfdruck p_s für einige Elemente als Funktion der Temperatur [Büttgenbach]

Zur Verdampfung des Schichtmaterials gibt es widerstandsbeheizte Verdampfer und Elektronenstrahlverdampfer (Abbildung 3.5). Beim thermischen Widerstandsverdampfer wird meistens ein Schiffchen durch elektrischen Strom erwärmt, so dass das Aufdampfgut aufschmilzt. Nachteilig beim Widerstandsverdampfen ist die Kontamination des Schichtmaterials durch das gleichzeitige Abdampfen des Verdampfers.

In der Mikrosystemtechnik hat sich der Elektronenstrahlverdampfer durchgesetzt. Der Elektronenstrahl wird durch einen Magneten über 270° abgelenkt, so dass die Strahlquelle vom abgedampften Material abgeschirmt ist. Die Vorteile des Elektronenstrahlverdampfers bestehen in:

- das Aufdampfmaterial schmilzt nur am Strahlauftreffpunkt, dadurch keine Kontamination durch das Tiegelmaterial
- gleichmäßige Erwärmung des Aufdampfgutes durch elektrostatisches Schwenken des Elektronenstrahls
- Legierungen sind durch gleichzeitiges Verdampfen der Einzelelemente aus verschiedenen Tiegeln mit Hilfe eines Springstrahls aufdampfbar

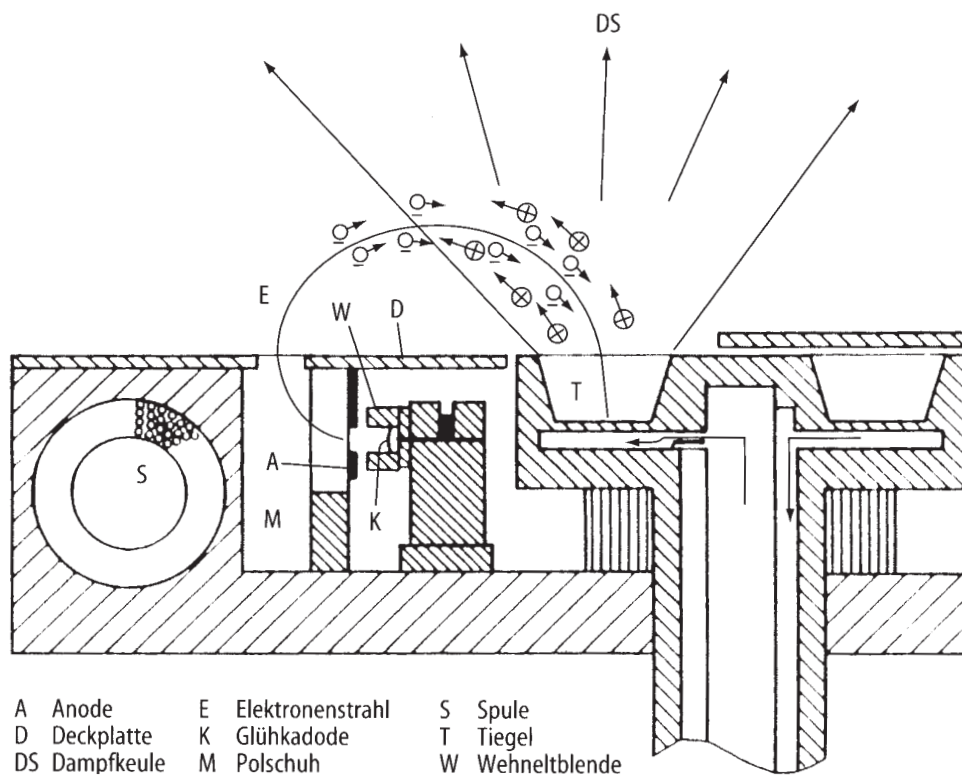


Abbildung 3.5: Aufbau eines Elektronenstrahlverdampfers [Obermeier/Tränkler]

Sputtern (Kathodenzerstäuben)

Die Sputtertechnik beruht auf den Vorgängen in einer Glimmentladung, die in einer Vakuumkammer im Druckbereich von 1 bis 10 Pa und Spannungen bis zu einigen kV zwischen zwei Elektroden zündet. Dabei entsteht ein Plasma aus Elektronen und positiven Ionen des Entladungsgases (üblicherweise Argon). Die Ionen werden auf die Kathode (*Target*) hin beschleunigt und treffen dort mit großer kinetischer Energie auf. Dabei schlagen sie Atome aus der Oberfläche des Targetmaterials heraus, die sich zur Anode bewegen, auf der sich die zu beschichtenden Substrate befinden. Abbildung 3.6 zeigt das Schema einer Sputteranlage.

Im Gegensatz zum Aufdampfen besitzen die Targetatome eine 10 bis 100-fache kinetische Energie (3...10 eV, gegenüber 0,2 eV), so dass gesputterte Schichten eine hohe Haftfestigkeit aufweisen. Ferner treffen die Atome aufgrund von Stoßprozessen auf das Substrat. Dadurch werden Kanten und Stufen auf der Substratoberfläche besser bedeckt als beim Aufdampfen (*step coverage*).

Da beim Sputtern das Beschichtungsmaterial nicht aufgeschmolzen wird, können beliebige Materialien wie hoch- oder nicht schmelzende Metalle, Legierungen und Nichtmetalle wie Oxide, Nitride aufgestäubt werden.

Der Sputterprozess wird im wesentlichen in zwei Verfahrensvarianten unterschieden: das

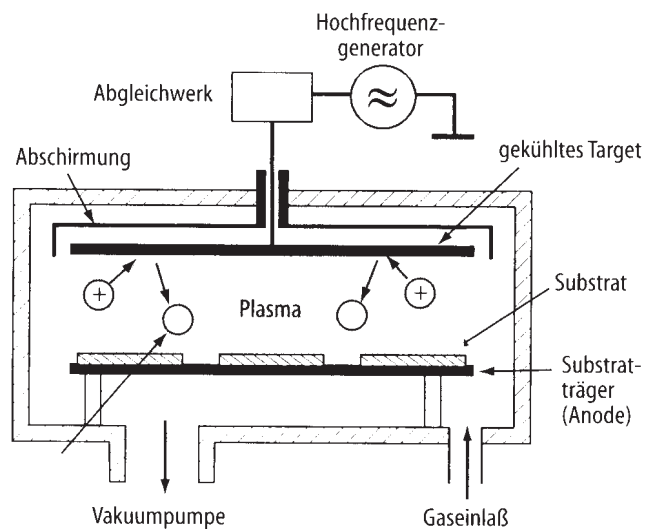


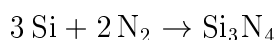
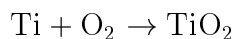
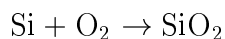
Abbildung 3.6: Schema einer HF-Dioden-Sputteranlage [Obermeier]

Sputtern mit einer Gleichspannung (DC-Sputtern) und das Sputtern mit einer hochfrequenten Wechselspannung (HF- oder RF-Sputtern). Beim HF-Sputtern (Abbildung 3.6) wird die Gasentladung durch Hochfrequenz (meist 13,56 MHz) angeregt. Aufgrund der unterschiedlichen Beweglichkeit von Elektronen und Ionen im Plasma lädt sich die Kathode negativ, d. h. ungefähr auf den Scheitelwert der HF-Amplitude auf (*self-biasing*). HF-Sputtern wird zum Aufstäuben von nichtleitenden Materialien benutzt.

Die Sputterraten sind proportional zur eingespeisten HF-Leistung und liegen bei $P = 1000 \text{ W}$ und einem Ar-Arbeitsdruck von $p = 50 \text{ Pa}$ je nach Material im Bereich von 300 nm/min bis 1000 nm/min .

Reaktives Sputtern:

Dielektrika, Isolatoren, Metalloxide können, anstatt entsprechende Targets einzusetzen, auch aus Metall- bzw. Halbleitertargets durch chemische Reaktionen mit reaktiven Sputtergaszusätzen (O_2 , N_2) aufgestäubt werden. Typische Reaktionen sind z. B.:



Aufgrund der Vielseitigkeit der abscheidbaren Materialien, der guten Haftung auf den Substratoberflächen, der kompakten Schichtqualität und der guten Stufenbedeckung hat sich das Sputterverfahren gegenüber dem Aufdampfen in der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik weitgehend durchgesetzt.

Chemical Vapor Deposition (CVD)

Der Schichtaufbau erfolgt bei der chemischen Gasphasenabscheidung (CVD) durch chemische Reaktion gasförmiger Komponenten in der Nähe oder auf der erhitzten Substratoberfläche. (Abbildung 3.7). Voraussetzung für einen CVD-Prozess ist, dass die Schichtkomponenten in gasförmigen Verbindungen (z. B. Halogenide, Fluoride, Chloride, Bromide, Jodide) vorliegen.

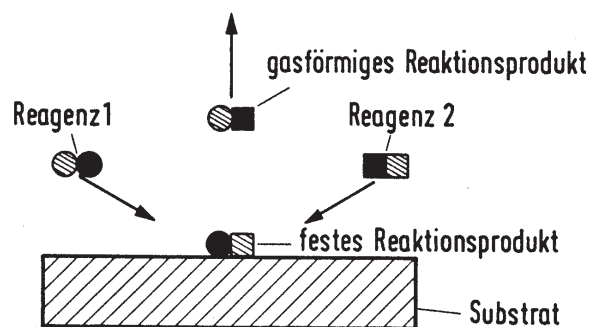


Abbildung 3.7: Prinzip der chemischen Abscheidung aus der Gasphase [Büttgenbach]

Die Gasphasenreaktion zur Schichtabscheidung erfolgt durch Zusammenwirken der folgenden drei Stufen:

- Transport der gasförmigen Ausgangsstoffe in die Reaktionszone
- Chemische Umsetzung
- Abtransport unerwünschter Reaktionsprodukte

Der Vorteil des CVD-Verfahrens liegt in der sehr guten Verbindung zwischen Schicht und Substrat und der gleichmäßigen Schichtdicke. Übliche Schichtdicken liegen im Bereich von 10 nm bis zu 2 μm und in Ausnahmefällen bis zu 25 μm . Bei optimaler Reaktionsführung entspricht die Oberflächengüte der Schicht derjenigen des Grundmaterials.

Die CVD-Verfahren lassen sich hinsichtlich der eingesetzten Energiequelle in thermische CVD und plasmaunterstützte CVD (*plasma enhanced CVD*, *PECVD*) bzw. hinsichtlich des Drucks in Normaldruck-CVD (*atmospheric pressure*, *APCVD*) und Niederdruck-CVD (*low pressure*, *LPCVD*) einteilen. Abbildung 3.8 zeigt die Schemata der gebräuchlichsten Verfahren.

Da beim CVD-Verfahren unter Normaldruck (APCVD) sehr hohe Temperaturen 1000 °C erforderlich sind, ist dieses Verfahren gerade für bereits prozessierte Substrate nicht anwendbar.

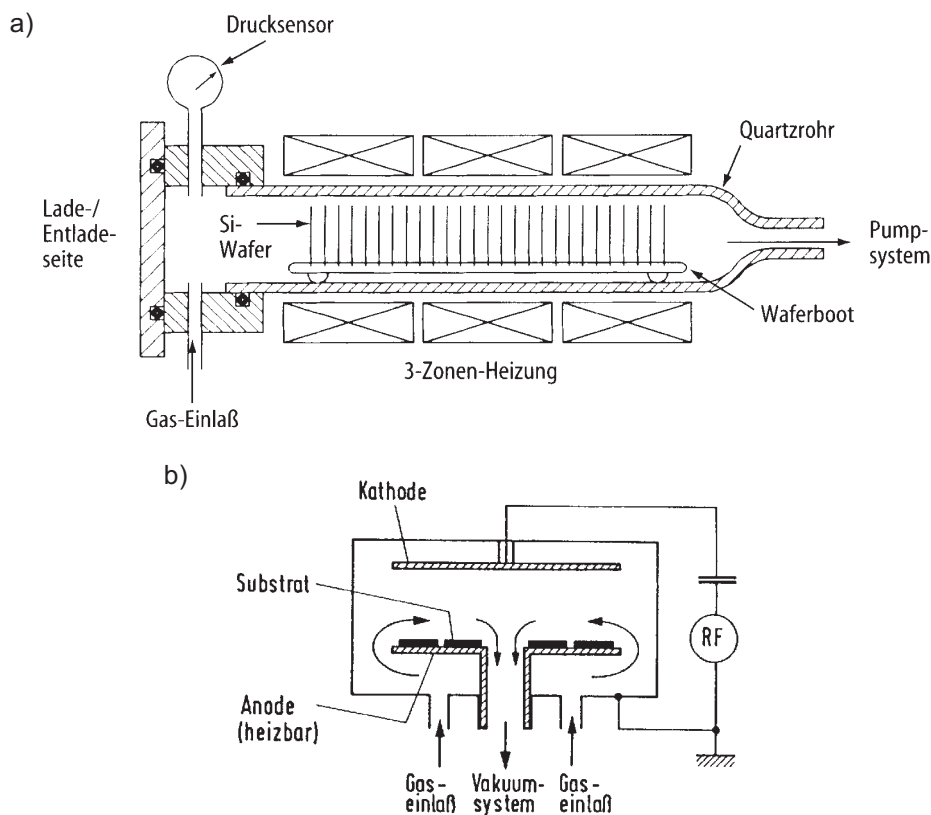


Abbildung 3.8: Schematische Darstellung verschiedener CVD-Reaktoren

- a) LPCVD-Rohrofen
- b) PECVD-Reaktor

LPCVD-Prozess:

Eine Lösung bietet die Niederdruck-CVD (LPCVD) bei Drücken von 10...100 Pa und Temperaturen von 500 bis 1000 °C, da durch die höhere freie Weglänge der Gastransport an die Substratoberfläche auch bei dichter Packung der Substrate (siehe Abbildung 3.8 a) intensiviert wird. LPCVD-Anlagen bestehen aus Rohröfen, wobei die Reaktionskammern aus Quarzrohren bestehen und von einer 3-Zonen-geregelten Heizung erwärmt wird. LPCVD-Prozesse haben sich heutzutage bei der Herstellung von mikroelektronischen Schaltkreisen weitgehend durchgesetzt.

PECVD-Prozess:

Im Gegensatz zu den thermischen CVD-Prozessen APCVD und LPCVD wird als Energiequelle zur Dissoziation der Reaktionsgase eine Plasmaentladung (Abbildung 3.8 b) angewendet. Somit lassen sich die Prozesstemperaturen unter 500 °C bis hin zu 250 °C senken.

Eine Zusammenstellung einiger gängiger CVD-Prozesse aus der Mikrotechnik zeigt Tabelle 3.3.

Tabelle 3.3: Ausgewählte CVD-Prozesse

Schicht	CVD-Prozess	Reaktionsschema	T [°C]	Druck [Pa]	Rate [nm/min]
Si	RPVPE	$\text{SiH}_2\text{Cl}_2 \rightarrow \text{Si} + 2 \text{HCl}$	1050–1150	10000	400–3000
Poly-Si	LPCVD	$\text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si} + 2 \text{H}_2$	615	30	9
SiO_2	LPCVD	$\text{SiH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2 \text{H}_2$ (LTO)	430	20	8
	LPCVD	$\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4 \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{Gase}$ (TEOS)	750	40	8
	LPCVD	$\text{SiH}_2\text{Cl}_2 + 2 \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{Gase}$ (HTO)	920	50	8
	PECVD	$\text{SiH}_4 + 4 \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{Gase}$	280	40	55
PSG	LPCVD	$\text{SiH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2 \text{H}_2$	430	20	8
		$2 \text{PH}_3 + 4 \text{O}_2 \rightarrow \text{P}_2\text{O}_5 + 3 \text{H}_2\text{O}$			
Si_3N_4	LPCVD	$3 \text{SiH}_2\text{Cl}_2 + 4 \text{NH}_3 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 6 \text{HCl} + 6 \text{H}_2$	730	85	2,5
	PECVD	$3 \text{SiH}_4 + 4 \text{NH}_3 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 12 \text{H}_2$	280	29	30

RPVPE Reduced Pressure Vapour Phase Epitaxy
LTO Low Temperature Oxide
TEOS Tetra-Ethyl-Ortho-Silicate
HTO High Temperature Oxide
PSG Phosphor-Silikat-Glas $(\text{SiO}_2)_{1-x}(\text{P}_2\text{O}_5)_x$

Epitaxie

Epitaktische Abscheideverfahren ermöglichen ein einkristallines Schichtwachstum auf der Oberfläche von Einkristallen (Wafern, Substraten). Die Abscheidung erfolgt wie bei den CVD-Verfahren aus der Gasphase, nur dass die Teilchen nicht amorph aufwachsen, sondern sich an der kristallinen Ordnung auf der Substratoberfläche aufgrund der Art der Prozessführung orientieren. Folgende Verfahren sind gebräuchlich:

- VPE Vapour Phase Epitaxy
- MOCVD Metal Organic Epitaxy
- MBE Molecular Beam Epitaxy

In der Mikrosystemtechnik finden Epitaxieprozesse zu Beginn der Prozessierung ihren Einsatz, um für Membranen oder Federstrukturen eine dotierte Silizium-Schicht auf Silizium-Wafern abzuscheiden. Dabei können die Schichtdicken bis zu $10 \mu\text{m}$ reichen. In der Mikroelektronik ist die Epitaxie fester Bestandteil zur Erzeugung dotierter Si-Schichten aber auch für Mischkristallschichten wie SiGe und SiC.

Elektrolytische Beschichtung

Bei der elektrolytischen Beschichtung erfolgt die Schichtabscheidung auf den Substraten aus der flüssigen Phase in einem Elektrolyten. Elektrolyte sind elektrische Leiter (meist wässrige Metallsalzlösungen), deren Leitfähigkeit durch elektrolytische Dissoziation der Ionen zustande kommt. Je nach der Art der Energiezufuhr wird zwischen den beiden Untergruppen unterschieden:

- Galvanische Beschichtung
Abscheidung durch äußere Gleichstromquelle
- Chemische Beschichtung
Abscheidung durch den Unterschied der elektrochemischen Potentiale der Reaktionspartner oder durch Oxidationsreaktion eines Reduktionsmittels

Bei allen elektrolytischen Verfahren zur Metallabscheidung gilt der gleiche Reaktionsmechanismus, bei dem an der Kathode eine Reduktion der Metallionen durch Aufnahme von Elektronen gemäß



stattfindet und an der Anode durch eine Oxidation Metallionen unter Abgabe von Elektronen gemäß



entstehen, sofern lösliche Anoden verwendet werden. Die zu beschichtenden Werkstückoberflächen müssen elektrisch leitfähig und chemisch rein sein.

Beim galvanischen Beschichten werden die als Kathode geschalteten Substrate an Haltern in das elektrolytische Bad getaucht, in dem sich eine Gegenelektrode als Anode befindet (Abbildung 3.9 a). Durch Anlegen einer elektrischen Spannung werden die positiv geladenen Metallionen Me^{n+} (Kationen) aufgrund des elektrischen Feldes zum Werkstück bewegt und dort zu neutralen Metallatomen reduziert. Besteht die Anode aus dem selben Metall wie die Metallionen im Elektrolyten, werden Metallatome durch Abgabe von Elektronen oxidiert und gehen als Metallionen in Lösung. Somit wird der Elektrolyt nicht aufgebraucht, sondern dient als Transportmittel der Metallionen. Für einige Schichtmaterialien sind in Tabelle 3.4 typische Prozessparameter zusammengestellt. Mikromechanische Feder- und Membranstrukturen werden bevorzugt aus Ni-Schichten oder NiFe-Legierungsschichten hergestellt. Kupferschichten dienen zur Verstärkung von Leiterbahnen, um höhere Ströme zu führen.

Die Abscheideraten hängen stark von der Stromdichte ab, die wiederum durch die an der Substratoberfläche herrschende elektrische Feldstärke bestimmt wird. An Kanten und Rändern von maskierten Bereichen entstehen Überhöhungen der elektrischen Feldstärke,

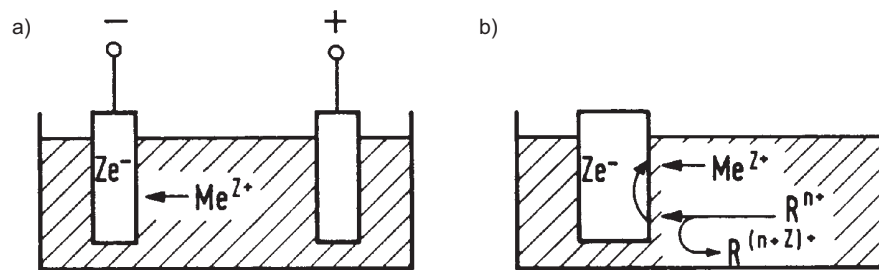


Abbildung 3.9: Prinzip der elektrolytischen Metallabscheidung
a) mit äußerer Stromquelle
b) stromlose Abscheidung mit Reduktionsverfahren

Tabelle 3.4: Prozessparameter für galvanisch abgeschiedene Metallschichten [Sautter]

Schicht	Übliche Schichtdicke [μm]	Abscheidegeschwindigkeit [$\mu\text{m/h}$]	Abscheidestromdichte [A/dm^2]
Aluminium	5...25	12	1
Nickel	5...2000	25	2
Kupfer	5...100 (gasdicht > 25)	20	1
Zink	5...30	12	1
Silber	3...15 (in spez. Anwendungen bis 100)	35	1
Zinn	1...100	60	2
Blei	5...1000	60	2
Blei-Zinn	5...1000	50	2

die zu inhomogenen Stromdichten bzw. Abscheideraten führen. Dies ist ein grundsätzlicher Nachteil der galvanischen Beschichtung trotz der vorteilhaften Materialzufuhr aus der Anode.

Bei der chemischen Beschichtung, auch stromlose Beschichtung genannt, werden die zur Reduktion der positiven Metallionen erforderlichen Elektronen durch eine Reaktion eines Reduktionsmittels erzeugt (Abbildung 3.9 b). Das Reduktionsmittel, das unedler sein muss als das abzuscheidende Metall, reagiert an der katalytisch wirksamen (aktivierten) Werkstückoberfläche unter Abgabe der zur Reduktion der positiven Metallionen erforderlichen Elektronen. Es bilden sich zunächst einzelne Metallkeime, von denen das Schichtwachstum ausgeht und sich solange fortsetzt, wie Reduktionsmittel in der Lösung enthalten ist. Dadurch lassen sich auch dickere Schichten abscheiden. Das Bad reichert sich mit Reaktionsprodukten an und muss nach einem bestimmten Werkstückdurchsatz regeneriert werden.

Der Vorteil des Verfahrens liegt in der gegenüber dem Galvanisieren gleichmäßigeren Schichtdickenverteilung auf beliebigen Werkstückoberflächen. Die Metallabscheidung mit

Reduktionsmitteln wird industriell bei der stromlosen Vernickelung und Verkupferung von Bauteiloberflächen eingesetzt. Die Nickelabscheidung („stromlos Nickel“) erfolgt vorwiegend in Nickelsulfat- bzw. Nickelchlorid-Lösungen. Als Reduktionsmittel werden leicht reagierende Verbindungen wie z. B. Hypophosphit H_2PO_2 eingesetzt. Abscheideraten von bis zu $30 \mu\text{m/h}$ können erreicht werden.

3.1.2 Schichtmodifikation

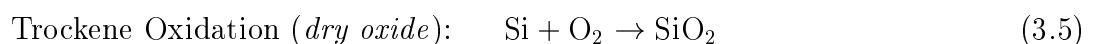
Unter dem Begriff Schichtmodifikation werden die Prozesse zusammengefasst, bei denen eine bereits vorhandene Schicht oder aber die Substratoberfläche umgewandelt werden, so dass eine neue Schicht mit anderen physikalischen Eigenschaften als zuvor entsteht.

Thermische Oxidation

Ein besonderes Merkmal von Silizium als Werkstoff der Mikroelektronik und der Mikrosystemtechnik besteht darin, dass es ein hochreines Eigenoxid SiO_2 bildet, das hervorragende elektrische, mechanische und chemische Eigenschaften besitzt und für vielfältige Zwecke eingesetzt werden kann, wie z. B.:

- als Dielektrikum bzw. Isolator
- zur Oberflächenpassivierung von Schaltkreisen
- als Maskierungsschicht bei Ätz- und Dotierungsprozessen
- zur Herstellung freitragender Membranen

Siliziumdioxid-Schichten aus Eigenoxid werden durch thermische Oxidation von Si-Wafern unter Normaldruck in horizontalen Rohröfen (ähnlich einer LPCVD-Anlage in Abbildung 3.8 a) hergestellt. Dabei bildet sich die SiO_2 -Schicht auf dem Silizium-Substrat durch chemische Reaktion des Siliziums, indem ein Oxidationsgas über die heiße Siliziumoberfläche strömt. Als Oxidationsgas kann trockene oder feuchte Sauerstoffatmosphäre dienen mit folgenden Gesamtreaktionen:



Bei der feuchten Oxidation ist die Oxidationsrate wesentlich größer; sie wird aus wirtschaftlichen Gründen zur Herstellung dicker SiO_2 -Schichten bevorzugt. Die trockene Oxidation liefert dagegen Schichten hoher Durchbruchfeldstärke und großer Dichte. Nach Ausbilden einer ersten Siliziumdioxid-Schicht an der Substratoberfläche findet der weitere Oxidationsprozeß an der Si/ SiO_2 -Grenzfläche statt, so dass diese in das Silizium-Substrat hineinwächst (Abbildung 3.10). Andererseits expandiert das Volumen der Schicht, da jedes

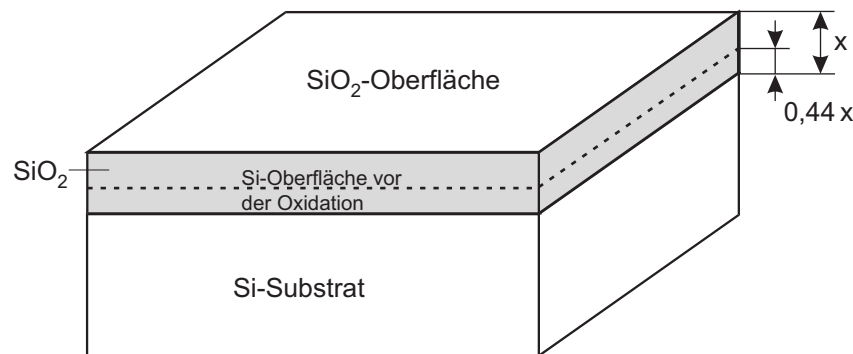


Abbildung 3.10: Schichtdickenverhältnis mit Volumenzunahme bei der thermischen Oxidation von Silizium

ursprüngliche Si-Atom des Kristalls sich mit zwei Sauerstoffatomen verbindet. Zur Bildung einer SiO_2 -Schicht der Dicke x wird eine Silizium-Schicht der Dicke $0,44 \cdot x$ verbraucht.

Für lange Oxidationszeiten mit Schichtdicken $x > 100 \text{ nm}$ wächst die Schichtdicke näherungsweise mit der Wurzel der Zeit

$$x = \sqrt{D t} \quad (3.7)$$

da die Diffusion der Sauerstoffatome durch die bereits erzeugte Oxidschicht behindert wird. Dabei ist D die Diffusionskonstante, die stark von der Temperatur abhängt (Arrhenius-Gesetz). In Abbildung 3.11 ist die Oxiddicke in Abhängigkeit von der Oxidationszeit im doppelt logarithmischen Maßstab dargestellt. Bei trockener Oxidation sind die Oxidationsraten sehr niedrig, so dass sie nur für dünne Oxidschichten ($< 200 \text{ nm}$) eingesetzt wird. Dickere Oxidschichten bis zu $1 \mu\text{m}$ Dicke werden durch feuchte Oxidation mit einer etwa fünffachen Oxidationsrate erzeugt. Typische Schichtdickenbereiche mit Anwendungen sind in Tabelle 3.5 zusammengestellt.

Tabelle 3.5: Anwendungen von SiO_2 -Schichten aus thermischer Oxidation

SiO_2 -Dicke [nm]	Anwendung
10...50	Gateoxide bei MOS-Transistoren, Kondensatordielektrika
200...500	Maskierungsschichten (Diffusion, Implantation, Ätzen) Oberflächenpassivierungen
300...1000	Feldoxide bei MOS-Transistoren
> 1000	Thermische Isolierung (Bubble-Jet-Tintendruckkopf: 3 mm)

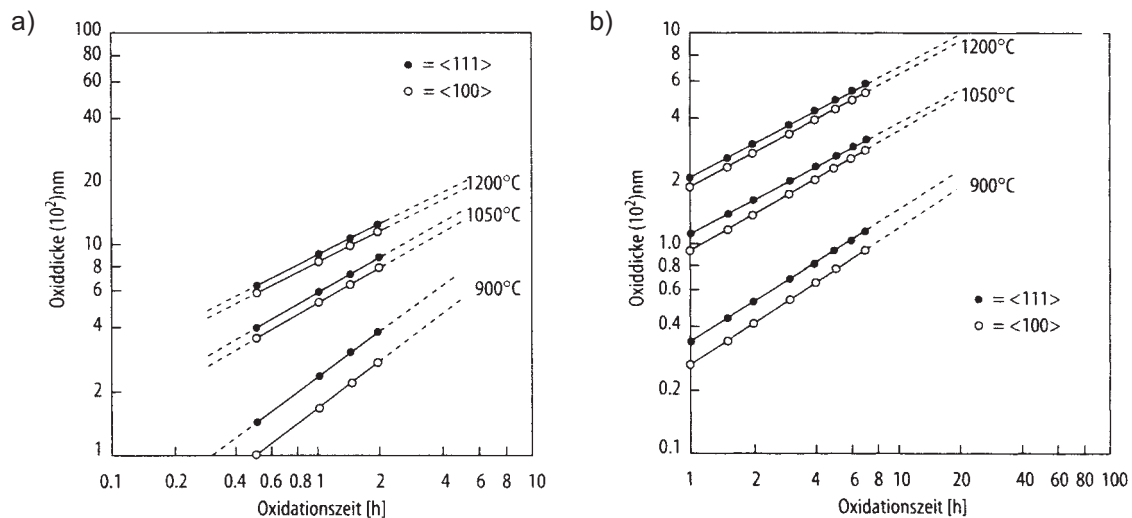


Abbildung 3.11: Oxiddicke als Funktion der Oxidationszeit bei trockener (a) und feuchter (b) Oxidation von $\langle 111 \rangle$ und $\langle 100 \rangle$ -Silizium [Obermeier]

Dotierung durch thermische Diffusion

Die Dotierung von Halbleitern dient zur definierten Veränderung der elektrischen, physikalischen und auch chemischen Eigenschaften des Substratmaterials durch Einbringen von Fremdatomen. Je nach dem Dotierungselement ergeben sich für Silizium die Dotierungsarten:

- p-Dotierung (Löcherüberschuß, p-leitend)
Elemente der 3. Gruppe: B, Al, Ga, In
- n-Dotierung (Elektronenüberschuß, n-leitend)
Elemente der 5. Gruppe: P, As, Sb

Mit steigender Dotierungsdichte sinkt der spezifische Widerstand des Substrats (Abbildung 3.12), wobei ein großer Wertebereich des elektrischen Widerstands einstellbar ist.

Die Dotierung von Silizium kann einerseits durch thermische Diffusion von Fremdatomen in Silizium oder andererseits durch Ionenimplantation erfolgen. Bei der Ionenimplantation werden ionisierte Atome (Dotierstoff) in einem elektrostatischen Feld beschleunigt und in den zu dotierenden Halbleiter eingeschossen, d.h. implantiert. Vorteilhaft gegenüber anderen Verfahren sind die sehr gute Kontrollierbarkeit der eingebrachten Dotierstoffkonzentration durch einfache Stromintegration, die ausgezeichnete Uniformität der Dotierung über der Scheibe sowie die einfache Maskierung. Allerdings ist die Dotierung nur auf oberflächennahe Schichten (max. 1 μm Tiefe) begrenzt.

Das Diffusionsverfahren bietet einen großen Bereich an Schichtdicken und erfordert einen geringeren apparativen Aufwand. Ein Diffusionsvorgang von Teilchen erfolgt, sobald ein

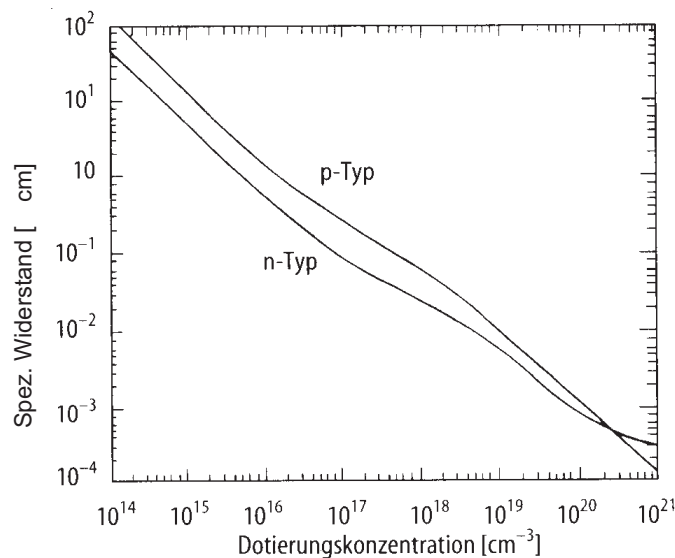


Abbildung 3.12: Einfluss der Dotierungsdichte und des Leitungstyps auf den spezifischen Widerstand von Silizium [Obermeier]

räumlicher Konzentrationsunterschied besteht. Bei der Dotierung eines Halbleiters durch Diffusion wird daher das Substrat bei hohen Temperaturen einer hohen Konzentration des meistens gasförmig zugeführten Dotierstoffes ausgesetzt, so dass auf Grund des Konzentrationsunterschiedes die Dotieratome in das Substratinnere diffundieren.

Nach Abbildung 3.13 können zwei Diffusionsarten mit unterschiedlichen Konzentrationsprofilen unterschieden werden:

- **Diffusion aus unerschöpflicher Quelle** (Abbildung 3.13 a)

Durch den geöffneten Bereich der Maskierungsschicht werden ständig Dotierungsatome gasförmig zugeführt, so dass an der Oberfläche die maximale Teilchenkonzentration N_0 vorliegt und die Dotierungsatomkonzentration N stetig mit der Tiefe x abfällt.

- **Diffusion aus erschöpflicher Quelle** (Abbildung 3.13 b)

In einem ersten Diffusions- oder auch Implantationsschritt wird eine dünne Schicht an der Substratoberfläche (Dicke d) mit der Teilchenkonzentration N_0 belegt. Danach wird die geöffnete Maskierungsschicht geschlossen (thermische Oxidation oder SiO_2 -Abscheidung durch CVD) und schließlich die abgeschlossene Teilchenquelle eindiffundiert (drive-in), ohne dass weitere Dotieratome durch die Oberfläche gelangen. Das Konzentrationsprofil ergibt bei der Diffusion aus erschöpflicher Quelle eine Gaußfunktion, wobei die Konzentration an der Oberfläche mit der Zeit abnimmt.

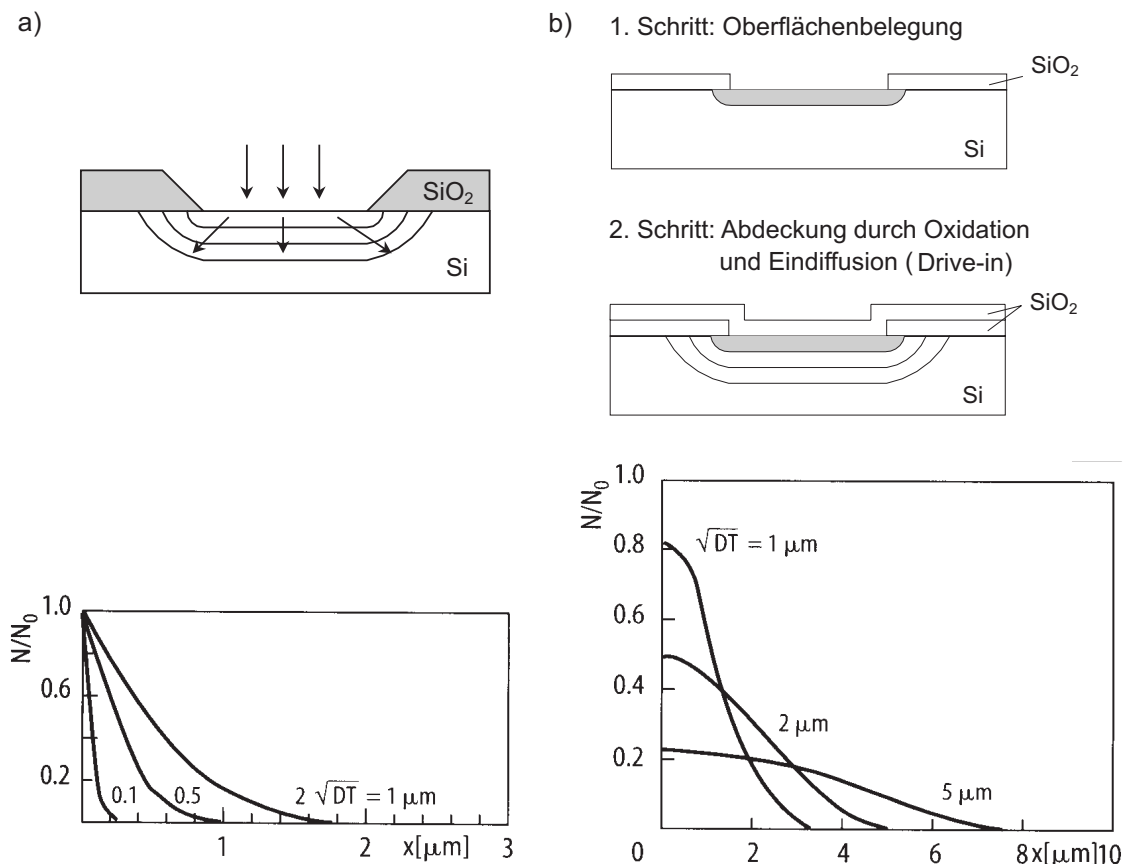


Abbildung 3.13: Diffusion aus unerschöpflicher Quelle (a) und aus erschöpflicher Quelle (b) mit Konzentrationsprofilen senkrecht zur Substratoberfläche

3.1.3 Photolithographie

Mit Hilfe photolithographischer Verfahren werden Strukturen in einem strahlungsempfindlichen Lack (Photoresist), mit dem das zu strukturierende Substrat beschichtet ist, erzeugt. Die Bestrahlung mit Licht, Röntgenstrahlung oder Elektronen verändert die Löslichkeit des Resists in einer Entwicklerlösung, wobei durch photochemische Prozesse im Resist die Löslichkeit der belichteten Bereiche im Fall von Positivresist erhöht wird und im Fall von Negativresist verringert wird. Die selektive Belichtung der zu erzeugenden Mikrostrukturen wird durch Bestrahlen einer Photomaske erzielt, die aus einem transparenten Träger mit absorbierenden Strukturen besteht. Nach dem Entwicklungsschritt wird die erzeugte Resiststruktur durch Ätzen auf die darunterliegende Schicht bzw. das Substrat übertragen (Abbildung 3.14). Je nach der Resistart muss die Polarität der Photomaske ausgelegt sein (Tabelle 3.6).

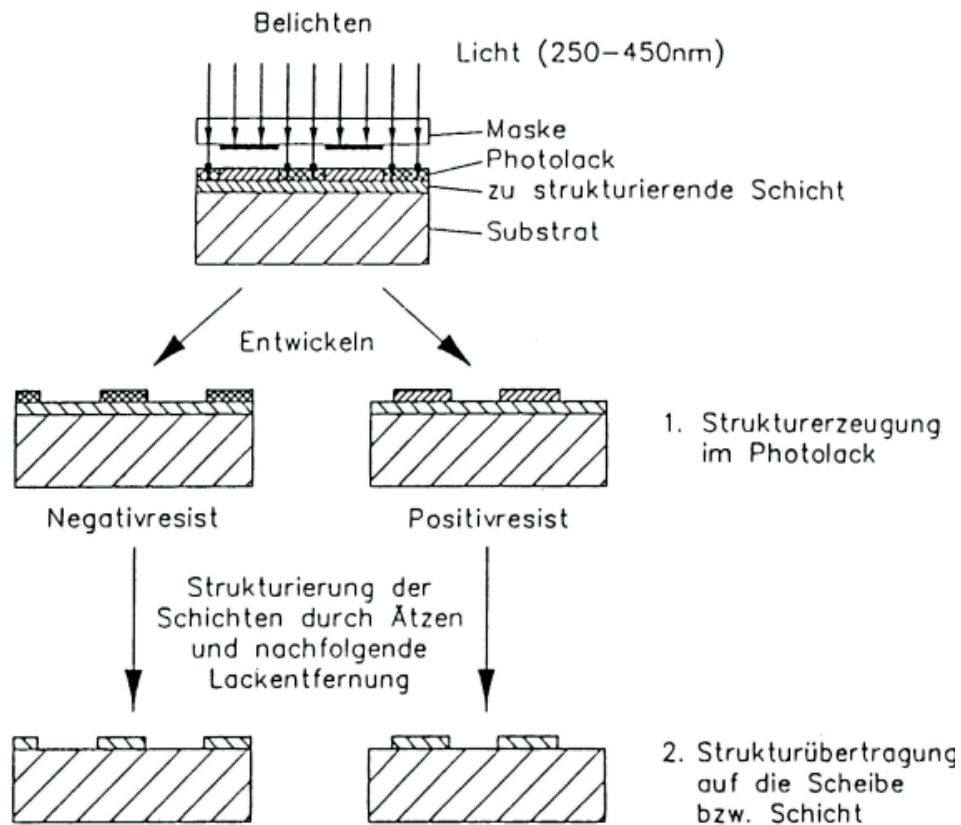


Abbildung 3.14: Prinzip der Strukturierung von Mikrostrukturen durch Photolithographie [Obermeier]

Tabelle 3.6: Arten des Photoresists und der Photomaskenpolarität

Photoresist	Maskenpolarität	Bemerkung
Positiv	Hellfeld (<i>light-field</i>)	zu erzeugende Struktur dunkel auf transparenter Maske
Negativ	Dunkelfeld (<i>dark-field</i>)	zu erzeugende Struktur transparent auf dunkler Maske

Die Strukturierung einer Schicht nach Abbildung 3.14 besteht aus einer Prozessfolge von folgenden Einzelschritten:

- Substratvorbehandlung:
 - Reinigung des Substrats (deionisiertes Wasser, Iso-Propanol)
 - ggf. Aufbringen eines Haftvermittlers (HMDS Hexamethyldisilazan)
- Belackung mit Photoresist
- Trocknung (*soft-bake*, *pre-bake*) (70...90 °C, 15...30 min)
- Belichtung
- Entwicklung
- Härtung (*hard-bake*, *post-bake*) (90...120 °C)
- Übertragung der Photoresiststruktur, z.B. durch Ätzen
- Entfernen des Photoresists (Strippen)
(Lösungsmittel, chemischer Remover, Sauerstoff-Plasma)

Diese Prozessfolge wird im Rahmen des gesamten Fertigungsprozesses von mikrotechnischen Produkten als ein *Strukturierungsschritt* oder *Lithographieschritt* bezeichnet.

Belackung mit Photoresist

Zum Beschichten mit Photolack wird ein Tropfen des flüssigen Resists auf die Mitte des Substrats mit Hilfe einer Dosierpumpe aufgebracht, wobei der Wafer durch Vakuuman-saugung auf einem Drehteller (*Chuck*) festgehalten wird. Der Resisttropfen wird durch Schleudern zu einer dünnen Schicht gleichmäßig verteilt. Nach etwa zehn Sekunden stellt sich die endgültige Lackdicke ein, die von der Viskosität des Resists und der Drehzahl abhängt (Abbildung 3.15); vereinfacht gilt:

$$\text{Resist-Enddicke} \sim \frac{1}{\text{Drehzahl}} \quad (3.8)$$

Typische Werte für Standard-Positiv-Resist (Novolak AZ-Serie, Fa. Shipley, Kalle, o. ä.) sind:

Resistdicke: 0,5...2 μm

Drehzahl: 2000...7000 /min

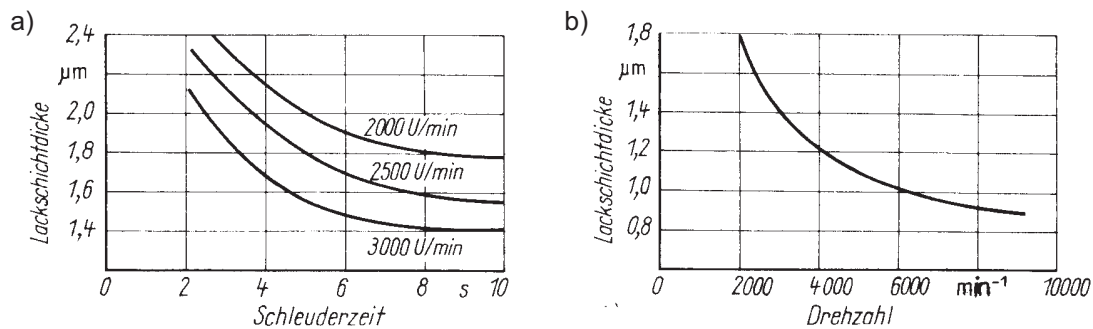


Abbildung 3.15: Resistschichtdicken in Abhängigkeit von der Schleuderzeit (a) und der Schleu-
derdrehzahl (b) (Positiv-Photoresist AZ 1370)

Belichtung

Bei der Belichtung wird die Photomaske, die aus einem Glasträger und darauf aufgebracht-
ten Absorberstrukturen besteht (meistens aus Chrom, Chrommaske), mit UV-Licht im
Wellenlängenbereich zwischen 200 und 450 nm auf die Oberfläche des Photoresists abge-
bildet. Nach Abbildung 3.16 kann zwischen Kontakt-, Abstands- (Proximity-) und Projek-
tionsbelichtung unterschieden werden.

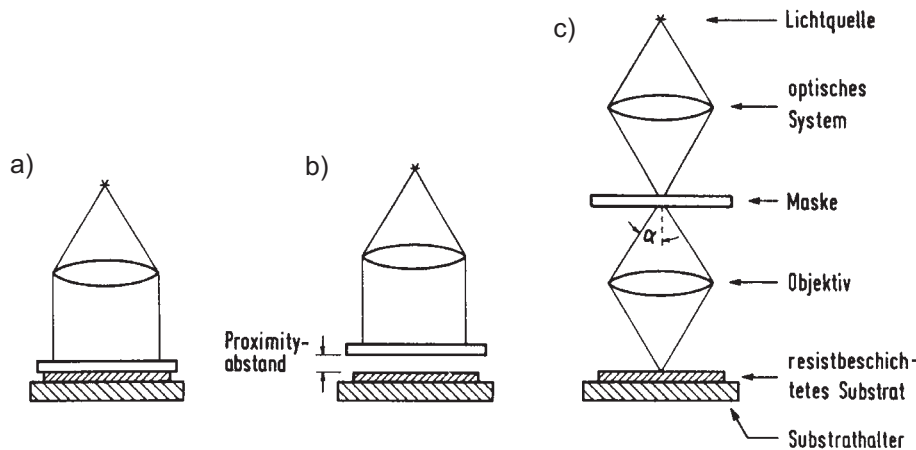


Abbildung 3.16: Belichtungsverfahren [Büttgenbach]

- a) Kontaktbelichtung
- b) Abstandsbelichtung (Proximitybelichtung)
- c) Projektionsbelichtung

In den Masken-Justier- und Belichtungsanlagen (*Mask-Aligner*) werden die Photomaske
und das Substrat, das auf einem Vakuumhalter (*Chuck*) fixiert ist, zueinander parallel
ausgerichtet (Keilfehlerausgleich). Über ein Mikroskop mit zwei Objektiven, deren Ge-
sichtsfelder auf die Randbereiche des Wafers ausgerichtet sind (Splitfield-Mikroskop) wird
die Maske zu bereits auf dem Substrat angebrachten Justiermarken ausgerichtet. Nach der

Justage werden zur Belichtung Maske und Substrat bei der Kontaktbelichtung aufeinandergepresst oder bei der Abstandsbelichtung auf einen definierten Abstand von 10...30 mm gehalten.

Mikromechanische Bauelemente wie z.B. ein Drucksensor nach Abbildung 3.1 werden sowohl auf der Vorder- als auch auf der Rückseite durch Photolithographieschritte strukturiert. Dabei muss mindestens bei einem Belichtungsschritt die Photomaske zu bereits vorhandenen Strukturen auf der abgewandten Substratrückseite justiert werden. In einem gängigen Verfahren werden zwei Photomasken zunächst zueinander und anschließend zum Wafer justiert.

Bei der Projektionsbelichtung (Abbildung 3.16 c) sind Maske und Substrat räumlich getrennt und die Maskenstruktur wird optisch auf die Resistschicht abgebildet. Wegen der hohen optischen Anforderungen werden nur Teilfelder vom Belichter ausgeleuchtet und durch präzises Verschieben des Substrats in vielen aufeinander folgenden Belichtungsschritten wird das Substrat mosaikartig belichtet (*Step & Repeat-Verfahren*).

Entwicklung

Nach der Belichtung werden die Substrate entweder in ein Entwicklerbad getaucht oder Entwicklerlösung wird aufgesprüht, wobei die Substrate wie beim Belacken auf einer Vakuumhalterung gehalten und gedreht werden. Bei Positiv-Resist werden die belichteten Bereiche, bei Negativ-Resist die unbelichteten abgelöst. Positiv-Resiste werden im allgemeinen durch umweltfreundliche wässrig-alkalische Entwickler behandelt, wogegen die Entwickler für Negativ-Resiste aus Lösungsmitteln bestehen, so dass eine aufwendigere Absaugung und Entsorgung vorgesehen werden muss. Der Entwicklungsprozess wird durch Spülen in deionisiertem Wasser gestoppt.

Photomaskenherstellung

Photomasken bestehen aus planparallelen Glasplatten, die mit einer lichtabsorbierenden Schicht versehen sind, die die nicht belichteten Bereiche der Mikrostrukturen abschatten. Wegen der mechanischen Beanspruchung beim Kontaktbelichtungsverfahren werden Metallschichten aus Chrom oder Eisenoxid als Absorber benutzt.

Als Substratmaterialien werden Kronglas, Borosilikatglas oder Quarzglas verwendet. Quarzglas besitzt den niedrigsten Ausdehnungskoeffizienten und eine nahezu konstante Transmission auch im tiefen UV-Bereich ($\lambda < 200 \text{ nm}$). Bei Borosilikatglas sinkt die Transmission für $\lambda < 300 \text{ nm}$ stark ab, so dass für Belichtungsanlagen im Bereich von 350 bis 450 nm Wellenlänge (UV 300 und UV 400) aus wirtschaftlichen Gründen Borosilikatglas als Maskensubstrat eingesetzt wird.

Zur Herstellung einer mikrostrukturierten, lichtabsorbierenden Schicht wird das Photomaskensubstrat mit einer Photoresistschicht versehen, die in einem seriell schreibenden Belichtungsverfahren belichtet wird. Die am weitesten verbreiteten Verfahren bilden der optische Pattern-Generator und der Elektronenstrahlschreiber.

3.1.4 Ätzverfahren / Strukturierungsverfahren

Photolithographisch erzeugte Resiststrukturen werden durch Strukturierungs-, d. h. im wesentlichen Ätzverfahren auf die darunterliegende Schicht bzw. in das Substrat übertragen. Abhängig von dem zu ätzenden Material und dem Verfahren zeigt ein Ätzprozess ein isotropes oder anisotropes Verhalten. Isotrop bedeutet, dass der Materialabtrag in allen Richtungen mit gleicher Ätzrate fortschreitet (Abbildung 3.17 a). Als anisotrop bezeichnet man Ätzprozesse, deren Ätzangriff nur senkrecht zur Substratoberfläche erfolgt (Abbildung 3.17 b).

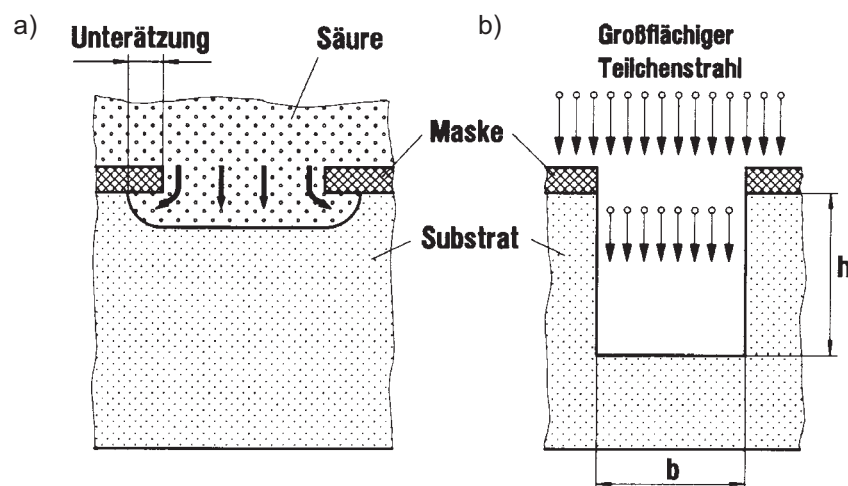


Abbildung 3.17: Querschnitt beim isotropen (a) und anisotropen (b) Ätzprozess

Viele Ätzprozesse erfolgen jedoch isotrop mit einem anisotropen Anteil. Darüberhinaus erfolgt beim Ätzen einer dünnen Schicht noch eine partielle Überätzung in das Substrat, da jedes Material eine spezifische Ätzrate aufweist. In Abbildung 3.18 ist ein verallgemeinerter Querschnitt einer geätzten Schichtstruktur zur Definition verschiedener Kenngrößen gezeigt.

$$\text{Ätzrate } r = \frac{\Delta d}{t} \quad [\text{nm/min; } \mu\text{m/h}] \quad (3.9)$$

mit Δd als Ätzabtrag senkrecht zur Substratoberfläche.

$$\text{Selektivität } S = \frac{r_1}{r_2} \quad (3.10)$$

Die Ätzselektivität S ist das Verhältnis der Ätzraten r_1 und r_2 von zwei Materialien, z. B. der zu strukturierenden Schicht und der Ätzmaske oder dem darunterliegenden Substrat.

In Abbildung 3.18 ist nach dem Durchätzen der Schicht eine Anätzung des Substrats mit der Tiefe AA' erfolgt, die bei hoher Selektivität ($S \rightarrow \infty$) minimiert werden kann. Es liegt somit eine Überätzung der abzutragenden Schicht vor.

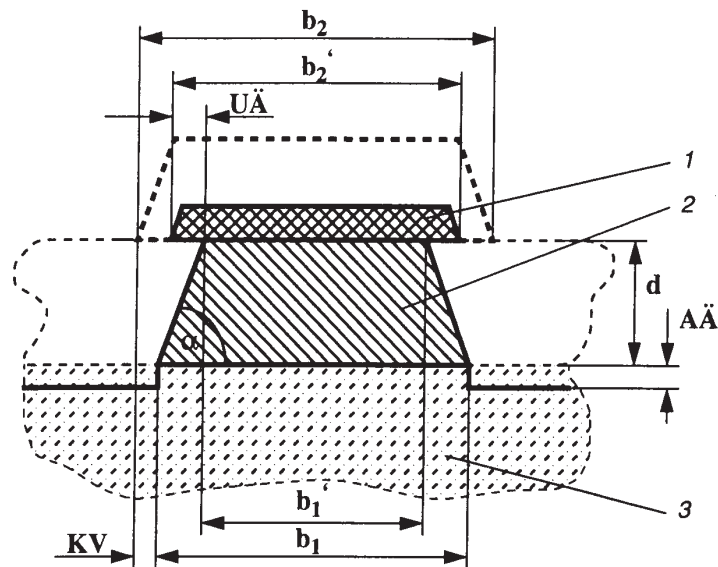


Abbildung 3.18: Querschnitt einer geätzten Struktur [Gerlach]

1 Lackmaske, 2 zu ätzende Struktur, 3 Unterlageschicht

α Böschungswinkel, $U\ddot{A}$ Unterätzung, $A\ddot{A}$ Anätzung des Substrats oder Unterlageschicht, KV Kantenverschiebung, d Schichtdicke

b_1 Stegbreite an der Unterkante, b'_1 Stegbreite an der Oberkante

b_2 maximale Lackstegbreite vor dem Ätzen, b'_2 maximale Lackstegbreite nach dem Ätzen

Bei einem anisotropen Ätzprozess ist die Ätzrate richtungsabhängig; dies wird beschrieben durch die

$$\text{Anisotropie} \quad A = 1 - \frac{r_{\text{lateral}}}{r_{\text{vertikal}}} \quad (3.11)$$

Für einen isotropen Ätzprozess gilt $A = 0$, für einen anisotropen Prozess $0 < A \leq 1$, wobei für $A = 1$ keine Unterätzung der Maskierungsschicht auftritt (Abbildung 3.18).

Das Verhältnis von Ätztiefe h und der Strukturbreite b wird bezeichnet als:

$$\boxed{\text{Aspektverhältnis} \quad AR = \frac{h}{b}} \quad (3.12)$$

Neben dem Grad der Anisotropie können die Ätzprozesse in nasschemische und Trockenätzverfahren unterschieden werden.

Nasschemisches Ätzen

Das nasschemische Ätzen von dünnen Schichten oder in das Substratmaterial erfolgt durch Eintauchen in ein temperiertes Ätzbad (Tauchätzen) oder durch Besprühen mit der Ätzlösung (Sprühätzen). Im Allgemeinen erfolgt der Ätzvorgang isotrop mit Unterätzungen der

Maskierungsschicht und die Selektivität ist dafür meistens sehr hoch. Tabelle 3.7 zeigt einige Beispiele von Ätzlösungen für dünne Schichten.

Tabelle 3.7: Ätzlösungen zum nasschemische Strukturieren von dünnen Schichten

Zusammensetzung		Material	Ätzrate	Bemerkungen
HF (1 %)		SiO ₂	8 nm/min bei 23 °C	
NH ₄ F (40 %)	4,1 l	SiO ₂	0,1 µm/min bei 23 °C	Gepufferte HF
HF (50 %)	47 l			
H ₂ O	1 l			
H ₃ PO ₄ (85 %)		Si ₃ N ₄	3 nm/min bei 160–180 °C	selektiv zu SiO ₂
H ₃ PO ₄ (85 %)	42 l	Al	200 nm/min bei 30 °C	selektiv zu SiO ₂
CH ₃ COOH (100 %)	3,5 l			
HNO ₃ (65 %)	0,8 l			
H ₂ O	5,2 l			
KJ	4 g	Au	0,5 – 1 µm/min	
J ₂	1 g			
H ₂ O	40 ml			
HNO ₃ (konz.)	0,5 l	Polysilizium	0,3 µm/min bei 23 °C	
HF (40 %)	15 ml			
H ₂ O	0,2 l			

Trockenätzverfahren

Mit steigenden Anforderungen an die Integrationsdichte werden in der Mikroelektronik nasschemische Ätzverfahren verdrängt und durch plasmaunterstützte Ätzverfahren, sogenannten Trockenätzverfahren, ersetzt. Hier wird das Material durch ein gasförmiges Ätzmedium abgetragen, wobei der Ätzangriff der in einem Plasma erzeugten Teilchen chemisch oder physikalisch oder auch physikalisch-chemisch wirken kann. Als ätzaktive Teilchen dienen:

- inerte Ionen (z. B. Ar⁺)
- reaktive Ionen (z. B. CF₃⁺)
- reaktive Radikale (z. B. F⁺, O⁺, CF₃⁺)

Durch Wahl geeigneter Verfahrensvarianten lassen sich Ätzgeschwindigkeit, Selektivität und Anisotropie in einem weiten Bereich variieren und anpassen. Abbildung 3.19 zeigt eine Übersicht der wichtigsten Typen von Trockenätzenanlagen.

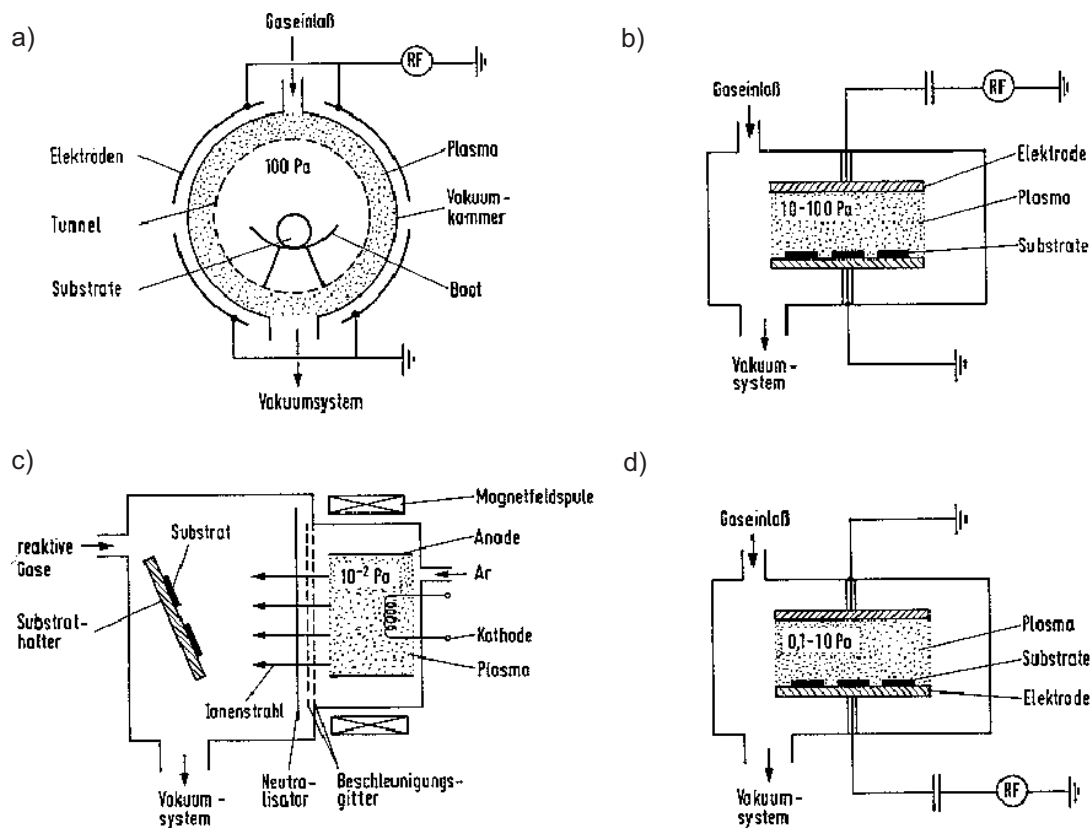


Abbildung 3.19: Prinzipieller Aufbau von Trockenätzanlagen [Büttgenbach]

- a) Barrel-Reaktor zum Plasmaätzen
- b) Planarer Plasmaätzreaktor
- c) Ionenstrahlätzanlage
- d) Reaktor zum reaktiven Ionenätzen

Plasmaätzen

Bei Plasmaätzprozessen werden reaktive Gase eingesetzt, die in einem Plasma angeregt werden, so dass neben Ionen und Elektronen auch angeregte Atome oder Moleküle (d. h. Radikale) entstehen, die mit dem abzutragenden Material eine chemische Ätzreaktion ausführen. Als Ätzgase werden fluor- oder chlorhaltige Verbindungen eingesetzt, wogegen reiner Sauerstoff zum Strippen von Photoresist dient. Plasmaätzen erfolgt bei relativ hohen Gasdrücken von 10...100 Pa (Feinvakuum), so dass eine geringe Ionenenergie (< 100 eV) vorliegt. Plasma-Ätzer sind als Barrel- oder Parallelplattenreaktoren ausgeführt (Abbildung 3.19 a und b).

Reaktives Ionenätzen RIE (Reactive Ion Etching)

Beim reaktiven Ionenätzen liegen die Wafer nach Abbildung 3.19 d auf der Kathode, und es herrscht ein niedriger Arbeitsdruck von 1...10 Pa, so dass die Ionenenergie mit einigen

100 eV hoch ist. Dadurch erfolgt sowohl eine chemische Ätzwirkung als auch ein physikalischer Abtragungseffekt durch Ionenbeschuss. Somit liefert der RIE-Prozess eine hohe Anisotropie bei hoher Ätzrate.

Deep Reactive Ion Etching (DRIE)

Das reaktive Ionenätzverfahren ist seit etwa 1990 zu einem Hochleistungs-Trockenätzprozess weiterentwickelt worden, das das Ätzen von schmalen, aber tiefen Gräben in Silizium mit hohen Ätzraten ermöglicht. Als Ätzmaskierung dienen SiO_2 - oder auch Photore-sistschichten. Das Erzielen von großen Ätztiefen bei gleichzeitig hohem Aspektverhältnis ($> 10 : 1$) beruht auf einem reaktiven Ionenätzprozess mit chlorhaltigen Ätzgasen, wobei gleichzeitig die geätzten Seitenwände durch einen begleitenden CVD-Prozess passiviert werden (Siliziumoxid- oder Polymerschicht), so dass senkrechte Ätzkanten entstehen (Abbildung 3.20). Dieser Prozess wird auch als Advanced Silicon Etch ASE bezeichnet (Fa. STS Surface Technology Systems, GB).

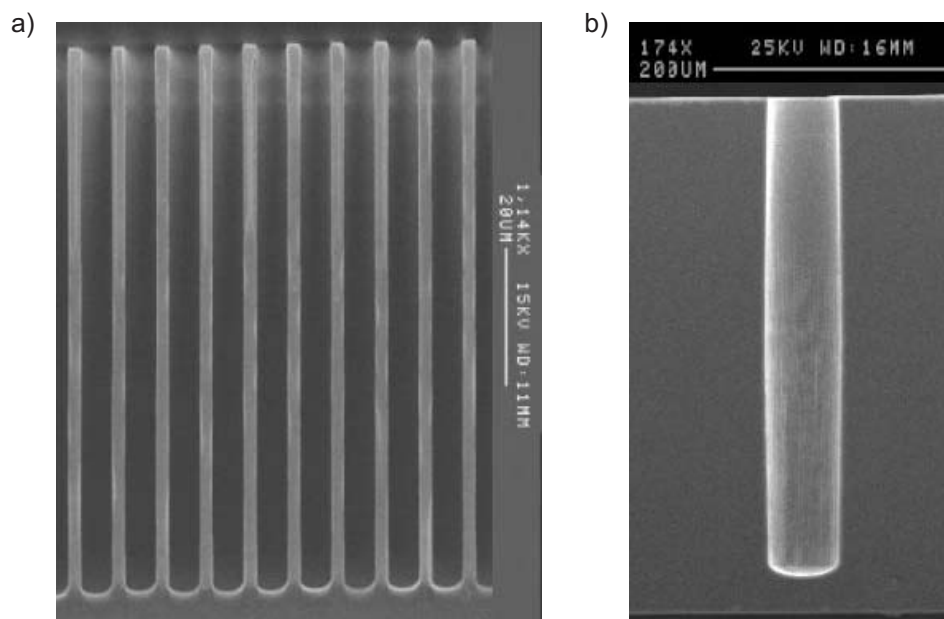


Abbildung 3.20: Ätzstrukturen in Silizium hergestellt durch DRIE mit Anisotropie $> 0,99$

- a) Gräben in Silizium: Tiefe $80 \mu\text{m}$, Breite $4,5 \mu\text{m}$, Wandstärke $2 \mu\text{m}$, Aspektverhältnis $18 : 1$, Ätzrate $> 2,2 \mu\text{m}/\text{min}$
- b) Loch in Silizium: Tiefe $350 \mu\text{m}$, Ätzrate $2,8 \mu\text{m}/\text{min}$

Ionenstrahlätzen (Ion Milling, Ion Beam Etching IBE)

Sputterätzen und Ionenstrahlätzen sind physikalisch wirkende Ätzverfahren, indem eine Kathodenzerstäubung des zu ätzenden Materials unter Einsatz von inerten Gasen wie

Ar erfolgt. Im Gegensatz zum Sputterätzen geschieht beim Ionenstrahlätzen die Ionen-Erzeugung, -Beschleunigung und -Fokussierung außerhalb des Targetraumes, siehe Abbildung 3.19 c. Der Materialabtrag erfolgt anisotrop, jedoch ist die Ätzrate bedeutend niedriger als beim reaktiven Ionenätzen. Unter Verwendung von chemisch reaktiven Gasen entsteht ein reaktiver Ionenstrahlätzprozess (*Reactive Ion Beam Etching RIBE*), der sowohl physikalisch als auch chemisch wirkt.

Zusammenfassung Ätzverfahren

Die Ätzverfahren zur Strukturierung von Mikrostrukturen sind sehr vielfältig und bieten je nach den betrachteten Kriterien Ätzrate, Ätzprofil (Anisotropie), Selektivität etc. Vor- und Nachteile. Zur Übersicht sind in Tabelle 3.8 die wesentlichen Eigenschaften zusammengefasst.

Tabelle 3.8: Zusammenfassung Ätzverfahren

Ätzprozess	Ätzmechanismus	Ätzrate	Ätzprofil	Selektivität	Bemerkung
Naßätzen (Tauchbad)	chemisch	mittel bis hoch	isotrop	hoch	Selektivität je nach Materialauswahl optimierbar
Naßätzen (Sprühen)	chemisch	hoch	isotrop, schwach anisotrop	hoch	Selektivität je nach Materialauswahl optimierbar
Plasmaätzen	chemisch	mittel	isotrop	mittel	Druckbereich: 10...100 Pa Ionenenergie niedrig
Ionenstrahlätzen	physikalisch	niedrig	anisotrop	niedrig	Hoch-/Ultrahochvakuum (0,01 Pa), Ionenenergie hoch (> 500 eV)
Reaktives Ionenätzen RIE	physikalisch-chemisch	mittel bis hoch	anisotrop mit isotroper Komponente	mittel bis hoch	Druckbereich: 1...10 Pa Ionenenergie hoch (> 100 eV)
Reaktives Ionenätzen DRIE	physikalisch-chemisch	sehr hoch	anisotrop	mittel bis hoch	Hohes Aspektverhältnis (> 10 : 1) durch Seitenwandpassivierung

Abhebetechnik (Lift-Off-Technik)

Die Abhebetechnik ist ein Strukturierungsverfahren für dünne Schichten, bei dem kein Ätzverfahren eingesetzt wird. Auf eine entwickelte Photoresiststruktur wird die gewünschte Schicht durch PVD-Verfahren (vorzugsweise Aufdampfen oder auch Sputtern) abgeschieden. Anschließend wird der Photoresist durch ein Lösungsmittel, ggf. im Ultraschallbad,

entfernt, so dass auf den ursprünglich Photoresist-freien Flächen die abgeschiedene Schicht zurückbleibt.

Der Abhebeprozess kann nur bei nicht bedeckten Flanken der Photoresiststruktur erfolgen, um dem Lösungsmittel eine Angriffsfläche zu bieten. Dies wird durch hinterschnittene Lackstrukturanten ermöglicht. Ferner muss die zu strukturierende Schicht dünner als die Resistmaske sein. Im Gegensatz zur Strukturierung durch Ätzverfahren stellt die Abhebetechnik ein Additiv-Verfahren dar.

3.2 Silizium-Mikromechanik

Die Herstellung von mikrotechnischen Bauteilen und Systemen der Mechanik wird als *Mikromechanik* bezeichnet. Der Werkstoff Silizium besitzt besondere mechanische Eigenschaften, so dass auf der Substratbasis Silizium eine Vielzahl von Funktionselementen der Mikromechanik realisiert werden. Zur Unterscheidung gegenüber anderen Materialsystemen sprechen wir von der *Silizium-Mikromechanik*, die in 2 unterschiedliche Technologien eingeteilt werden kann:

- Silizium-Bulk-Mikromechanik (BMM)
Heraus- bzw. Freiätzen von mechanischen Strukturen aus monokristallinem Silizium (Substrativtechnik)
- Silizium-Oberflächen-Mikromechanik (OMM)
Aufbringen von mechanischen Strukturen auf der Substratoberfläche (Additivtechnik)

3.2.1 Silizium-Bulk-Mikromechanik

Silizium-Einkristalle zeigen bei basischen Ätzlösungen ein richtungsabhängiges Ätzverhalten, d.h. die Ätzrate ist in Richtung verschiedener Kristallachsen stark unterschiedlich (Abbildung 3.21). Kalium-Hydroxid-Lösungen KOH weisen entlang der Hauptkristallachsen die höchste Ätzrate in $\langle 110 \rangle$ -Richtung, gefolgt von der $\langle 100 \rangle$ -Richtung auf, wogegen in $\langle 111 \rangle$ -Richtung die Ätzrate um den Faktor 100 bis 400 geringer ist (Kristallachsen als Flächennormalen der Kristallebenen). Somit wirken (111)-Kristallebenen als ätzstoppende Flächen.

Wird ein (100)-Wafer mit einer Ätzmaskierung mit rechteckiger Öffnung versehen (Abbildung 3.22 a und b), erfolgt der Ätzangriff mit maximaler Ätzrate in senkrechter Richtung in das Substrat. An den zur Waferoberfläche geneigten (111)-Flächen stoppt der Ätzvorgang, so dass der gesamte Ätzvorgang nach Erreichen einer V-Nutstruktur (Abbildung 3.22 a) gestoppt wird, da keine Oberfläche in $\langle 100 \rangle$ -Richtung mehr zur Verfügung steht. Ein vorzeitiges Beenden des Ätzprozesses liefert wannenförmige Ätzstrukturen mit horizontaler Bodenfläche (Abbildung 3.22 b). Bei nahezu vollständigem Durchätzen des Wafers kann auf diese Weise eine Membran hergestellt werden.

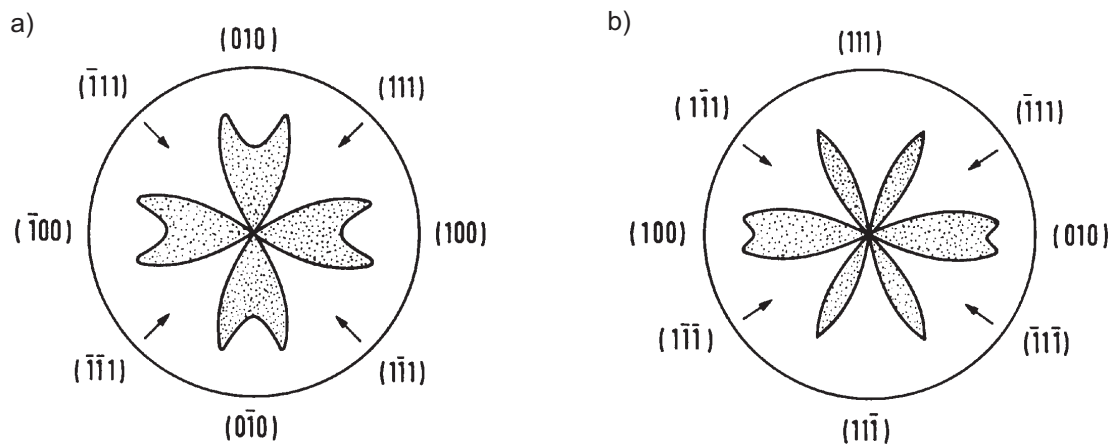


Abbildung 3.21: Schematische Darstellung der Richtungsabhängigkeit der lateralen Ätzrate auf (100)-Wafern (a) und (111)-Wafern (b) für 50 % KOH-Ätzlösung bei 78 °C [Büttgenbach]

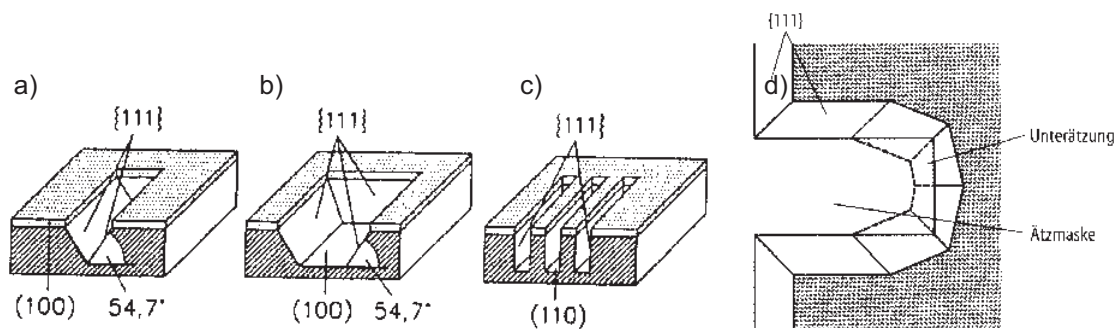


Abbildung 3.22: Anisotrope Ätzstrukturen in Silizium
a) (100)-Wafer bei vollständiger anisotroper Ätzung
b) (100)-Wafer bei unvollständiger anisotroper Ätzung
c) (110)-Wafer mit senkrechten Grabenseitenwänden
d) Unterätzung von konvexen Ecken beim anisotropen Ätzen

Der Neigungswinkel α der Ätzstoppplächen ergibt sich aus der Neigung der raumdiagonalen (111)-Ebene in Abbildung 2.2 gegenüber der (100)-Oberfläche der Elementarzellen nach (2.2) zu:

$$\alpha = \arctan \sqrt{2} = 54,74^\circ$$

Bei (110)-Wafern, deren Scheibenoberfläche in $\langle 110 \rangle$ -Richtung weist, stehen (111)-Ebenen aufgrund der Symmetrien nach Abbildung 2.2 und Abbildung 3.21 b entlang einer Richtung senkrecht zur Waferoberfläche, so dass Gräben mit senkrechten Seitenwänden nach Abbildung 3.22 c herstellbar sind. An den Stirnseiten der Gräben bilden sich jedoch keine rechtwinkligen und senkrechten Ätzstoppplächen, da nach Abbildung 3.21 b für die (111)-Flächen keine 4-zählige Symmetrie besteht.

Die Ätzung von Strukturen mit konvexen Außenecken in der Ätzmaskierung (Abbildung 3.22 d) führt zu einer Unterätzung, die erst bei Erreichen der nächsten durchgängigen (111)-Ebene endet, so dass eine freitragende Zungenstruktur aus dem Maskierungsmaterial entsteht. Dieser Mechanismus wird gezielt zum Herstellen freitragender Zungen, Federn oder Brückenstrukturen eingesetzt.

Die Ätzraten von KOH-Lösungen in Silizium hängen neben der Kristallrichtung nach Abbildung 3.21 von den Prozessparametern Temperatur und Konzentration ab (Abbildung 3.23). Bei höherer Temperatur (80 °C) lassen sich höhere Ätzraten erzielen, jedoch fällt die Ätzrate mit steigender KOH-Konzentration stark ab. Die höchsten Ätzraten lassen sich bei 80 °C und 20 % KOH mit ca. 80 mm/h erzielen, jedoch steigen die Rauigkeiten der geätzten (111)-Flächen bei niedrigen KOH-Konzentrationen an, so dass meistens KOH-Konzentrationen um 40 % mit Ätzraten von ca. 60...70 mm/h bei 80 °C verwendet werden. Das Durchätzen von Wafern mit einer Dicke von 525 μm dauert somit länger als acht Stunden.

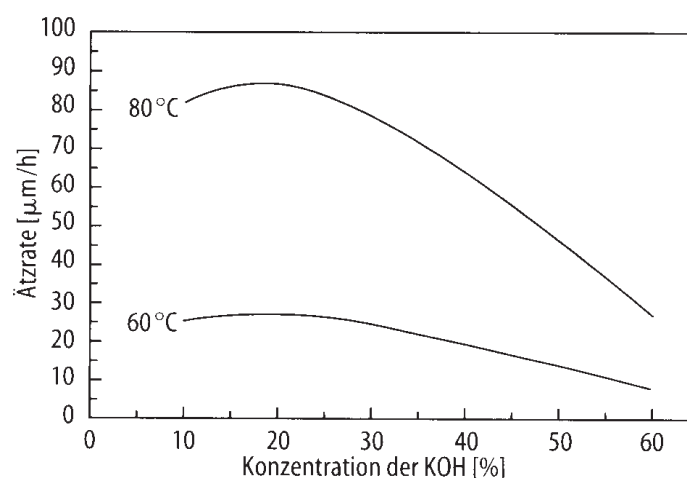


Abbildung 3.23: Ätzrate von KOH in (100)-Silizium als Funktion der KOH-Konzentration bei 60 °C und 80 °C [Obermeier]

Als Maskierungsmaterial zum anisotropen KOH-Ätzen werden Si_3N_4 - oder SiO_2 -Schichten eingesetzt. Si_3N_4 -Schichten, abgeschieden durch LPCVD, werden nahezu gar nicht von KOH-Lösungen angegriffen, so dass Schichtdicken von 200 nm eine vollständige Durchätzung überstehen. Die Ätzraten von SiO_2 in KOH liegen deutlich höher und hängen stark von der KOH-Konzentration ab.

Elektrochemischer Ätzstopp

Das anisotrope Ätzen mit KOH-Lösungen in (100)-Silizium ermöglicht die Herstellung von hochpräzisen Formteilen wie prismatischen Führungen, z. B. Lagerungen für Kugellinsen oder Glasfasern, Wannenstrukturen oder freitragenden Zungen bzw. Membranen aus Maskierungsmaterial. Das Ätzen von Membranen aus Silizium mit einer definierten Dicke bereitet allerdings Schwierigkeiten:

Silizium-Wafer mit produktionsbedingt schwankender Dicke werden bis auf die gewünschte Membrandicke fast vollständig von der Rückseite her durchgeätzt. Dieses Verfahren wäre bei konstant einhaltbarer Ätzrate nur für dicke Membranen ($> 50 \mu\text{m}$) bei sehr eng tolerierter Waferdicke $< \pm 5 \mu\text{m}$ anwendbar.

Die Lösung des Problems erfolgt durch das Aufbringen einer dotierten Silizium-Schicht auf der Waoberfläche, die bei einer rückseitigen Ätzung an ihrer Grenzfläche zum Substrat einen Ätzstopp auf Grund ihrer Materialeigenschaften liefert (vgl. Drucksensor in Abbildung 3.1). Bei einer hohen Selektivität der Ätzraten vom Substrat gegenüber der Membranschicht ist die Membrandicke nur durch die ursprüngliche Dicke der abgeschiedenen Schicht bestimmt. Die Membranschichten können durch monokristalline Schichtabscheidung, d. h. Epitaxie, oder Ionenimplantation aber auch durch Diffusion hergestellt werden. Für einen Ätzstopp stehen zwei Verfahren zur Verfügung:

- Ätzstopp an Schichten mit hoher Bor-Dotierung
- Elektrochemischer Ätzstopp am pn-Übergang

Bei (100)- bzw. (110)-Silizium nimmt die Ätzrate eines organischen Ätzmittels EDP bei hohen Bor-Dotierungen oberhalb von $3 \cdot 10^{19}/\text{cm}^3$ stark ab, so dass nach dem Durchätzen eines Wafers der Ätzvorgang an der Grenzfläche zur Bor-dotierten Schicht stoppt. Allerdings bilden hochdotierte Schichten mit $10^{20}/\text{cm}^3$ entartete Halbleiter und stehen wegen der kleineren Atomradien von Bor unter hoher Zugspannung, so dass diese Technik heute nur noch in Ausnahmefällen angewendet wird.

Beim elektrochemischen Ätzverfahren wird auf einem p-dotierten Wafer eine n-dotierte Schicht in der gewünschten Membrandicke aufgebracht, so dass an der Grenzfläche ein pn-Übergang vorliegt. In einem elektrochemischen Ätzbad nach Abbildung 3.24 wird die n-dotierte Schicht gegenüber einer Pt-Gegenelektrode im Bad mit einer positiven Spannung von 0,6...1 V versehen, so dass der pn-Übergang in Sperrichtung vorgespannt ist. Solange die Ätzlösung nur das p-dotierte Substrat auf der Waferrückseite benetzt, besteht kein

Potentialunterschied zwischen Silizium und der KOH-Lösung und der Ätzvorgang erfolgt in $\langle 100 \rangle$ -Richtung mit Ätzstopp an den schrägen (111)-Ebenen.

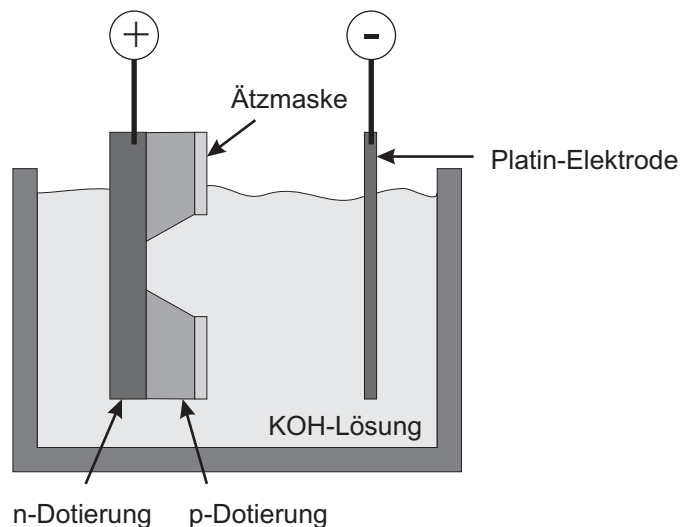


Abbildung 3.24: Elektrochemisches Ätzbad mit Ätzstopp an einem pn-Übergang

Sobald der pn-Übergang erreicht wird, ändern sich die Potentialverhältnisse, da die positiv vorgespannte n-dotierte Schicht mit der KOH-Lösung in Berührung kommt. Es bildet sich auf der n-dotierten Siliziumoberfläche eine Passivierungsschicht, die den Ätzprozess zum Stillstand bringt. Heutzutage hat sich die elektrochemische Ätzstopptechnik bei der Serienproduktion von Drucksensoren durchgesetzt.

Waferverbindungsverfahren

Bauelemente der Mikromechanik bestehen oft aus komplizierten Aufbauten, die aus mehreren Substraten ohne Fügspalt zusammengesetzt werden müssen, wenn z. B. bewegliche Teile innerhalb von Hohlräumen angeordnet sind. Ein Beschleunigungssensor mit einer beweglichen seismischen Masse, die zwischen zwei Messelektroden an geätzten Federbeinen aufgehängt ist und somit einen Differentialkondensator bildet, ist ein Beispiel einer Verbundstruktur (Abbildung 3.25). Zur besseren elektrischen Isolation ist es zweckmäßig, die Messelektroden auf Glassubstraten herzustellen und diese fügspaltfrei mit dem Siliziumwafer mit den Federstrukturen zu verbinden.

Um nicht jedes einzelne Bauteil aus drei Chips justieren und fügen zu müssen, werden sowohl die Glaswafer als auch die Silizium-Wafer für sich prozessiert, im ganzen zu einem Waferverbund gefügt und zum Schluss erst vereinzelt. Ein weitverbreitetes Verbindungsverfahren von Silizium- und Glaswafern ist das feldunterstützte Bonden oder Anodische Bonden (*anodic bonding*) nach Abbildung 3.26. Nach der Justage des Glaswafers zum Silizium-Wafer werden beide Wafer erwärmt ($300\ldots 450\text{ }^{\circ}\text{C}$) und eine Hochspannung $300\ldots 1000\text{ V}$ wird angelegt. Durch die Erwärmung sind Natrium-Ionen Na^+ im Glas frei beweglich und

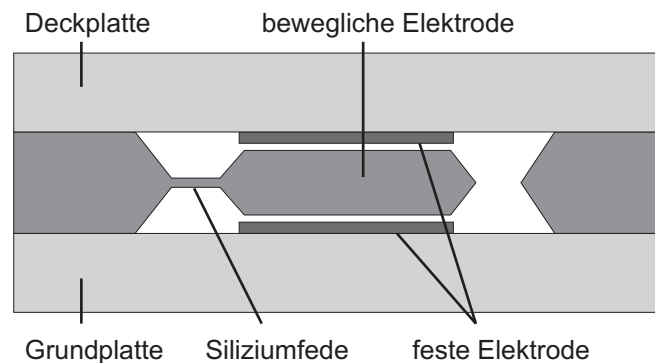


Abbildung 3.25: Beschleunigungssensor mit geätzter seismischer Masse

werden durch die hohe Feldstärke von der Glasoberfläche fort in das Substratinnere gezogen, so dass sich eine Raumladungszone an der Glasoberfläche bildet. Durch das Erwärmen ist das Glassubstrat schwach leitend, so dass die gesamte elektrische Spannung über der einige μm dicken Raumladungszone abfällt.

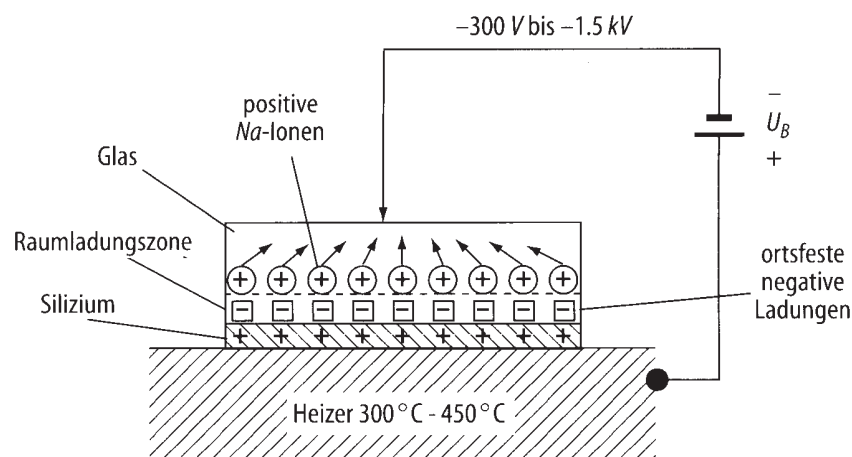


Abbildung 3.26: Anodisches Bonden von Silizium und Glas; Schematische Anordnung

Dadurch entstehen sehr hohe elektrostatische Kräfte, die die Silizium- und Glasoberfläche auf atomare Abstände zusammenpressen, so dass sich chemische Bindungen durch Sauerstoffbrücken in Form von Si-O-Si zwischen der Silizium-Oberfläche und der Glasmatrix bilden. Diese Bindungen liefern eine stoffschlüssige Verbindung, die bei Belastungstests zum Brechen der Grundsubstrate führt. Als bondbare Gläser werden Borosilikatgläser eingesetzt, deren thermischer Ausdehnungskoeffizient an Silizium ($\alpha = 2,3 \cdot 10^{-6}/\text{K}$) angepasst ist, wie Corning #7740 (Pyrex) oder DESAG Borofloat.

3.2.2 Oberflächen-Mikromechanik

Bei vielen Bauelementen der Mikromechanik besteht das eigentliche mechanisch bewegliche Teil aus flachen Feder- oder Membranstrukturen, die parallel zur Substratoberfläche angeordnet sind (vgl. Abbildung 3.1). Zur Freilegung dieser Strukturen muss jedoch der gesamte Wafer von der Rückseite her durchgeätzt werden. Ferner werden für die schrägen Flanken der (111)-Ebenen erhebliche Chipflächen belegt, die nicht zur Funktion beitragen und damit das Bauelement durch eine (unnötig) vergrößerte Chipfläche verteuern. Bei einer Waferdicke h beträgt die auf die Waferoberfläche projizierte Böschungsbreite $b = h/\sqrt{2}$, bei $525\text{ }\mu\text{m}$ Waferdicke ergibt das $370\text{ }\mu\text{m}$.

Somit bestehen die Nachteile der Bulk-Mikromechanik in:

- langen Ätzzeiten für die Rückseitenätzung
- vergrößerter Chipfläche durch Wannenböschungen

Seit etwa 1990 hat sich die Oberflächen-Mikromechanik aus der CMOS-Technologie entwickelt, die die Herstellung freitragender Strukturen auf der Wafervorderseite ermöglicht. Dazu werden nach Abbildung 3.27 verschiedene Funktionsschichten nacheinander abgeschieden und strukturiert, wobei der spätere Freiraum für die beweglichen Strukturen durch einen Platzhalter, der sog. Opferschicht (*sacrificial layer*), ausgefüllt wird, die am Schluss durch Unterätzen entfernt wird. Die beweglichen Strukturen bestehen meistens aus polykristallinem Silizium (Poly-Silizium, abgeschieden durch CVD). Diese Technologie wird inzwischen vielfältig für Mikrosensoren zur Druck-, Beschleunigungs- oder Drehratenmessung eingesetzt.

Abbildung 3.28 zeigt einen Beschleunigungssensor mit einer horizontal beweglichen Schwingmasse, deren Auslenkung durch kammförmige Messelektroden kapazitiv gemessen wird. Gleichzeitig sind auch kapazitive Kammelektrodenaktoren integriert, die zur Kalibration bzw. zum Selbsttest dienen.

Die Oberflächen-Mikromechanik weist verschiedene Vor- und Nachteile auf:

- + Beliebige Gestaltungsfreiheit unabhängig von Kristallachsen
- + Platzsparende Integration mechanischer Elemente durch enge Arbeitsspalte ($0,5 \dots 5\text{ }\mu\text{m}$)
- + Monolithische Integration mit der CMOS-Technologie möglich
- Mechanische Strukturen nicht aus monokristallinem Silizium, mechanische Eigenschaften von Poly-Silizium hängen vom CVD-Prozess ab
- Poly-Silizium-Strukturen stehen unter Eigenspannungen
- geringe Schichtdicke der beweglichen Strukturen (max. $1,5\text{ }\mu\text{m}$)

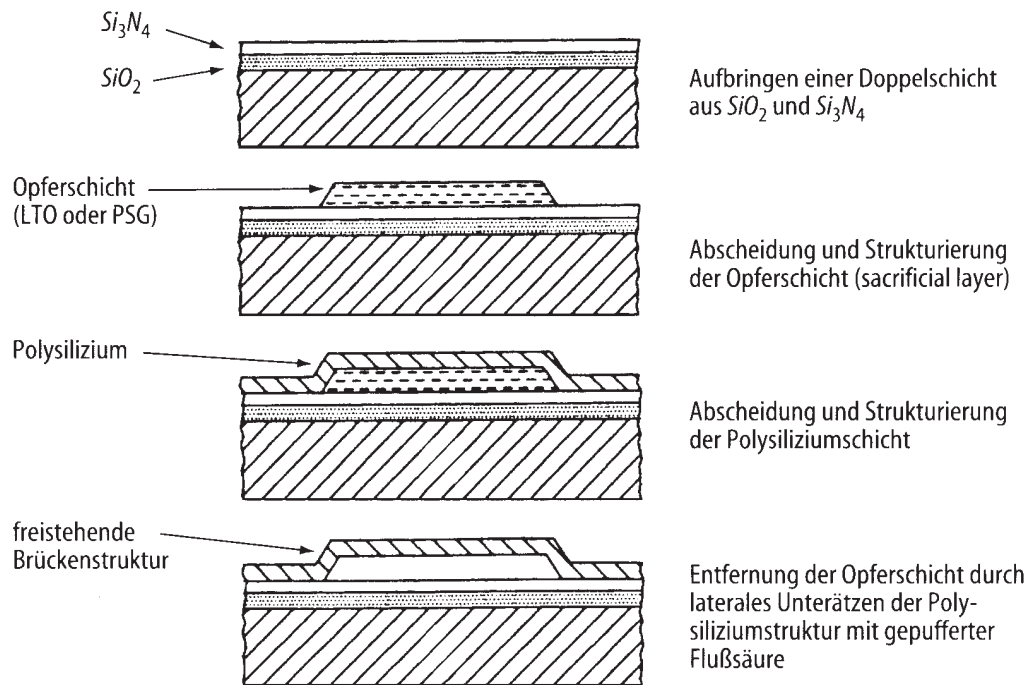


Abbildung 3.27: Prozessablauf zur Herstellung einer Mikrobrücke aus Poly-Silizium in Oberflächen-Mikromechanik [Obermeier]
LTO: Low Temperature Oxide; PSG: Phosphor Silicate Glass

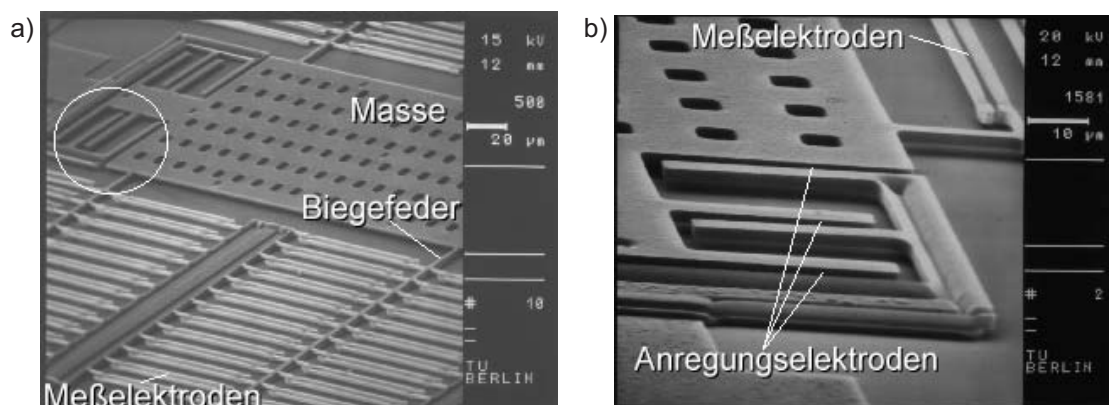


Abbildung 3.28: Beschleunigungssensor in Oberflächen-Mikromechanik [TU Berlin; Fricke, Obermeier]
a) Kammstruktur mit beweglichen Messelektroden und festen Gegenelektroden
b) Ausschnitt mit Anregungselektroden, Elektrodenabstand 2 mm

Aus der Beschränkung der Schichtdicken der mechanischen Strukturen sowie der Opferschichtdicken (d. h. vertikale Spaltbreiten) folgt, dass diese Technologie vorwiegend für Mikrosensoren eingesetzt wird und für Aktoren weitgehend ausscheidet, da die Querschnittsflächen zur Kraftübertragung zu gering sind.

Um den Vorteil der einseitigen Waferbearbeitung der *Oberflächen-Mikromechanik* mit den monokristallinen mechanischen Silizium-Strukturen der *Bulk-Mikromechanik*, die in ihrer Dicke in größerem Umfang variierbar sind, zu verbinden, sind diverse Varianten der Oberflächen-Mikromechanik entwickelt worden. Die Anwendung der tiefen Trockenätztechnik in Silizium DRIE (vgl. Abbildung 3.20) führt zum SCREAM-Prozess (*Single Crystal Reactive Etching and Metallization*) nach Abbildung 3.29. Nach einer anisotropen Tiefenätzung (bis $> 200 \mu\text{m}$ Tiefe) werden die senkrechten Seitenflächen mit SiO_2 beschichtet und anschließend wird durch einen weiteren anisotropen Trockenätzschritt die SiO_2 -Schicht auf den Bodenflächen der Gruben entfernt. In einem letzten isotropen Ätzschritt werden die beweglichen Strukturen am Boden der Ätzgräben vom Substrat freigelegt und damit abgetrennt (Abbildung 3.29 e). Der Vorteil dieser Technologie besteht darin, dass nur ein einziger Photolithographieschritt benötigt wird und keine aufwendigen Abscheideverfahren wie Epitaxie oder langwierige Diffusionsverfahren erforderlich sind.

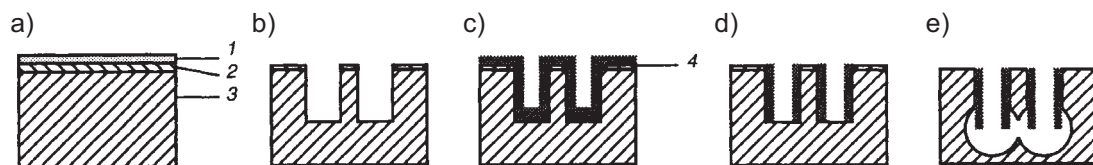


Abbildung 3.29: Oberflächen-Mikromechanik in monokristallinem Silizium durch SCREAM-Prozess (Single Crystal Reactive Etching and Metallization) [Gerlach]

- a) Aufbringen von Maskierungsschicht und Resist
 - b) Strukturierung von Resist und Maskierungsschicht; tiefes Silizium-Ätzen (DRIE)
 - c) Isolatorbeschichtung
 - d) anisotropes Entfernen der Isolatorschicht von den horizontalen Flächen
 - e) Freilegen der Zungen durch isotrope Unterätzung
- 1 Maskierungsschicht; 2 SiO_2 ; 3 Bulk-Silizium; 4 Spacer- SiO_2

3.3 LIGA-Verfahren

Das LIGA-Verfahren (**LIGA** → **L**ithographie, **G**alvanoformung, **A**bformung) beruht auf einer Kombination der Fertigungsschritte Röntgentiefenlithografie mit Synchrotronstrahlung, Galvanoformung und Kunststoffabformung. Abbildung 3.30 zeigt die wichtigsten Fertigungsschritte dieses Verfahrens. Die besonderen Merkmale des Verfahrens bestehen in:

- Photolithographieprozess für dicke Resiststrukturen (bis $1000 \mu\text{m}$) mit hohem Aspektverhältnis (bis $100 : 1$)

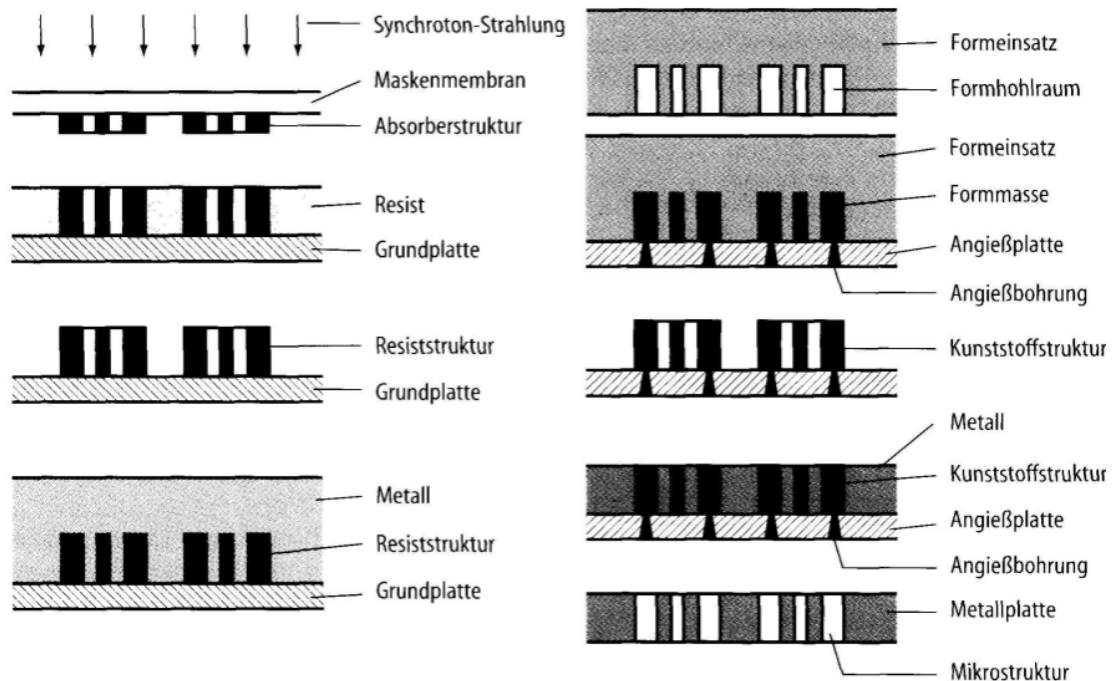


Abbildung 3.30: Fertigungsschritte des LIGA-Verfahrens

- Additivtechnik zur Herstellung von metallischen Mikrostrukturen durch galvanische Beschichtung
 - Schichtdicken variabel (bis $1000\ \mu\text{m}$)
 - Materialvielfalt der Mikrostrukturen
- Abformbarkeit
 - Einsatz der metallischen Mikrostruktur als Präzisionswerkzeug
 - Abformung von Mikrokunststoffteilen durch kostengünstige Replikation (Spritzgießen, Heißprägen)

Beim LIGA-Verfahren erfolgt die Erzeugung der primären Mikrostruktur durch einen Lithographieprozess mit Röntgenstrahlung aus einem Synchrotron oder Speicherring ($\lambda \approx 0,2 \dots 2\ \text{nm}$). Hierbei wird das Absorbermuster einer Röntgenmaske in eine dicke Resistschicht, die sich auf einer metallischen Grundplatte befindet, übertragen. Die Röntgenmaske besteht aus einer dünnen, über einen stabilen Rahmen gespannten Trägermembran aus einem Metall niedriger Ordnungszahl (z. B. Beryllium), auf der sich die Absorberstrukturen (meistens Gold 20 bis $40\ \mu\text{m}$) befinden. Die von der Röntgenstrahlung getroffenen Bereiche der Resiststruktur werden dann in einem Entwicklungsschritt entfernt und man erhält eine erste Mikrostruktur aus Kunststoff. Als Resistmaterial dient meistens PMMA (Polymethylmethacrylat). Die Synchrotronstrahlung besitzt eine hohe Parallelität, so dass

ein hohes Aspektverhältnis von $> 100 : 1$ erreicht wird. Ferner sind große Dicken (bis zu 1 mm!) des Polymermaterials strukturierbar.

Die mikrostrukturierte Polymerstruktur kann bereits als Endprodukt dienen; sie wird jedoch meistens als Mutter für eine galvanische Abformung benutzt. Nach dem Entfernen des Polymers kann das Galvanoformteil z.B. als Spritzgießform zum Herstellen von Kunststoffteilen in Submikrometerpräzision verwendet werden. Abbildung 3.31 zeigt eine Teststruktur aus entwickeltem Röntgenresist.

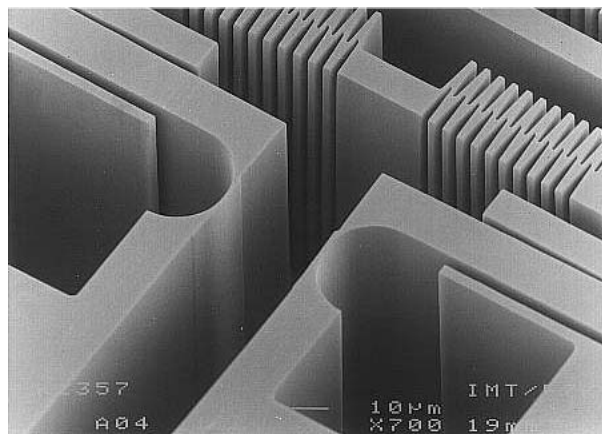


Abbildung 3.31: Teststruktur aus entwickeltem Röntgenresist [FZK, Karlsruhe]

Das LIGA-Verfahren bietet trotz der kostenintensiven Synchrotronbelichtung den Vorteil einer vielfachen Abformung durch Mikrospritzguss. Allerdings bildet die aufwendige Herstellung der Röntgenmasken und die Nutzung von Synchronanlagen der Großforschungseinrichtungen ein Haupthindernis zur breiten Anwendung der Technologie.

LIGA mit UV-Tiefenlithographie

Für viele Anwendungen kann die kostenintensive Synchrotronstrahlung beim LIGA-Verfahren durch eine spezielle UV-Tiefenlithographie ersetzt werden, da ein Aspektverhältnis von $100 : 1$ oft gar nicht benötigt wird. Besondere Negativ-Resiste wie das 1995 von IBM erstmals vorgestellte EPON SU-8 gestatten bei normaler UV-Belichtung (200 bis 400 nm) ein Aspektverhältnis von $> 10 : 1$ der entwickelten Resiststruktur bis zu Schichtdicken von $> 800 \mu\text{m}$. Die Hauptbestandteile eines solchen Resists sind:

- Epoxidharz EPON SU-8
- Lösungsmittel
(bestimmt die Viskosität und damit die Schichtdicke beim Aufschleudern)
- Photoinitiator

Die entwickelten Resiststrukturen entsprechen in ihrer Kantensteilheit der in Abbildung 3.31 gezeigten Qualität, nur dass die minimale Schlitzbreite auf ein Zehntel der Schichtdicke begrenzt ist. Trotz der bisherigen Schwierigkeiten beim Entfernen des Resists (schwer lösbar wegen hoher Vernetzung) ist diese Technologie weltweit sehr stark im Kommen; sie wird auch als LC-LIGA (*Low-Cost-LIGA*) oder „Poor-man’s-LIGA“ bezeichnet.

LIGA-Oberflächen-Mikromechanik

Die Herstellung beweglicher Systeme kann durch eine Kombination der Opferschichttechnik aus der Oberflächen-Mikromechanik mit dem LIGA-Verfahren nach Abbildung 3.32 erfolgen. Auf einem isolierenden Substrat (z. B. Keramik) wird zuerst eine Metallschicht als Verankerung für die später ortsfesten Teile strukturiert. Danach wird eine metallische Opferschicht als Unterlage für die beweglichen Teile strukturiert. Anschließend folgt der LIGA-Prozess mit der Resiststrukturierung und der galvanischen Metallabscheidung (Abbildung 3.32 c und d). Nach der Entfernung des Resists wird durch Unterätzen der beweglichen Strukturen die Opferschicht entfernt. Tabelle 3.9 zeigt typische Materialkombinationen von Opferschichten und Mikrostrukturen. Dieses Verfahren wird sowohl mit der Röntgen- als auch der UV-Tiefenlithographie eingesetzt.

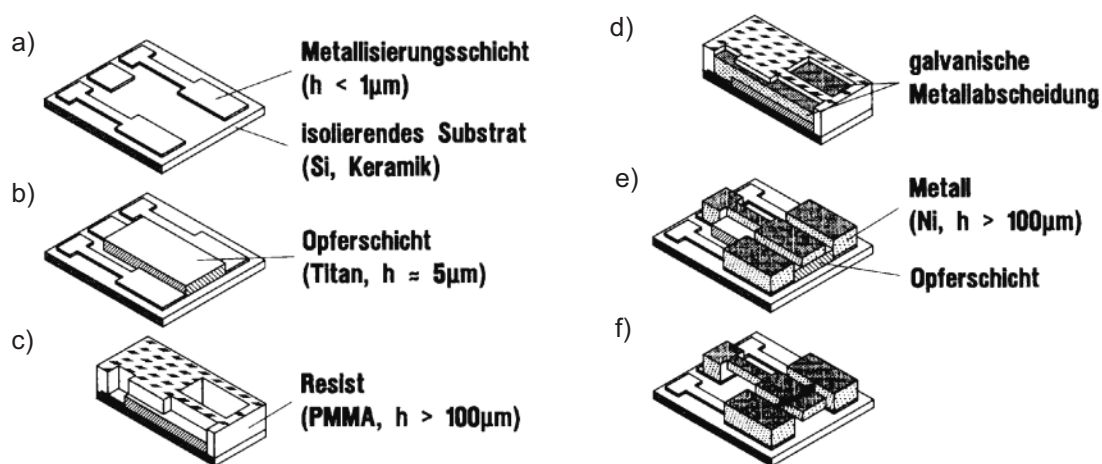


Abbildung 3.32: Prozessfolge bei der Herstellung beweglicher LIGA-Strukturen mit metallischer Opferschicht [Menz]

Tabelle 3.9: Materialkombinationen für Opferschichten

Opferschicht	Material Mikrostruktur	Ätzmedium (Anteile)	Unterätzrate
Cu	Ni	H ₂ O / H ₂ SO ₄ / H ₂ O ₂ 62 / 6,5 / 39	10...15 µm/min
Ti	Ni	HF / HNO ₃ / H ₂ O 160 / 5 / 1740	5...8 µm/min

Ausblick

Zur Herstellung von mikromechanischen Funktionselementen sind seit 1990 neben der Silizium-Bulk-Mikromechanik verschiedene Technologien vorgestellt worden. Eine grobe Übersicht mit der Auswirkung auf Federstrukturen zeigt Abbildung 3.33.

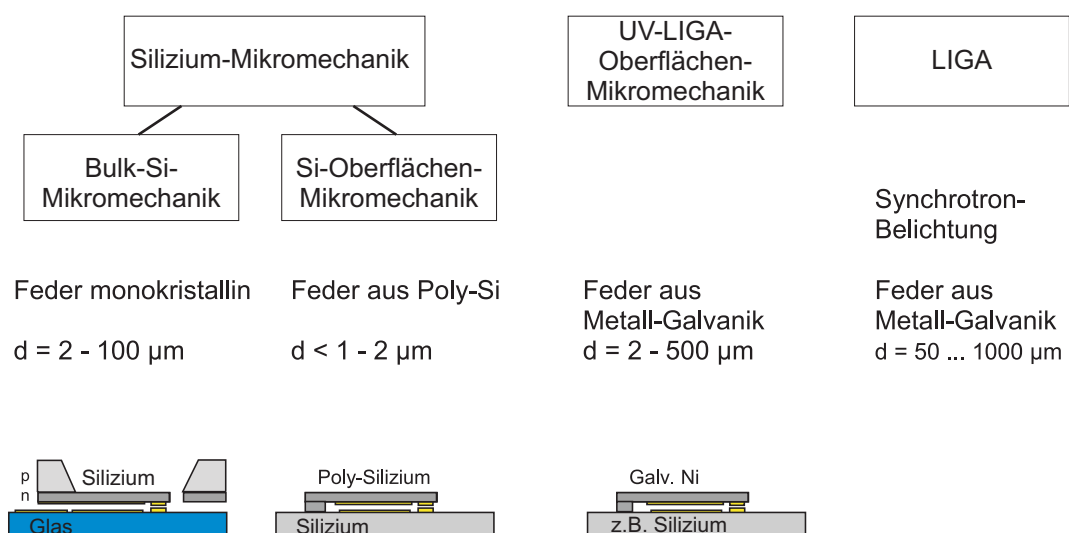


Abbildung 3.33: Übersicht der Herstellungstechnologien für die Mikromechanik

Die Bulk-Mikromechanik in Silizium kann als etabliert angesehen werden. Sie bietet einen großen Gestaltungsspielraum für monokristalline Federstrukturen. Die Oberflächen-Mikromechanik ist auf sehr dünne bewegliche Systeme ($1...2 \mu\text{m}$) beschränkt, bietet aber eine hohe Designvielfalt und die monolithische Integrierbarkeit mit der CMOS-Technologie.

Die LIGA-Oberflächen-Mikromechanik mit UV-Tiefenlithographie besitzt für viele Anwendungen ein hohes Potential, da kostengünstige Substrate wie Keramik, Metall oder Glas mit einer hohen Schichtdicke und einer Materialvielfalt der beweglichen Strukturen kombiniert werden kann.

3.4 Aufbau- und Verbindungstechnik

Bauteile, Komponenten und Subsysteme der Mikrotechnik müssen für ihren Einsatz mit Hilfe verschiedener Technologien in Gehäuse eingebaut oder miteinander auf gemeinsamen Trägern aufgebaut bzw. elektrisch verbunden werden. Dabei stehen als Ziele im Vordergrund:

- Schutz der Mikrostrukturen vor Medien
- Ankopplung an Systemumgebung

Als Zusammenfassung für die Vielzahl an einzelnen Technologien hat sich der Sammelbegriff Aufbau- und Verbindungstechnik (*Packaging*) durchgesetzt. Die Verfahren sind aus der Chipmontage der Mikroelektronik entnommen und an die Anforderungen der Mikrosystemtechnik angepasst worden.

Die Montage von mikroelektronischen Silizium-Chips in Plastikgehäusen besteht aus folgenden Fertigungsschritten, die vollautomatisch ablaufen:

- Vereinzeln der Silizium-Wafer in Chips durch Sägen
Wafer wird auf Haftfolie gehalten, Sägeblattstärke 30 – 50 μm
- Stanzen oder Ätzen von Trägerstreifen (*Leadframe*)
Dicke 0,1 bis 0,25 mm, Material partiell versilbert
- Kleben des Chips auf Leadframe (*Die-Bonden*)
Zuführung der Chips durch Pick & Place
- Aushärten des Klebers (Ofen)
- Drahtbonden
Elektrische Verbindung zwischen Chipkontaktflächen und Anschlusspins des Leadframe herstellen
- Umhüllung mit Pressmasse (*Transfer-Mold*)
Duroplaste auf Epoxidbasis, ca. 175 °C, ca. 90 s
- Aushärten der Pressmasse (Ofen)
- Deflash
Reinigung der Pins von Duroplast-Resten und Anlaufbelägen
- Freistanzen und Biegen der Anschlusspins (*Leads*)
- Galvanisches Verzinnen der Pins
(SnPb 80/20, 5 – 15 μm)
- Freistanzen von Trägerband

- Funktionstest
- Stempeln oder Laserbeschriftung

Der Querschnitt eines Bauelements in einem Plastikflachgehäuse für SMT-Montage (*Surface Mount Technology*) ist in Abbildung 3.34 gezeigt.

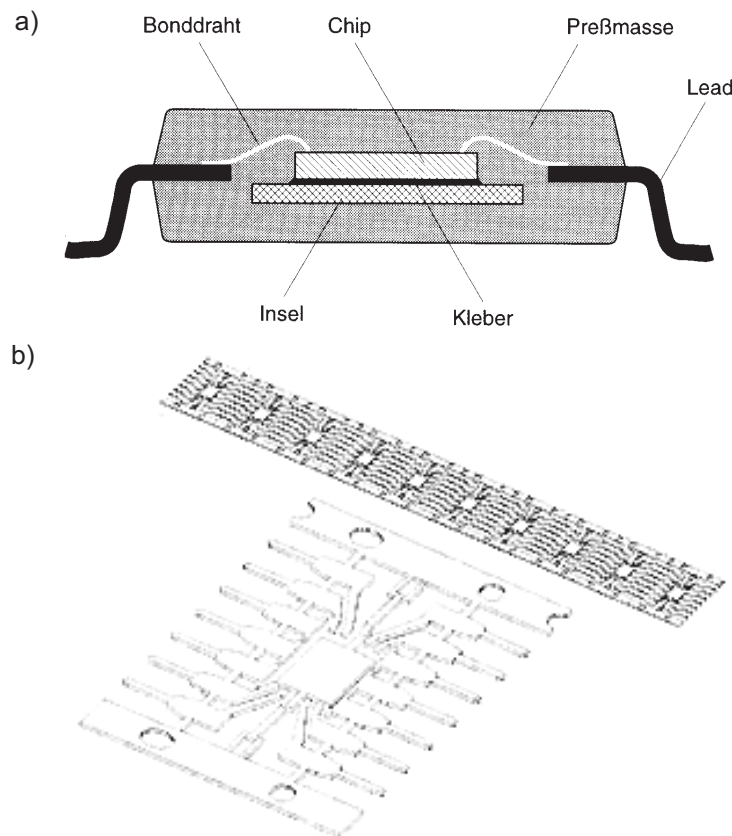


Abbildung 3.34: Querschnitt eines Plastik-Chipgehäuses, Typ SO-P (Small Outline) für SMT-Montage (a); Ansicht eines Trägerstreifens (b)

Zur Kontaktierung der Kontaktflächen (Al) am Rand des Chips mit den Anschlüssen (*Leads*) der Trägerstreifen wird meistens ein Thermosonic-Bondverfahren (Abbildung 3.35) eingesetzt, indem ein dünner Bonddraht ($17\text{ }\mu\text{m} \dots 50\text{ }\mu\text{m}$) an seinem Ende kugelförmig aufgeschmolzen wird (*Ball*), diese Kugel wird auf die Kontaktfläche des Chips aufgedrückt und unter einer horizontalen Ultraschallbewegung bei gleichzeitiger Erwärmung des Chips verschweißt. Danach wird ein Drahtbogen (*Loop*) gezogen und auf dem Anschlusspin keilförmig der zweite Kontakt (*Wedge*) hergestellt sowie der Draht durch seitliches Ziehen abgetrennt. Wegen der Kontaktform wird dieses Verfahren auch als Ball-Wedge-Bonden bezeichnet. Tabelle 3.10 zeigt einen Vergleich mit den anderen gebräuchlichen Drahtbondverfahren wie Thermokompressions- und Ultraschallbonden.

Bei vielen Anwendungen ist ein Umpressen der Mikrokomponente nicht möglich, da bewegliche Mikrostrukturen offen liegen. Anstelle des Klebens auf Trägerstreifen und des

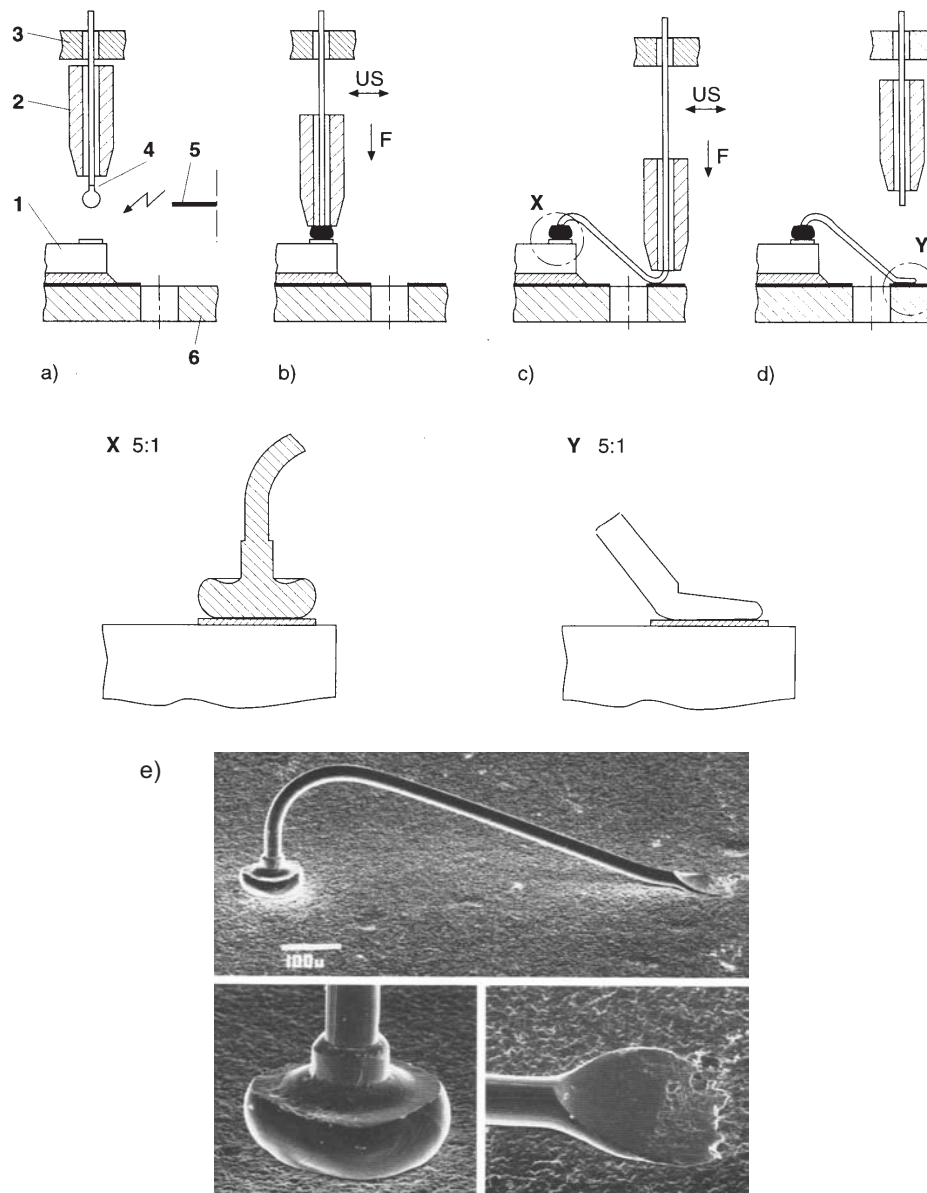


Abbildung 3.35: Prinzipieller Verfahrensablauf beim Thermosonic-Drahtbonden [Scheel]

- a) Kugel anschmelzen
- b) Kugelkontakt auf Pad
- c) 2. Kontakt (*Wedge*)
- d) Drahtabriss
- 1 Chip mit Bondpad, 2 Kapillare, 3 Klammer, 4 Bonddraht
- 5 Elektrode, 6 äußerer Anschluss
- e) REM-Aufnahmen von Drahtbondkontaktstellen

Tabelle 3.10: Vergleich der Drahtbondverfahren

Verfahren	Thermosonic Ball-Wedge	Ultraschall Wedge-Wedge	Thermokompression Ball-Wedge
Material Bonddraht	meist Au	AlSi1 %, Al	meist Au
Abmessungen Bonddraht	Ø25 µm (Standard) Bereich 7 – 75 µm meist 20 – 33 µm	Ø25 µm (Standard) Bereich 17– > 500 µm	25 µm (Standard)
Prozessparameter Bondtemperatur Anpresskraft US-Leistung Schweißdauer	≤ 150 °C 0,3 – 0,7 N 0,1–1 W / 100–120 kHz 10 – 40 ms	Raumtemperatur 0,3 N 0,5 W 30 – 50 ms	280 – 350 °C 0,3 – 0,9 N 300 – 600 ms
Vorteile	unempfindlich gegen Oberflächenverunrei- nigung niedrige Arbeitstem- peratur gut automatisierbar	unempfindlich gegen Oberflächenverunrei- nigung Al-Draht, große Draht- durchmesser keine Temperaturbe- lastung	relativ einfach US-empfindliche Bau- elemente bondbar
Nachteile	teurer Au-Draht	Kaltverfestigung eingeschränkter Frei- heitsgrad	empfindlich gegen Oberflächenverun- reinigung
Anwendungen	Standardverfahren	Leistungselektronik	

Umpressens erfolgt eine Montage in ein vorgefertigtes Gehäuse, wobei aber die wesentlichen Verfahrensschritte gleich bleiben.

3.5 Mechanische Mikrofertigung

Mit der Entwicklung von mikrotechnischen Fertigungsverfahren auf der Basis der photolithographischen Strukturierung haben sich die mechanischen Bearbeitungsverfahren in Richtung einer Ultrapräzisionstechnik (UPT) weiterentwickelt. Mechanische Mikrostrukturen mit Strukturgrößen von 50 µm (in Sonderfällen bis zu 10 µm) mit Oberflächen-Rauheiten von < 1 µm sind mit Aspektverhältnissen bis zu 10 : 1 durch verschiedene Verfahren herstellbar:

- Mikrozerspanung
- Laserbearbeitung
- Mikrofunkenerosion

Mikrozerspanung

Abbildung 3.36 zeigt eine Übersicht zur Weiterentwicklung der Werkzeuge aus der Feinwerktechnik zur Ultrapräzisionstechnik. Die Sägemaschinen zur Vereinzelung von Halbleiter-Wafern werden auch zur Herstellung von definierten Nuten eingesetzt und bilden somit einen Vorreiter der Entwicklung. Für die Mikrozerspanung werden hochtourige Spindeln mit Drehzahlen von 30.000 bis 100.000 /min eingesetzt. Diese Technik bietet den Vorteil, schnell ohne teure Maskentechnik Prototypen zur Erprobung bzw. kleine Serien herzustellen. Abbildung 3.37 zeigt als Anwendungsbeispiel die Herstellung einer mikrooptischen Koppeleinheit für Laserdiode und Glasfaser.

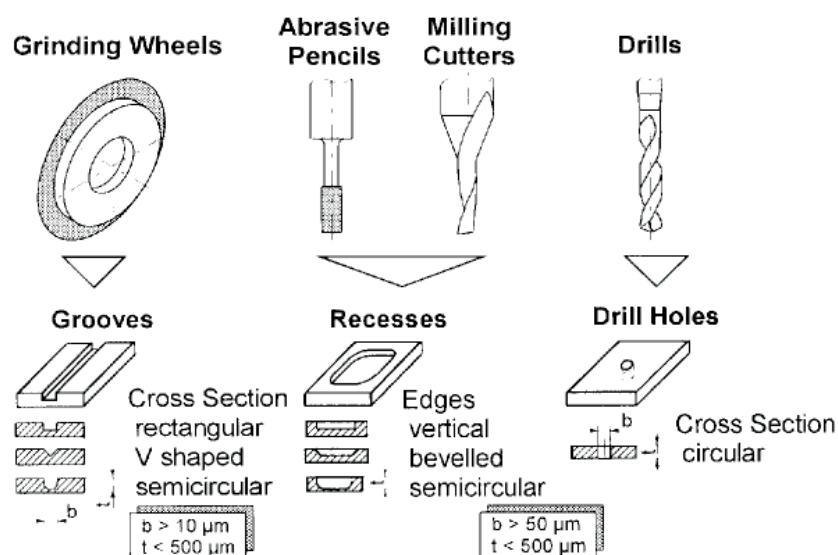


Abbildung 3.36: Verfahren und Werkzeuge der Mikrozerspanung [IWF, TU Braunschweig]

Laserbearbeitung

Mit Hilfe paralleler gebündelter Laserstrahlung lassen sich durch Laserablation Mikrostrukturen aus ebenen Werkstücken mit hoher Qualität und mit einem Aspektverhältnis bis 10 : 1 heraustrennen. Bearbeitungslaser gibt es in verschiedenen Wellenlängenbereichen, wobei die am meisten eingesetzten Lasermedien bestehen aus:

- Nd:YAG (Festkörperlaser mit Neodym-Yttrium-Aluminium-Granat) $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$
- CO₂ (Gaslaser mit Kohlendioxid) $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$
- Excimer-Laser (angeregte Edelgase) $\lambda = 0,2...0,3 \mu\text{m}$

Mit den weit verbreiteten Nd:YAG-Festkörperl Lasern lassen sich absorbierende Werkstoffe wie Metalle, Keramik und auch Kunststoffe bearbeiten. Glas und transparente Kunststoffe können besser mit den Excimer-Lasern bearbeitet werden, da im UV-Bereich die Absorption ansteigt. Abbildung 3.38 zeigt einige Beispiele von Mikrostrukturen.

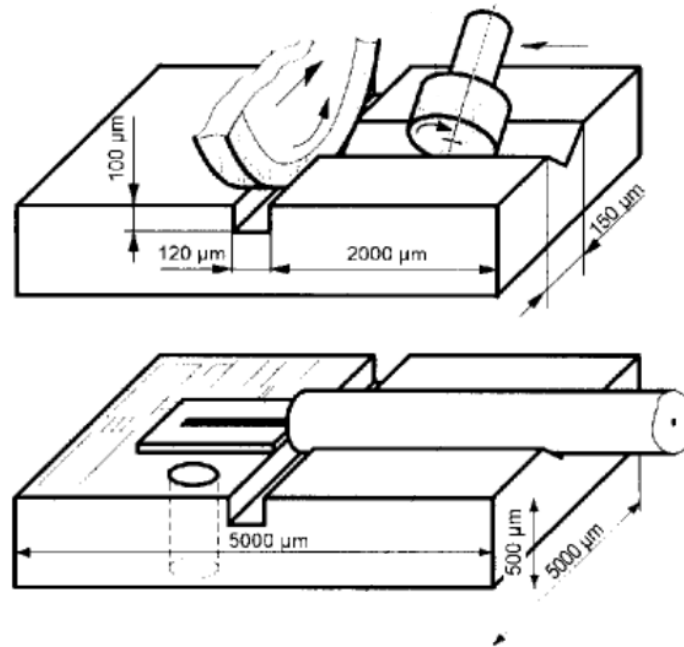


Abbildung 3.37: Herstellung eines mikrooptischen Trägers für eine Laser-LWL-Koppeleinheit mit V-Nut und Koppelkante [IWF, TU Braunschweig]

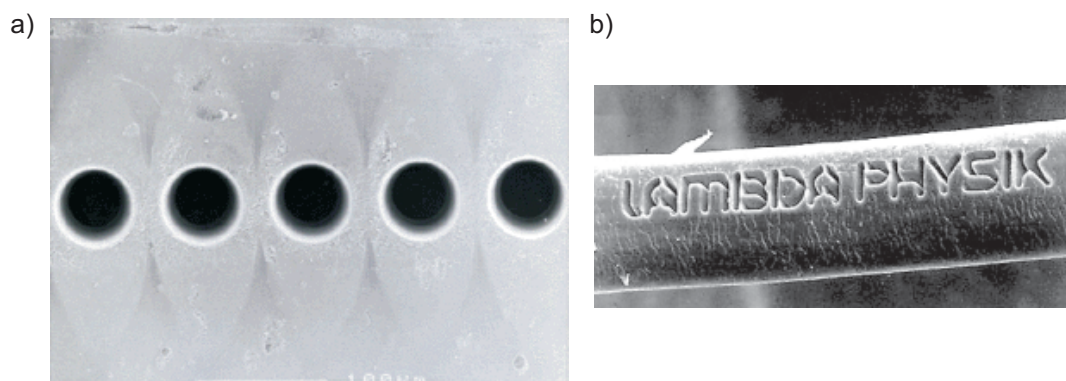


Abbildung 3.38: Mikrostrukturen hergestellt durch Laserbearbeitung [Lambda-Physik]
a) Düsenplatte eines Tintendruckkopfes
b) Mikrogravur in einem Haar

Mikrofunkenerosion

Verfahren der Funkenerosion (auch Elektroerosion genannt) sind zur Formgebung von leitfähigen Materialien im Millimeterbereich seit über 30 Jahren im Formen- und Werkzeugbau im Einsatz. Durch systematische Verbesserungen in den Maschinen, der Elektronik und der Prozessführung ist dieses Verfahren zur Herstellung von mechanischen Mikrostrukturen in Metallen weiterentwickelt worden. Es lassen sich inzwischen Aspektverhältnisse von 5 : 1 bis 20 : 1 und Oberflächen-Rauhheiten von $R_a = 0,2 \dots 0,3 \mu\text{m}$ erreichen. Die Mikroerosion wird u. a. zur Herstellung von Präzisionswerkzeugen für die Abformverfahren Spritzgießen und Heißprägen eingesetzt und hat vielfach den aufwendigen LIGA-Prozess ersetzt. Ferner werden mit diesem Verfahren auch mikromechanische Bauteile, insbesondere Kanalstrukturen für die Mikroreaktionstechnik hergestellt. Abbildung 3.39 zeigt einige Strukturen.

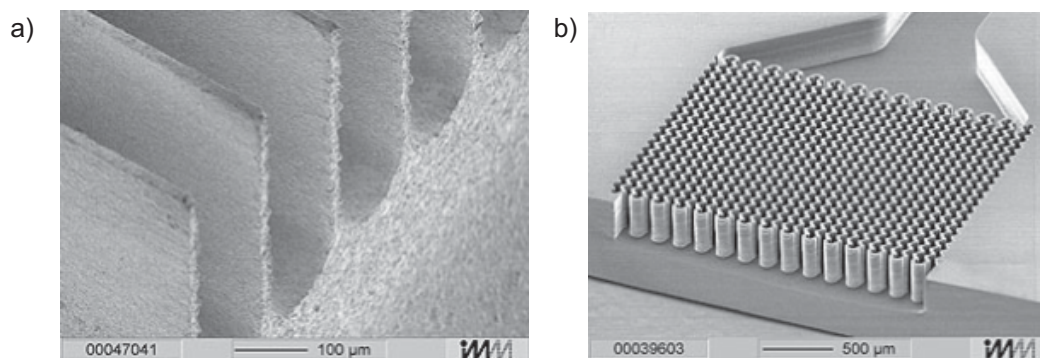


Abbildung 3.39: Mechanische Mikrostrukturen hergestellt durch Mikrofunkenerosion [IMM]

- a) Teststruktur
- b) Mikromischer

Kapitel 4

Funktionselemente und Grundstrukturen der Mikrotechnik

Mikrotechnische Systeme bestehen aus integrierten Anordnungen von einzelnen Bauteilen, Komponenten bzw. Subsystemen, die sich in ihrer zunehmenden Komplexität und Integrationsstufe unterscheiden. Jeder Bestandteil der jeweiligen Integrationsstufe lässt sich auf einzelne Grundstrukturen bzw. Funktionselemente zurückführen. Analog zu den Maschinenelementen im Maschinenbau lassen sich die Komponenten von Mikrosystemen in *Form- und Funktionselemente* unterscheiden, siehe Tabelle 4.1 [nach Gerlach]:

- Formelemente: Konstruktive Aufgaben mit mechanischen Funktionen wie Stützen, Anordnen und Abgrenzen
- Funktionselemente: Bereitstellen, Wandeln, Anpassen und Übertragen von Energie und Signalen

4.1 Passive mechanische Formelemente

Für die Funktionen „Stützen“ und „Anordnen“ lassen sich mit Hilfe der Silizium-Bulk-Mikromechanik (Abbildung 4.1) viele Formelemente herstellen. Die Ausnutzung der Kristallanisotropie bei den richtungsabhängigen Ätzprozessen dient zur Herstellung von hochpräzisen Formteilen mit Toleranzen (Abmaßen) bis in den Submikrometerbereich, obwohl die einzelnen Strukturen im Millimeterbereich liegen können. Formätzteile sind am weitesten mit Silizium-Wafern in (100)-Orientierung verbreitet, für spezielle Anwendungen werden auch (110)-Wafer eingesetzt.

4.1.1 Formätzteile in (100)-Silizium

Wird ein (100)-Silizium-Wafer mit einer ätzresistenten Maskierungsschicht, z. B. aus Si_3N_4 100 nm dick, versehen, die nach Abbildung 4.1 eine schlitzförmige Öffnung aufweist, erfolgt

Tabelle 4.1: Übersicht der Form- und Funktionselemente in Mikrosystemen [nach Gerlach]

Art	Zweck	Funktion	Funktionsmerkmale	Beispiele		
				Mechanisch	Thermisch	Fluidisch
Formelemente	Ordnen von Elementen in Komponenten	Stützen	Übertragen von Kräften und Momenten	Balken, Platte, Einspannung, Kanal		
		Anordnen	Schaffen der räumlichen Beziehung zwischen Funktionselementen	Lagerung, Führung, Einspannung, Abstandhalter (Spacer), Kanal		
		Abgrenzen	Umhüllen und Schützen eines Raumes	Gehäuse, Dichtung, Passivierung, Kapselung		
Funktionselemente	Bereitstellen von Energie	Speichern	zeitabhängiges Aufnehmen und Abgeben von Energie	Feder, Masse	Wärmekapazität	Druckkammer
		Wandeln	Wandeln zwischen Energieformen	Elektromagnet, Piezoelement, Motor	Heizwiderstand, Peltierelement	Pumpe
	Wandeln von Energie und Signalen	Erkennen	Identifizieren von Energieströmen oder Signalen	Elektromagnet, piezoelektrischer Aufnehmer	Thermoelement, Bimorph	Flusssensor
		Antreiben	Wandeln nichtmechanischer in mechanische Energie	Motor, Elektromagnet, Piezoelement	Formgedächtnislegierung, Bimorph	Pumpe
	Anpassen von Energie	Umsetzen	Verändern der Charakteristik einer Funktionsgröße	Getriebe		Strömungskanal
		Verstärken, Reduzieren	Verändern des Betrages einer Funktionsgröße	Getriebe, Bremse, Dämpfung		Diffusor, Krümmer, Düse
		Schalten	Unterbrechen und Wiederherstellen des Energie- oder Signalfusses	Gesperre, Gehemme, Schaltkupplung		Ventil
	Übertragen von Energie	Leiten	Übertragen von Funktionsgrößen zwischen beliebigen Orten	Achse, Welle, Kupplung	Wärmeleiter	Kanal
		Vereinigen, Verzweigen	Zusammenführen oder Aufteilen von Funktionsflüssen	Differential-, Summiergetriebe	Wärmespreizkörper	Verzweigung

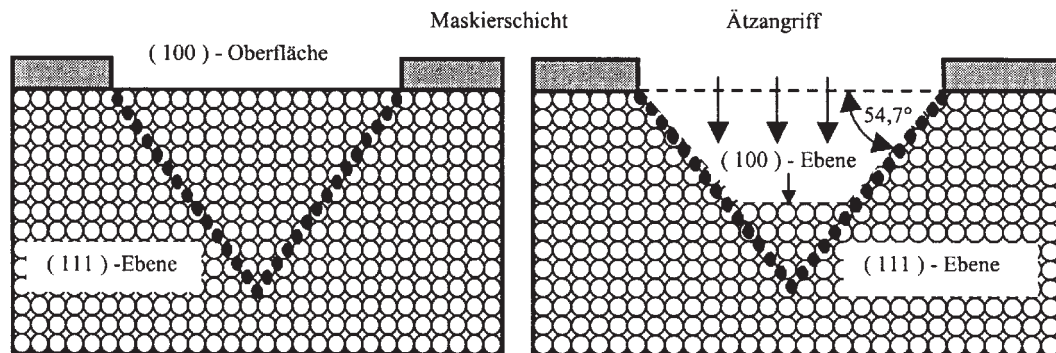


Abbildung 4.1: Ätzprozess im (100)-Silizium-Wafer
 Ätzstopp an geneigten (111)-Ebenen, waagerechter Ätzboden an (100)-Ebene

in einem KOH-Ätzbad ein Ätzangriff, der von den (111)-Ebenen begrenzt wird, die die Maskierungskanten schneiden. Es bildet sich ein Ätzgraben mit geneigten Seitenflächen und einem waagerechten Boden, der bei längeren Ätzzeiten verschwindet, sobald die Spitze der V-Grube erreicht wird.

Je nach Form der Maskierungsöffnung und der durch die Ätzdauer bestimmten Äztiefe lassen sich nach Abbildung 4.2 folgende Grundformen von Ätzstrukturen herstellen:

- Pyramide
- Pyramidenstumpf
- V-Graben
- Trog

Die Voraussetzung zur Erzielung perfekter Formteile besteht darin, dass die Begrenzungslinien der Ätzmaskierungsöffnungen parallel zu den $\langle 110 \rangle$ -Richtungen in der (100)-Ebene ausgerichtet sind.

Sobald rechteckige Ätzmaskierungen gemäß Abbildung 4.3 zu den Kristallachsen schräg ausgerichtet sind, bildet sich durch Unterätzen der Ätzmaskierung je nach der Ätzdauer ein Trog oder eine V-Nut-Struktur, die an der Substratoberfläche die größte umschriebene Rechteckfläche der ursprünglichen Ätzmaskierung einnimmt. Dies gilt auch für unregelmäßige Öffnungsgeometrien.

Die Herstellung von präzisen V-Nut-Strukturen in Silizium, wie sie zur exakt parallelen Ausrichtung von Lichtwellenleiter-Arrays mit genau definiertem Abstand zueinander benötigt werden, erfolgt durch einen Prozessablauf nach Abbildung 4.4. Als Ätzmaskierung wird eine durch LPCVD abgeschiedene Si_3N_4 -Schicht verwendet, die bei der anisotropen KOH-Ätzung die höchste Selektivität von $> 100 : 1$ gegenüber Silizium besitzt.

Für den Entwurf von Formätzteilen in (100)-Silizium gelten die im Folgenden definierten Designregeln.

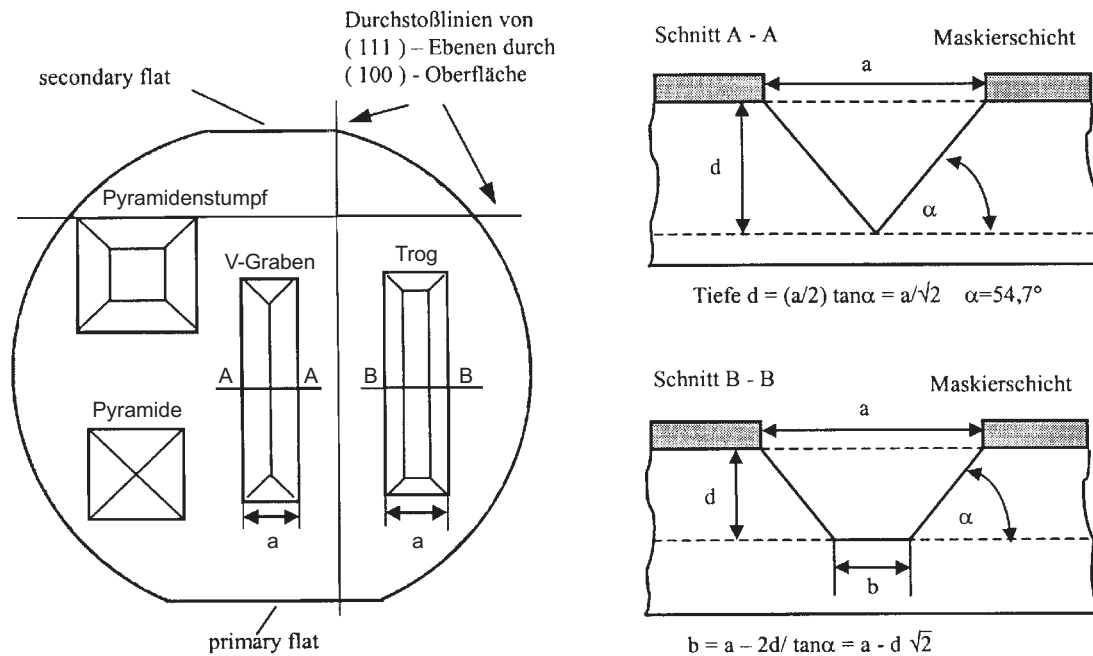


Abbildung 4.2: Grundformen von Ätzstrukturen

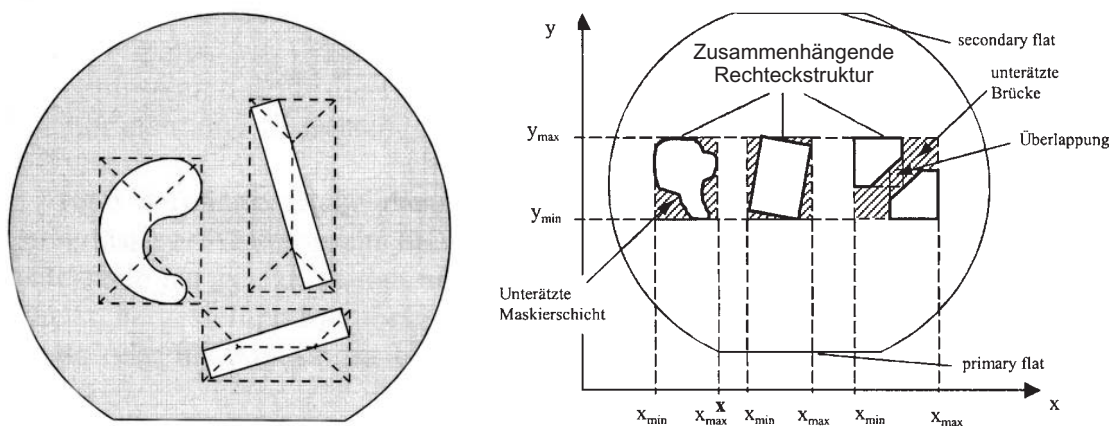


Abbildung 4.3: Unterätzung bei unregelmäßiger Ätzmaskierung
Ätzbegrenzung durch größte umschriebene Rechteckfläche

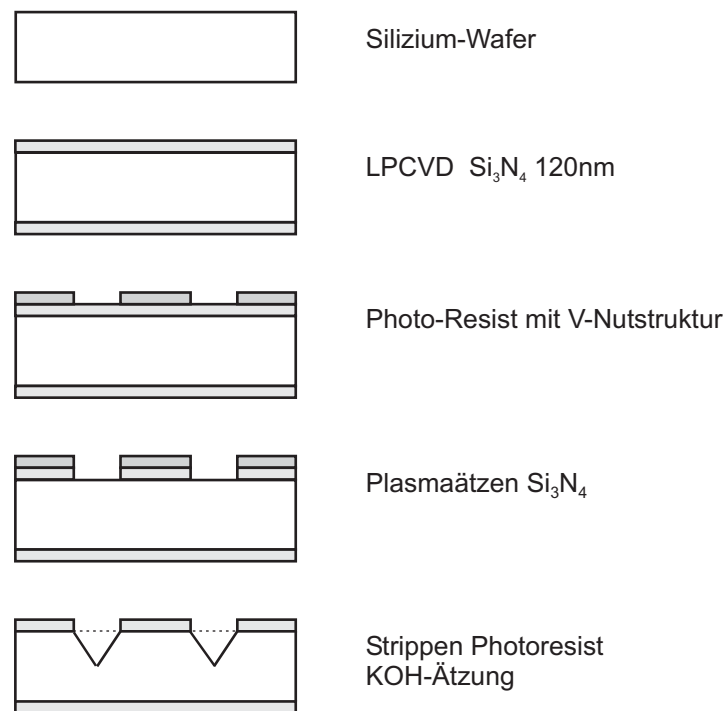


Abbildung 4.4: Prozessablauf zur Herstellung von V-Nutstrukturen in (100)-Silizium
(z. B. Führungsstruktur für Lichtwellenleiter-Array)

Designregeln für (100)-Silizium

- Rechteck-Masken ergeben spitze oder stumpfe Pyramiden oder Nuten
- Nach hinreichend langer Ätzzeit sind die geätzten Kanten immer in $\langle 110 \rangle$ -Richtung orientiert
- Beliebige Formen der Ätzmaske werden stets zu rechteckigen pyramidenförmigen Strukturen. Die äußere Begrenzung wird durch die äußersten Tangenten parallel zu $\langle 110 \rangle$ -Richtungen definiert
- Die Tiefe d einer Pyramidenstruktur ergibt sich aus der Maskierungsbreite a zu

$$d = \frac{1}{\sqrt{2}} a \quad (4.1)$$

- Die Breite b des Pyramidenstumpfes am Boden als Funktion von a und d :

$$b = a - \sqrt{2} d \quad (4.2)$$

- Konvexe Ecken werden unterätzt

- Unterätzen von rechtwinkligen Brücken (beidseitig eingespannt) mit Ausrichtung an $\langle 110 \rangle$ -Richtungen ist *nicht* möglich

Die Unterätzung von konvexen Ecken ist in Abbildung 4.5 veranschaulicht. An den Außencken ist ein Ätzangriff über alle Winkel innerhalb von 270° möglich. Damit sind Kristallebenen höherer Ordnung (211), (311), (411) ätzbar. (411)-Ebenen sind gegenüber der (100)-Ebene ebenso wie die (111)-Ebenen um $54,7^\circ$ geneigt. (411)-Ebenen stehen schräg geneigt auf der (100)-Ebene. Sie durchstoßen die (100)-Ebene unter einem Winkel von $30,96^\circ$ gegenüber der $\langle 110 \rangle$ -Richtung.

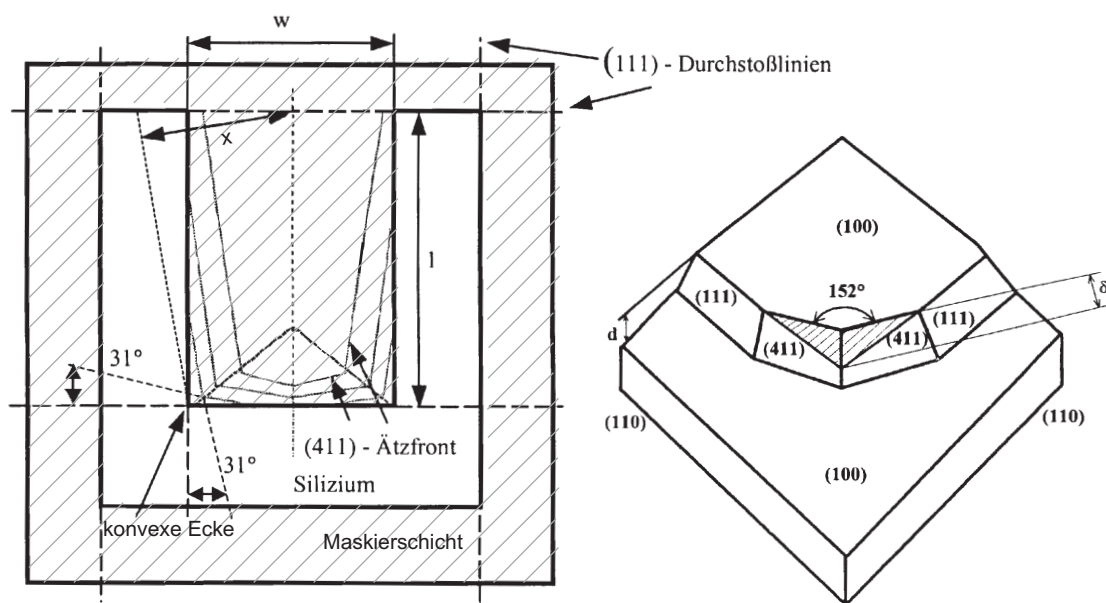


Abbildung 4.5: Unterätzung konvexer Ecken beim anisotropen Ätzen in (100)-Silizium

Die Unterätzrate u ist das Ätzratenverhältnis der (411)- gegenüber der (100)-Ebene:

$$u = \frac{r_{411}}{r_{100}} \approx 1,5 \quad (4.3)$$

Die Unterätzweite ist

$$x = l \sin \alpha + \frac{w}{2} \cos \alpha \quad (4.4)$$

für $l > 0$ und $w > 0$, sonst ist $x = 0$. Die Ätzzeit t zum Durchätzen von x beträgt

$$t = \frac{x}{r_{411}} = \frac{x}{u r_{100}} \quad (4.5)$$

Die Tiefe der entstehenden Ätzgrube beträgt:

$$d = t r_{100} = x \frac{r_{100}}{r_{411}} = \frac{x(l, w)}{u} \quad (4.6)$$

Um die Eckenunterätzung bei konvexen Ecken zu vermeiden, können Vorhaltestrukturen die Unterätzung kompensieren, siehe Abbildung 4.6.

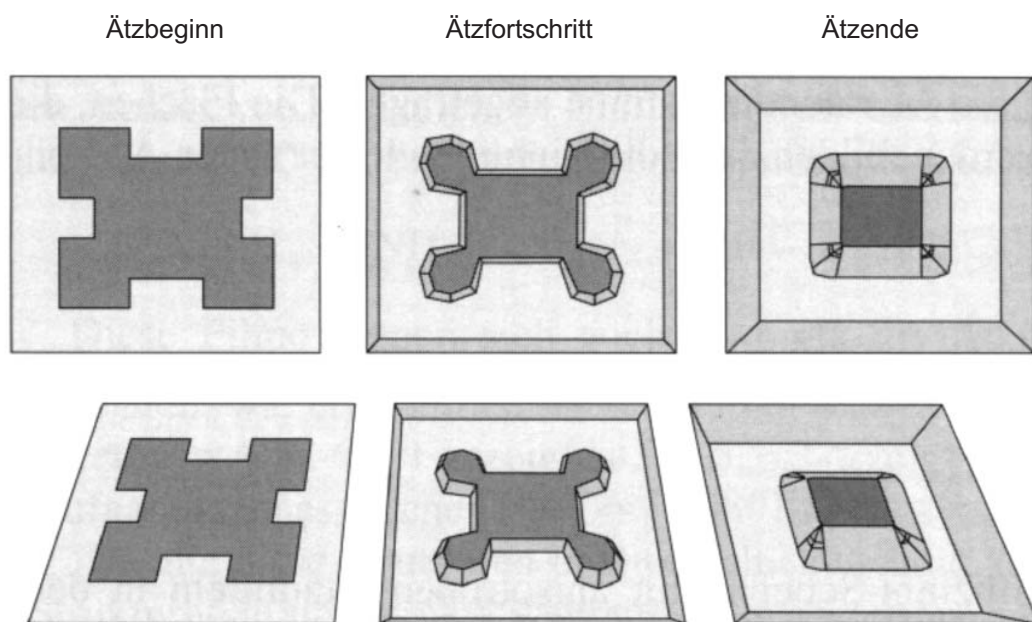


Abbildung 4.6: Kompensation der Eckenunterätzung mit vorgelagertem Quadrat

Nachteile sind:

- begrenzte Ätztiefe
- Platzverlust

4.1.2 Formätzteile in (110)-Silizium

Bei einem Ätzprozess in einem (110)-Si-Wafer sind senkrechte Wände möglich, da die (111)-Ebenen senkrecht zur Waferoberfläche stehen. Allerdings stehen die (111)-Ebenen nicht rechtwinklig zueinander, sondern in einem Winkel von $70,53^\circ$. Es lassen sich somit Grabenstrukturen mit schrägen Stirnkanten ätzen (Abbildung 4.7 und 4.8).

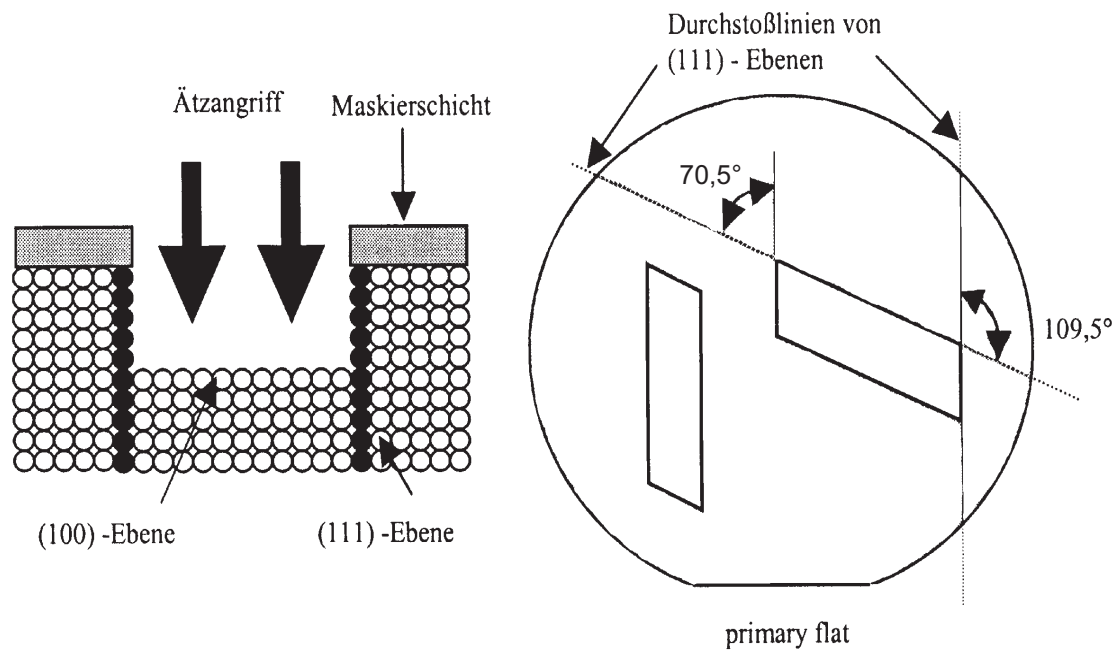


Abbildung 4.7: Ätzprozess in einem (110)-Si-Wafer

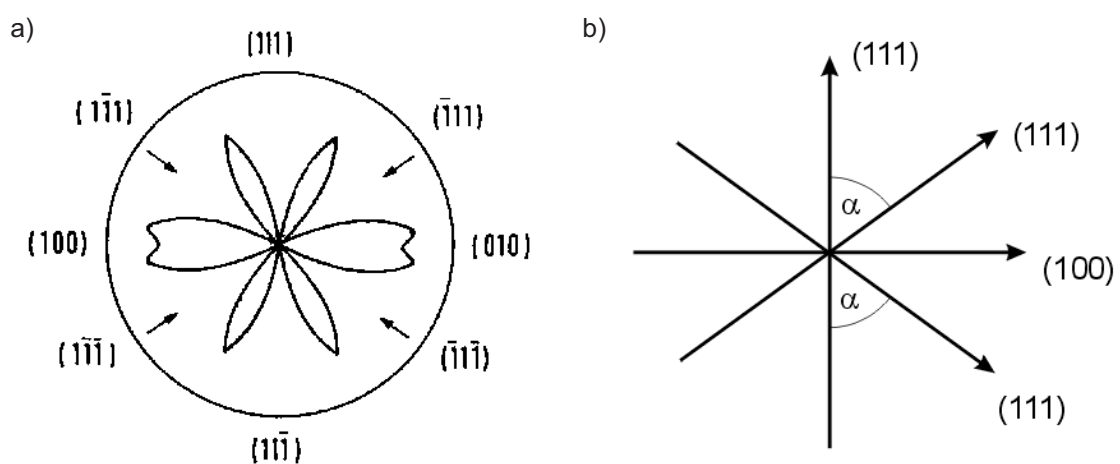


Abbildung 4.8: Richtungsabhängigkeit der Ätzraten von (110)-Silizium
Durchstoßlinien der (111)-Ebenen auf der (110)-Ebene, $\alpha = 70,53^\circ$

In der Tiefe gibt es keine schnellätzende Ebene wie bei (100)-Wafern, sondern geneigte (111)-Ebenen, siehe Abbildung 4.9. Die Bodenflächen sind um $35,26^\circ$ gegenüber der Oberfläche geneigt und schneiden diese an den Eckpunkten der Maskenöffnung.

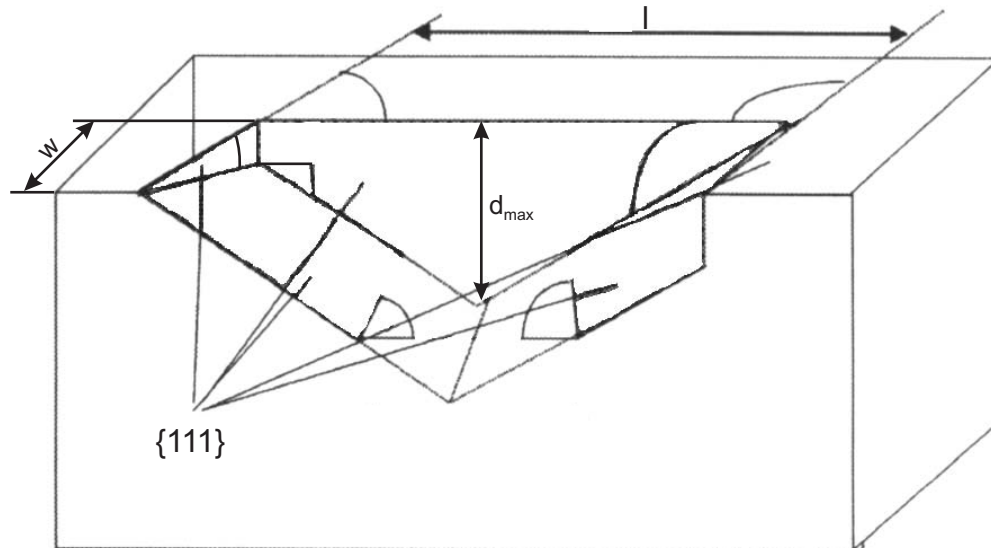


Abbildung 4.9: Perspektivische Ansicht einer geätzten Grube

$$\alpha = 35,26^\circ; \beta = 109,5^\circ; \gamma = 70,5^\circ; \delta = 125,26^\circ; \varepsilon = 54,76^\circ$$

$$\beta + \gamma = 180^\circ; \delta + \varepsilon = 180^\circ$$

$$d_{\max} = (3/8)w + (1/(2\sqrt{2}))l$$

Für den Entwurf von Formteilen in (110)-Silizium gelten die folgenden Designregeln:

Designregeln für (110)-Silizium

- Dreidimensionale Formen mit senkrechten Wänden sind herstellbar
- (111)-Ebenen begrenzen die Ätztiefe und sind um $35,26^\circ$ gegenüber der Oberfläche geneigt
- Kurze und tiefe Gräben sind *nicht* herstellbar
- Senkrechte Kanten schneiden sich in der Aufsicht um $70,5^\circ$ bzw. $109,5^\circ$
- Rechtwinklige Brückenstrukturen (beidseitig aufgehängt) können hergestellt werden

Anwendungen

Diese Formteilätztechnik findet ihre Anwendung, sobald langgestreckte Strukturen mit parallelen Seitenwänden und präzise eingehaltenen Abständen hergestellt werden müssen. Typische Beispiele sind parallele Kanalstrukturen für Tintendruckköpfe und kammartige

Kondensatoren für Drehmomentsensoren. Eine Antriebswelle nach Abbildung 4.10 erfährt unter Last eine Torsion, die zu einer Winkeldifferenz an zwei Messringen führt. Wird jeder Messring mit jeweils einem Elektrodenfächer gekoppelt, kann über die Kapazitätsänderung des Kammkondensators die Torsion der Welle und damit das Drehmoment gemessen werden. Abbildung 4.11 zeigt eine Detailansicht des Kammkondensators.

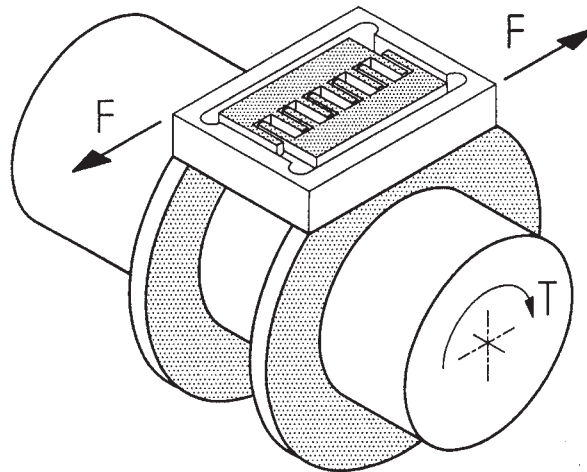


Abbildung 4.10: Prinzip eines Drehmomentsensors mit Kammkondensator [Siemens]
 Das Drehmoment M ist proportional zur Kapazitätsänderung $\Delta C/C_0$

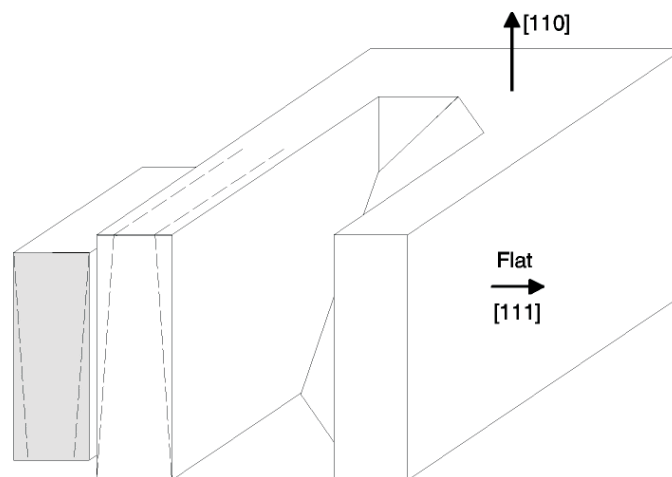


Abbildung 4.11: Kammstruktur für Kondensator geätzt in (110)-Silizium

4.1.3 Ausrichtung der Wafer zum Kristallgitter

Die Herstellung von präzisen Formteilen mit Hilfe der Silizium-Bulk-Mikromechanik ist nur möglich, wenn die Ätzmaske zu den Schnittkanten der (111)-Ebenen mit der Waferoberfläche (100) oder (110) perfekt ausgerichtet wird. Wird diese Ausrichtung nicht eingehalten, hätte dies eine Unterätzung der Maske und damit Maßabweichungen zur Folge. Daher muss der *Flat* an den Wafern genau ausgerichtet werden. Allerdings ist der Flat standardmäßig nur auf $\pm 0,5^\circ$ bzw. mit Aufpreis bis $\pm 0,2^\circ$ genau ausgerichtet.

Im Fall einer V-Nut-Struktur für Lichtwellenleiter-Koppeleinheiten würde eine Fehlausrichtung um den Winkel α auf Grund der Unterätzung nach Abbildung 4.3 zu einer Verbreiterung der Nut gemäß Abbildung 4.12 führen.

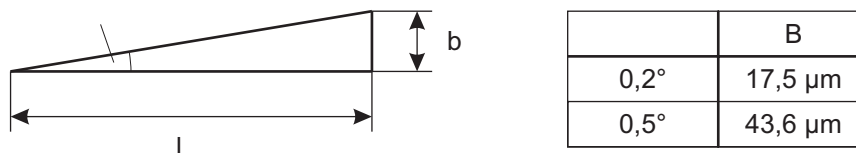


Abbildung 4.12: Fehlwinkel bei einer LWL-Koppeleinheit

Länge: $L = 5 \text{ mm}$

Verbreiterung der Nut: $B = L \tan \alpha$

Abhilfe schafft eine Orientierungsätzung in der ersten Maskierungsschicht vor dem ersten anisotropen Ätzschritt. Die Orientierungsätzung erfolgt mit einer geringen Ätztiefe, um die weiteren Lithographieschritte über der Grube ausführen zu können (Abbildung 4.13).

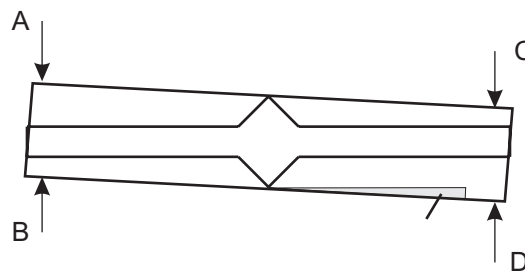


Abbildung 4.13: Teststruktur für Orientierungsätzung

Messpunkte A bis D zur Ermittlung des Fehlwinkels α

Der Fehlwinkel wird an Hand der Unterätzungsmaße $A...D$ nach Abbildung 4.13 berechnet. Der Fehlwinkel streut individuell für jeden Wafer. Daher wird jeder Wafer durch eine Laserbeschriftung gekennzeichnet. Die Vorteile sind:

- Individuelle Messung und Speicherung der Fehlwinkel
- Justage der Belichtungsmaschine auf der Längskante der Orientierungsstruktur
- Drehung des Waferchucks um den individuellen Fehlwinkel

4.1.4 Design und Herstellung von Formätzteilen für verschiedene Anwendungen

Der Entwurf und der Herstellungsprozess von Silizium-Formteilen sind sehr eng miteinander verknüpft. Dies wird an Hand von verschiedenen Beispielen aus unterschiedlichen Anwendungen veranschaulicht.

Elektrostatisches Mikrofon

Ein elektrostatisches Mikrofon besteht aus einem Plattenkondensator mit einer feststehenden und einer vom Schalldruck bewegten Membran, die als Schallwandler dient. Eine Lösung mit Hilfe der Silizium-Mikromechanik zeigt Abbildung 4.14; sie besteht aus den Bestandteilen:

- Feste Elektrode im Silizium-Formteil
- Bewegliche Elektrode als Membran aus Mylar-Folie mit aufgedampfter Elektrode (Elektrodenabstand $40\text{ }\mu\text{m}$)
- Druckausgleich über Luftlöcher zur Rückseite

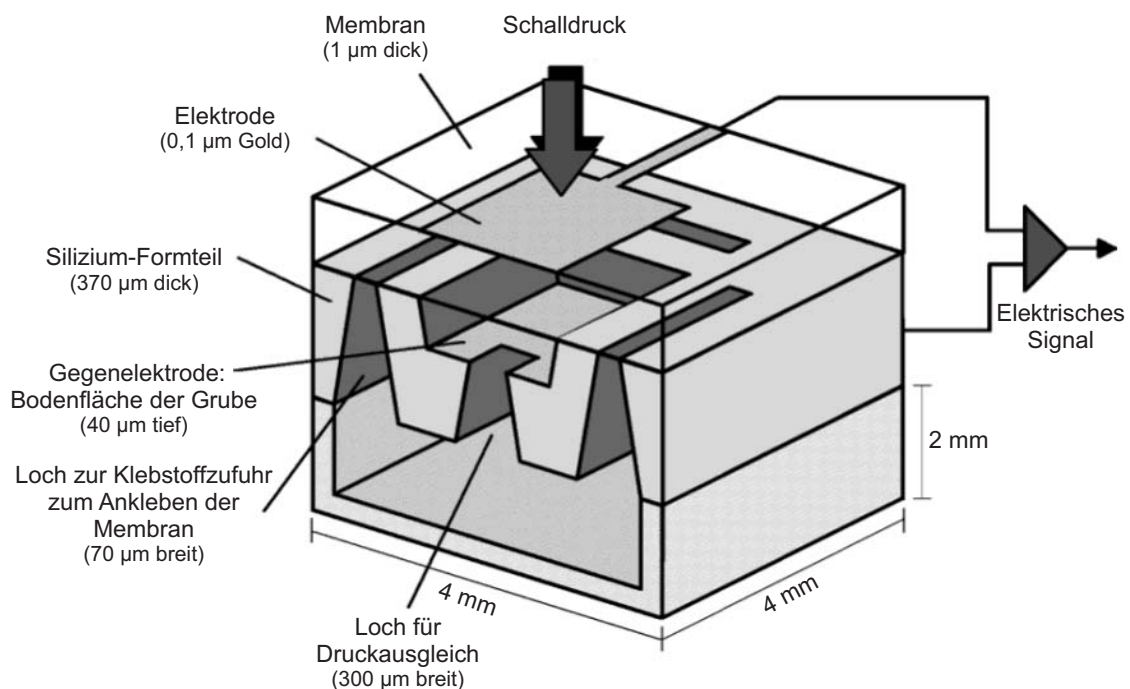


Abbildung 4.14: Elektrostatisches Mikrofon in Silizium-Mikromechanik [Siemens SAT]

Bei der Herstellung des Silizium-Formteils müssen folgende Problemstellungen gelöst werden:

- Löcher und Wannen mit definierten Maßen (Tiefen) von Vorder- und Rückseite
- Beidseitige Strukturierung
- Waferdicke wegen der Flächenausbeute minimieren (Waferdicke = $370\ \mu\text{m}$)

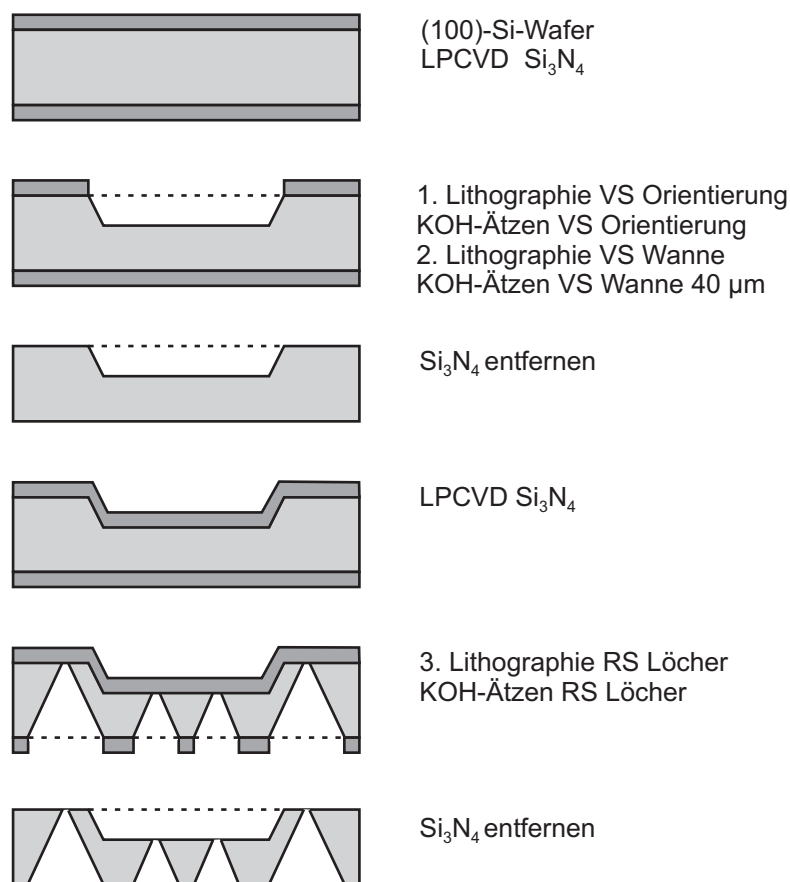


Abbildung 4.15: Prozessablauf für das Siliziumformätzteil eines elektrostatischen Mikrofons

Die Herstellung von derartig geformten Siliziumteilen kann mit einem Prozessablauf nach Abbildung 4.15 erfolgen.

Grundsätzlich kann nach einer Tiefenätzung auf einer Waferoberfläche mit einer Topographie, die ein Vielfaches der Photoresistdicke von ca. $1...2\ \mu\text{m}$ beträgt, kein weiterer Lithographieschritt erfolgen, da der Resist an den Kanten beim Aufschleudern abreißen würde. Somit muss die Herstellung der Ätzmaskierungen für die Grubenätzung auf der Oberseite und die Lochdurchätzung von der Unterseite aus voneinander entkoppelt auf den ebenen, zuvor unstrukturierten Waferoberflächen erfolgen.

Faser-Linsen-Koppeleinheit

In faseroptischen Übertragungssystemen müssen integriert optische Wellenleiter über Kugellinsen an Single-Mode-Glasfasern angekoppelt werden, da die Fleckgrößen (*spot size*) der geführten Lichtmoden stark unterschiedlich sind. Nach Abbildung 4.16 wird die Kugellinse auf einem präzisen Trägerteil starr mit der Glasfaser zueinander angeordnet. Diese Faser-Linsen-Koppeleinheit wird als Ganzes zur Stirnfläche des integriert optischen Wellenleiterchips justiert. Letzterer kann aus einer Schaltmatrix, einem Abschwächer oder auch einem Streifenwellenleiter-Laser bestehen.

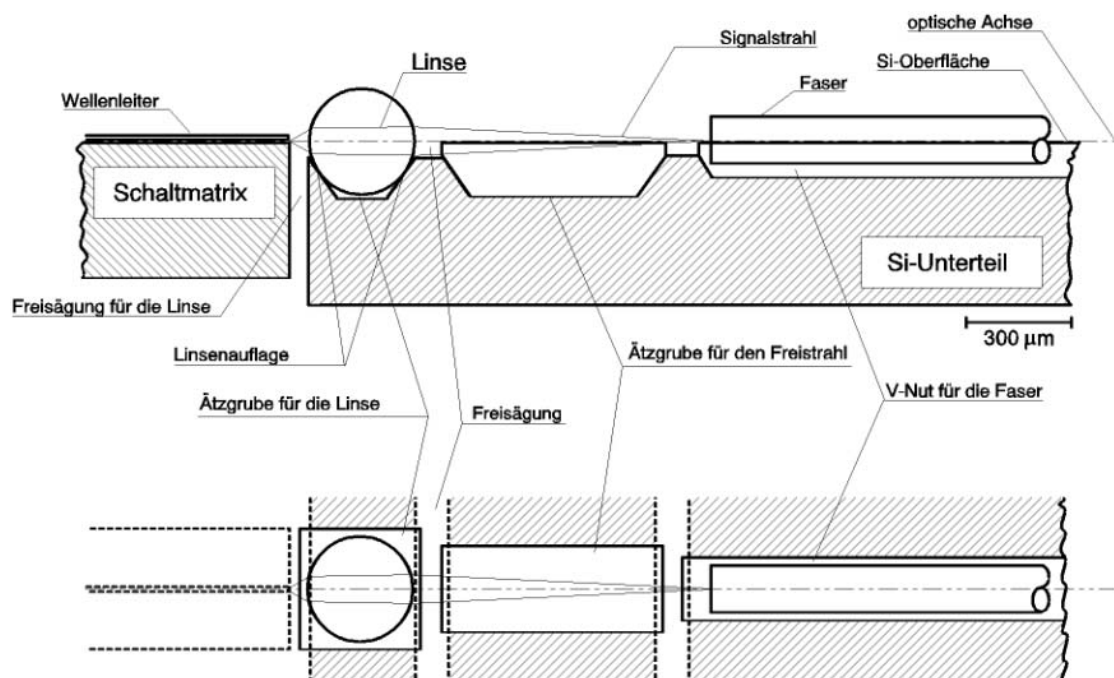


Abbildung 4.16: Faserlinsenkoppeleinheit [Siemens]

Das Formteil der Faser-Linsen-Koppeleinheit besteht aus drei Grundelementen: Pyramidenstumpf für Kugellinse, V-Nut-Führung für Glasfaser und Freiraum zur Strahlausbreitung. Dabei bestehen folgende Problemstellungen:

- Wannen, V-Nuten, Vertiefungen mit unterschiedlichen Tiefen und Breiten
- Unterätzung von konvexen Ecken

Für die Herstellung derartiger komplexer Formteile gibt es verschiedene Lösungsmöglichkeiten.

Lösung 1

- Anisotropes Ätzen von isolierten Wannen und V-Nuten
- Mechanisches Sägen von Verbindungsgräben

Nach dem Ätzen der einzelnen noch getrennten Wannen bzw. Nuten werden die Freiräume für die Lichtausbreitung durch Sägeschnitte freigelegt (Abbildung 4.16).

Lösung 2

- Anisotropes Ätzen in mehreren Stufen
- Mehrlagige Maskierung

Hier werden flache Nuten zwischen den großen Ätzwannen aus Abbildung 4.16 in einem ersten Ätzschritt freigelegt, die durch eine Oxidation gegen die lange Tiefenätzung der drei Wannen geschützt werden. Ohne diese Zwischenpassivierung würden die konvexen Ecken zwischen Verbindungsnut und beispielsweise Linsenhalterung unterätzt werden. Abbildung 4.17 zeigt den Prozessablauf für die Herstellung von Formteilen mit stark unterschiedlichen Ätztiefen und in Abbildung 4.18 ist das fertige Formteil für eine Faser-Linsen-Koppeleinheit mit vier Fasern gezeigt.

Designregeln für den Prozessablauf:

- Platzhalter aus Si_3N_4 für tiefe Ätzstrukturen
- Maskierung aus SiO_2 für flache Ätzstrukturen
- Nach dem Ätzen der flachen Strukturen Oxidation, dadurch kein Wachstum auf Si_3N_4
- Öffnen der Tiefenätzmaske durch selektives Entfernen der Si_3N_4 -Schicht

Nachteil:

- Zwischenoxidation mit Hochtemperatur, dadurch keine Vorstrukturierung von Metallschichten möglich

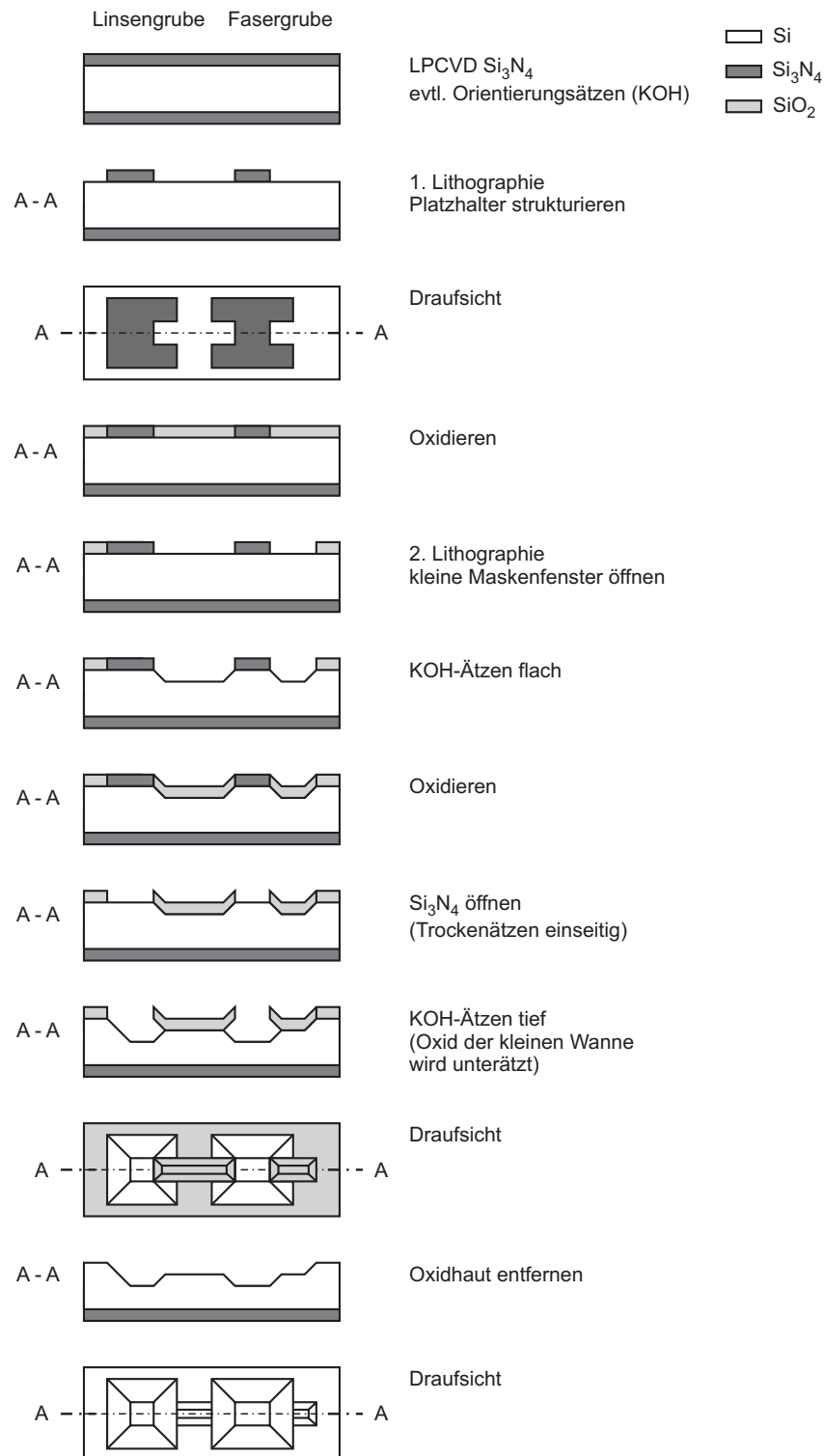


Abbildung 4.17: Doppellagen-Maskierung mit Platzhalter zur Herstellung von Formteilen mit unterschiedlichen Tiefen

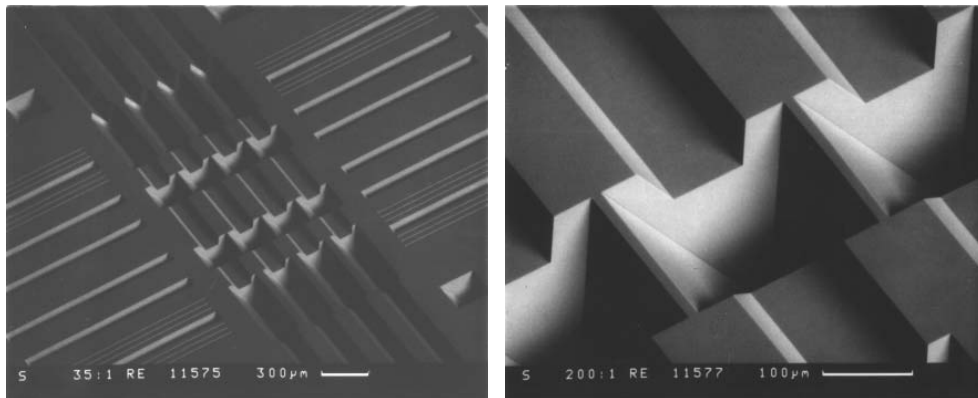


Abbildung 4.18: REM-Aufnahme einer mehrlagigen geätzten Struktur [Siemens]

Lösung 3

- Mehrlagenmaskierung mit verschiedenen Schichtdicken

Wie bei Lösung 2 erfolgen die Flach- und Tiefenätzung in getrennten Schritten, wobei die Reihenfolge vertauscht wird. Es wird nur ein Maskierungsmaterial verwendet, das vor den Tiefenätzschritten in zwei verschiedenen Schichtdicken strukturiert wird. Somit wird die spätere Ätztiefe in das Maskierungssystem abgebildet. Der Prozessablauf ist in Abbildung 4.19 veranschaulicht.

Designregeln für eine Ätzmaskierung mit verschiedenen Schichtdicken

- Nur ein Maskierungsmaterial
- Maskierung für tiefe Strukturen zuerst öffnen
- Maskierung für flache Strukturen mit halber Schichtdicke
- 1. KOH-Ätzung tief
- 2. KOH-Ätzung flach

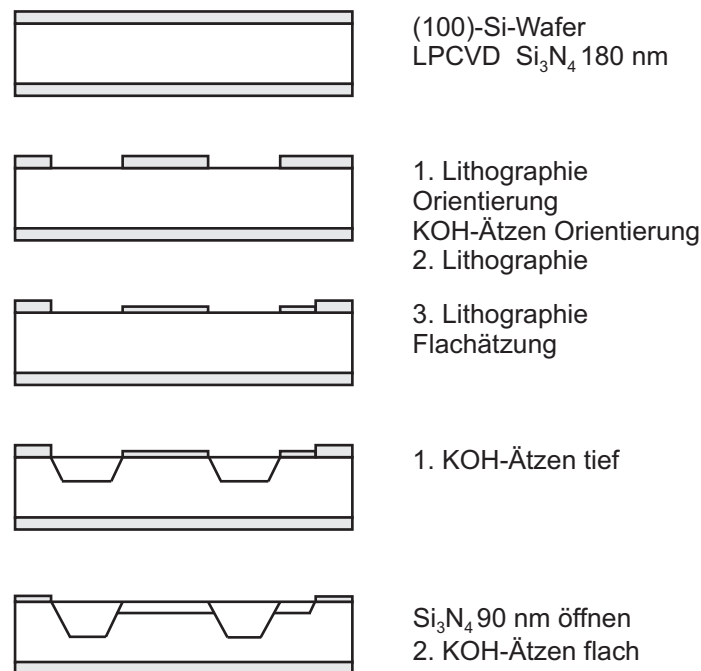


Abbildung 4.19: Prozessablauf zur Herstellung von Silizium-Formteilen mit unterschiedlichen Ätztiefen

Bubble-Jet-Tintendruckkopf

Ein Tintendruckkopf nach dem Bubble-Jet-Prinzip (Blasenstrahl) besteht aus mikrostrukturierten Kanälen mit Heizwiderständen (Abbildung 4.20), wobei durch Heizstromimpulse in der Tinte Dampfblasen entstehen, die durch Verdrängung an der Kanaldüse Tropfen ausstoßen. Die ersten Tintendruckkopf-Generationen bestanden aus folgendem Aufbau:

- Kanalstruktur aus Polymer
- Deckel aus Glas mit Wanne und Loch zur Tintenzufuhr
- Dünnschicht-Bodenteil aus Silizium mit Heizwiderständen und Leiterbahnen

Bei der Serienfertigung ergibt sich folgende Problemstellung:

- Kantenpolitur wegen unterschiedlichen Härten von Silizium, Polymer, Glas problematisch (Sandwich)

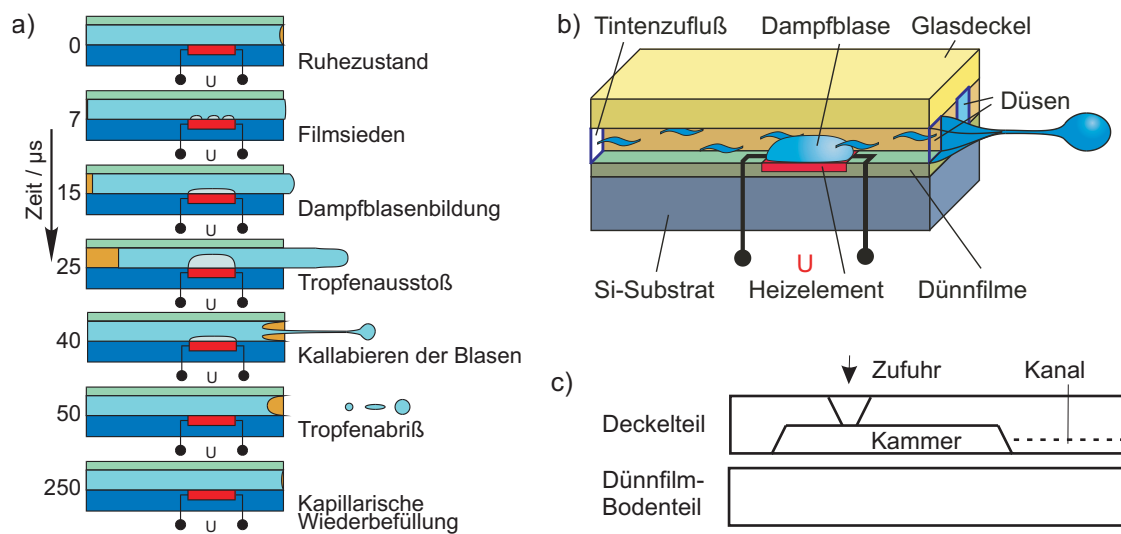


Abbildung 4.20: Bubble-Jet-Tintendruckkopf [nach Wehl]

- a) Funktionsprinzip
- b) Prinzipieller Aufbau der Kanalstruktur mit Düse
- c) Längsschnitt eines Druckkopfs in Voll-Silizium-Technik, Deckelformteil mit zwei Ätztiefen und Rückseitenlöchern

Lösung:

- Alle Teile aus einem Werkstoff: Silizium
- Integration von Kanälen, Tintenwanne und Rückseitenloch in das Deckelteil

Somit ergibt sich die abstrahierte Aufgabenstellung:

- Formteil mit zwei Ätztiefen und Rückseitenlöchern

Der Herstellungsprozessablauf für ein derartiges Formteil nach Abbildung 4.21 besteht aus den wesentlichen Blöcken:

- Vorderseite mit Doppellagenmaskierung
 1. Ebene: Maskierung aus SiO_2 für flache Kanäle
 2. Ebene: Maskierung für tiefe Wanne
zwei Tiefenätzschritte mit unterschiedlicher Dauer
- Rückseite
 1. Ebene: Maskierung aus SiO_2 für Tintenloch und Justageloch
(spätere Montage mit Bodenteil)
 2. Ebene: Maskierung aus Si_3N_4 ; Nur ein Tiefenätzschritt

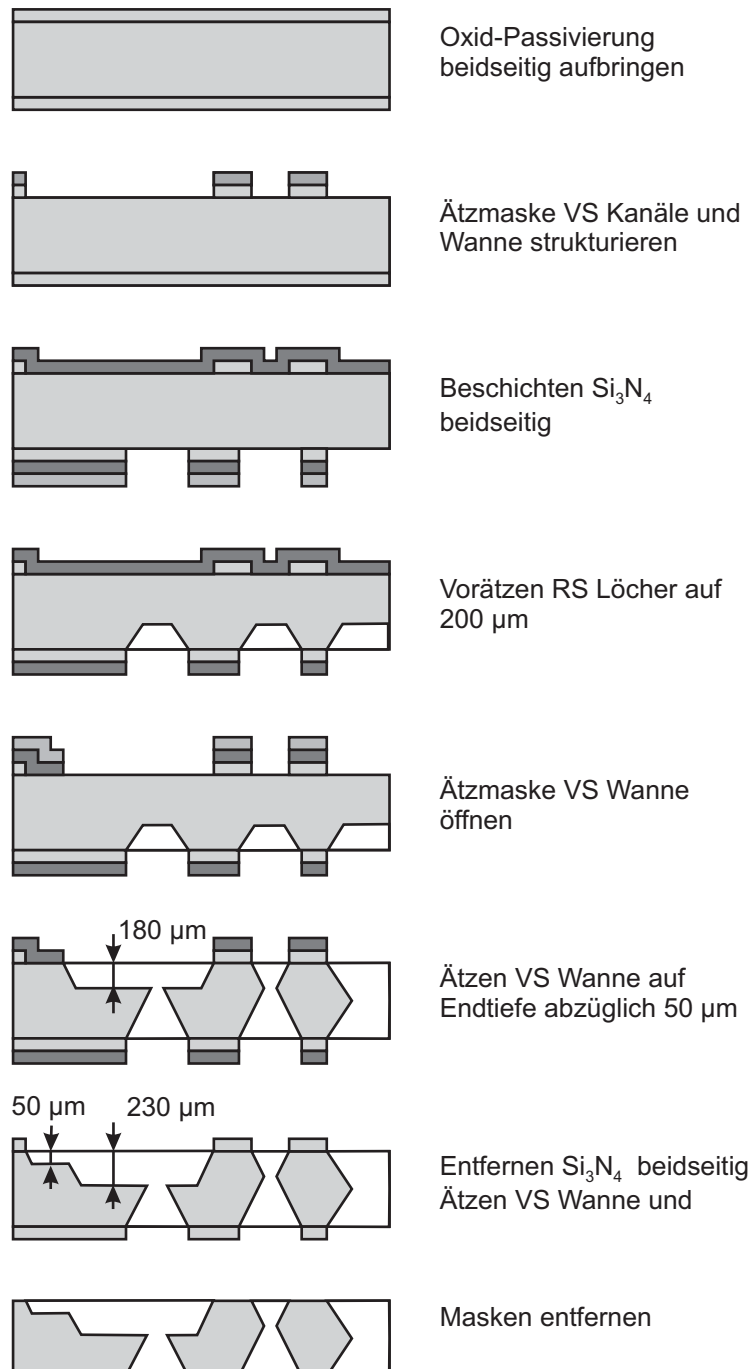


Abbildung 4.21: Prozessablauf einer Silizium-Deckelplatte für einen Bubble-Jet-Druckkopf

Designregeln für Prozessablauf:

- Ätzprozess in drei Schritte aufteilen
 1. Schritt Rückseite: Tiefe $d_1 = \text{Loch}$
 2. Schritt Vorderseite: Tiefe $d_2 = \text{Wanne}$ (Endtiefe = $d_2 + d_3$)
 3. Schritt Vorderseite: Tiefe $d_3 = \text{Kanal}$

4.2 Mikromechanische Biegebalken

In Mikrosystemen bilden Biegebalken ein grundlegendes mechanisches Funktionselement, das vielseitig eingesetzt wird, z. B. als Biegefedern, Torsionsfeder oder Aufhängung. Mikromechanische Biegebalken können einseitig oder beidseitig eingespannt sein und bezüglich der Substratoberfläche in vertikaler oder horizontaler Richtung verformt werden.

4.2.1 Biegebalken einseitig eingespannt

Ein einseitig eingespannter Biegebalken gemäß Abbildung 4.22 zeigt bei einer Belastung mit der Kraft F am Balkenende, bei $x = l$, eine Auslenkung von

$$s_0 = \frac{F}{E I} \frac{l^3}{3} \quad (4.7)$$

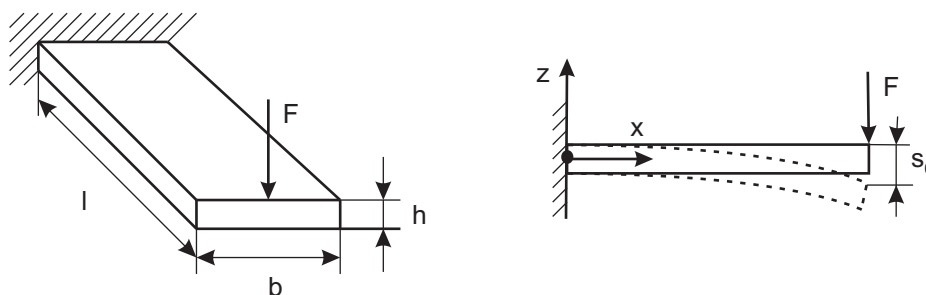


Abbildung 4.22: Biegebalken einseitig eingespannt

Mit dem Flächenträgheitsmoment

$$I = \frac{b h^3}{12} \quad (4.8)$$

ergibt die Auslenkung am Balkenende:

$$\boxed{s_0 = \frac{4 F}{E b} \left(\frac{l}{h} \right)^3} \quad (4.9)$$

Die Federkonstante c ergibt mit

$$F = c s_0 \quad (4.10)$$

$$c = \frac{F}{s_0} = \frac{1}{4} b E \left(\frac{h}{l} \right)^3 \quad (4.11)$$

Die Biegelinie entlang des gebogenen Balkens beträgt:

$$\boxed{s(x) = s_0 \frac{1}{2} \left(\frac{x}{l} \right)^2 \left(3 - \frac{x}{l} \right)} \quad (4.12)$$

Die örtliche Spannungsverteilung im Biegebalken ist definiert als:

$$T(x, z) = \frac{F l}{I} z \left(1 - \frac{x}{l} \right) = \frac{12 F l z}{b h^3} \left(1 - \frac{x}{l} \right) \quad (4.13)$$

In der Balkenmitte, d.h. bei $z = 0$, liegt die neutrale Faser. An der Einspannstelle tritt die maximale mechanische Spannung auf:

$$\begin{aligned} x &= 0 \\ z &= \pm \frac{h}{2} \\ T_{\max} &= \frac{6 F l}{b h^2} \end{aligned}$$

Am Balkenende verschwindet die mechanische Spannung:

$$\begin{aligned} x &= l \\ T &= 0 \end{aligned}$$

Die Dehnung auf der Balkenoberfläche mit $z = h/2$ beträgt:

$$S(x) = S_0 \left(1 - \frac{x}{l} \right) \quad (4.14)$$

$$\frac{S_0}{s_0} = \frac{3 h}{2 l^2} \quad (4.15)$$

$$S_0 = \frac{4 F}{E b} \frac{l^3}{h^3} \frac{3}{2} \frac{h}{l^2} = \frac{6 F}{E b} \frac{l}{h^2} \quad (4.16)$$

$$S_0 = \frac{T_{\max}}{E} \quad (4.17)$$

4.2.2 Biegebalken verschiebbar

Ein Biegebalken nach Abbildung 4.23 ist an einer Seite fest eingespannt und an der anderen Seite parallel zur z -Achse verschiebbar, so dass an beiden Enden die Steigung Null beträgt. Ein solcher Biegebalken kann als Serienschaltung von zwei einseitig eingespannten Biegebalken der halben Länge $l/2$ mit einem Wendepunkt bei $x = l/2$ betrachtet werden.

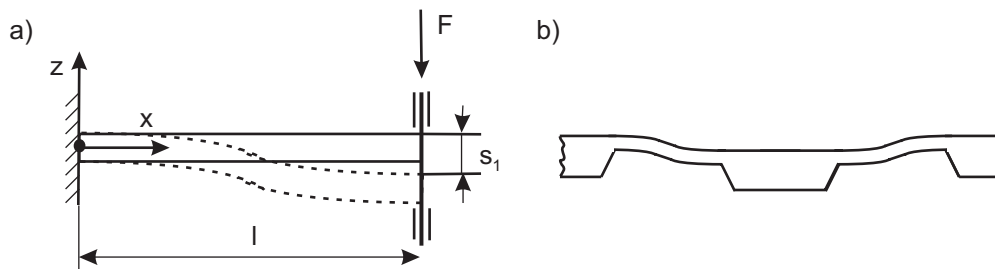


Abbildung 4.23: Verschiebbarer Biegebalken
 Prinzip (a); Realisierung in Silizium-Mikromechanik (b)

Die Auslenkung am Balkenende, d. h. bei $x = l$, beträgt:

$$s_1 = \frac{F}{E I} \frac{l^3}{12} \quad \text{mit} \quad I = \frac{b h^3}{12} \quad (4.18)$$

$$\boxed{s_1 = \frac{F}{E b} \left(\frac{l}{h} \right)^3} \quad (4.19)$$

Die Federkonstante c ergibt sich zu:

$$c = \frac{F}{s_1} \quad (4.20)$$

$$c = b E \left(\frac{h}{l} \right)^3 \quad \text{vierfach steifer als beim freien Biegebalken}$$

Die Biegelinie:

$$\boxed{s(x) = s_1 \left(\frac{x}{l} \right)^2 \left(3 - 2 \frac{x}{l} \right)} \quad (4.21)$$

Resonanzfrequenz von Biegebalkenstrukturen

In vielen Mikrosystemen sind die dynamischen Eigenschaften wie Sprungantwort und Resonanzverhalten von Bedeutung. Die Resonanzfrequenz von Biegebalken ist allgemein definiert mit:

$$w_0 = \sqrt{\frac{1}{m n}} \quad \text{mit der Nachgiebigkeit} \quad n = \frac{1}{c} \quad (4.22)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}} \quad (4.23)$$

4.2.3 Biegebalken in Bulk-Mikromechanik

Biegebalken in Mikrosystemen können auf unterschiedliche Weise dargestellt werden (vgl. Kap. 3). Auf Grund der hervorragenden elastischen Eigenschaften von monokristallinem Silizium ist die Herstellung von Biegebalken mit Hilfe der Silizium-Bulk-Mikromechanik sehr verbreitet.

Abbildung 4.24 zeigt den Herstellungsprozess eines Biegebalkens in Bulk-Silizium-Mikromechanik für (100)-Silizium-Wafer mit elektrischem Kontakt für die elektrochemische Ätztechnik. Abbildung 4.25 und 4.26 zeigt Beispiele für zweiseitig eingespannte Biegebalken, wobei die Sonnenradstruktur durch eine Torsion die Parallelführung gestattet, wogegen in Abbildung 4.26 die Biegebalken bei der Auslenkung unter mechanischer Zugspannung stehen.

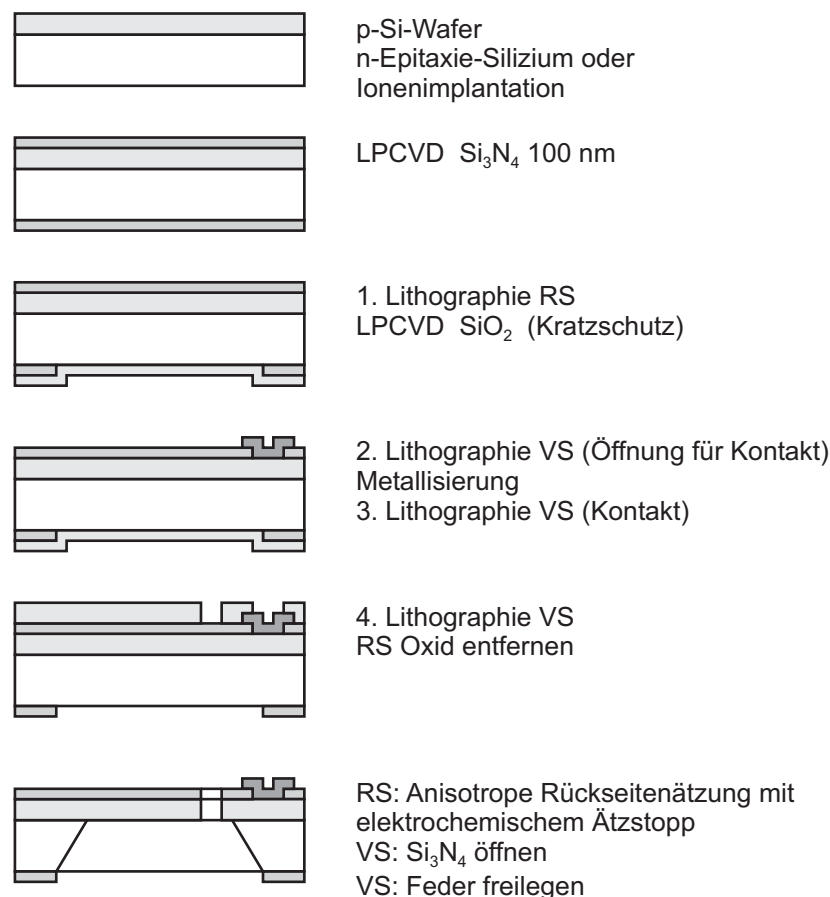


Abbildung 4.24: Herstellung von Biegebalken in Si-Mikromechanik mit elektrochemischem Ätzstopp

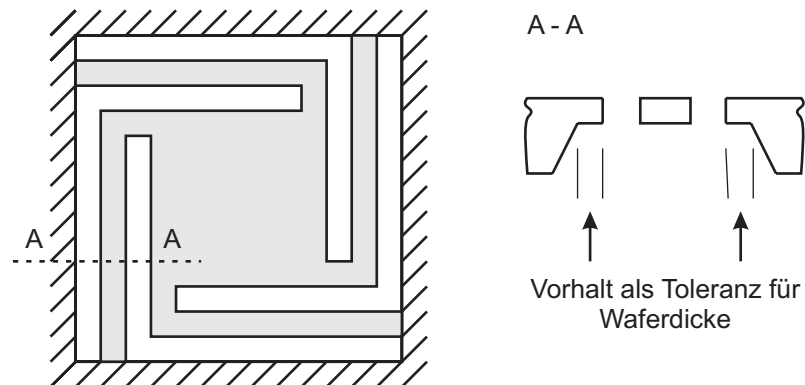


Abbildung 4.25: Zweiseitig eingespannter Biegebalken (frei verschiebbar)
 Torsionsfeder mit Sonnenradstruktur

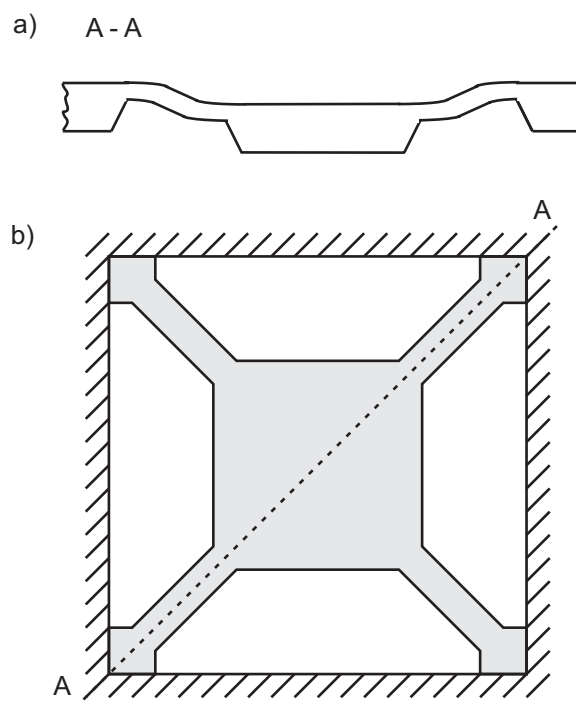


Abbildung 4.26: Zweiseitig eingespannter Biegebalken (geklemmt)
 Seismische Masse eines Beschleunigungssensors vierseitig durch Biegebalken
 aufgehängt

4.2.4 Biegebalken in Oberflächenmikromechanik

Bei der Oberflächenmikromechanik müssen alle Funktionselemente horizontal auf der Substratoberfläche angeordnet werden. Somit erfolgen die Auslenkungen von Biegebalkenstrukturen in horizontaler Richtung. Auf Grund der prozesstechnisch beschränkten Schichtdicke bei polykristallinen Siliziumschichten von max. $1...2\ \mu\text{m}$ sind die Balkenbreite und Balkendicke in etwa gleich, so dass nahezu quadratische Stäbe vorliegen.

Beim Einsatz der LIGA-Technik oder der DRIE-Verfahren (Tiefentrockenätzverfahren) in monokristallinem Silizium sind flache Balkenprofile herstellbar, wobei die Balkenseiten hinsichtlich ihrer längeren Querschnittsseiten senkrecht zur Substratoberfläche stehen.

Abbildung 4.27 zeigt eine typische Parallelfederaufhängung für ein horizontal bewegliches Teil und in Abbildung 4.28 ist eine Anwendung als Beschleunigungssensor dargestellt.

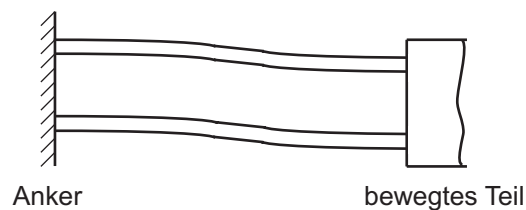


Abbildung 4.27: Horizontal ausgelenkter Biegebalken in Oberflächen-Mikromechanik

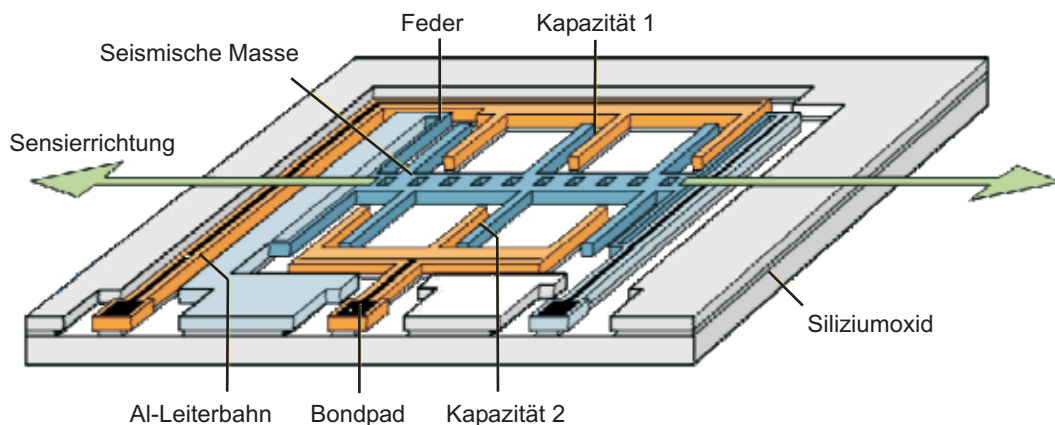


Abbildung 4.28: Beschleunigungssensor in Oberflächen-Mikromechanik [Bosch]

4.3 Mikromechanische Platten (Membranen)

Im allgemeinen werden in der Mikromechanik allseits eingespannte Platten verwendet. Nach Abbildung 4.29 wird eine dünne Platte mit der Dicke h durch den Druck p in ihrer Mitte um den Betrag w_0 ausgelenkt. Die folgenden Gleichungen sind Näherungslösungen

der Differentialgleichungen für eine kreiszylindrisch eingespannte Platte (Abbildung 4.29) bei geringen Auslenkungen $w_0 < h$.

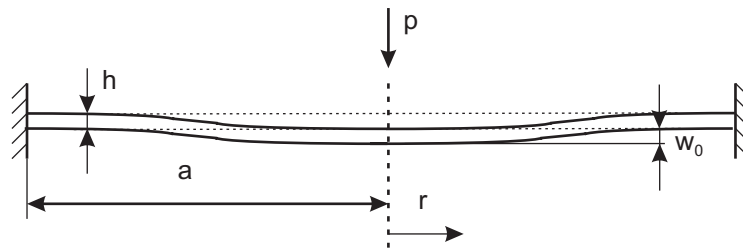


Abbildung 4.29: Kreiszylindrische Silizium-Membran

Die Plattenauslenkung in der Mitte beträgt:

$$\frac{w_0}{h} = \frac{3p}{16E} \left(\frac{a}{h}\right)^4 (1 - \nu^2) \quad (4.24)$$

$$\boxed{w_0 = \frac{3}{16} \frac{(1 - \nu^2)}{E} \frac{a^4}{h^3} p} \quad (4.25)$$

mit der Plattendicke h , Plattenradius a und dem Druck p .

Die Biegelinie entlang des Plattenradius ergibt:

$$w(r) = w_0 \left(1 + \left(\frac{r}{a}\right)^4 - 2 \left(\frac{r}{a}\right)^2\right) \quad (4.26)$$

$$\boxed{w(r) = w_0 \left(1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2\right)^2} \quad (4.27)$$

Die Krümmung der Platte entspricht der 2. Ableitung der Biegelinie:

$$w''(r) = \frac{4w_0}{a^2} \left(1 - 3 \left(\frac{r}{a}\right)^2\right) \quad (4.28)$$

Maximale Krümmung am Rand: $r = a$

$$K_{\max} = w''(r)|_{\max} = \frac{8w_0}{a^2} \quad (4.29)$$

Krümmung in der Plattenmitte: $r = 0$

$$w''(0) = \frac{4w_0}{a^2} = \frac{1}{2} K_{\max} \quad (4.30)$$

Runde Silizium-Membranen (Abbildung 4.30) werden durch isotropes Ätzen mit elektrochemischem Ätzstopp hergestellt. Als Ätzmedium wird $\text{HNO}_3 + \text{HF} + \text{H}_2\text{O}$ verwendet. Der Prozessablauf entspricht dem des Biegebalkens mit Rückseitenätzung, siehe Abbildung 4.24.

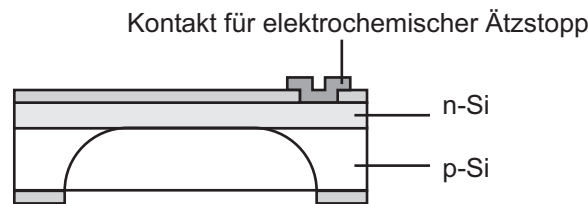


Abbildung 4.30: Querschnitt einer kreiszylindrischen Silizium-Membran

Rechteckige Si-Membran

Eine eingespannte rechteckige Platte in der Draufsicht zeigt Abbildung 4.31 a. Rechteckige bzw. quadratische Membranen können durch anisotropes KOH-Ätzen mit elektrochemischem Ätzstopp gemäß dem oben genannten Prozessablauf aus Abbildung 4.24 hergestellt werden. Abbildung 4.31 b zeigt den Querschnitt.

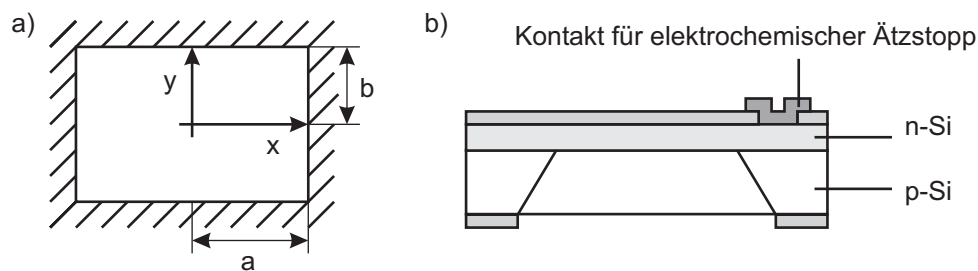


Abbildung 4.31: Rechteckige Silizium-Membran
 Draufsicht (a); Querschnitt mit anisotroper Grubenätzung (b)

Die Auslenkung der Platte in der xy-Ebene ergibt sich zu:

$$w(x, y) = p \frac{3}{2} \frac{(1 - \nu^2)}{E h^3} \frac{\left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}\right)^2}{\frac{3}{a^4} + \frac{2}{a^2 b^2} + \frac{3}{b^4}} \frac{128}{\pi^4} \quad (4.31)$$

Im Fall einer quadratischen Membran mit $a = b$ ergibt sich:

$$w(x, y) = p \frac{3}{16} \frac{(1 - \nu^2)}{E} \frac{a^4}{h^3} \left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{a^2}\right)^2 \frac{128}{\pi^4} \quad (4.32)$$

Mit der Abkürzung w_0 aus (4.25) vereinfacht sich der Ausdruck zu:

$$w(x, y) = w_0 \left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{a^2}\right)^2 \frac{128}{\pi^4} \quad (4.33)$$

Gleichung (4.33) zeigt eine ähnliche Struktur wie Gleichung (4.27) für die Kreismembran mit $r^2 = x^2 + y^2$ und dem Korrekturfaktor k .

$$k = \frac{128}{\pi^4} \approx 1,3 \quad (4.34)$$

Gegenüber der kreiszylindrischen Platte erhöht sich die Auslenkung durch die biegbaren Eckbereiche (Abbildung 4.32).

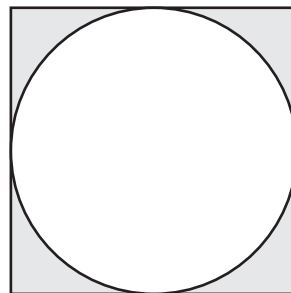


Abbildung 4.32: Quadratische Membran im Vergleich zur kreisförmigen Membran

Rechteckige Silizium-Membran mit Mittenverstärkung

Oft werden in Mikrosystemen Membranen mit einer Versteifung in der Mitte benötigt. Bei einer Realisierung mit Hilfe der Silizium-Mikromechanik gemäß Abbildung 4.33 besteht der Mittenbereich („Boss“) aus dem ursprünglichen Wafer und die Membran bildet nur noch einen Ring der Breite b . Solche Strukturen werden bei Drucksensoren im Hochdruckbereich als Ventilsitz für Mikroventile (siehe Kap. 6) eingesetzt.

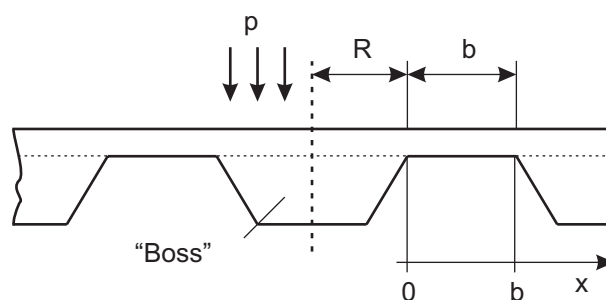


Abbildung 4.33: Membran mit Mittenverstärkung

Die Auslenkung der Ringmembran lässt sich durch eine Näherungslösung beschreiben:

$$s(x) = p \frac{1}{2} \frac{(1 - \nu^2)}{E} R \left(\frac{b}{h} \right)^3 \left(\frac{x}{b} \right)^2 \left(3 - 2 \frac{x}{b} \right) \quad (4.35)$$

Diese Näherung entspricht ungefähr der Biegelinie eines verschiebbaren Biegebalkens nach (4.21) und (4.19), wobei die Balkenlänge aus der Breite b der Ringmembran besteht und die „Balkenbreite“ durch den Umfang $8R$ der Mittenverstärkung beschrieben wird. Somit gilt diese Näherung nur für große Mittenverstärkungen $R \gg b$.

Die Einspannungen von Biegebalken und Platten (Membranen) lassen sich nach Abbildung 4.34 durch unterschiedliche Herstellprozessfolgen und in verschiedenen Anordnungen bezüglich der Kristallorientierungen realisieren.

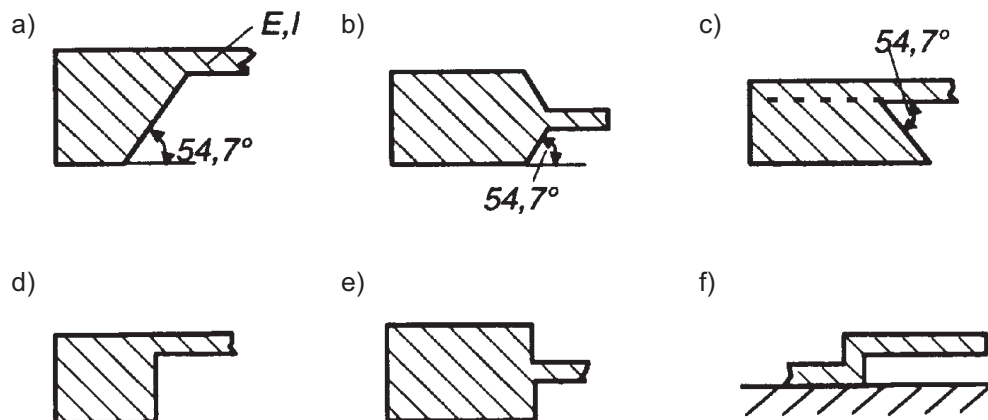


Abbildung 4.34: Einspannungen von Biegebalken und Platten

a) bis c) in (100)-Silizium

d) bis e) in (110)-Silizium oder durch anisotropes Trockenätzen (DRIE)

f) von Strukturen hergestellt mit Hilfe der Oberflächenmikromechanik

4.4 Mechanische Spannungen in dünnen Schichten

Dünne Schichten auf einem festen Substrat stehen nach der Herstellung unter Eigenspannung, da die Abscheidung bei hoher Temperatur erfolgt. Abbildung 4.35 veranschaulicht die unterschiedliche Dehnung durch gedankliche Trennung der Schicht vom Substrat.

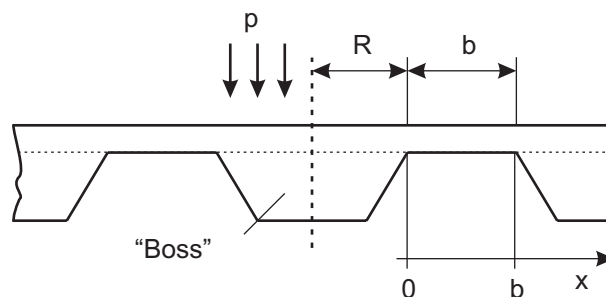


Abbildung 4.35: Schematische Darstellung der Eigenspannung von dünnen Schichten

Substrat:

Die Ausdehnung Δl_1 , relative Dehnung S_1 bzw. mechanische Spannung T_1 im festgeklebten Fall ergeben sich für das Substrat zu:

$$\Delta l_1 = l \alpha \Delta T \quad (4.36)$$

$$S_1 = \alpha_1 \Delta T \quad (4.37)$$

$$T_1 = E_1 \alpha_1 \Delta T \quad (4.38)$$

Schicht:

Die abgeschiedene dünne Schicht dehnt sich auf Grund von zwei Beiträgen aus, einer intrinsischen Eigenspannung T_{20} durch Gefügeumwandlung und der thermischen Ausdehnung α_2 .

$$\Delta l_2 = \Delta l_{21} + \Delta l_{22} \quad (4.39)$$

$$\Delta l_2 = l \alpha_2 \Delta T + l S_{20} \quad (4.40)$$

$$S_2 = \alpha_2 \Delta T + S_{20} \quad (4.41)$$

$$T_2 = E_2 \alpha_2 \Delta T + T_{20} \quad (4.42)$$

Die thermischen Ausdehnungskoeffizienten für typische Schichtsysteme der Mikrosystemtechnik lauten:

$$\alpha_{\text{Si}} = 2,33 \cdot 10^{-6} / \text{K}$$

$$\alpha_{\text{SiO}_2} = 0,55 \cdot 10^{-6} / \text{K}$$

$$\alpha_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 3 \dots 6 \cdot 10^{-6} / \text{K}$$

Die thermisch induzierten Spannungen in Mehrschichtsystemen können einerseits unerwünschte Auswirkungen aufweisen, andererseits aber gezielt für Bauteilfunktionen ausgenutzt werden:

- Störende Spannung $\Rightarrow$ Verbiegung von Wafern
- Gezielter Einsatz zur Verkrümmung von Biegebalken, Federn und Membranen

Abbildung 4.36 zeigt die Spannungsverteilung über den Querschnitt einer thermisch oxidierten Siliziumscheibe mit einer Druckspannung in der SiO_2 -Schicht.

Aufgrund des niedrigen Ausdehnungskoeffizienten von SiO_2 zieht sich das Silizium-Substrat stärker zusammen, so dass an der Substratoberfläche Zugspannungen auftreten und an der Waferrückseite Druckspannungen. Insgesamt würde sich der Wafer zur Rückseite hin verwölben. Das Integral der Spannungen entlang des Querschnitts ergibt Null.

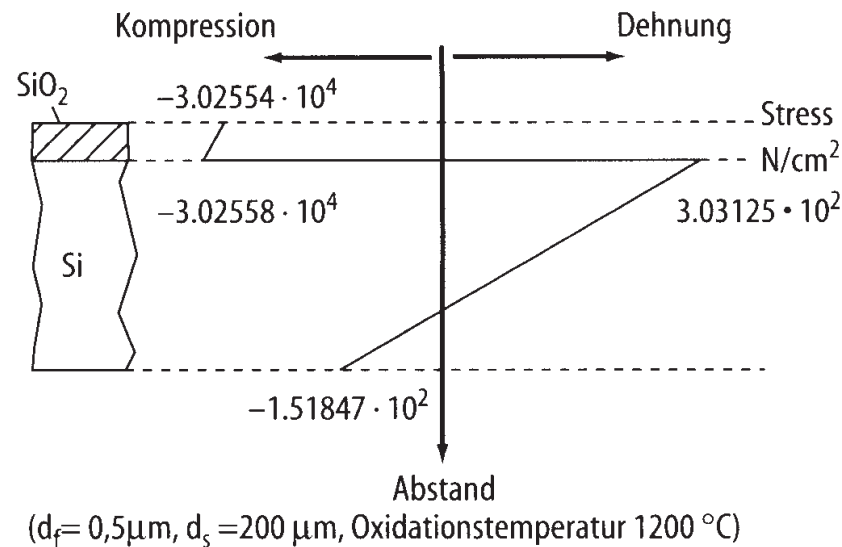


Abbildung 4.36: Druckspannung einer thermisch oxidierten Si-Scheibe

Gekrümmte Blattfeder

Für Anwendungen in Schaltern und Ventilen lassen sich gekrümmte Blattfedern aus geätzten Silizium-Biegebalken mit einem Mehrschichtsystem herstellen. Im Folgenden wird die Berechnung der Blattfeder-Krümmung eines Systems mit n Schichten dargelegt.

Aufgrund ihrer unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten in Verbindung mit unterschiedlichen Abscheidungstemperaturen weisen die Isolationsschichten innere mechanische Spannungen auf, welche das Krümmen der Feder bewirken; im gekrümmten Zustand ist die Feder von äußeren Kräften und Momenten frei. Abbildung 4.37 verdeutlicht den Schichtaufbau einer Antriebsfeder und die wirkenden Spannungen.

Betrachtet wird eine aus n Schichten aufgebaute Blattfeder, deren i -te Schicht durch die Dicke d_i , den Elastizitätsmodul E_i , den linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_i und die Prozesstemperatur T_i gekennzeichnet ist. T_i ist damit diejenige Temperatur, bei der die Schicht i ohne äußere Dehnung frei von inneren mechanischen Spannungen ist. Aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten α_s des Substratmaterials (welches bei Raumtemperatur als spannungsfrei angenommen wird) und α_i des Schichtmaterials i treten beim Abkühlen von der Prozesstemperatur T_i auf Raumtemperatur T_R in beiden Materialien unterschiedliche elastische Dehnungen auf, so dass sich in Schicht i die thermisch induzierte mechanische Spannung T_{th_i} aufbaut:

$$T_{th_i} = E_i (\alpha_i - \alpha_s) (T_i - T_s) \quad (4.43)$$

Ist die Blattfeder frei beweglich, so krümmt sie sich infolge der überlagerten inneren Spannungen aller Einzelschichten und es treten im Gleichgewichtszustand keine äußeren Kräfte und Momente auf, siehe Abbildung 4.38.

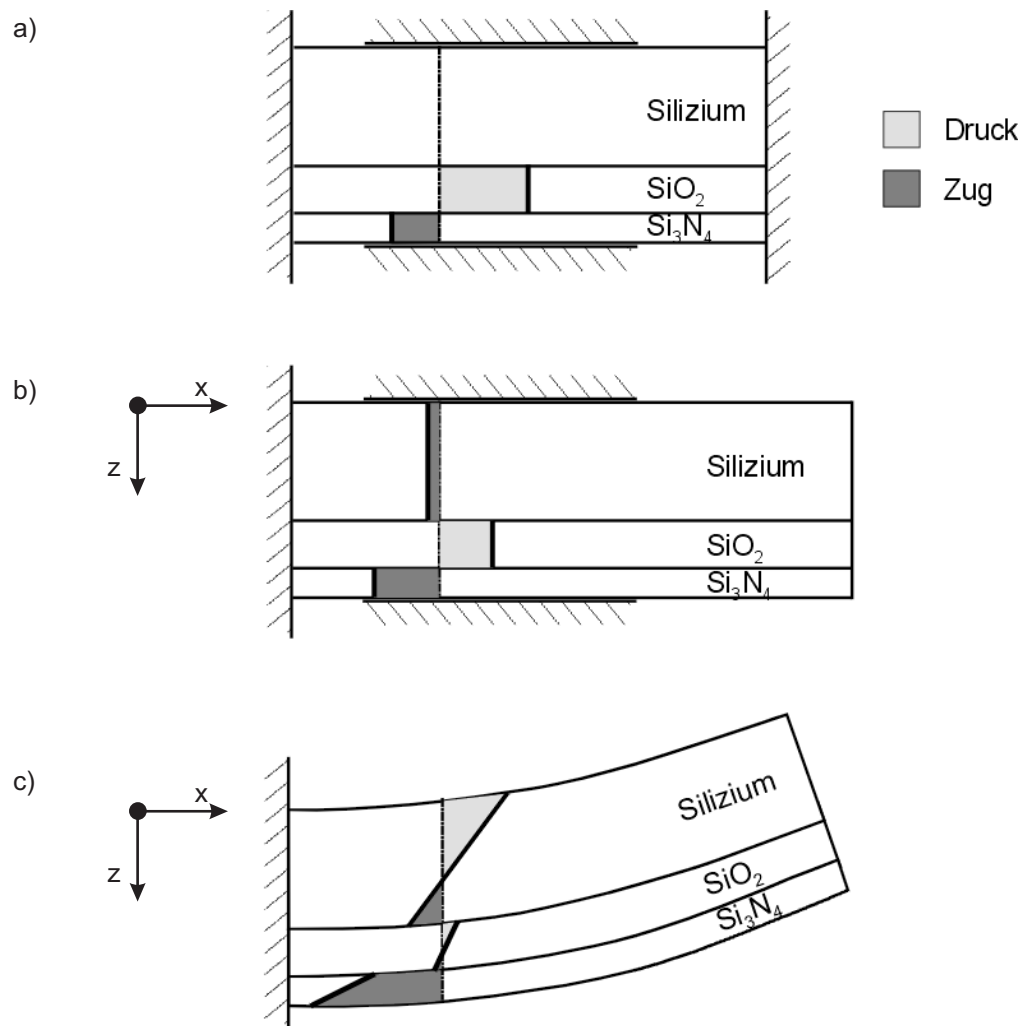


Abbildung 4.37: Biegebalken mit Vorkrümmung [Rechengang nach S. K. Hesse]

- a) Gedachter Anfangszustand (bei Raumtemperatur)
- b) Längsgedehnter Zustand ohne äußere Kräfte
- c) Gekrümmter Zustand ohne äußere Momente

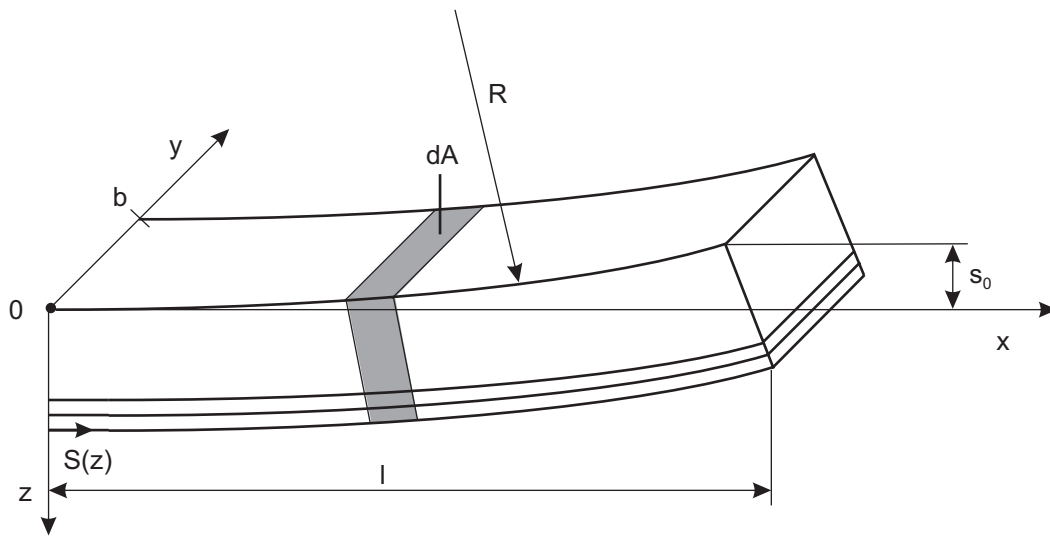


Abbildung 4.38: Kenngrößen eines Biegebalkens mit Vorkrümmung

Beschreibt $S(z)$ die Funktion der Längsdehnung in Abhängigkeit von der Federkrümmung

$$S(z) = S_{z_0} + \frac{1}{R} z \quad (4.44)$$

mit R als Krümmungsradius über das gesamte aus n Schichten bestehende Federpaket und beträgt die Energiedichte

$$w_{\text{mech}} = \frac{1}{2} S T \quad \text{mit} \quad T = E S \quad (4.45)$$

$$w_{\text{mech}} = \frac{1}{2} \frac{T^2}{E} = \frac{1}{2} E S^2 \quad \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \frac{\text{Nm}}{\text{m}^3} = \frac{\text{J}}{\text{m}^3} \right] \quad (4.46)$$

$$W_{\text{mech}} = \int w_{\text{mech}} dV \quad (4.47)$$

dann gilt für die mechanische Energie des Systems pro Länge und Breite

$$\begin{aligned} \frac{\partial W_{\text{mech}}}{\partial A} &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \int_{z_{i-1}}^{z_i} \frac{T_{\text{ges}_i}^2(z)}{E_i} dz \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \int_{z_{i-1}}^{z_i} \frac{(T_{\text{th}_i} + S(z) E_i)^2}{E_i} dz \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \int_{z_{i-1}}^{z_i} \left(\frac{T_{\text{th}_i}^2}{E_i} + S^2(z) E_i + 2 T_{\text{th}_i} S(z) \right) dz \end{aligned} \quad (4.48)$$

mit

$$z_i = z_{i-1} + d_i \quad z_0 = 0 \quad (4.49)$$

Gleichung (4.48) enthält als Unbekannte noch die Krümmung $1/R$ und die Dehnung S_{z_0} an der Federunterseite, die den Dehnungsverlauf $S(z)$ über die Federdicke bestimmen, siehe Gleichung (4.44). R und S_{z_0} stellen sich so ein, dass die mechanische Energie des Systems minimal wird und somit folgende Bedingungen erfüllt sein müssen:

$$\frac{\partial \frac{\partial W_{\text{mech}}}{\partial A}}{\partial \frac{1}{R}} = 0 \quad (4.50)$$

und

$$\frac{\partial \frac{\partial W_{\text{mech}}}{\partial A}}{\partial S_{z_0}} = 0 \quad (4.51)$$

Mit

$$\begin{aligned} \frac{\partial \frac{\partial W_{\text{mech}}}{\partial A}}{\partial \frac{1}{R}} &= \sum_{i=1}^n \int_{z_{i-1}}^{z_i} \left(z (S_{z_0} E_i + T_{\text{th}_i}) + z^2 E_i \frac{1}{R} \right) dz \\ &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{z_i^2 - z_{i-1}^2}{2} (S_{z_0} E_i + T_{\text{th}_i}) + \frac{z_i^3 - z_{i-1}^3}{3} E_i \frac{1}{R} \right) = 0 \end{aligned} \quad (4.52)$$

und

$$\begin{aligned} \frac{\partial \frac{\partial W_{\text{mech}}}{\partial A}}{\partial S_{z_0}} &= \sum_{i=1}^n \int_{z_{i-1}}^{z_i} \left(z E_i \frac{1}{R} + S_{z_0} E_i + T_{\text{th}_i} \right) dz \\ &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{z_i^2 - z_{i-1}^2}{2} E_i \frac{1}{R} + d_i (S_{z_0} E_i + T_{\text{th}_i}) \right) = 0 \end{aligned} \quad (4.53)$$

ergibt sich für die beiden zu ermittelnden Unbekannten $1/R$ und S_{z_0} das Gleichungssystem

$$A S_{z_0} + B \frac{1}{R} = C \quad (4.54)$$

$$D S_{z_0} + E \frac{1}{R} = F \quad (4.55)$$

mit den Koeffizienten

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} E_i (z_i^2 - z_{i-1}^2) \quad (4.56)$$

$$B = \sum_{i=1}^n \frac{1}{3} E_i (z_i^3 - z_{i-1}^3) \quad (4.57)$$

$$C = - \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} T_{\text{th}i} (z_i^2 - z_{i-1}^2) \quad (4.58)$$

$$D = \sum_{i=1}^n d_i E_i \quad (4.59)$$

$$E = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} E_i (z_i^2 - z_{i-1}^2) = A \quad (4.60)$$

$$F = - \sum_{i=1}^n d_i T_{\text{th}i} \quad (4.61)$$

und der Lösung für die Dehnung S_{z_0} an der Federunterseite und die Krümmung $1/R$

$$S_{z_0} = \frac{C E - B F}{A E - B D} \quad (4.62)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{A F - C D}{A E - B D} \quad (4.63)$$

Gemäß Abbildung 4.38 ergibt sich aus der Krümmung R die Auslenkung $s_0 = f(R, l)$ am Federende zu

$$R^2 = (R - s_0)^2 + l^2 \quad (4.64)$$

$$s_0 = R - \sqrt{R^2 - l^2} \quad (4.65)$$

4.5 Elektrische Funktionselemente

Passive elektrische Funktionselemente sind leicht in mikromechanische Bauelemente integrierbar. In die Schichtsysteme von Mikrosystemen können als Funktionselemente Leiterbahnen, Widerstände, Kapazitäten und Induktivitäten bzw. Flachspulen integriert werden.

4.5.1 Leiterbahnen

Der elektrische Widerstand von Leiterbahnen ist trotz kleiner Bauteile nicht zu vernachlässigen. Abbildung 4.39 zeigt den Aufbau von elektrischen Leiterbahnen auf einer Isolationschicht zur Isolation gegen ein unter Umständen leitfähiges Substrat.

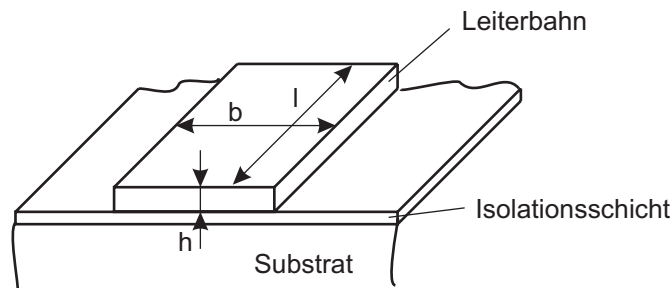


Abbildung 4.39: Geometrie einer elektrischen Leiterbahn

Der elektrische Widerstand ergibt sich zu

$$R = \rho \frac{l}{b h} \quad (4.66)$$

mit dem spezifischen Widerstand ρ . Bei mehrschichtigen Leiterbahnen gilt eine Parallelschaltung der Widerstände der Einzelschichten:

$$R = \frac{l}{b} \frac{1}{\sum_i \frac{h_i}{\rho_i}} \quad (4.67)$$

Als Rechenhilfe dient der Flächenwiderstand von quadratischen Leitungselementen (*Square*) mit $l = b$, wie in Abbildung 4.40 gezeigt:

$$R_{\square} = \frac{\rho}{h} \quad (4.68)$$

Das Auszählen von Quadraten ergibt schnell den Widerstand.

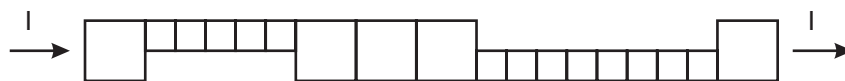


Abbildung 4.40: Widerstandsbestimmung einer Leiterbahn mit Hilfe von Quadratelementen

Beispiel:

Leiterbahnen aus Al:

$$\rho = 0,03 \, \Omega \text{mm}^2/\text{m}$$

$$h = 1 \, \mu\text{m}$$

$$R_{\square} = 30 \, \text{m}\Omega$$

Eine Leiterbahnstruktur nach Abbildung 4.40 ergibt:

$$n = 18$$

$$R = n R_{\square} = 0,54 \Omega$$

Zur Verminderung des elektrischen Widerstands ist wie in diesem Beispiel gezeigt eine Verstärkung der Leiterbahnen durch eine galvanische Abscheidung notwendig.

4.5.2 Kapazitäten

Elektrische Kapazitäten lassen sich durch übereinanderliegende Metallschichten mit der Fläche A und einer dazwischenliegenden Isolationsschicht mit der Dicke d_2 und der Permeabilität ε_2 realisieren (siehe Abbildung 4.41). Die Kapazität beträgt

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_2 \frac{A}{d_2} \quad (4.69)$$

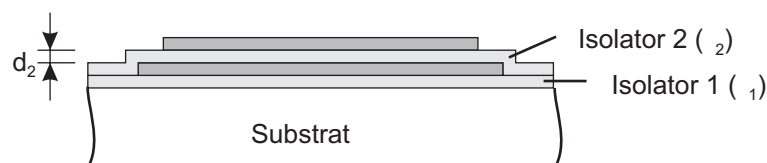


Abbildung 4.41: Dünnschichtaufbau einer Kapazität

4.5.3 Flachspulen

Für elektromagnetische und elektrodynamische Mikroantriebe werden flache Spulen, die in einer Ebene oder in mehreren von einander isolierten Lagen übereinander angeordnet sind, benötigt. Die wichtigsten Anforderungen sind:

- Elektrischer Widerstand $\rightarrow 0$
- Windungszahl $\rightarrow$ hoch

Abbildung 4.42 zeigt schematisch den Querschnitt einer Wicklung in konventioneller Dünnschichttechnik. Im Gegensatz zu lackisolierten Drähten ist der Füllfaktor niedrig, da der Zwischenraum etwa gleich breit ist wie jede Leiterbahn.

Um beide o. g. Anforderungen zu erfüllen, muss die Packungsdichte erhöht werden, indem ein Strukturierungsverfahren mit hohem Aspektverhältnis $AR \gg 1$ verwendet wird. Eine optimierte Flachspule nach Abbildung 4.43 kann durch UV-LIGA, d. h. mit Hilfe der Tiefenlithographie und Galvanik hergestellt werden. Die Prozessfolge besteht aus den Blöcken:

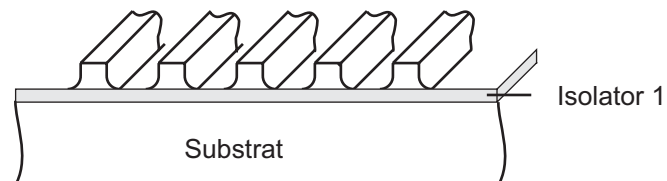


Abbildung 4.42: Flachspule in Dünnschichttechnik

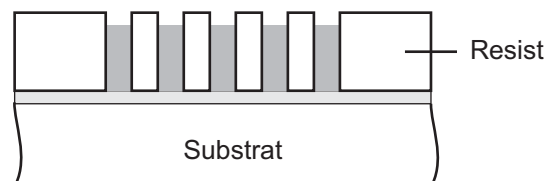


Abbildung 4.43: Flachspule mit UV-LIGA-Technik

- Beschichtung metallische Startschicht
- Tiefenlithographie mit $AR \gg 1$
- Galvanische Abscheidung der Leiterbahnen
(Schichtdicke Leiterbahn $\neq$ Resistdicke)
- Resist entfernen
- Entfernen der überflüssigen Startschicht

Kapitel 5

Mikroaktoren

Aktoren sind Energiewandler, die in der Regel elektrische Energie in mechanische Energie, d. h. *Kraft* · *Weg* umwandeln. Die Abgrenzung von Mikroaktoren ist nicht scharf definiert. Sie kann einerseits durch den Grad der Miniaturisierung (einige mm) oder aber durch den Einsatz von Fertigungsverfahren der Mikrotechnik bestimmt sein.

Miniaturisierung von Antrieben

Bei der Miniaturisierung von Antrieben wird das Skalierungsverhalten einiger charakteristischer Größen auf die Längenabmessung l bezogen:

- Verkleinerung der Abmessungen:
 - Volumen, Masse $\sim l^3$
 - Kräfte (meistens) $\sim l^2$
 - Verhältnis: Kraft / Volumen $\sim 1/l$
- Volumenkräfte: Trägheit, Gravitation vernachlässigbar
 - ⇒ Massenträgheit gering
 - ⇒ kurze Stellzeiten
- Oberflächenkräfte: Reibung, Adhäsion, Feldkräfte bestimmend

Mikroaktoren können nach folgenden Kriterien eingeteilt werden:

- Physikalisches Wirkprinzip
- Funktionsklasse

Antriebsprinzipien

Aufgrund der oben genannten Gesetzmäßigkeiten stehen für Mikroaktoren im Gegensatz zu makroskopischen Antriebssystemen eine Vielzahl von Antriebsprinzipien zur Verfügung:

- Antriebe durch Feldkräfte:
 - elektromagnetisch
 - elektrostatisch
 - elektrodynamisch
- Dehnungsantrieb
 - piezoelektrisch
 - magnetostruktiv
- Thermische Aktoren
 - thermomechanisch (Bimetalleffekt)
 - thermopneumatisch
 - Formgedächtniseffekt (Memorymetalle)

Funktionsklassen von Aktoren

Es kann eine Vielzahl von Funktionsklassen unterschieden werden, die sich z.B. nach der Art der mechanischen Bewegung in Linear- oder Rotationsantriebe unterscheiden lassen. Die Bewegung bzw. Zustandsänderung von Flüssigkeiten stellen ebenso wie die Gruppe der Schalter eigene Klassen dar:

- Hubantrieb
- Translationsantrieb
- Rotationsantrieb
- Flüssigkeitsantrieb
- Schalter

5.1 Feldaktoren

Die Gesetzmäßigkeiten von Aktoren angetrieben durch Kräfte, die von elektrostatischen bzw. elektromagnetischen Feldern hervorgerufen werden, verhalten sich analog. Im makroskopischen Bereich ist die Energiedichte von magnetischen Feldern um den Faktor 1000 bis 10.000 höher als bei elektrostatischen Feldern. Das gilt bei Mikroaktoren unter den Randbedingungen der Wärmebelastung durch Verlustleistungen *nicht*.

5.1.1 Elektrostatische Mikroaktoren

In elektrostatischen Mikroaktoren wird eine Kraft F durch eine elektrische Feldstärke E erzeugt (Abbildung 5.1).

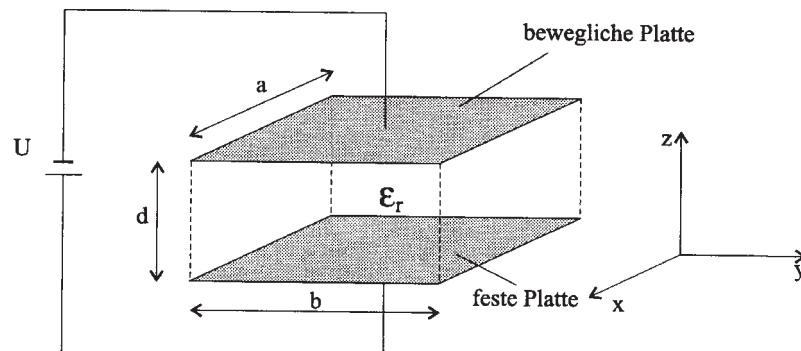


Abbildung 5.1: Plattenkondensator mit Koordinatensystem
a, b: Abmessungen der Kondensatorelektrode; d: Plattenabstand
Elektrische Feldkonstante $\varepsilon_0 = 8,854 \text{ pF/m}$

Die Energie des gespeicherten elektrischen Feldes ist:

$$W = \frac{1}{2} C U^2 \quad (5.1)$$

$$C = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad \text{mit} \quad A = a b \quad (5.2)$$

$$\boxed{W = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r U^2 \frac{a b}{d}} \quad (5.3)$$

Die Kräfte ergeben sich als Änderung der Energie entlang der jeweiligen Koordinatenrichtung:

$$F_x = \frac{\partial W}{\partial x} \quad (5.4)$$

$$F_y = \frac{\partial W}{\partial y} \quad (5.5)$$

$$F_z = -\frac{\partial W}{\partial z} \quad (5.6)$$

Kraft in transversaler Richtung

Somit ergeben sich die Kräfte in transversaler Richtung nach Abbildung 5.2 (Parallelverschiebung der Platten) zu:

$$F_x = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r U^2 \frac{b}{d} \quad (5.7)$$

$$F_y = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r U^2 \frac{a}{d} \quad (5.8)$$

Die Kräfte sind unabhängig von der Überlappungslänge der Platten und damit für jede Position des Aktors konstant.

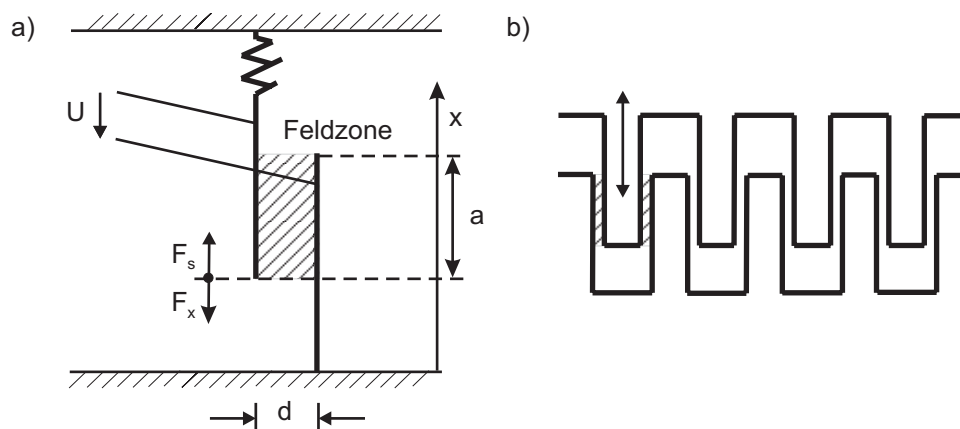


Abbildung 5.2: Elektrostatischer Aktor mit Transversalkraft (Schema)

- a) Elektrostatischer Aktor mit Transversalkraft
- b) Kammelektrodenstruktur

Nach Abbildung 5.2 ist die bewegliche Elektrode an einer Feder aufgehängt. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung vergrößert sich die Überlappungslänge a und die Feder wird ausgelenkt, so dass eine Federkraft F_s entsteht:

$$F_s = c x \quad (5.9)$$

Gesamtkraft auf bewegliche Elektrode:

$$F_{\text{ges}} = F_x(U) + F_s(x) \quad (5.10)$$

In Ruhelage gilt:

$$F_{\text{ges}} = 0 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r U^2 \frac{b}{d} + c x \quad (5.11)$$

Auslenkung der beweglichen Platte in Richtung vergrößerter Überlappungslänge:

$$x = -\frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r U^2 \frac{b}{d} \frac{1}{c} \quad (5.12)$$

$$x \sim U^2 \quad (5.13)$$

Die Auslenkung erfolgt stetig (quadratische Abhängigkeit von U).

Beispiel:

Elektrostatistischer Kammelektrodenantrieb hergestellt in Silizium-Oberflächen-Mikromechanik (Abbildung 5.3).

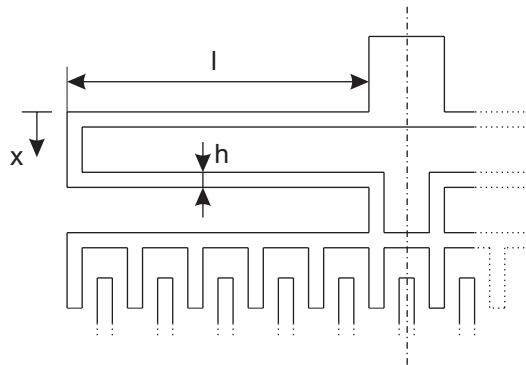


Abbildung 5.3: Aufhängung mit Biegebalken zweiseitig eingespannt (verschiebbar)

- Schichtdicke polykristallines Silizium (Poly-Silizium): $b = 2 \mu\text{m}$
- Spaltbreite zwischen Elektrodenfingern: $d = 1 \mu\text{m}$

Kraft einer Kammelektrode bei einer Erregung mit $U = 15 \text{ V}$

$$F_{x_0} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r U^2 \frac{b}{d} \approx 2 \cdot 10^{-9} \text{ N}$$

Kammkondensator mit $n = 50$ Elementen:

$$F_x = 50 F_{x_0} \approx 0,1 \mu\text{N}$$

Federkonstante einer S-förmig gebogenen Balkenfeder mit Parallelführung (Abbildung 5.3):

$$c = b E \left(\frac{h}{l} \right)^3$$

$$c = 2 \cdot 10^{-6} \mu\text{m} \cdot 170 \cdot 10^9 \text{ Pa} \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^6 \mu\text{m}}{200 \cdot 10^6 \mu\text{m}} \right)^3 = 0,34 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

mit $b = 2 \mu\text{m}$, $h = 2 \mu\text{m}$, $l = 200 \mu\text{m}$, $E = 170 \text{ GPa}$ und $s_1 = 3 \mu\text{m}$.

Es sind jeweils zwei Federn in Reihe geschaltet, die wiederum als Paar parallel angeordnet sind, so dass sich die Federkraft bei einer Auslenkung von $s_1 = 3 \mu\text{m}$ ergibt:

$$F_s = c s_1 = 0,34 \frac{\text{N}}{\text{m}} \cdot 3 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 1 \mu\text{N}$$

Kraft in normaler Richtung

Die Kraft eines elektrostatischen Antriebs nach Abbildung 5.1 in normaler Richtung (Plattenabstandsänderung) ergibt nach Gleichung (5.6):

$$F_z = -\frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r U^2 \frac{a b}{d^2} \quad (5.14)$$

Die Kraft steigt quadratisch mit sinkendem Plattenabstand d und strebt für $d \rightarrow 0$ gegen ∞ . Ein realer elektrostatischer Plattenantrieb besitzt jedoch eine Isolationsschicht, die beim Durchziehen $d = 0$ einen Kurzschluss verhindert. Somit liegt ein geschichtetes Dielektrikum vor, das aus dem Arbeitsluftspalt d und der effektiven Isolatorstärke d_0 besteht, so dass in (5.14) d durch den effektiven Abstand

$$d^* = d + d_0 \quad (5.15)$$

$$\text{mit } d_0 = \frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2} + \dots \quad (5.16)$$

ersetzt wird. Gleichung (5.16) ist allgemein für eine mehrschichtige Isolationsschicht formuliert (z.B. eine hinsichtlich der mechanischen Spannungen kompensierte Schicht aus SiO_2 und Si_3N_4). Somit ergibt sich im Arbeitsluftspalt die Kraft F_z mit $\varepsilon_r = 1$ und $A = a b$ zu:

$$F_z = -\frac{1}{2} \varepsilon_0 A \left(\frac{U}{d^*} \right)^2 \quad (5.17)$$

Abbildung 5.4 zeigt einen elektrostatischen Antrieb mit Plattenkondensator und einer Kraft-Weg-Kennlinie. Im doppelt logarithmischen Maßstab ergibt Gleichung (5.17) einen linearen Verlauf für Elektrodenabstände $d \gg d_0$. Auf Grund der Isolationsschicht erfolgt eine Begrenzung der Kraft auf einen Maximalwert bei $d = 0$ bzw. $d^* = d_0$.

Aufhängung der beweglichen Elektrode an Feder

Abbildung 5.5 zeigt die schematische Anordnung eines Plattenkondensatorantriebs, dessen bewegliche Elektrode an einer Feder aufgehängt ist.

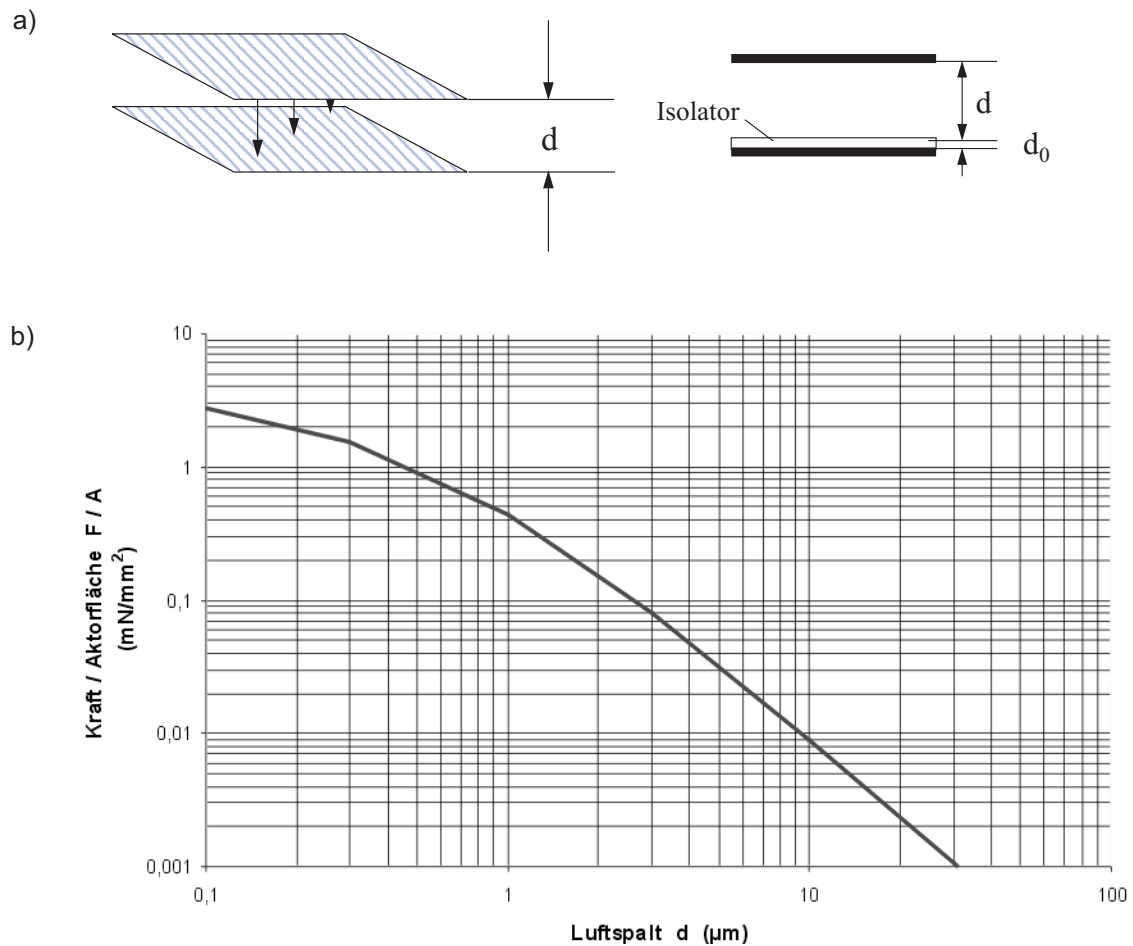


Abbildung 5.4: a) Elektrostatischer Aktor mit Plattenkondensator
b) Kraft-Weg-Kennlinie mit $U = 15 \text{ V}$ und $d_0 = 0,5 \mu\text{m}$
(Kraft normiert auf Aktorfläche)

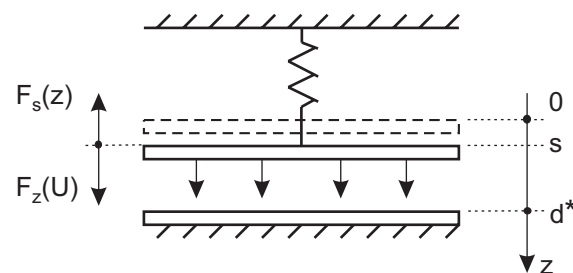


Abbildung 5.5: Aufhängung der beweglichen Elektrode eines Plattenkondensators an einer Feder

Federkraft:

$$F_s = -c z \quad (5.18)$$

Aktorkraft:

$$F_z = \frac{1}{2} \varepsilon A \left(\frac{U}{d^* - z} \right)^2 \quad (5.19)$$

Kräftegleichgewicht:

$$F_{\text{ges}} = F_s + F_z = 0 \quad (5.20)$$

$$-c z + \frac{1}{2} \varepsilon_0 A \left(\frac{U}{d^* - z} \right)^2 = 0 \quad (5.21)$$

$$U^2 = \frac{2c}{\varepsilon_0 A} (d^* - z)^2 z \quad (5.22)$$

Ein Betrieb mit einer stabilen Ruhelage ist nur möglich innerhalb des Abstandsbereichs:

$$0 < z < \frac{1}{3} d^* \quad (5.23)$$

Eine Instabilität (Pull-in, Durchzug) tritt auf bei:

$$z = \frac{1}{3} d^* \quad (5.24)$$

$$U_{\text{an}} = \sqrt{\frac{8c d^{*3}}{27 \varepsilon_0 A}} \quad (5.25)$$

Wird die Spannung U über den Wert U_{an} hinaus erhöht, übersteigt die Kraft aus dem elektrostatischen Feld, die quadratisch mit $1/d^{*2}$ ansteigt, die nur linear ansteigende Gegenkraft F_s der Feder, so dass der Aktor durchzieht und die Platten sich berühren ($d = 0$ bzw. $d^* = d_0$). Abbildung 5.6 zeigt die Spannungs-Weg-Charakteristik eines elektrostatischen Plattenantriebs.

Im durchgezogenen Zustand $z = d$ ist die Feder gespannt und liefert die maximale Federkraft:

$$F_{\text{s an}} = c d \quad (5.26)$$

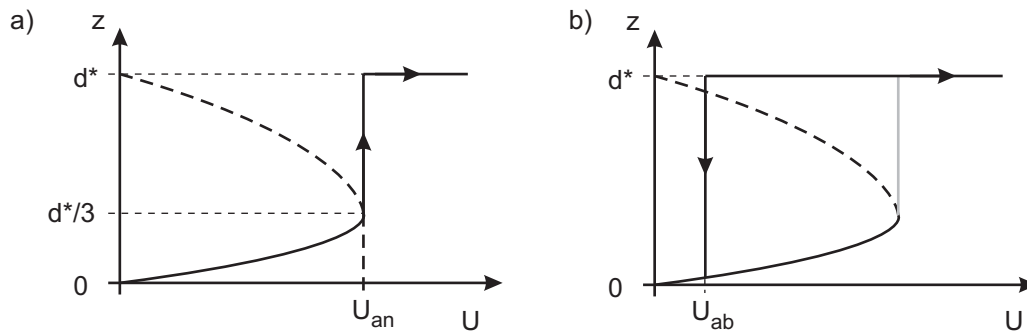


Abbildung 5.6: Instabilität eines elektrostatischen Aktors mit Hysterese

- a) Durchziehen bei der Ansprechspannung $U = U_{an}$
- b) Haltebereich mit der Abfallspannung $U = U_{ab}$

Wird die Steuerspannung U unterhalb des Ansprechwertes U_{an} reduziert, bleibt der Aktor weiterhin in der Durchzugsposition $z = d$, da die Aktorkraft $F_z(d = 0)$ die Federkraft F_{san} übersteigt. Der Aktor bleibt durchgezogen, solange $F_z \geq F_{san}$ erfüllt ist.

Die Abfallspannung U_{ab} errechnet sich aus:

$$F_{san} = F_z(U_{ab}) \quad \text{mit} \quad z = d \quad (5.27)$$

$$d^* - z = d_0 \quad (5.28)$$

$$F_{san} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 A \frac{U^2}{d_0^2} = c d \quad (5.29)$$

$$U_{ab} = \sqrt{2 \frac{c d}{\varepsilon_0 A}} d_0 \quad (5.30)$$

5.1.2 Elektromagnetische Mikroaktoren

In elektromagnetischen Mikroaktoren wird eine Kraft F durch eine magnetische Feldstärke H bzw. eine magnetische Flussdichte B erzeugt. Analog zu den elektrostatischen Aktoren wird die gespeicherte Energie betrachtet.

$$W = \frac{1}{2} L I^2 \quad (5.31)$$

Zur besseren physikalischen Anschauung wird die Energie aus den Feldgrößen und der Energiedichte w hergeleitet:

$$w = \frac{1}{2} B H \quad (5.32)$$

$$W = \frac{1}{2} \int B H dV \quad (5.33)$$

Die Energie des elektromagnetischen Feldes ist im Arbeitsluftspalt eines Magnetkreises gespeichert (Abbildung 5.7). Näherungsweise wird ein homogenes Feld im Luftspalt angenommen:

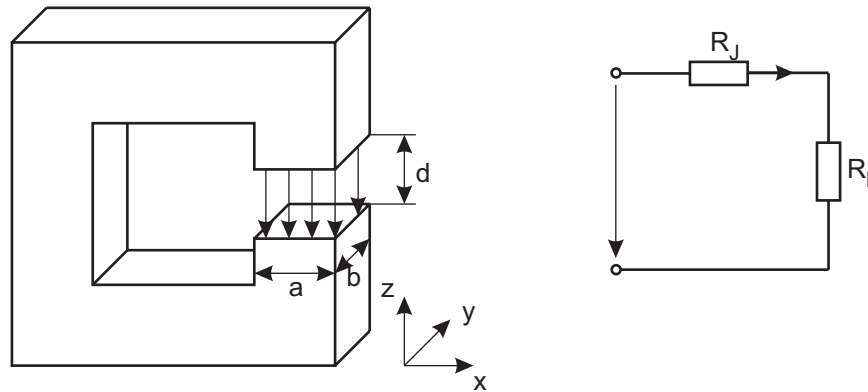


Abbildung 5.7: Schema eines Magnetkreises mit Ersatzschaltbild

$$W = \frac{1}{2} B H V = \frac{1}{2 \mu_0} B_L^2 V \quad \text{mit} \quad B = \mu_0 H \quad (5.34)$$

$$V = a b d = A_{\text{Pol}} d \quad \text{mit der Polfläche} \quad A_{\text{Pol}} = a b \quad (5.35)$$

Die Berechnung der Kräfte des elektromagnetischen Feldes liefert Ergebnisse, die sich analog zum elektrostatischen Feld darstellen lassen, obwohl ein Unterschied in der Entstehung des Feldes besteht:

- elektrostatisches Feld: Quellenfeld (elektrische Ladungen als Quellen)
- magnetisches Feld: Strömungsfeld (d. h. keine Quellen, geschlossene Feldlinien)

Da das magnetische Feld als Strömungsfeld angesehen werden kann, gilt als *Ohmsches Gesetz* des Magnetkreises:

$$\theta = R_M \phi \quad (5.36)$$

$$\theta = n I \quad (5.37)$$

θ = magnetische Spannung bzw. Durchflutung [A]

ϕ = magnetischer Fluss [Vs]

R_M = magnetischer Widerstand [A/Vs = 1/H]

Der magnetische Widerstand des gesamten Magnetkreises ergibt sich als Summe der einzelnen Abschnitte i :

$$R_M = \frac{1}{\mu_0} \sum_i \frac{1}{\mu_i} \frac{l_i}{A_i} \quad (5.38)$$

l_i = Länge
 A_i = Querschnittsfläche
 μ_i = relative Permeabilität

Vereinfachtes Modell für einen Magnetkreis

Ein Magnetkreis nach Abbildung 5.7 besteht aus zwei Bestandteilen, dem Luftspalt und Joch. Es gilt:

$$R_M = R_L + R_J \quad (5.39)$$

- Luftspalt

$$R_L = \frac{1}{\mu_0} \frac{d}{A_{\text{Pol}}} \quad \text{mit der Polfläche } A_{\text{Pol}} = a b \quad (5.40)$$

- Joch

$$R_J = \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{\mu_r} \frac{l}{A_J} \quad (5.41)$$

Magnetischer Gesamtwiderstand:

$$R_M = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{d}{A_{\text{Pol}}} + \frac{1}{\mu_r} \frac{l}{A_J} \right) \quad (5.42)$$

Für konventionelle Magnetsysteme gilt $\mu_r \gg 1$ bzw. $\mu_r \rightarrow \infty$ und damit $R_J \ll R_L$. Somit ist der magnetische Widerstand des Arbeitsluftspalts R_L dominant gegenüber dem Jochkreis R_J , so dass sich die Polschuhe wie *Quellen* verhalten.

$$R_M = \frac{1}{\mu_0 A_{\text{Pol}}} \left(d + \frac{l}{\mu_r} \frac{A_{\text{Pol}}}{A_J} \right) \quad (5.43)$$

Mit

$$d_0 = \frac{l}{\mu_r} \frac{A_{\text{Pol}}}{A_J} \quad (5.44)$$

und der Abkürzung $d^* = d + d_0$ ergibt sich

$$R_M = \frac{d^*}{\mu_0 A_{\text{Pol}}} \quad (5.45)$$

Der magnetische Widerstand R_J des Jochkreises kann als eine Erhöhung des Arbeitsluftspalts d durch einen Beitrag d_0 angesehen werden, so dass ein effektiver Luftspalt d^* eines verlustfreien Jochkreises definiert werden kann.

Effektiver Luftspalt:

$$d^* = d + d_0 \quad (5.46)$$

Magnetischer Fluss:

$$\phi = \frac{\theta}{R_M} \quad (5.47)$$

$$\phi = \mu_0 A_{\text{Pol}} \frac{\theta}{d^*} \quad (5.48)$$

Flussdichte im Luftspalt:

$$\phi = B_L A_{\text{Pol}} \quad (5.49)$$

$$B_L = \frac{\phi}{A_{\text{Pol}}} = \mu_0 \frac{\theta}{d^*} \quad (5.50)$$

Flussdichte im Jochsystem:

$$\phi = B_J A_J \quad (5.51)$$

$$B_J = \frac{\phi}{A_J} = \mu_0 \frac{A_{\text{Pol}}}{A_J} \frac{\theta}{d^*} = B_L \frac{A_{\text{Pol}}}{A_J} \quad (5.52)$$

Bei Mikrosystemen besteht die Gefahr der Sättigung, da in der Regel die Polflächen wesentlich größer als die Jochquerschnittsfläche sind: $A_{\text{Pol}} \gg A_J$

Aus (5.34) und (5.35) ergibt sich mit (5.49) die Energie im Arbeitsluftspalt:

$$\boxed{W = \frac{1}{2} \mu_0 \left(\frac{\theta}{d^*} \right)^2 A_{\text{Pol}} d} \quad (5.53)$$

Die Kräfte eines elektromagnetischen Aktors ergeben sich aus der Änderung der Energie entlang der jeweiligen Koordinatenrichtung:

Transversalkraft

Antriebe mit Tangentialkraft beruhen auf der Änderung des Flussquerschnitts (Verringerung des magnetischen Widerstands) bei gleichbleibendem Luftspalt (Abbildung 5.8). Dabei werden die Bauteile des Aktors aufgefangen in einer mechanischen Führung. Diese Form von Antrieben wird auch als *Reluktanzantrieb* bezeichnet.

$$F_x = \frac{\partial W}{\partial x} = \frac{1}{2} \mu_0 \theta^2 \frac{b d}{d^{*2}} \quad (5.54)$$

$$F_y = \frac{\partial W}{\partial y} = \frac{1}{2} \mu_0 \theta^2 \frac{a d}{d^{*2}} \quad (5.55)$$

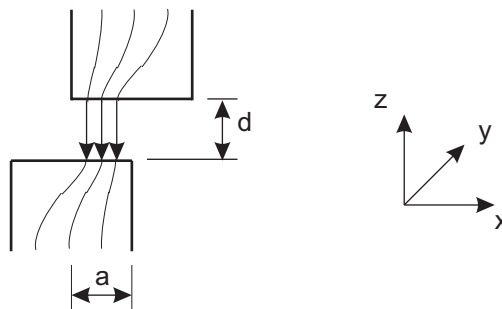


Abbildung 5.8: Magnetkreis mit versetzten Polflächen zur Erzeugung einer Transversalkraft

Normalkraft

$$F_z = \frac{\partial W}{\partial z} = \frac{1}{2} \mu_0 \left(\frac{\theta}{d^*} \right)^2 A_{\text{Pol}} = \frac{1}{2 \mu_0} B_L^2 A_{\text{Pol}} \quad (5.56)$$

Dieser Ausdruck ist analog zur Kraft, hervorgerufen durch ein elektrostatisches Feld, formuliert. Abbildung 5.9 zeigt schematisch einen elektromagnetischen Antrieb mit einem Magnetkreis mit Flachspulsystem, wobei der Jochquerschnitt A_J klein gegenüber der Polfläche ist: $A_J \ll A_{\text{Pol}}$.

Abbildung 5.10 zeigt die Kraft-Weg-Charakteristik eines konventionellen Miniatur-Spulen-antriebs im Vergleich mit einem Dünnschicht-Magnetkreissystem. Bei kleinen Arbeitsabständen $d < 100 \mu\text{m}$ erreicht beim Spulen-antrieb die Flussdichte im Joch die Sättigung $B \approx 2 \text{ T}$, so dass die Kräfte für $d \rightarrow 0$ begrenzt werden. Beim Dünnschicht-Magnetsystem besitzt der Jochkreis einen hohen magnetischen Widerstand, hier $d_0 = 50 \mu\text{m}$, so dass für $d < 100 \mu\text{m}$ ebenfalls eine Begrenzung der Kraft einsetzt (analog zum elektrostatischen Aktor in Abbildung 5.4).

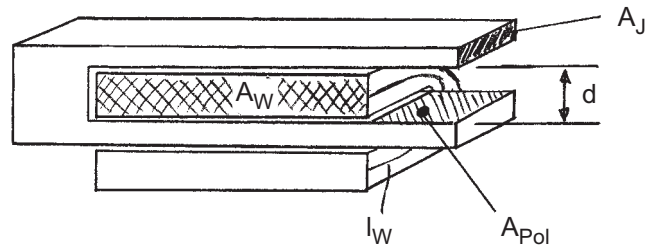


Abbildung 5.9: Elektromagnetischer Antrieb in Dünnschichttechnik

Größe	Spule	Dünnschicht
d_0	$\leq 8 \mu\text{m} (\ll d)$	$\gg 50 \mu\text{m} (\geq d)$
θ	50 AW	2 AW
l_m	20 mm	2 mm
A_{Pol}/A_J	2	≥ 10
μ_r	≥ 5000	400

AW Amperewindung

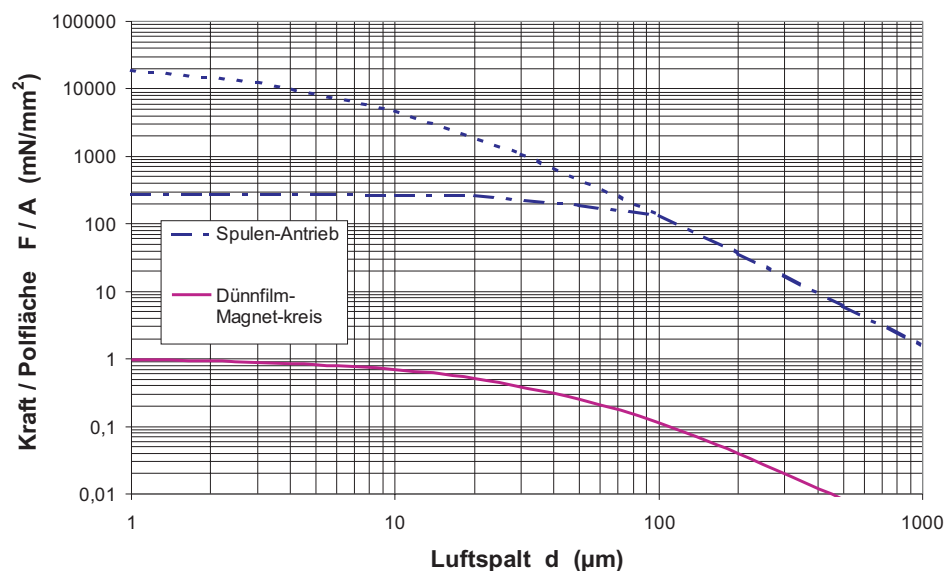


Abbildung 5.10: Vergleich eines Dünnschicht-Magnetkreises mit konventioneller Spule
Beim Spulenantrieb ist die Sättigung der Flussdichte für $d < 100 \mu\text{m}$ berücksichtigt (Begrenzung der Kraft, strichpunktierter Verlauf)

Verlustleistung bei Erregung

Bei der Miniaturisierung von elektromagnetischen Antrieben muss die elektrische Verlustleistung in einem immer kleiner werdenden Volumen abgeführt werden, so dass eine Analyse der Verlustleistung erforderlich ist.

Aus der Durchflutung

$$\theta = n I \quad (5.57)$$

und dem Querschnitt der Wicklung

$$A_W = n A_{W_0} \quad (5.58)$$

mit dem Querschnitt einer Windung A_{W_0} ergibt sich der Spulenwiderstand

$$R_W = \varrho \frac{l_W n}{A_{W_0}} = \varrho \frac{l_W n^2}{A_W} \quad (5.59)$$

Damit ist die Verlustleistung P_V definiert:

$$P_V = R_W I^2 = \varrho \frac{l_W}{A_W} n^2 I^2 \quad (5.60)$$

$$\boxed{P_V = \frac{\varrho l_W}{A_W} \theta^2} \quad (5.61)$$

$$\frac{P_V}{\theta^2} = \frac{\varrho l_W}{A_W} \quad (5.62)$$

Die Verlustleistung P_V bezogen auf die Durchflutung θ hängt nur vom spezifischen Widerstand des Spulenmaterials und der Spulengeometrie, d.h. der mittleren Windungslänge l_W und der Wicklungsquerschnittsfläche A_W ab. Bei der Miniaturisierung der Längenabmessung sinkt $l_W \sim l$ und $A_W \sim l^2$, so dass die relative Verlustleistung $P_V/\theta^2 \sim 1/l$ bei einer Miniaturisierung auf 1/10 um den Faktor 10 zunimmt. Dies gilt jedoch bei einer Miniaturisierung aller Kenngrößen des Aktors einschließlich der Kräfte und des Arbeitshubes.

Eine Miniaturisierung von elektromagnetischen Mikroaktoren bei konstanter *Schaltarbeit* mit $F = \text{const.}$ und $d = \text{const.}$

$$F = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{\theta^2}{d^{*2}} A_{\text{Pol}} \quad \rightarrow \quad \theta^2 = \frac{2 d^{*2}}{\mu_0 A_{\text{Pol}}} F \quad (5.63)$$

$$P_V = \frac{\varrho l_W}{A_W} \theta^2 = \frac{2 \varrho}{\mu_0} d^{*2} \frac{l_W}{A_W A_{Pol}} F \quad (5.64)$$

liefert einen deutlichen Anstieg der Verlustleistung bei der Miniaturisierung. Somit steigt die Verlustleistung näherungsweise mit dem Kehrwert des Volumens des Aktors:

$$P_V \sim \frac{1}{V} \quad (5.65)$$

Für die Realisierung von Dünnschicht-Magnetaktoren stehen verschiedene Grundprinzipien zur Verfügung (Abbildung 5.11):

- Flachspule:
 - + technologischer Aufwand begrenzt
 - große Chipfläche
 - große Wicklungsfläche
 - kleine Polfläche
- 2-Lagen-Dünnschicht-Spule
 - + kurze Windungslänge
 - hoher technologischer Aufwand (mehr Maskenebenen)
- Meander-Spule
 - + kurze Windungen
 - + technologischer Aufwand begrenzt
 - Parallelschaltung, keine Reihenschaltung der Windungen

Die Flachspulen in der Ausführung mit zwei übereinanderliegenden Wicklungen finden in den magnetischen Schreib-Leseköpfen von Festplattenlaufwerken Verwendung.

5.1.3 Elektrodynamische Mikroaktoren

Ein stromdurchflossener Leiter erfährt im senkrecht dazu stehenden Magnetfeld eine Kraft (Lorentzkraft), die in die dritte Koordinatenrichtung zeigt:

$$\vec{F} = I \vec{s} \times \vec{B} \quad (5.66)$$

$\vec{s}$ Länge des Leiters im Magnetfeld (auch mehrere Windungen)

Ein weit verbreitetes elektrodynamisches System bildet der Tauchspulantrieb (Abbildung 5.12), der eingesetzt wird für

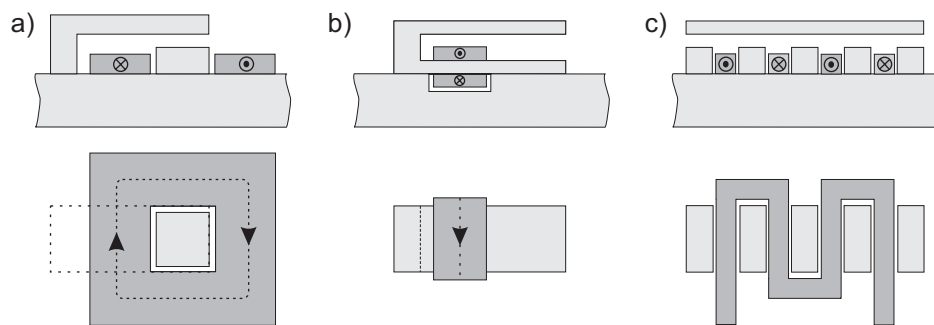


Abbildung 5.11: Elektromagnetische Antriebe in der Mikrotechnik

- a) Flachspule
- b) 2-Lagen-Dünnschichtspule
- c) Meander-Spule

- Lautsprecher
- Linearantriebe

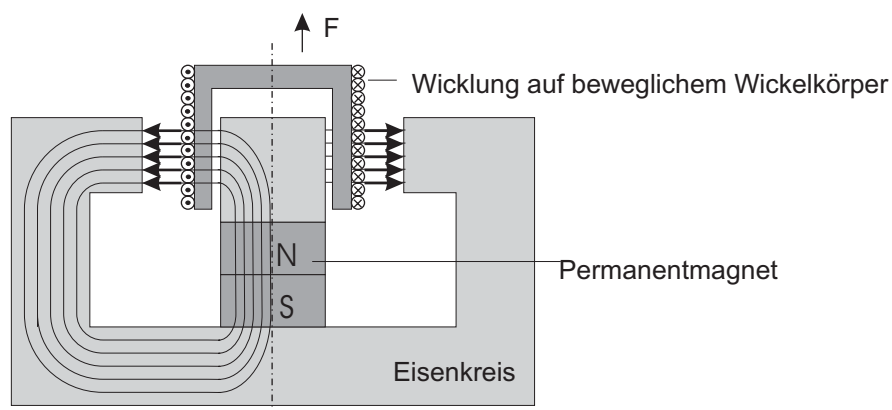


Abbildung 5.12: Elektrodynamischer Antrieb mit Tauchspulsystem

Die Erregung für das Magnetfeld erfolgt in der Regel durch Permanentmagnete. Eine flache Anordnung eines elektrodynamischen Antriebs ist im Schwenkantrieb von Festplattenlaufwerken realisiert (Abbildung 5.13).

Beispiel eines Mikroantriebs:

Eine mikromechanische Realisierung eines elektrodynamischen Aktors bildet ein mikromechanischer Lautsprecher (Abbildung 5.14 a). Als Erregung dient ein NdFeB-Magnet, wobei der magnetische Fluss zwischen der oberen Polfläche und einem weichmagnetischen Ring auf dem Substrat geführt wird. Der Lautsprecher besteht aus einem Siliziumteil mit der Membran und einem Glas-Sockelteil (Abbildung 5.14 b). Typische Kennwerte sind:

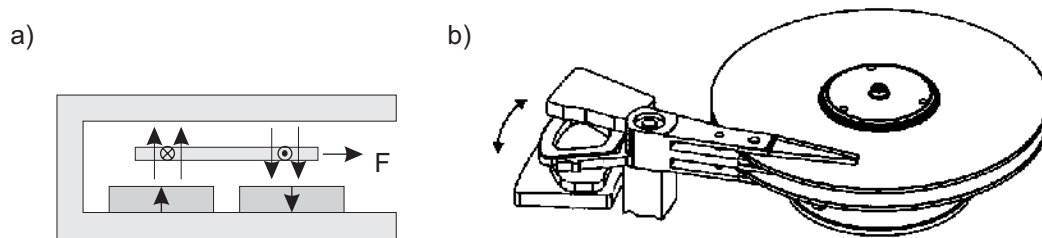


Abbildung 5.13: Schwenkantrieb von Festplattenlaufwerken

- a) Querschnitt
- b) Ansicht des Antriebs

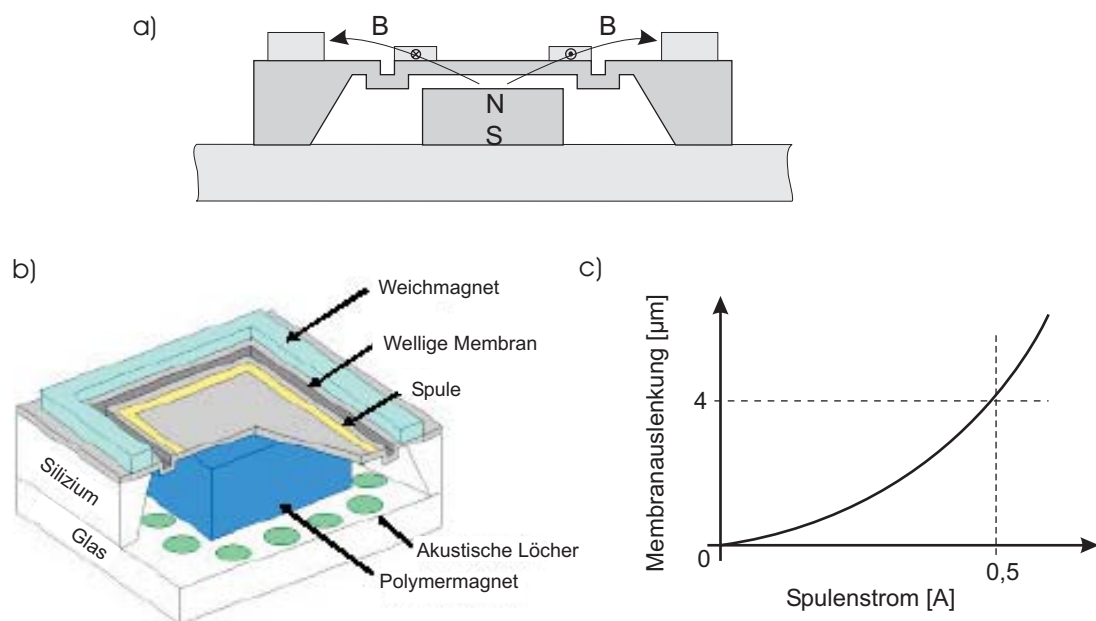


Abbildung 5.14: Mikromechanischer Lautsprecher [MEMOS Lab., Taiwan]

- a) Querschnitt
- b) Ansicht
- c) Membranauslenkung

Permanentmagnet	$B = 0,5 \text{ T}$
Strom in Dünnfilmsspule	$I = 50 \text{ mA}$
Windungen	$n = 20$
Durchflutung	$s = 2 \text{ mm}$
Kraft	$F = I n s B = 1 \text{ mN}$

Der Herstellungsprozess nach Abbildung 5.15 besteht aus folgenden Prozessschritten:

Siliziumteil:

- Si-Membran geätzt auf $30 \mu\text{m}$ Dicke
- Polyimid (Membran) $5 \mu\text{m}$ dick, Abmessungen $3,5 \text{ mm} \cdot 3,5 \text{ mm}$
- Ti/Cu aufgedampft (Startschicht)
- Cu galvanisch abgeschieden (Spule), CuSO_4 -Bad
- NiFe galvanisch abgeschieden: $\text{NiSO}_4/\text{NiCl}_2/\text{FeSO}_4/\text{Additive}$
- Abätzen der restlichen Startschicht
- Rückseiten-Trockenätzung (Entfernen Si, nur Polyimid-Schicht als Membran)

Glas-Sockelteil:

- Au/Cr strukturieren als Ätzmaske
- Ätzen Glas (akustische Löcher)
- Montage NdFeB-Magnet ($3 \text{ mm} \cdot 3 \text{ mm} \cdot 1,8 \text{ mm}$)
- Beide Wafer anodisch bonden

5.1.4 Skalierungsverhalten von Mikroaktoren

Für die verschiedenen Feldaktorprinzipien lässt sich der Einfluss der Größenskalierung auf die verschiedenen physikalischen Kennwerte untersuchen. Dabei werden dreidimensionale Antriebssysteme zugrunde gelegt, die in *allen* Längendimensionen um den Faktor s gegenüber einer Bezugsgröße l_0 variiert werden:

$$l = l_0 s \quad (5.67)$$

Eine Miniaturisierung erfolgt zunächst durch dreidimensionale Verkleinerung, ohne die Grundkonzepte der Anordnungen zu verändern, z.B. bleibt der feinmechanische Aufbau eines elektromagnetischen Antriebs bestehen und wird *nicht* in eine planare Struktur umgewandelt.

Bei der Skalierung werden jedoch die Feldgrößen, d.h. die elektrische Feldstärke E und die magnetische Flussdichte B konstant gehalten, so dass die Erregungsgrößen wie die Spannung U bzw. die Durchflutung θ proportional zu s skalieren. Die Zusammenhänge zeigt

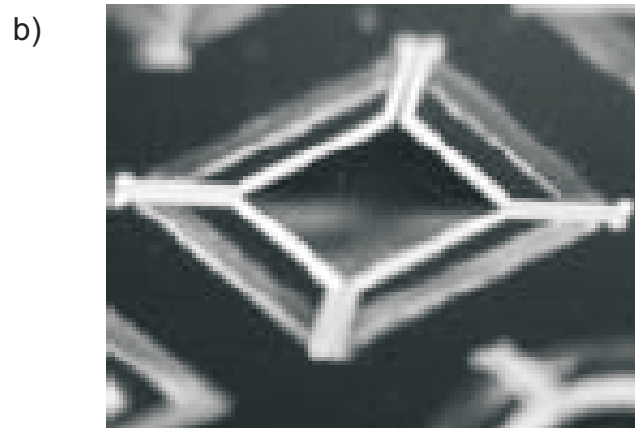
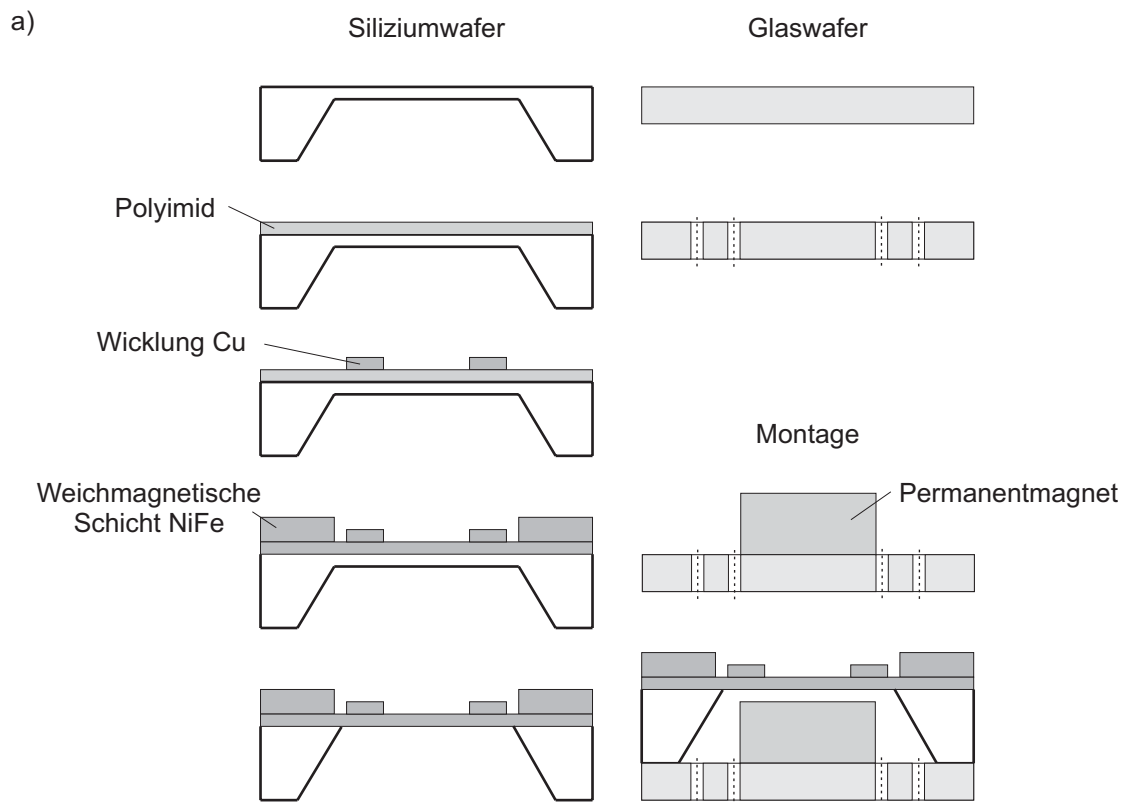


Abbildung 5.15: Mikromechanischer Lautsprecher
a) Herstellungsprozess
b) Ansicht der Membran

Tabelle 5.1: Allgemeine Größenskalierung von Feldaktoren

Größe	Elektrostatisch	Elektromagnetisch	Elektrodynamisch
Länge l	s	s	s
Fläche A	s^2	s^2	s^2
Volumen V	s^3	s^3	s^3
Arbeitsabstand d	s	s	s
Effektiver Arbeitsabstand d^{*1}	s	s	s
Druck p	1	1	1
Kraft F	s^2	s^2	s^2
Schaltarbeit W	s^3	s^3	s^3
Verlustleistung P_V	—	s	s
Spannung U	s	—	—
Durchflutung θ	—	s	s
Elektrische Feldstärke E	1	—	—
Magnetische Feldstärke im Arbeitsluftspalt B_L	—	1	1

¹ Magnetkreisverluste: $d_0 = l/\mu_r A_{\text{Pol}}/A_J \sim s$
Effektiver Arbeitsabstand: $d^* = d + d_0 \sim s$

Tabelle 5.1, wobei die Skalierung s^n der physikalischen Kennwerte aus den Berechnungsformeln der einzelnen Aktoren entnommen sind.

Bei einer Skalierung um den Faktor $s = 0,1$ sinkt das Volumen um den Faktor 1000, die Kraft um den Faktor 100, der Arbeitshub um den Faktor 10, die Schaltarbeit also um den Faktor 1000. Dadurch wird in der Spule eines elektromagnetischen Aktors eine Leistung benötigt, die nur um den Faktor 10 abnimmt. Somit führt ein elektromagnetischer Miniaturantrieb bei fortschreitender Miniaturisierung zu einer Überhitzung der Spule.

Größenskalierung bei konstanter Last und Erwärmung

Mikroaktoren besitzen gegenüber den zuvor betrachteten konventionellen Aktoren wegen der Herstellung in Dünnschichttechnik einen zweidimensionalen Aufbau. Bei der Größenskalierung ändern sich nur die lateralen Längenabmessungen, wogegen die vertikalen Abmessungen, wie Schichtdicken, Ätztiefen etc. invariant bleiben. Ferner wird ein konstanter Arbeitsabstand d angesetzt, da in den meisten technischen Anwendungen der Arbeitshub aus der Aufgabenstellung vorgegeben ist.

Um die Vergleichbarkeit der Aktorprinzipien zu gewährleisten wird die aktive Fläche als Aktorfläche

$$A = l_0^2 \quad (5.68)$$

mit der Bezugsgröße l_0 für die verschiedenen Antriebe folgendermaßen definiert:

- elektrostatisch: $A = \text{Elektrodenfläche}$
- elektromagnetisch: $A = A_{\text{Pol}} + A_{\text{Spule}}$ (Abbildung 5.16)
- elektrodynamisch: $A = \text{Durchdringungsfläche von Feld und Wicklung}$

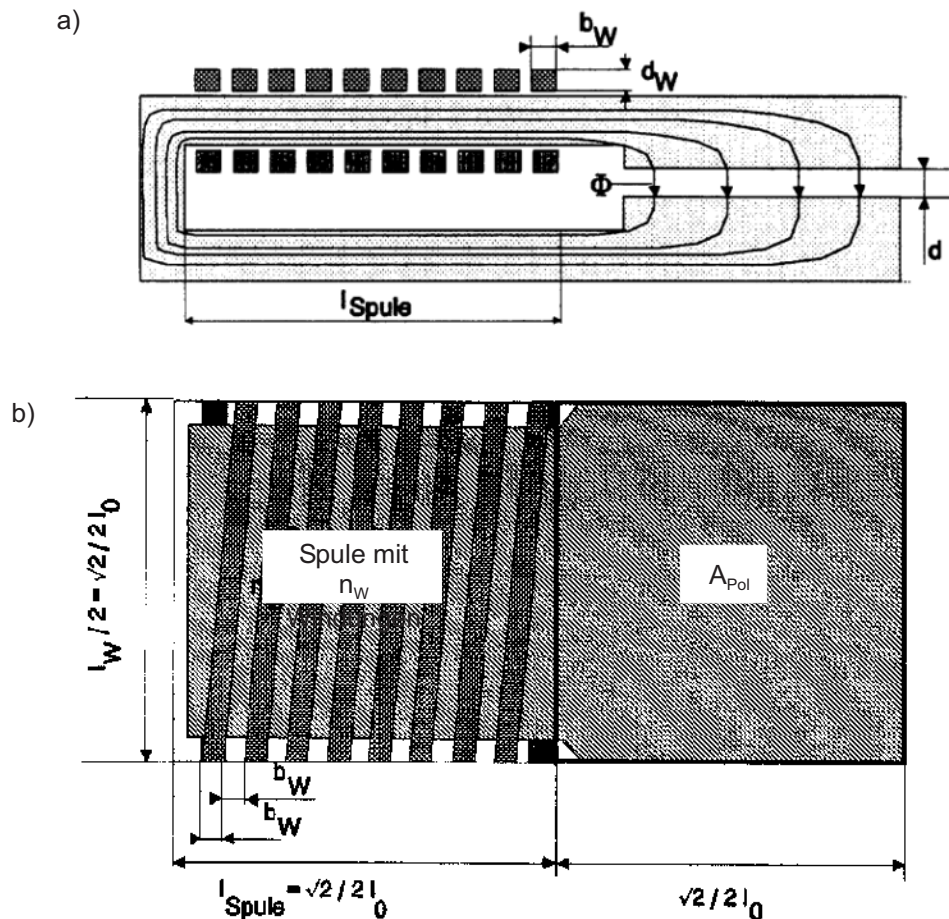


Abbildung 5.16: Elektromagnetischer Dünnfilmantrieb mit zweilagiger Flachspule
a) Querschnitt
b) Draufsicht

Beim elektrostatischen Feld ergibt sich bei konstanter Spannung U ein von der Skalierung invarianter Druck:

$$p_{\text{kap}} = \frac{\varepsilon_0}{2} \frac{U^2}{d^{*2}} \quad (5.69)$$

Der Druck auf die Polfläche eines elektromagnetischen Dünnfilmantriebs ergibt sich zu:

$$p_{\text{mag}} = \frac{1}{2\mu_0} B_L^2 = \frac{\mu_0}{2} \frac{\theta^2}{d^{*2}} \quad (5.70)$$

Im Gegensatz zur vorhergehenden allgemeinen Skalierungsbetrachtung soll die Stromdichte i in der Dünnschichtspule konstant gehalten werden, dies ist äquivalent zu einer konstanten Erwärmung mit invarianter Übertemperatur ΔT . Somit wird die Durchflutung θ durch die Skalierung unter einer neuen Randbedingung variiert.

$$\text{Verlustleistung: } P_V = \frac{\varrho l_W}{A_W} \theta^2 \quad (5.71)$$

$$\text{Durchflutung und Stromdichte: } \theta = i A_W \quad (5.72)$$

$$\text{Wicklungsquerschnitt (nach Abbildung 5.16): } A_W = d_W \frac{l_0}{\sqrt{2}} \sim s \quad (5.73)$$

$$\text{Wicklungslänge: } l_W = \sqrt{2} l_0 \sim s \quad (5.74)$$

$$\text{Verlustleistung: } P_V = \varrho l_W A_W i^2 = \varrho d_W l_0^2 i^2 \sim s^2 \quad (5.75)$$

Die Verlustleistung skaliert im Gegensatz zur vorherigen Betrachtung mit dem Faktor s^2 . Durch Einsetzen von (5.72) und (5.72) in p_{mag} folgt:

$$p_{\text{mag}} = \frac{\mu_0}{2} \frac{i^2 A_W^2}{d^{*2}} = \frac{\mu_0}{4} i^2 d_W^2 \frac{l_0^2}{d^{*2}} \sim s^2 \quad (5.76)$$

Unter den Randbedingungen einer konstanten Stromdichte in den Leiterbahnen nimmt bei einer Skalierung um den Faktor $s = 0,1$ der Druck um den Faktor 100, die Kraft um den Faktor 10.000 ab.

Das gleiche Ergebnis liefert die Betrachtung der Spulenerwärmung um die Übertemperatur ΔT :

$$\Delta T = P_V R_{\text{th}} \quad (5.77)$$

$$R_{\text{th}} = \frac{1}{\alpha A_K} \quad (5.78)$$

mit dem Wärmeübergangskoeffizienten α [W/Km²] und der Kühlfläche

$$A_K = 2 l_0^2 \quad (5.79)$$

wobei eine Wärmeabstrahlung nur in vertikaler Richtung nach oben und nach unten vorausgesetzt wird. Eine seitliche Wärmeableitung kann bei Aktorarrays nicht erfolgen.

Durch Einsetzen von P_V folgt ΔT bzw. p_{mag} :

$$\Delta T = \frac{\varrho}{\alpha} \frac{l_W}{A_K A_W} \theta^2 \quad (5.80)$$

$$p_{\text{mag}} = \frac{\mu_0}{2} \Delta T \frac{\alpha}{\varrho} d_W \frac{l_0^2}{d^{*2}} \sim s^2 \quad (5.81)$$

Tabelle 5.2 zeigt den Vergleich der physikalischen Kennwerte verschiedener Feldaktorprinzipien unter den Randbedingungen $d = \text{const.}$ und konstanter Erwärmung.

Tabelle 5.2: Größenskalierung von Feldaktoren bei invariantem Arbeitsluftspalt

Größe	Elektrostatisch	Elektromagnetisch $d_0 < d$	Elektrodynamisch
Länge l	s	s	s
Fläche A	s^2	s^2	s^2
Volumen V	s^3	s^3	s^3
Arbeitsabstand d	1	1	1
Effektiver Arbeitsabstand d^{*1}	1	1	1
Druck p	1	s^2	1
Kraft F	s^2	s^4	s^2
Schaltarbeit W	s^2	s^4	s^2
Verlustleistung P_V	—	s^2	s^2
Spannung U	1	—	—
Durchflutung θ	—	s	s
Elektrische Feldstärke E	1	—	—
Magnetische Feldstärke im Arbeitsluft B_L	—	s	1

¹ Magnetkreisverluste: $d_0 = l/\mu_r A_{\text{Pol}}/A_J \sim s^2$
Effektiver Arbeitsabstand $d^* = d + d_0 \sim s^2$ für $d_0 > d$

In konventionellen dreidimensionalen Magnetkreisen wird d^* durch den Arbeitsluftspalt d weitgehend bestimmt, da $d_0 \ll d$ gilt. In Dünnschicht-Magnetsystemen skaliert die Polfläche $A_{\text{Pol}} \sim s^2$ jedoch die Jochquerschnittsfläche $A_J \sim s$, da die Schichtdicke aus technologischen Gründen konstant bleibt. Es gilt gemäß Abbildung 5.16:

$$A_{\text{Pol}} = \frac{1}{2} l_0^2 \quad (5.82)$$

$$A_J = d_J \frac{l_0}{\sqrt{2}} \quad (5.83)$$

$$d_0 = \frac{l_m}{\mu_r} \frac{A_{\text{Pol}}}{A_J} = \frac{k}{2} \frac{l_0^2}{\mu_r d_J} \sim s^2 \quad \text{mit} \quad l_m = k \frac{l_0}{\sqrt{2}} \quad (5.84)$$

k ist die Länge des magnetischen Pfades gemäß Abbildung 5.16 als Vielfaches der Bezugslänge $l_0/\sqrt{2}$. Die Größenordnung ist in der Regel 3...4. Der Anteil d_0 des effektiven Arbeitsabstands d^* auf Grund des magnetischen Widerstands des Dünnschichtmagnetkreises nimmt bei einer Vergrößerung des Systems um den Faktor s^2 zu. Dies führt dazu, dass bei großflächigen Dünnschichtsystemen mit $l_0 \gg d_J$ der effektive Luftspalt d^* durch d_0 bestimmt wird:

$$d_0 > d \quad (5.85)$$

$$d^* \approx d_0 \sim s^2 \quad (5.86)$$

Somit ergibt sich als Näherung für den Druck nach Gleichung (5.76) mit der Abkürzung

$$d^* \approx \frac{l_0^2}{d_{m0}} \quad (5.87)$$

$$p_{\text{mag}} = \frac{\mu_0}{4} i^2 d_w^2 \frac{d_{m0}^2}{l_0^2} \sim \frac{1}{s^2} \quad (5.88)$$

In Abbildung 5.17 ist der Kraftverlauf pro Fläche in Abhängigkeit von der Skalierung der Basislänge im Vergleich von elektrostatischem und elektromagnetischem Dünnschichtantrieb dargestellt.

Wegen der Begrenzung der Stromdichte steigt $p_{\text{mag}} \sim s^2$, wogegen p_{kap} invariant bleibt. Bei Mikroaktoren mit Basislängen unterhalb von 1 mm liefern elektrostatische Mikroaktoren höhere Kräfte. Bei der Vergrößerung von elektromagnetischen Dünnschichtaktoren setzt bei Basislängen ab 10 mm ein Abfall des Druckes nach Gleichung (5.88) ein, der durch den stark ansteigenden magnetischen Widerstand verursacht wird. Weiterhin muss die Flussdichte im Magnetkreis B_J kontrolliert werden, da durch die Sättigung eine weitere Kraftreduzierung einsetzt.

5.1.5 Anwendung von Feldaktoren

Mikroaktoren mit elektrostatischen, elektromagnetischen oder elektrodynamischen Antrieben lassen sich in vielen Anwendungen einsetzen. Eine systematische Einteilung zeigt Tabelle 5.3.

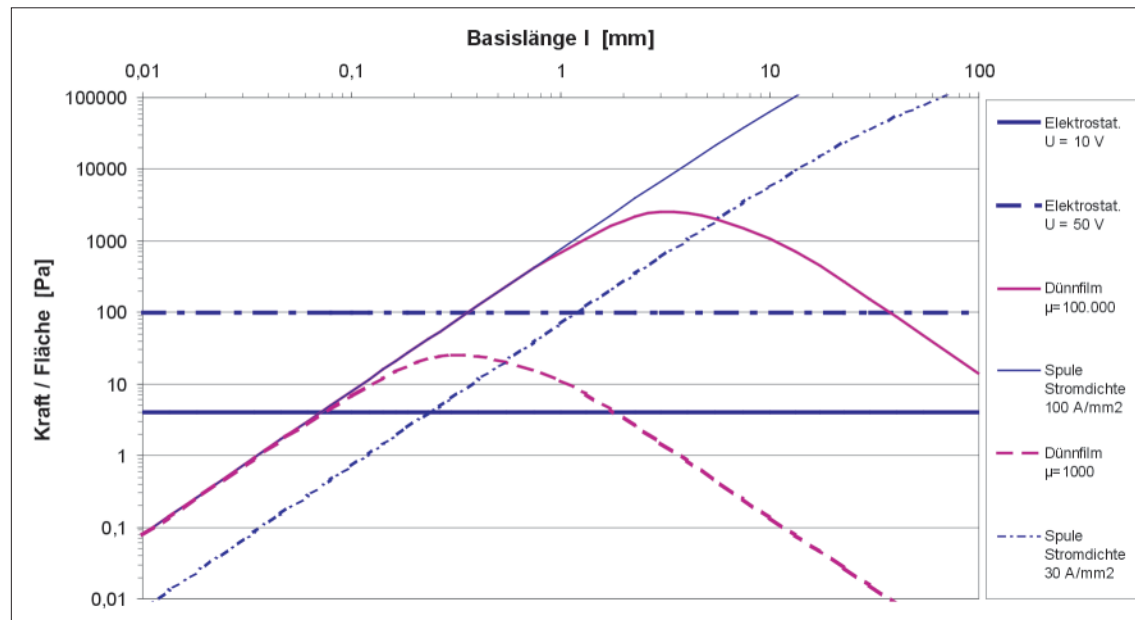


Abbildung 5.17: Vergleich des Skalierungsverhaltens von elektrostatischen und elektromagnetischen Dünnsfilmaktoren
 Arbeitsluftspalt $d = 10 \mu m$; Jochdicke $d_J = 20 \mu m$
 effektive Dicke Dünnsfilmspule $d_W = 5 \mu m$
 spezifischer Widerstand $\rho = 0,018 \Omega mm^2/m$; Stromdichte $i = 100 A/mm^2$

Tabelle 5.3: Einteilung von Anwendungen von Feldaktoren

Kraftrichtung bezogen auf aktive Fläche	Elektrostatisch	Elektromagnetisch	Elektrodynamisch
Transversalkraft	LWL-Schalter, Variable optische LWL-Abschwächer, Mikromotor		Lautsprecher Penny-Motor
Normalkraft	Torsionsspiegel Mikrorelais Mikroventil Mikropumpe	Mikrorelais	

5.1.5.1 Mikrooptischer 2x2-LWL-Schalter

Ein 2x2-Schalter mit zwei sich kreuzenden optischen Pfaden nach Abbildung 5.18 a kann mit Hilfe der tiefen Trockenätztechnik (DRIE) auf Siliziumsubstraten mit vergrabener SiO_2 -Schicht (SOI-Wafer) hergestellt werden. Die Strahlumlenkung um 90° erfolgt durch einen unter 45° eingeführten Spiegel, der durch einen elektrostatischen Kammaktor aus dem Strahlengang herausgezogen wird (Abbildung 5.18 b).

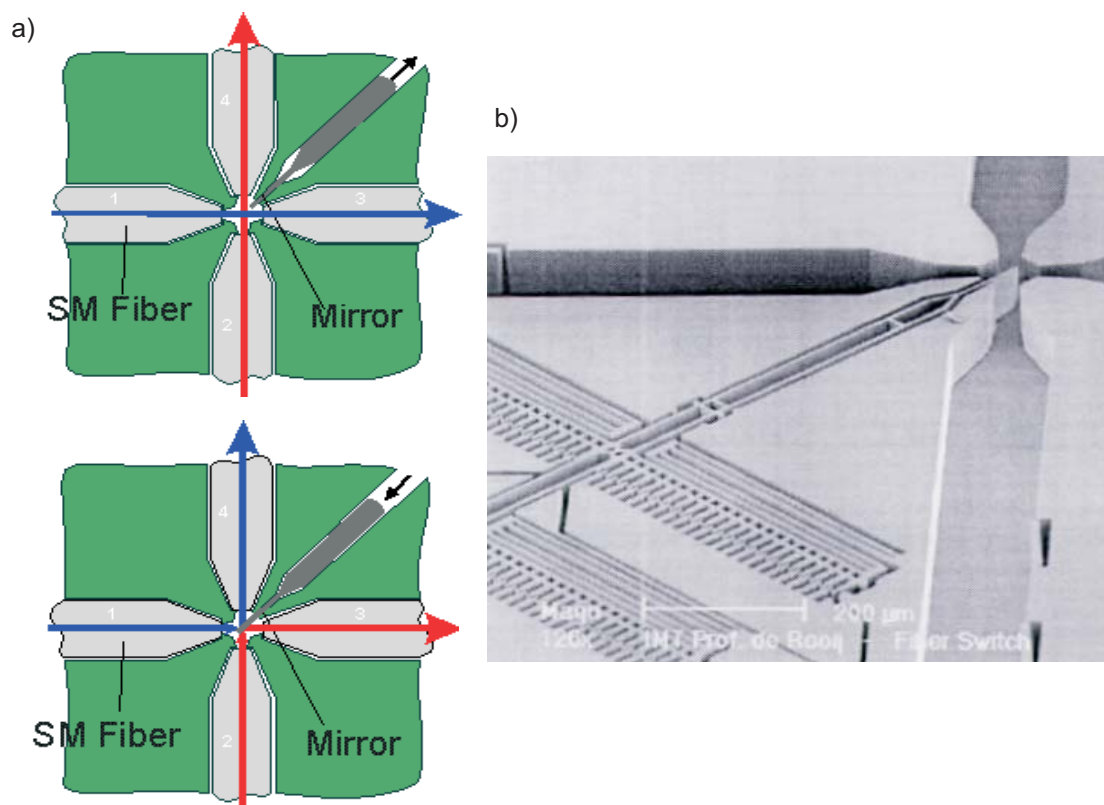


Abbildung 5.18: Mikrooptischer 2x2-LWL-Schalter in Oberflächen-Mikromechanik mit Tiefenätzung [Fa. Sercalo, CH]

- a) Anordnung der LWL mit verschiebbarem Ablenkspiegel
- b) Ansicht des beweglichen Spiegels mit Kammelektrodenantrieb

Funktionsweise:

- Ruheposition: Spiegel im Strahlengang
- Schaltposition: Mikrospiegel um $20\ \mu\text{m}$ herausgezogen bei $U = 60\ \text{V}$
- Lichtstrahl $10 - 20\ \mu\text{m}$ unterhalb Waferoberfläche
- LWL-Abstand $35\ \mu\text{m}$, Einfügungsdämpfung $0,3\ \text{dB}$ (wegen Strahlaufweitung), Cladding dünn geätzt zur Reduktion des Abstands

- Mechanische Dämpfung durch Index-Matching-Ölfüllung

Herstellung:

- BESOI-Wafer, vergrabene SiO₂-Schicht (*buried oxide*), obere Si-Schicht 75 μm
- Strukturätzung DRIE 75 μm tief, Ätzstopp an *buried oxide*
- Beweglicher Spiegel 1,6 μm dick, bedampft mit Au (Substrat geneigt in Aufdampf-anlage), Si durchsichtig bei $\lambda > 1,1 \mu\text{m}$

Die Einfügdungsämpfungen der jeweiligen Schaltzustände betragen zwischen 0,5 und 0,9 dB. Die Schaltspannung für die Auslenkung des Mikrospiegels um $x = 20 \mu\text{m}$ beträgt 60 V, die aus einem DC-DC-Konverter mit 5 V Speisespannung gewonnen wird.

Nach dem gleichen Prinzip funktioniert ein variabler mikrooptischer LWL-Abschwächer, bei dem anstelle eines Ablenkspiegels eine schräg gestellte Schneide den Lichtstrahl durch partielle Abschattung dämpft.

5.1.5.2 Elektrostatischer Torsionsspiegel

Für optische Mikroskanner oder optische Projektionssysteme werden Arrays mit drehbaren Mikrospiegeln verwendet. Diese bestehen nach Abbildung 5.19 aus reflektierenden Platten, die mittig an zwei Torsionsfedern aufgehängt sind. Analog zum elektrostatischen Normalkraftaktor wird eine Drehbewegung der Spiegelplatte durch die Kraft des elektrostatischen Feldes erzeugt, das zwischen der beweglichen Elektrode und einer feststehenden Elektrode anliegt (Abbildung 5.19 b).

Zur Berechnung des Drehwinkels φ in Abhängigkeit von der Steuerspannung an den Elektroden wird ein Gleichgewicht der Drehmomente M_{el} hervorgerufen durch das elektrische Feld sowie M_{torsion} verursacht durch die Torsionsfedern betrachtet:

$$\begin{aligned} M_{\text{el}} &= M_{\text{torsion}} = c_{\text{rot}} \varphi & (5.89) \\ c_{\text{rot}} &= \text{Torsionssteifigkeit (beide Torsionsfedern)} \\ \varphi &= \text{Drehwinkel [rad]} \end{aligned}$$

Torsionssteifigkeit beider Federn:

$$c_{\text{rot}} = 2 I_t \frac{G}{l} \quad (5.90)$$

I_t = Flächenträgheitsmoment einer Torsionsfeder

$$G = \frac{E}{2(1-\nu)} \quad \text{Schubmodul des Federmaterials} \quad (5.91)$$

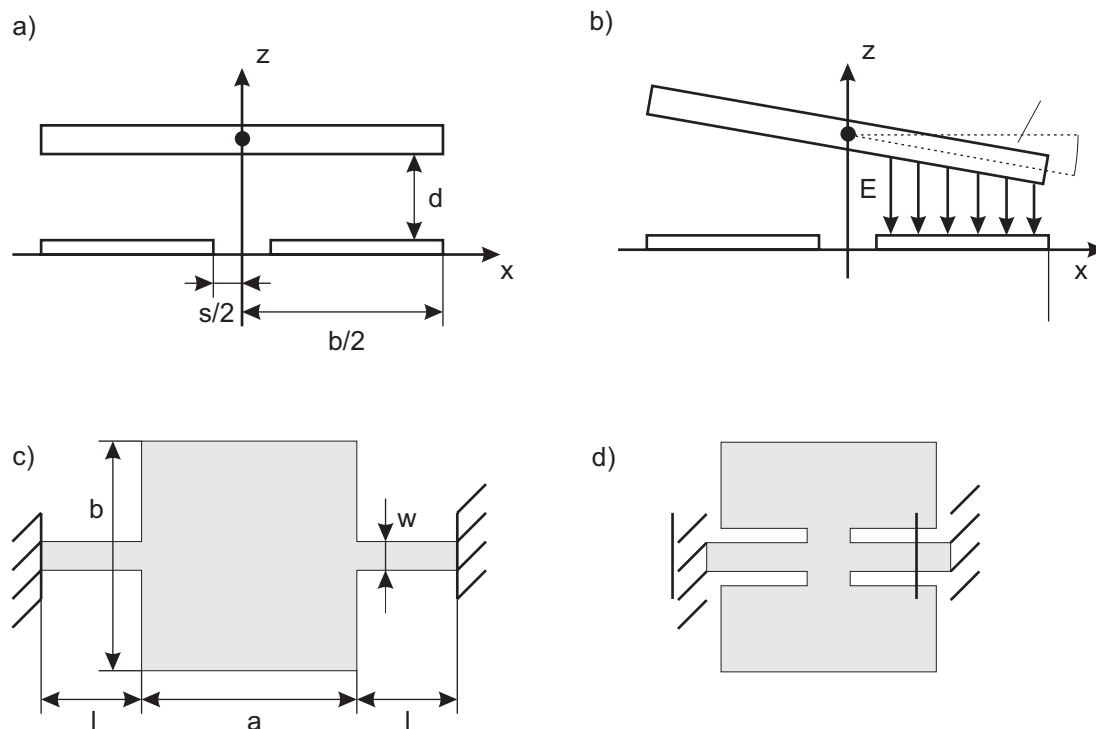


Abbildung 5.19: Querschnitt eines Torsionsspiegels in Ruhelage (a) und bei Verkipfung (b)
 c) Draufsicht mit Torsionsfeder
 d) Realisierung mit platzsparender Aufhängung

Für dünne Torsionsfedern, bei denen die Federdicke h klein gegen die Federbreite w ist ($h \ll w$), gilt aus der technischen Mechanik die Näherung:

$$I_t = \frac{1}{3} w h^3 \quad (5.92)$$

Für beliebige Abmessungen gibt es eine verfeinerte Näherung mit Korrekturfaktoren (Bell Labs/Lucent Technologies):

$$I_t = \frac{1}{3} w h^3 \left(1 - \frac{192 h}{\pi^5 w} \tanh \left(\frac{\pi w}{2 h} \right) \right) \quad (5.93)$$

Drehmoment hervorgerufen durch elektrostatisches Feld:

$$M_{\text{el}} = \int_0^{b/2} F'(x) x dx \quad (5.94)$$

Die Kraft $F'(x)$ eines Linienelements an der Position x beträgt:

$$F'(x) dx = \frac{\varepsilon_0}{2} a \frac{U^2}{z(x)^2} dx \quad \text{für} \quad \frac{s}{2} < x < \frac{b}{2} \quad (5.95)$$

mit $z(x) = d - \varphi x$, sonst ist $F'(x) = 0$.

$$M_{\text{el}} = \frac{\varepsilon_0}{2} a U^2 \int_{s/2}^{b/2} \frac{x}{(d - \varphi x)^2} dx \quad (5.96)$$

Für eine stabile Drehposition gilt:

$$\varphi x < d \quad (5.97)$$

sonst erfolgt ein Durchzug mit Berührung der beweglichen Elektrodenplatte auf der feststehenden Elektrode.

Fallunterscheidung:

$\varphi = 0$ Ausgangszustand (Platten parallel)

$\varphi > 0$ Drehbetrieb

a) $\varphi = 0$ (Anfangsdrehmoment):

$$\begin{aligned} M_{\text{el}0} &= \frac{\varepsilon_0}{2} a \frac{U^2}{d^2} \int_{s/2}^{b/2} x \, dx \\ &= \frac{\varepsilon_0}{2} a \frac{U^2}{d^2} \left[\frac{1}{2} x^2 \right]_{s/2}^{b/2} \\ &= \frac{\varepsilon_0}{4} a \frac{U^2}{d^2} \left(\frac{b}{2} \right)^2 \left(1 - \left(\frac{s}{b} \right)^2 \right) \end{aligned} \quad (5.98)$$

Näherung mit $s \ll b$:

$$M_{\text{el}0} \approx \frac{\varepsilon_0}{4} a \frac{U^2}{d^2} \left(\frac{b}{2} \right)^2 = \frac{\varepsilon_0}{4} a U^2 \left(\frac{b}{2d} \right)^2 \quad (5.99)$$

b) $\varphi > 0$ (Drehbetrieb):

$$M_{\text{el}} = \frac{\varepsilon_0}{2} a \frac{U^2}{d^2} \int_{s/2}^{b/2} \frac{x}{\left(1 - \varphi \frac{x}{d} \right)^2} dx \quad (5.100)$$

mit $\varphi x/d < 1$.

Mit der allgemeinen Lösung des Integrals

$$\int \frac{x dx}{X} = \frac{b}{a^2 X} + \frac{1}{a^2} \ln X \quad \text{mit} \quad X = a x + b \quad (5.101)$$

ergibt sich:

$$\begin{aligned} A_{\text{el}} &= \int_{s/2}^{b/2} \frac{x}{\left(1 - \varphi \frac{x}{d}\right)^2} dx \\ &= \left[\frac{1}{\frac{\varphi^2}{d^2} \left(1 - \varphi \frac{x}{d}\right)} + \frac{1}{\frac{\varphi^2}{d^2}} \ln \left(1 - \varphi \frac{x}{d}\right) \right]_{s/2}^{b/2} \\ &= \frac{d^2}{\varphi^2} \left[\frac{1}{1 - \varphi \frac{x}{d}} + \ln \left(1 - \varphi \frac{x}{d}\right) \right]_{s/2}^{b/2} \\ &= \frac{d^2}{\varphi^2} \left(\frac{1}{1 - \varphi \frac{b}{2d}} + \ln \left(1 - \varphi \frac{b}{2d}\right) - \frac{1}{1 - \varphi \frac{s}{2d}} - \ln \left(1 - \varphi \frac{s}{2d}\right) \right) \end{aligned} \quad (5.102)$$

Das elektrostatisch hervorgerufene Drehmoment ergibt sich mit der Näherung $\varphi s \ll 2d$ wegen $\varphi \ll 1$ und $s \ll d$ zu:

$$M_{\text{el}} = \frac{\varepsilon_0}{2} a \frac{U^2}{\varphi^2} \left(\frac{\varphi \frac{b}{2d}}{1 - \varphi \frac{b}{2d}} + \ln \left(1 - \varphi \frac{b}{2d}\right) \right) \quad (5.103)$$

Abkürzung: $\psi = \varphi \frac{b}{2d}$

$$M_{\text{el}} \approx M_{\text{el}0} I(\psi) \quad (5.104)$$

$$M_{\text{el}} \approx M_{\text{el}0} \frac{2}{\psi^2} \left(\frac{\psi}{1 - \psi} + \ln(1 - \psi) \right) \quad (5.105)$$

Der maximal mögliche Drehwinkel ergibt sich nach Abbildung 5.20:

$$\sin \varphi_{\text{max}} = \frac{d}{b/2} = \frac{2d}{b} \quad (5.106)$$

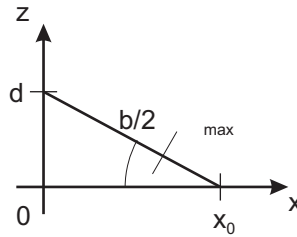


Abbildung 5.20: Maximaler Drehwinkel eines Torsionsspiegels

$$\varphi_{\max} = \arcsin \left(\frac{2d}{b} \right) \quad (5.107)$$

Für $d \ll b/2$ gilt näherungsweise:

$$\varphi_{\max} \approx \frac{2d}{b} \quad (5.108)$$

$$x_0 \approx \frac{b}{2} \quad (5.109)$$

Momentengleichgewicht:

$$M_{\text{el}} = c_{\text{rot}} \varphi = c_{\text{rot}} \frac{2d}{b} \psi \quad (5.110)$$

$$\frac{\varepsilon_0}{4} a U^2 \left(\frac{b}{2d} \right)^2 I(\psi) = c_{\text{rot}} \frac{2d}{b} \psi \quad (5.111)$$

Die Kennlinie Ablenkspannung vs. Steuerspannung $\varphi(U)$ ist nur implizit aus der Umkehrfunktion $U(\varphi)$ errechenbar:

$$U^2 = \frac{4}{\varepsilon_0 a} c_{\text{rot}} \left(\frac{2d}{b} \right)^3 \frac{\psi}{I(\psi)} \quad (5.112)$$

Neben der Drehung des Spiegelements nach Abbildung 5.19 b erfolgt auch eine vertikale Auslenkung des Spiegels durch die elektrostatische Anziehung des beweglichen Spiegelements. Dabei werden die Torsionsfedern zusätzlich als Biegebalken in S-Form (Parallelverschiebung an der Einspannung zur beweglichen Platte) verformt (Abbildung 5.21, vgl. Kapitel 4).

Auslenkung vertikal:

$$s_1 = \frac{F_z}{E w} \left(\frac{l}{h} \right)^3 \quad (5.113)$$

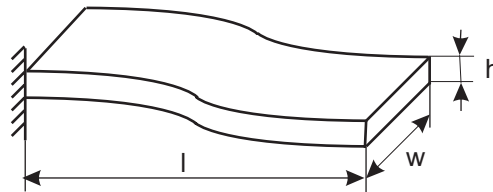


Abbildung 5.21: Vertikale Auslenkung der Torsionsfeder

Federkonstante:

$$c = E w \left(\frac{h}{l} \right)^3 \quad (5.114)$$

Aufhängung an zwei Federn (Parallelschaltung):

$$c_z = 2 c = 2 E w \left(\frac{h}{l} \right)^3 \quad (5.115)$$

Kraft in vertikaler Richtung nach Abbildung 5.19 b:

$$F_z = \frac{\varepsilon_0}{2} a U^2 \int_{s/2}^{b/2} \frac{dx}{(d - \varphi x)^2} = \frac{\varepsilon_0}{2} a \frac{U^2}{d^2} \int_{s/2}^{b/2} \frac{dx}{\left(1 - \varphi \frac{x}{d} \right)^2} \quad (5.116)$$

Mit der allgemeinen Lösung des Integrals:

$$\int \frac{dx}{X^2} = -\frac{1}{a X} \quad \text{mit} \quad X = a x + b \quad (5.117)$$

ergibt sich:

$$F_z = \frac{\varepsilon_0}{2} a \frac{U^2}{d^2} \frac{d}{\varphi} \left(-\frac{1}{1 - \varphi \frac{b}{2d}} + \frac{1}{1 - \varphi \frac{s}{2d}} \right) \quad (5.118)$$

Mit $\varphi \frac{s}{2d} \rightarrow 0$ folgt:

$$F_z \approx \frac{\varepsilon_0}{2} a \frac{U^2}{d^2} \frac{d}{\varphi} \left(1 - \frac{1}{1 - \varphi \frac{b}{2d}} \right) \quad (5.119)$$

Mit der Abkürzung: $\psi = \varphi \frac{b}{2d}$ ist

$$F_z = \frac{\varepsilon_0}{2} a \frac{U^2}{d^2} \frac{d}{\varphi} \left(\frac{\varphi \frac{b}{2d}}{1 - \psi} \right)$$

$$F_z = \frac{\varepsilon_0}{2} a \frac{b}{2} \frac{U^2}{d^2} \frac{1}{1 - \psi} \quad (5.120)$$

Sofern die vertikale Auslenkung s_1 gegenüber dem Plattenabstand d nicht vernachlässigbar wäre, würde sich die Berechnung der Ablenkungskennlinie $\varphi(U)$ ändern, da im Momentengleichgewicht statt d der effektive Abstand $d' = d - s_1$ ggf. in einer Iterationsrechnung eingesetzt werden müßte.

Abbildung 5.22 zeigt den schematischen Aufbau eines Scannerarrays in Bulk-Silizium-Mikromechanik. Mit den beispielhaften Daten in Tabelle 5.4 sind die Drehmomente der Antriebs- und der Torsionsfeder sowie die Kennlinien $U(\varphi)$ und $\varphi(U)$ berechnet (Abbildung 5.23). Analog zum elektrostatischen Normalkraftvektor erfolgt ein Durchziehen des Drehspiegels mit Berühren der Grundplatte, sobald die Steuerspannung einen kritischen Wert überschritten hat (Abbildung 5.23 c). Drehwinkel bis zu etwa 44 % (hier ca. 5°) des maximalen möglichen Winkels (hier $11,5^\circ$) lassen sich stabil einstellen, darüberhinaus erfolgt das Durchziehen, da das elektrostatische Moment M_{el} das Torsionsmoment übersteigt (Abbildung 5.23 a).

Tabelle 5.4: Typische Abmessungen und Kenndaten für einen elektrostatischen Torsionsspiegel

Plattenlänge, -breite	$a = b$	1000 μm
Plattenabstand	d	100 μm
Torsionsfeder: Länge	l	400 μm
Breite	w	20 μm
Dicke	h	5 μm
Elastizitätsmodul Si	E	169 GPa
Schubmodul Si	G	63,7 GPa
Torsionssteifigkeit	c_{rot}	0,22 μNm
Maximaler Drehwinkel	φ_{max}	11,54°
Drehwinkel bei Durchzug	φ_{an}	5°
Durchzugsspannung	U_{an}	409 V
Vertikalkraft bei U_{an} und φ_{an}	F_z	66 μN
Vertikalauslenkung bei U_{an} und φ_{an}	s_1	5 μm

Dieses Beispiel zeigt deutlich, dass die vertikale Auslenkung s_1 gegenüber dem Elektrodenabstand d vernachlässigt werden darf.

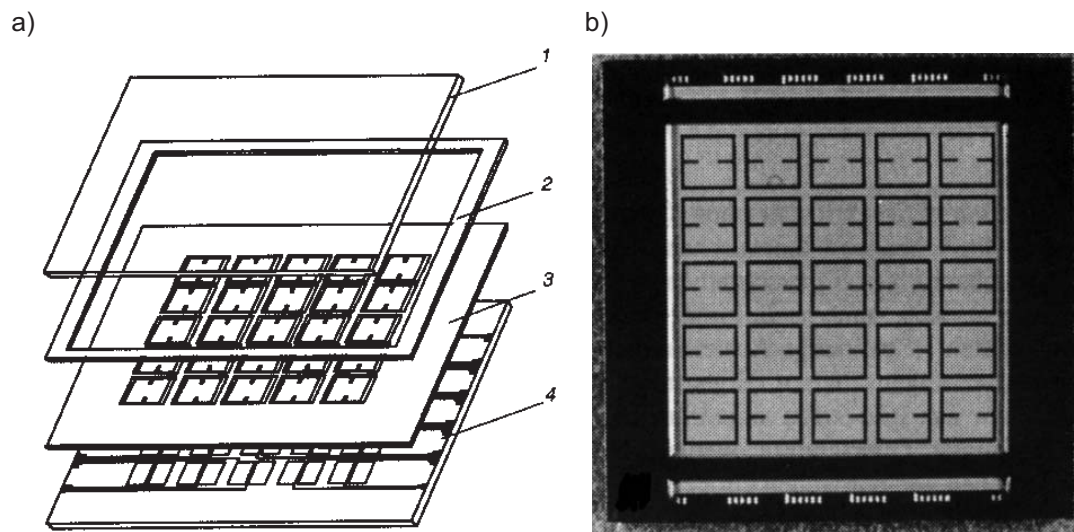


Abbildung 5.22: Elektrostatisch angetriebenes Scannerarray [Gerlach]
a) Schematischer Aufbau; 1 Glasdeckel, 2 oberes Abstandselement
3 Silizium-Spiegelteil, 4 Glas-Grundelement
b) Foto des montierten Scannerarrays

Elektrostatische Torsionsspiegel werden in verschiedenen Anwendungsgebieten eingesetzt [Gerlach]:

- Bilderzeugung 2D digital:
Lichtprojektoren (Beamer)
- Bilderzeugung 2D analog:
Laser-TV-Projektion
- Bilderzeugung 1D analog:
Laser-Drucker (Ersatz Polygonspiegel)
- Objekterkennung:
Torsionsspiegel als Scanner
- Optische Messtechnik
- Optische Schaltmatrix für Lichtwellenleiter

Die einzelnen Anwendungen sind in [Gerlach] ausführlich beschrieben.

Abbildung 5.24 zeigt eine Schaltmatrix für Lichtwellenleiter, die jede Glasfaser eines ankommenden Glasfaserbündels mit Hilfe von drehbaren Mikrospiegeln mit jeder Faser des Ausgangsbündels verbinden kann. Die Mikrospiegel sind dabei über eine kardanische Aufhängung in zwei Richtungen drehbar (Abbildung 5.25). Derartige Schaltmatrizen sind für 32x32 bis zu 512x512 Fasern demonstriert worden.

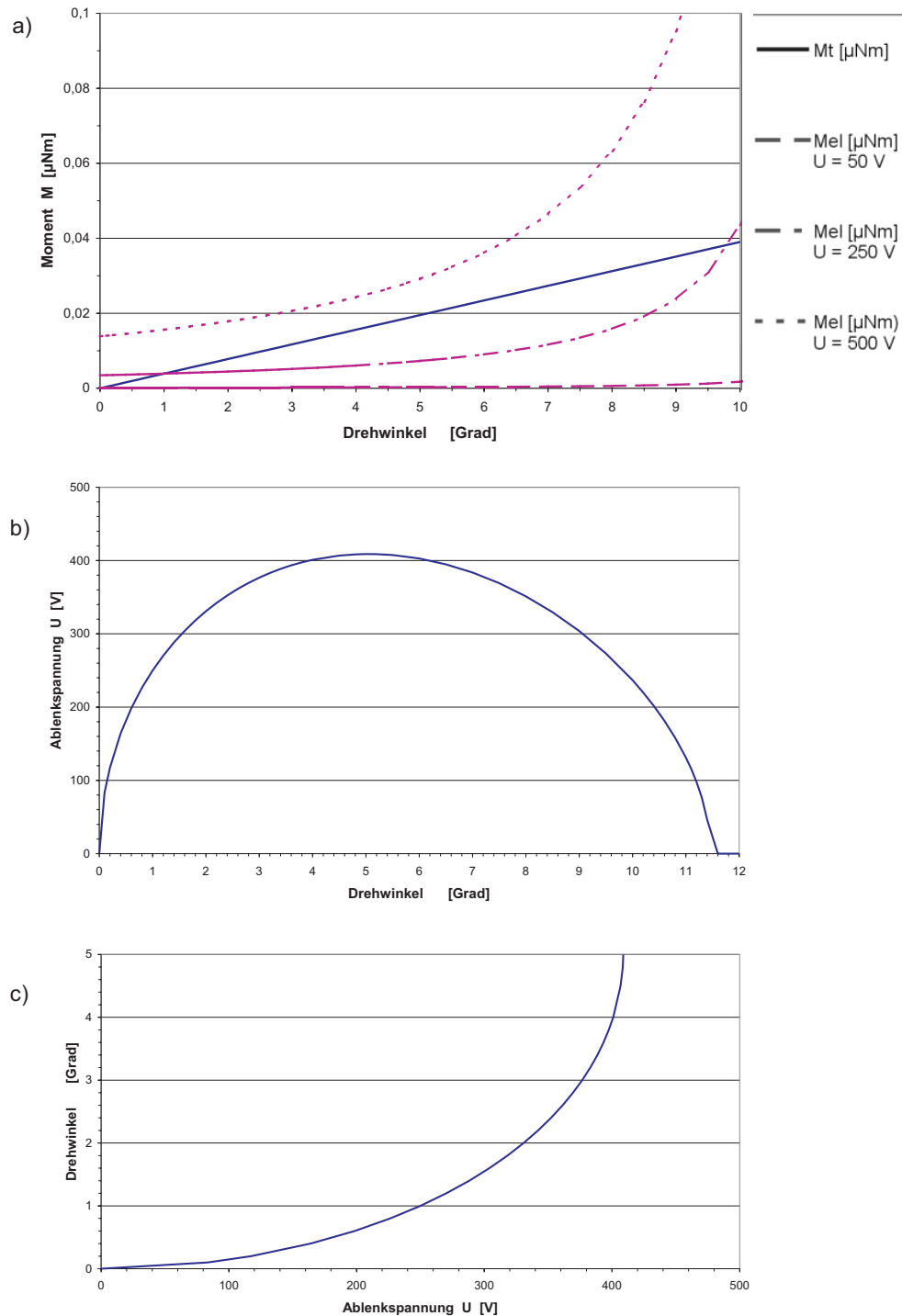


Abbildung 5.23: Kennlinien des elektrostatisch angetriebenen Scannerarrays

- a) Drehmomentenverlauf
- b) Kennlinie $U(\varphi)$
- c) Kennlinie Ablenkwinkel-Spannung $\varphi(U)$

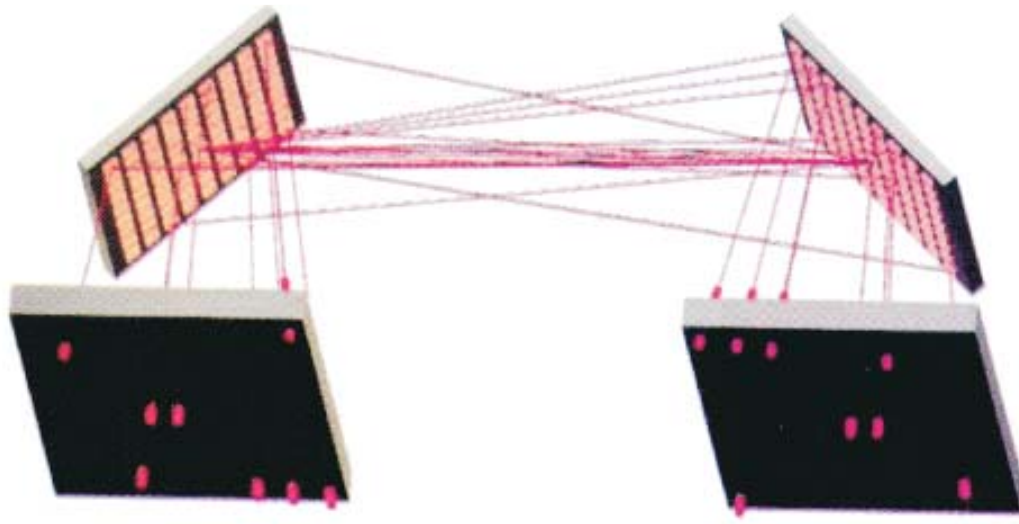


Abbildung 5.24: Optische Schaltmatrix mit mikromechanischem 3D-Spiegelsystem und aktiver Positionsregelung [Lucent Technologies]

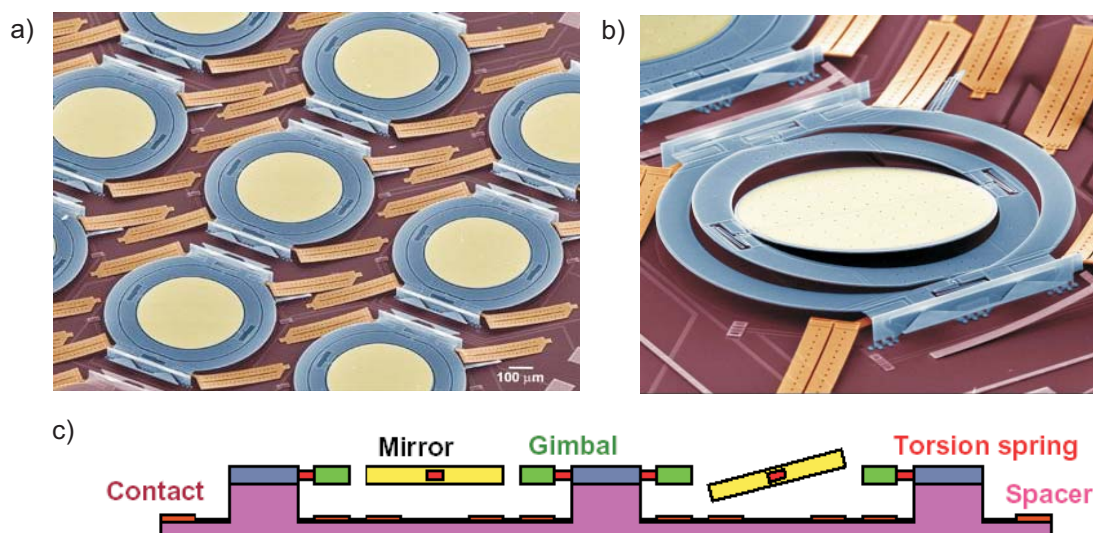


Abbildung 5.25: Zweidimensional beweglicher mikromechanischer Torsionsspiegel für optische Schalter (a); Einzelner Spiegel (b); Querschnitt (c)

5.1.5.3 Digital Mirror Device DMD

Eine besondere Anwendung elektrostatischer Torsionsspiegel ist von Texas Instruments für digitale Lichtprojektion (*Digital Light Processing DLP*) vorgestellt worden [Hornbeck]. Für die Projektion von Licht auf einer Projektionswand werden Bilder digital durch Spiegel-Arrays nach Abbildung 5.26 erzeugt, indem jedes Bildelement durch ein Spiegelement gesteuert wird. Im Gegensatz zu den zuvor betrachteten analog ablenkbaren Scannerspiegeln werden die Spiegel in den Digital Mirror Devices DMD digital in zwei Anschlagpositionen nach Abbildung 5.27 betrieben. Die Helligkeit jedes Bildpunktes wird durch die Verweildauer des Spiegelements in Projektionsrichtung eingestellt, ansonsten wird das Licht außerhalb der Projektionsoptik auf einen Absorber gelenkt.

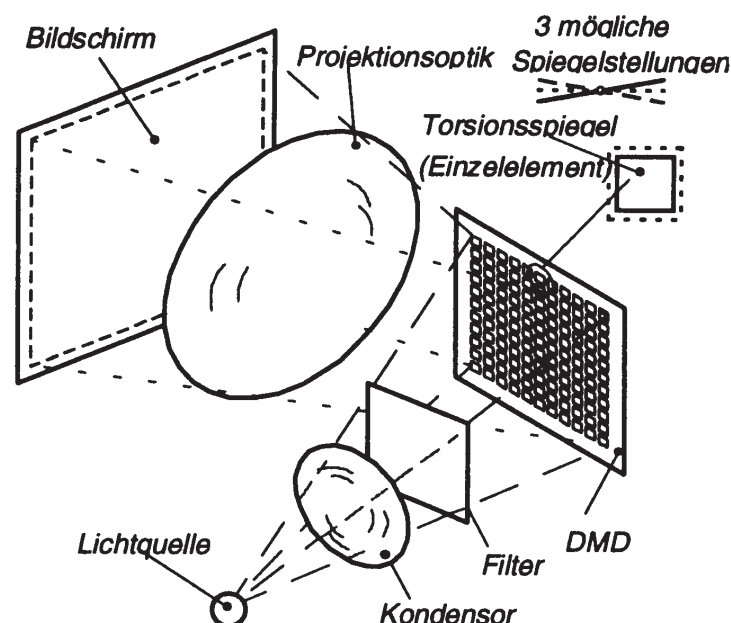


Abbildung 5.26: Digitale 2D-Bilderzeugung für HDTV-Projektion mit Digital Mirror Device DMD; 1920x1080 Bildelemente mit 1,5" Bilddiagonale bei 16:9 Bildformat; Chipgröße: 37 mm · 22 mm [Texas Instrument]

Kennwerte für DLP:

Auflösung:	1024 · 768	XGA	4 : 3
	1280 · 1024	SXGA	5 : 4
	1920 · 1080	HDTV	16 : 9
Spiegelement:	17 μ m · 17 μ m		
Ablenkung:	$\pm 10^\circ$		
Einschwingzeit:	10 μ s		
Kontrast:	> 100 : 1		
Leuchtstärke:	2...3-fach gegenüber LCD-Projektor		

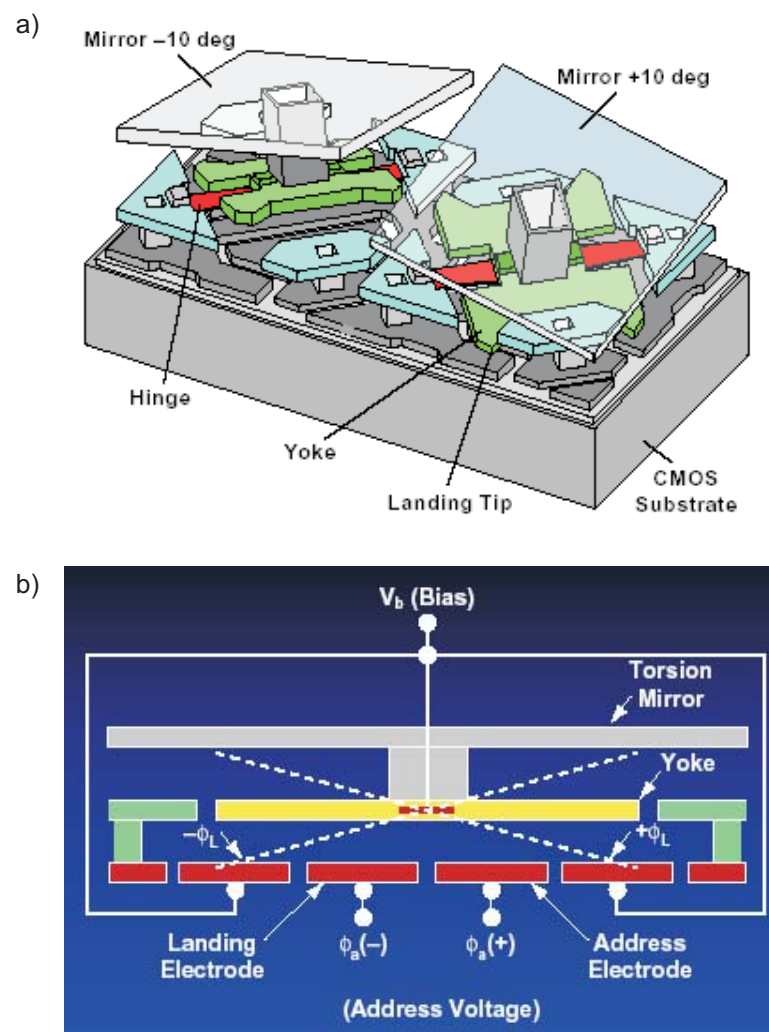


Abbildung 5.27: a) Spiegelement eines Digital Mirror Device [Texas Instruments]
b) Querschnitt

Um die Chipfläche möglichst gut für die Reflexionsflächen der Spiegel auszunutzen, sind DMD in einem 3-Schicht-System nach Abbildung 5.27 aufgebaut, so dass der Antrieb mit Aufhängung unter dem Spiegel versteckt ist:

- Grundfläche: feststehende Steuerelektroden
- Mittelebene: bewegliche Elektrode mit Torsionsfedern
- Obere Ebene: Spiegel

Die Herstellung von DMD erfolgt nach Abbildung 5.28 mit Hilfe der Opferschichttechnologie, wobei die Torsionsfedern aus dünnen Metallschichten bestehen, da die Torsionsmomente in der Anschlagposition im Bereich von einigen pNm (10^{-12} Nm) liegen. Gemäß der zuvor durchgeführten Berechnung sind in Tabelle 5.5 die Kenndaten für die Mikrospiegel im DMD zusammengestellt. Da die Spiegelemente mit einer Kantenlänge von $16\text{ }\mu\text{m}$ (Pixelgröße $17\text{ }\mu\text{m}$) eine diagonale Drehachse aufweisen, sind für die Momentenberechnung effektive Elektrodenabmessungen von $11\text{ }\mu\text{m}$ zugrunde gelegt worden.

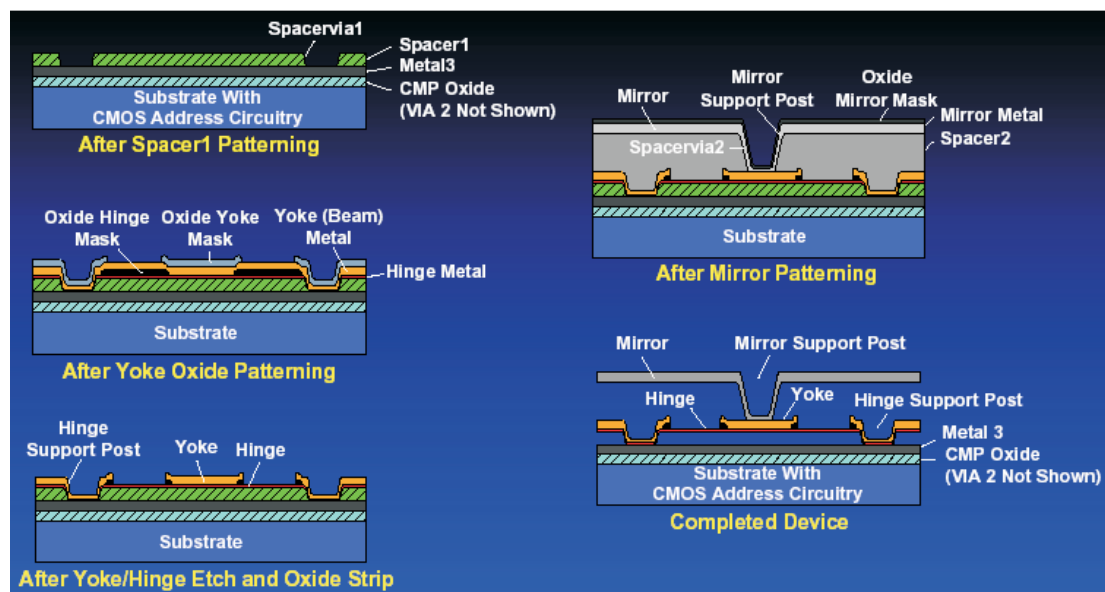


Abbildung 5.28: Herstellungsprozess eines DMD in Oberflächen-Mikromechanik mit Opferschicht-Technologie [Texas Instruments]

Die Verläufe der Momenten- und Ablenkwinkel-Kennlinie entsprechen Abbildung 5.23, nur sind die Momente um vier bis fünf Größenordnungen niedriger.

Tabelle 5.5: Abmessungen und Kenndaten eines elektrostatischen Torsionsspiegels in einem DMD

Pixelabmessung		$17\ \mu\text{m}$
Kantenlänge Spiegel		$16\ \mu\text{m}$
Elektrodenplattenlänge, -breite	$a = b$	$11\ \mu\text{m}$
Plattenabstand	d	$1\ \mu\text{m}$
Torsionsfeder: Länge	l	$8\ \mu\text{m}$
Breite	w	$1,5\ \mu\text{m}$
Dicke	h	$0,2\ \mu\text{m}$
Elastizitätsmodul Al	E	$72\ \text{GPa}$
Schubmodul Al	G	$27\ \text{GPa}$
Torsionssteifigkeit	c_{rot}	$24,7\ \text{pNm}$
Maximaler Drehwinkel	φ_{max}	10°
Durchzugsspannung	U_{an}	$35\ \text{V}$
Vertikalkraft bei U_{an} und φ_{an}	F_z	$0,6\ \mu\text{N}$
Vertikalauslenkung bei U_{an} und φ_{an}	s_1	$0,18\ \mu\text{m}$

5.1.5.4 Mikrorelais

Elektromechanische Kleinsignalrelais dienen zum Schalten von Laststromkreisen, die gegenüber dem Steuerkreis galvanisch getrennt sind und im geöffneten Zustand vollständige elektrische Isolation aufweisen. Kleinsignalrelais decken ein weites Spektrum von Anwendungsbereichen ab:

- Telekommunikation
- Messtechnik
- Automatisches Testequipment
- Industrieelektronik

Telekommunikationsrelais der vierten Generation (ab 2000) zeigen ein Volumen von ca. $0,34\ \text{cm}^3$ und erreichen die Grenzen der konventionellen Fertigungstechnologie der Feinwerktechnik. Eine deutliche Miniaturisierung bietet die Mikrotechnologie wie Silizium-Mikromechanik und UV-LIGA-Technik, wobei verschiedene Antriebsprinzipien wie Elektrostatik, Dünnfilm-Magnetik, Piezo- und Thermowandler zur Auswahl stehen. Tabelle 5.6 zeigt einige Anforderungen an Kleinsignalrelais.

Für den Einsatz der Mikrotechnologie gibt es einige Motivationsfaktoren, die sich aus den technischen und mehr wirtschaftlichen Anforderungen ergeben:

Tabelle 5.6: Anforderungen an elektromechanische Kleinsignalrelais

Vorgang	Entwicklungsziel	Grenzwert
Kontakte offen	Perfekte Isolation	$R_{\text{iso}} \rightarrow \infty$
Kontakte geschlossen	Niedriger / konstanter Kontaktwiderstand	$R_K < 100 \text{ m}\Omega$
Galvanische Trennung	Lastkreis / Steuerkreis	$R_{\text{iso}} \rightarrow \infty$
Durchschlagfestigkeit	Hohe Durchbruchspg. Lastkreis / Steuerkreis	$U_D > 500 \text{ V (2500 V)}$
Zuleitungen / Anschlüsse	Verlustfrei	$R_L \rightarrow 0$
Strombelastbarkeit	Hohe Wärmeableitung	$R_{\text{th}} \rightarrow 0$
Schaltkennlinie	Hysteresese mit Kippzuständen	$U_{\text{an}} > U_{\text{ab}}$
Prellen	Wenig Prellvorgänge	$n \rightarrow 0$
Schaltzeiten	Kurz	$t_r, t_f < 1 \text{ ms}$

U_{an} Ansprechspannung
 U_{ab} Rückfallspannung

- Geringes Volumen
- Justierfreier Fertigungsprozess
- Einhaltung enger Toleranzen
- Potential für kostengünstige Fertigung

Als Barrieren sind die physikalisch bedingten geringen Kontaktkräfte von weit unter 1 cN und die durch die Chipgrößen stark bestimmten Herstellungskosten zu überwinden. Der Einsatz der Mikrotechnologie ermöglicht die Anwendung verschiedener Antriebsprinzipien und völlig neuartiger Konstruktionen. Ferner bieten die Fertigungsverfahren der Mikrotechnik hochreine Schaltkontakte, die die klassischen Kräftebereiche für stabile Kontaktgabe erweitern.

In klassischen Schalteranwendungen sind die Abhängigkeiten des Kontaktwiderstands von den aufgebrachten Kontaktkräften sowie den jeweiligen Kontaktmaterialien für Arbeitsbereiche ab 10 cN Kontaktkraft sowohl theoretisch als auch experimentiell untersucht worden. Bei Mikrorelais liegen die Kontaktkräfte je nach Antrieb und Bauart im Bereich von einigen 10 μN bis 5 mN, d.h. um den Faktor 100 bis 1000 niedriger.

Experimentielle Untersuchungen an verschiedenen Kontaktmaterialien wie Gold, AuNi5, Silber und Rhodium haben gezeigt, dass stabile Kontaktwiderstände von $R_K < 50 \text{ m}\Omega$ bei Kontaktkräften von $F_K < 1 \text{ mN}$ bei reinem Gold bzw. Goldlegierungen erreichbar sind. Aus den experimentiellen Ergebnissen zum Kontaktwiderstand und elektrischen Durchschlagverhalten lassen sich die Vorgaben für das Design von Mikrorelais ableiten:

- Kontaktkraft $> 100 \mu\text{N}$
- Öffnerkraft $> 500 \mu\text{N}$

- Kontaktabstand $> 5 \mu\text{m}$ (Wunsch $10 \mu\text{m}$)

Zum Antrieb der beweglichen Schaltkontakte sind verschiedene Antriebskonzepte realisiert worden, wobei auf Grund der Skalierungsbetrachtungen aus Kap. 5.1 und dem stromlosen Haltebetrieb die elektrostatischen Antriebe im Vordergrund stehen. Abbildung 5.29 a zeigt das Funktionsprinzip eines elektrostatisch angetriebenen Relais. Neben der Rückstellfeder eines Normalkraftaktors nach Abbildung 5.5 ist der bewegliche Kontakt an einer zusätzlichen Kontaktfeder angebracht. Der Antrieb zeigt eine Weg-Spannungs-Charakteristik mit einer Hysterese nach Abbildung 5.6 mit einer Ansprechspannung U_{an} und einer Rückfallspannung U_{ab} . Im durchgezogenen Zustand wäre die Kraft des Aktors abhängig von der aktuellen Betriebsspannung, so dass der Kontaktwiderstand nicht stabil wäre. Deshalb wird der bewegliche Kontakt von einer Kontaktfeder auf den feststehenden Kontakt gepresst, so dass die Kontaktkraft von der Betriebsspannung des Antriebs unabhängig ist.

Eine Realisierung eines Mikrorelais mit elektrostatischem Parallelplattenantrieb zeigt Abbildung 5.29 b. Für die geforderten Vorgaben liefert dieses Relais nach den Berechnungen aus 5.1.1 folgende Kennwerte:

Aktorfläche A	1 mm^2
Elektrodenabstand d	$10 \mu\text{m}$
Federsteifigkeit c (Rückstellfeder)	50 N/m
Ansprechspannung U_{an}	44 V
Rückfallspannung U_{ab}	$3,8 \text{ V}$
Öffnungskraft $F_s = c d$	$500 \mu\text{N}$

Die Ansprechspannung lässt sich deutlich reduzieren, wenn die in Abbildung 5.29 a dargestellten Funktionselemente in einer gekrümmten Federstruktur zusammengefasst werden, so dass sich ein variabler Elektrodenluftspalt, als Wanderkeil bezeichnet, ergibt. Der Grundaufbau nach Abbildung 5.30 a besteht aus einer festen Elektrode am Boden und einer zweiten in Form einer gebogenen Federzunge, die von der ersten isoliert ist und gleichzeitig die Rückstellfeder bildet. Sie ist an einem Ende eingespannt und am freien Ende enthält sie die Kontaktfeder [Siemens AG, Schlaak et al.].

Durch Anlegen einer elektrischen Steuerspannung entsteht durch das elektrische Feld zwischen den Elektroden eine anziehende Kraft, die ein Abrollen der Feder bewirkt (Abbildung 5.30 b). Mit steigender Spannung bewegt sich der Luftspaltkeil zum Federende, bis diese ganzflächig mechanischen Kontakt mit dem Boden aufweist. Der separate Federbereich am Ende der Schaltfeder bildet die Kontaktfeder, so dass wie bei einem konventionellen elektromagnetischen Relais die Kontaktkraft unabhängig von der aktuellen Steuerspannung ist. Sie ergibt sich aus dem Produkt der Federsteifigkeit und dem Überhub, der in diesem Fall aus der Höhe beider Schaltkontakte besteht.

Der Abrollprozess ergibt sich aus dem Energiegleichgewicht zwischen der Änderung der elektrostatischen Energie im Kondensator einerseits und der Änderung der mechanischen

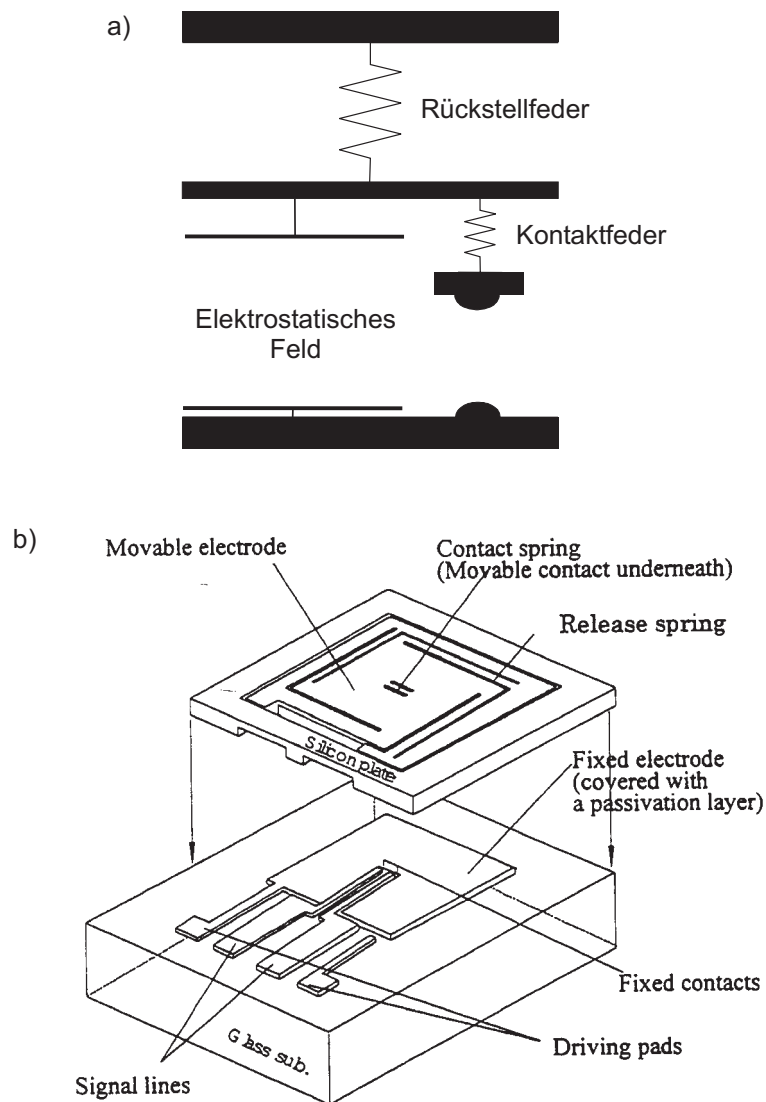


Abbildung 5.29: a) Funktionsprinzip eines elektrostatischen Mikrorelais
b) Mikromechanisches Relais mit Parallel-Plattenantrieb
Chipgröße $2,5 \cdot 2 \text{ mm}^2$ [NTT, Sakata et al.]

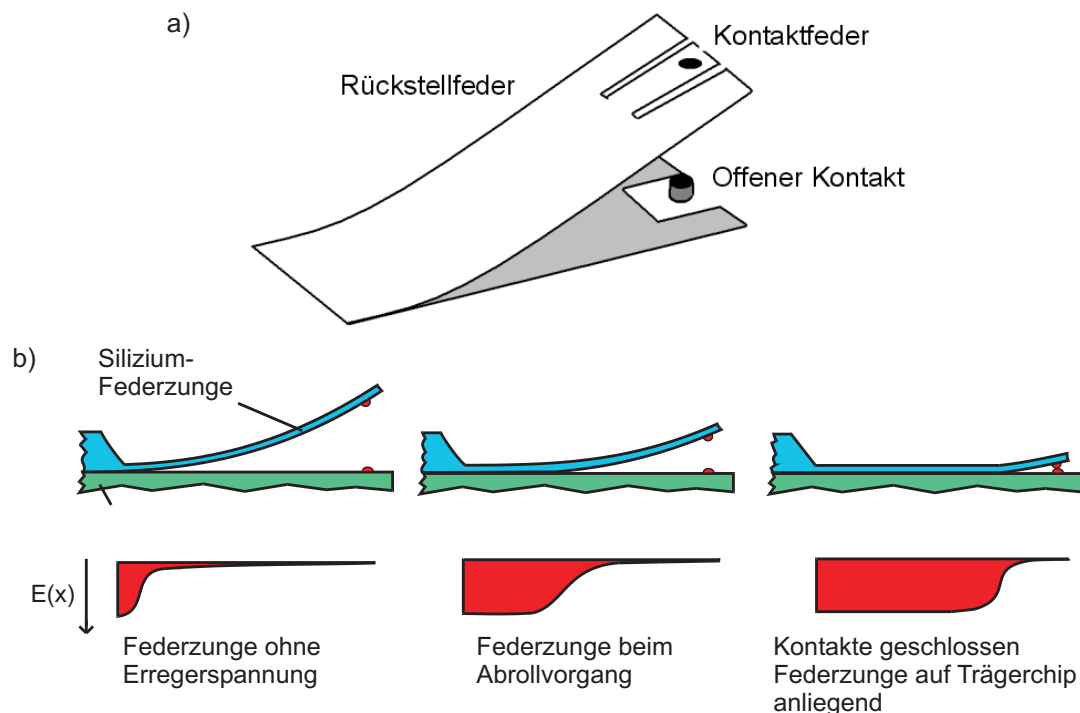


Abbildung 5.30: a) Prinzipaufbau eines elektrostatischen Wanderkeilantriebs mit gebogener Federzunge
b) Schaltvorgang mit Abrollen der gekrümmten Schaltfeder

Verformungsenergie, die in der Rückstellfeder gespeichert ist. Je kleiner der Biegeradius der Federzunge wird, desto höher wird die Spannung. Ein einwandfreier Schaltprozeß muss zwei Hauptanforderungen erfüllen:

- Während die Steuerspannung ansteigt, muss der Kontaktabstand möglichst groß bleiben, bis die Ansprechspannung erreicht wird. Dann erst sollen die Kontakte abrupt schließen und die volle Kontaktkraft aufweisen.
- Beim Absenken der Steuerspannung beginnend von der Ansprechspannung aus sollen die Kontakte geschlossen bleiben bis die Rückfallspannung erreicht wird. Bei dieser sollen die Kontakte unmittelbar öffnen.

Die Aufgabe der Design-Analyse besteht darin, dass alle geometrischen Parameter so abgestimmt werden, dass beide Bedingungen erfüllt sind und die Ansprechspannung signifikant größer ist als die Rückfallspannung.

Im Fall einer konstanten Krümmung der Rückstellfeder gäbe es eine definierte Spannung, bei der die Feder vollständig abgerollt wäre, wenn die elektrostatische und mechanische Energie im Gleichgewicht sind. Dieser Abrollvorgang würde jedoch unterbrochen werden, sobald eine zusätzliche Kontaktkraft beim Berühren der Schaltkontakte auftritt. Dieses

Problem kann durch eine Ansprechverzögerung in Form einer Energiebarriere durch eine der beiden folgenden Möglichkeiten gelöst werden (Abbildung 5.31 a):

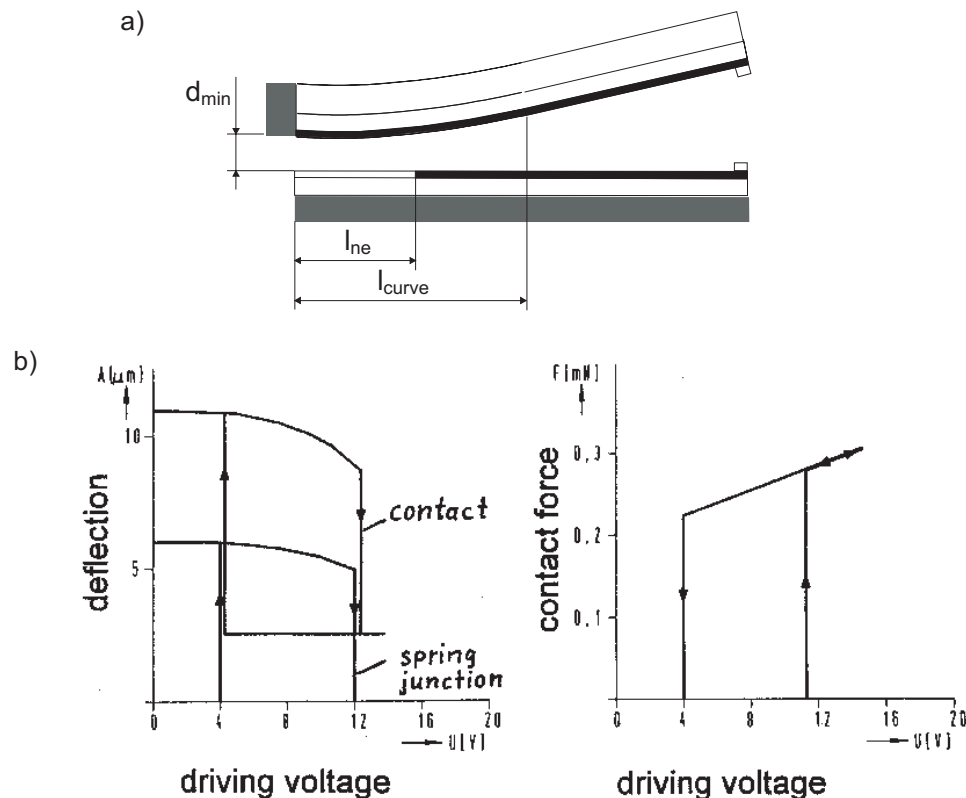


Abbildung 5.31: a) Konstruktive Elemente für eine Ansprechverzögerung in einem elektrostatischen Wanderkeilantrieb
b) Weg-Spannungs- und Kraft-Spannungs-Kennlinien eines Wanderkeilantriebs mit Ansprechverzögerung

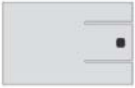
- Variable Krümmung der Federzunge mit der höchsten Krümmung an der Einspannstelle
- Luftspalt d_{min} an der Einspannstelle
- Versatz l_{ne} der festen Steuerelektrode gegenüber der Einspannstelle

Am leichtesten lässt sich die Ansprechverzögerung durch den Luftspalt d_{min} realisieren. Das gekoppelte elektrostatische und mechanische System wird wegen der integrierten Struktur mit Hilfe des Finiten Element Programmsystems ANSYS für verschiedene Konstruktionsvarianten von Rückstell- und Kontaktfeder analysiert. Die Berechnungen wurden unter statischen Bedingungen durchgeführt, wobei die Steuerspannung rampenförmig sowohl ansteigend als auch abfallend variiert wurde, so dass die charakteristischen Parameter wie

Auslenkung der Feder und Kontaktkraft für die Übergänge beim Ansprechen und Rückfallen berechnet wurden (Abbildung 5.31 b).

Die Ergebnisse von FEM-Analysen für verschiedene Federkonstruktionen sind in Abbildung 5.32 veranschaulicht und in Tabelle 5.7 zusammengestellt. Bei einer effektiven Antriebs-elektrodenfläche von ca. 1 mm^2 und einem Kontaktabstand $x_c = 10 \mu\text{m}$ werden Ansprechspannungen von ca. 12 V erreicht, die damit um den Faktor 3...4 unter dem Parallelplattenantrieb von Abbildung 5.29 b liegen. Eine niedrige Ansprechspannung bei gleichzeitig hoher Kontaktkraft von knapp 2 mN liefert eine spiralförmige Kontaktfeder (Abbildung 5.32).

Tabelle 5.7: Ergebnisse der FEM-Analyse von verschiedenen Federkonstruktionen

Spring type						
Curved length	μm	1300	1300	400	400	400
Contact spring l / w or $\varnothing$ / angle	$\mu\text{m}, ^\circ$	500 / 500	500 / 500	250 / 500	500 / 230°	500 / 200°
Contact height (total)	μm	4	4	2.5	2.5	2.5
Gap at fixture	μm	0	0.5	0	0	0
Pull-in voltage	V	10.5	19	12	11	11.5
Fall-back voltage	V	5	4	6.5	4.5	7
Contact force at pull-in	mN	0.18	0.8	0.86	0.79	1.9
Spring length at contact	1300 μm					
Spring width	1000 μm					

Die Abhängigkeit der Ansprechspannung von den wichtigsten geometrischen Parametern wie der Federdicke d_{Feder} , der Federbiegung x_c und dem Anfangsluftspalt d_{min} lässt sich durch eine analytische Näherung beschreiben, die auf dem Gleichgewicht der elektrostatischen und der mechanischen Energie beruht:

$$U_{\text{an}} \sim d_{\text{Feder}}^{3/2} x_c d_{\text{min}} \quad (5.121)$$

Elektrostatische Mikrorelais lassen sich nach dem Aufbau in Abbildung 5.33 mit Hilfe der Silizium-Mikromechanik herstellen. Das Relais wird aus zwei miteinander verbundenen Chips aufgebaut: einem Silizium-Chip mit der Federzunge und einem Träger-Chip aus Pyrex-Glas mit den Gegenelektroden und dem festen Schaltkontakt.

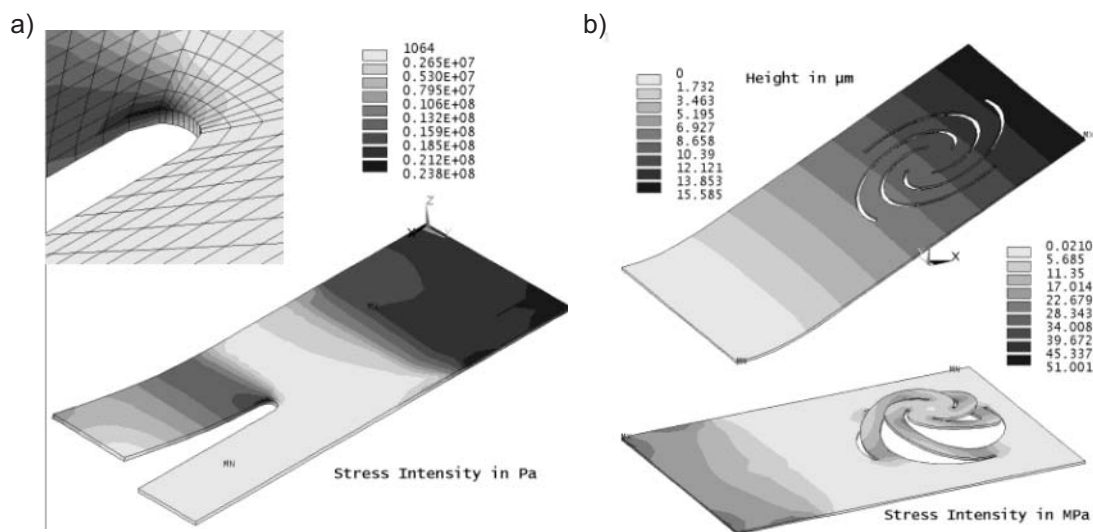


Abbildung 5.32: FEM-Analyse der mechanischen Spannungen einer Schaltfeder

a) mit schlitzförmiger

b) mit spiralförmiger Kontaktfeder

Federlänge 1,3 mm/1,8 mm; Federbreite 1 mm

Kontakthöhe (Überhub) 2,5 µm

Als Ausgangsmaterial für das Federteil dient ein p-dotierter Silizium-Wafer, der mit einer 10 µm dicken n-dotierten Silizium-Schicht für die Schaltfeder versehen wird. Den Ablauf eines möglichen Herstellungsablaufs zeigt Abbildung 5.34.

Die Federzunge wird durch anisotropes KOH-Ätzen von der Wafer-Rückseite aus freigelegt, wobei die Dicke der Federzunge durch einen elektrochemischen Ätzstopp an der Grenze der n-dotierten Siliziumschicht sehr genau definiert wird.

Auf der Vorderseite des Silizium-Wafers wird ein stress-induzierendes Schichtsystem aufgebracht, das aus thermischem Siliziumoxid und Plasma-CVD-Oxid besteht. Letzteres dient zum Abdecken der elektrischen Leiterbahnen aus gesputtertem Aluminium. Alle Schichtstrukturierungen müssen vor dem KOH-Ätzen vorbereitet sein, da die Silizium-Federzunge noch durch die isolierenden Schichten auf der Wafervorderseite mit dem Wafer allseitig verbunden ist. Erst im letzten Prozessschritt werden die Schlitz um die Schalt- und Kontaktfeder durch einen Plasmaätzprozess freigelegt und die bis dahin „eingefrorene“ mechanische Druckspannung des Vorderseitenschichtsystems führt zur erwünschten Krümmung der Schaltfeder.

Beide Substrate werden mit einem minimalen Spalt von weniger als 0,5 µm zusammengebondet. Die Schaltkontakte auf der Silizium-Federzunge und dem Glas-Substrat bestehen aus galvanisch abgeschiedenen Gold-Legierungen mit einer Höhe von je 2 µm.

Die experimentielle Charakterisierung von Mikrorelais besteht im wesentlichen aus den elektrischen Schalteigenschaften wie Ansprech- und Rückfallspannungen sowie Schaltzeiten

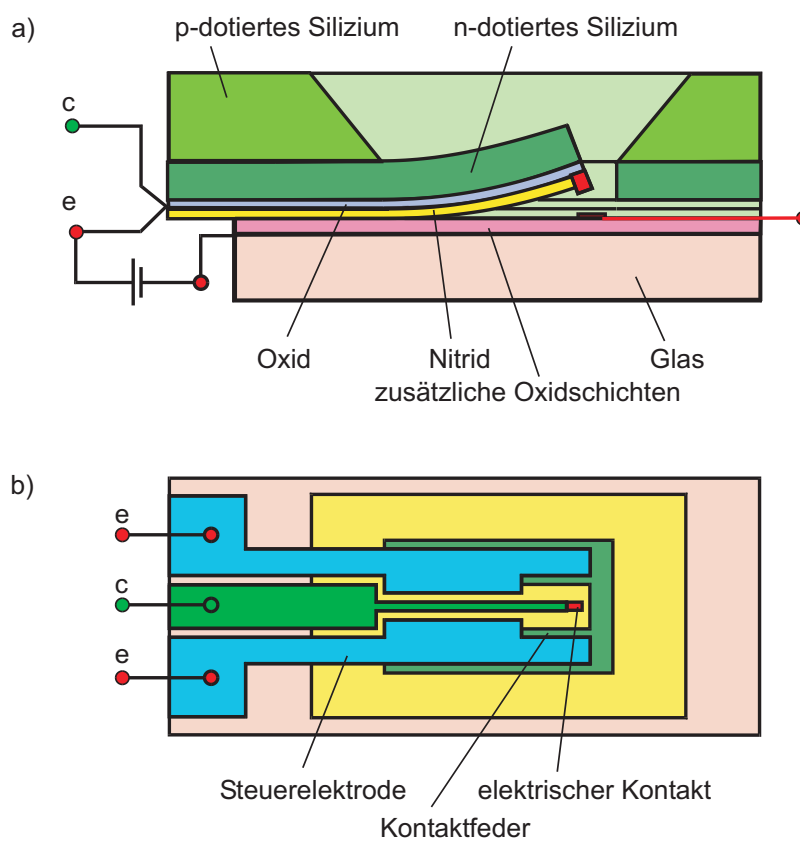


Abbildung 5.33: Schematischer Aufbau eines elektrostatischen Silizium-Mikrorelais mit Querschnitt (a) und Draufsicht (b) [Siemens]

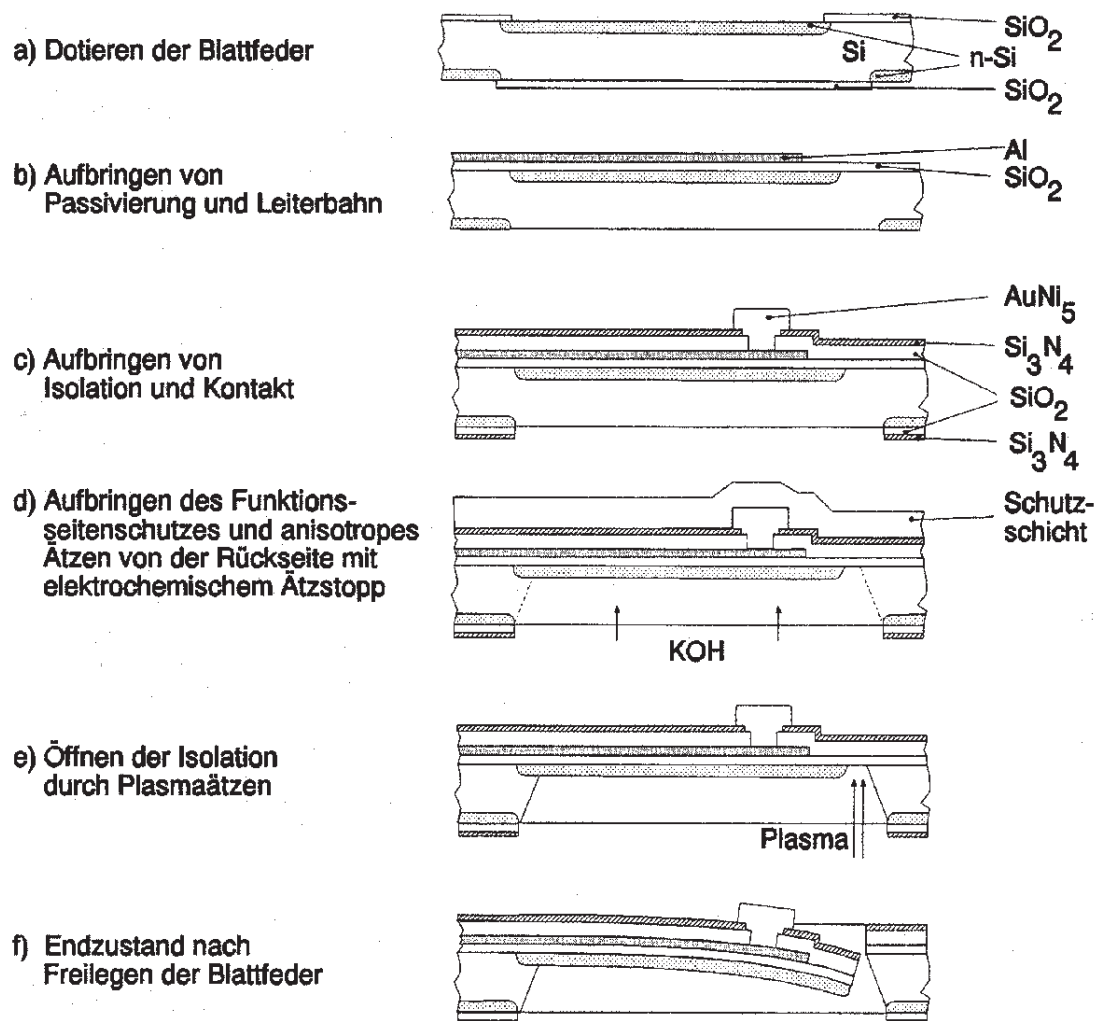


Abbildung 5.34: Prozessablauf zur Herstellung des Siliziumteils eines Silizium-Mikrorelais mit vorgekrümmter Federzunge

und den Kontakteigenschaften wie Kontaktwiderstand und elektrischer Lebensdauer.

Die Schaltcharakteristik wird mit einem quasistatischen ansteigenden und abfallenden Rampensignal der Steuerspannung ermittelt, wobei die Spannung an den Schaltkontakten und die mechanische Federauslenkung mit Hilfe eines Laser-Abstandssensors gemessen werden. Ein typisches Messergebnis gemäß Abbildung 5.35 zeigt eine Schalthysterese mit abrupten Schaltübergängen.

Aufgrund der niedrigen trägen Masse der Schaltfeder erreichen Mikrorelais Schaltfrequenzen von über 1 kHz mit Schaltzeiten von ca. $200 \mu\text{s}$ unter normalem Luftdruck. Unter Vakuum können die Schaltzeiten weiter vermindert werden. Wegen der kleinen bewegten Massen zeigen Mikrorelais kein Prellen, weder mechanisch an der Schaltfeder noch elektrisch an den Schaltkontakten.

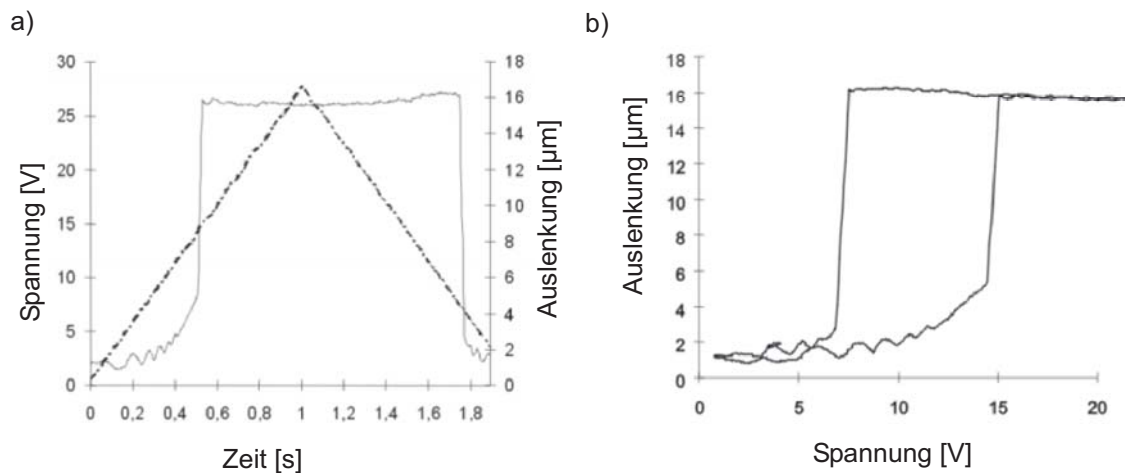


Abbildung 5.35: Auslenkung der Federzunge an der Kontaktmitte gemessen durch Laser-Abstandssensor, Steuerspannungsbereich 30 V [Siemens]
a) Steuerspannung und Auslenkung in Abhängigkeit von der Zeit
b) Auslenkungs-Spannungs-Charakteristik mit Hysterese

Abbildung 5.36 zeigt ein Messergebnis zur elektrischen Lebensdauer für ein Mikrorelais mit Normal-Schließfunktion (Form A) bei einer ohmschen Last von 6 V/50 mA. Bei derartigen Lasten mit 0,3 W geschalteter Leistung an Kontakten mit sehr kleinen Flächen von ca. $100 \mu\text{m} \cdot 100 \mu\text{m}$ erreichten die Relais elektrische Lebensdauern bis nahezu 40 Millionen Schaltspielen, wobei bis ca. 20 Millionen ein konstanter Widerstand vorliegt. Bei Lasten von 6 V/100 mA mit 0,6 W geschalteter Leistung wurden Lebensdauern bis zu ca. 7 Millionen Schaltspielen erreicht.

Neben den elektrostatischen Mikrorelais wurden auch Mikrorelais mit elektromagnetischem Antrieb in einer Dünnschichttechnologie nach Abbildung 5.37 realisiert [CP Clare /CSEM, Tilmans et al.]. Zur Verminderung des magnetischen Widerstands wird das Relais auf einem FeSi₃-Substrat hergestellt, so dass der magnetische Widerstand des Jochs vernachlässigbar gering wird (vgl. Kap. 5.1.2).

Die Dünnschicht-Flachspulen wurden in einer Zweilagentechnik mit insgesamt 127 Windungen hergestellt. Der Anker mit Rückstellfeder besteht aus galvanisch abgeschiedenem NiFe 80/20 mit 20 µm Schichtdicke. Die Sättigungsflussdichte beträgt $B_s = 1 \text{ T}$ und die Permeabilität $\mu_{r\text{max}} = 2000$. Die Ansprech-Steuereistung beträgt 16 mW bei einer Durchflutung von $n I = 1 \text{ AW}$ und einer Chipfläche von 20 mm^2 .

Mit diesem Bauelement wurden ebenfalls mechanische Lebensdauern von > 10 Millionen Schaltspielen und elektrische Lebensdauern von > 10 Millionen Schaltspielen allerdings nur bei geringen Lasten von 2,3 V/5 mA (Trockenschalten) erreicht.

Aus den gegenwärtigen Ergebnissen von Mikrorelais unterschiedlicher Bauart lassen sich folgende Potentiale für künftige Mikrorelais ableiten:

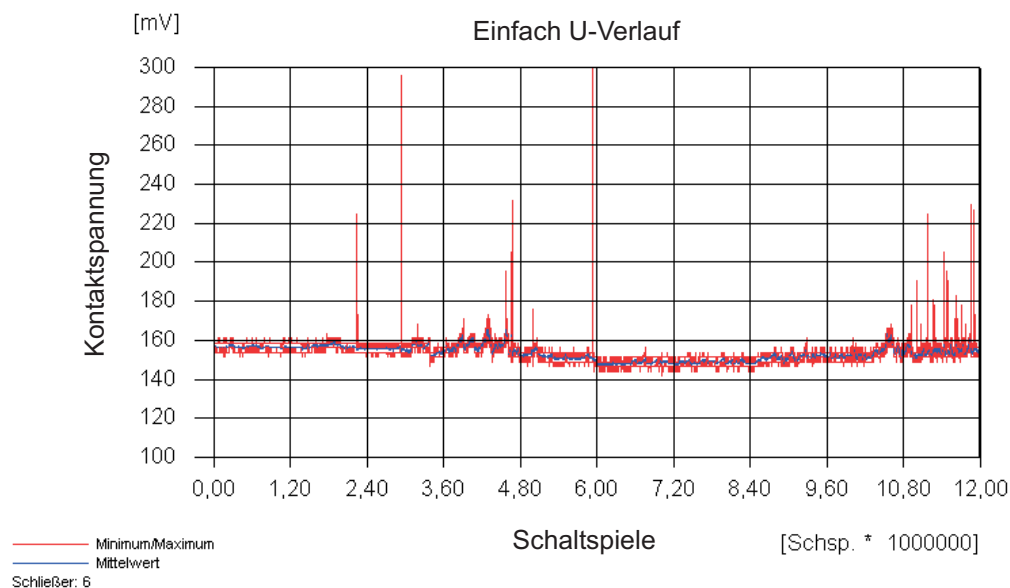


Abbildung 5.36: Elektrischer Lebensdauertest mit ohmscher Last 6 V/50 mA bei 20 Hz; Widerstandsverlauf bis 12 Millionen Schaltspiele, Gesamtlebensdauer 39 Millionen Schaltspiele

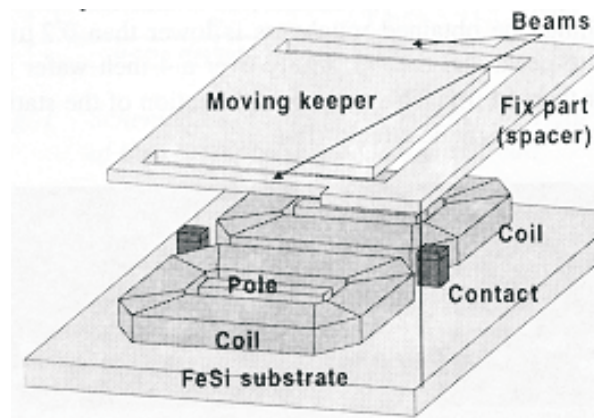


Abbildung 5.37: Elektromagnetisches Mikrorelais (Chipfläche ca. 5 mm 4 mm)

- Hohe Zuverlässigkeit mit elektrischen Lebensdauern > 20 Millionen Schaltspielen, die heutigen Telekom-Relais entsprechen
- Niedrige Durchgangswiderstände von $< 500 \text{ m}\Omega$ durch optimierte Kontaktmaterialien und verstärkte Leiterbahnen
- Schaltströme bis 500 mA
- Führen von Grenzströmen bis zu 1 A

- Schaltspannungen sind wegen der Lichtbögen auf den Kleinsignalbereich 12 V bzw. 24 V begrenzt
- Durch Vakuum bzw. Schutzgas im Kontaktraum kann das Schalten höherer Spannungen ermöglicht werden
- Leistungslose Ansteuerung durch elektrostatische Antriebe
- Sehr gute Hochfrequenzeigenschaften für die übertragenen Signale mit Bandbreiten > 3 GHz

5.2 Dehnungsaktoren

In Dehnungsaktoren werden Kräfte und Stellwege durch die Verformung von Festkörpern auf Grund zugeführter Energie erzeugt. Beispiele von Dehnungsaktoren beruhen auf folgenden Effekten mit den jeweiligen Energiequellen:

- | | |
|--|----------------------------|
| • Reziproker piezoelektrischer Effekt | Elektrisches Feld |
| • Magnetostriktiver Effekt | Magnetisches Feld |
| • Thermomechanischer Effekt (Bimetall) | Wärme (Elektrischer Strom) |
| • Formgedächtnis-Effekt | Wärme (Elektrischer Strom) |

5.2.1 Piezoelektrische Antriebe

Piezoelektrische Antriebe zeigen nach Abbildung 2.9 richtungsabhängige Verformungen, die als Längs-, Quer- bzw. Schereffekt bezeichnet werden. Allgemein gilt für die Verformung in Richtung i :

$$S_i = \sum_{k=1}^6 s_{ik} T_k + \sum_{k=1}^3 d_{ik} E_k \quad \text{mit} \quad S = \Delta l / l \quad (5.122)$$

Längseffekt

Abbildung 5.38 zeigt die Anordnung eines piezoelektrischen Scheibenaktors, der sich auf Grund der vertikalen elektrischen Feldstärke E_3 um Δh ausdehnt.

Scheibenaktor $E_3 \parallel \Delta h$

$$S_3 = s_{33} T_3 + d_{33} E_3 \quad \text{mit} \quad E_3 = \frac{U}{h} \quad (5.123)$$

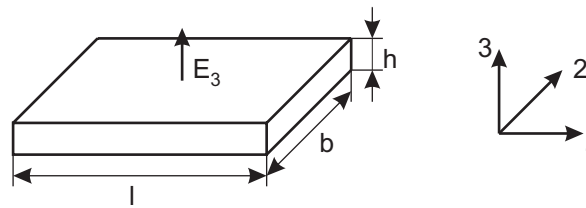


Abbildung 5.38: Anordnung eines piezoelektrischen Scheibenaktors

Leerlaufauslenkung:

$$\Delta h_E = h S_3 = h d_{33} E_3 \quad (5.124)$$

$$\Delta h_E = d_{33} U \quad (5.125)$$

Blockierkraft (maximale Stellkraft):

Berechnung der Blockierkraft mit Hilfe der Ausdehnung durch äußere Kraft F .

$$\Delta h_F = h s_{33}^E \frac{F}{A_F} \quad (5.126)$$

$$A_F = l b \quad (5.127)$$

Die maximale Stellkraft entsteht bei verhinderter Auslenkung:

$$\Delta h_{\text{ges}} = \Delta h_E - \Delta h_F = 0 \quad (5.128)$$

Diese wird als Blockierkraft bezeichnet:

$$F_{\text{max}} = \frac{d_{33} E_3}{s_{33}^E} A_F = \frac{d_{33}}{s_{33}^E} \frac{U}{h} A_F \quad (5.129)$$

Energie:

$$W = \frac{1}{2} \Delta h_E F_{\text{max}} = \frac{1}{2} h \frac{d_{33}^2 E_3^2}{s_{33}^E} A_F \quad (5.130)$$

$$W = \frac{1}{2} \frac{d_{33}^2}{s_{33}^E} E_3^2 V \quad (5.131)$$

Quereffekt

Gemäß Abbildung 5.38 erfolgt infolge der elektrischen Feldstärke eine Längenänderung senkrecht zur Feldstärke: $E_3 \perp \Delta l$

$$S_1 = s_{11} T_1 + d_{31} E_3 \quad \text{mit} \quad E_3 = \frac{U}{h} \quad (5.132)$$

Leerlaufauslenkung:

$$\begin{aligned} \Delta l_E &= l d_{31} E_3 \\ \Delta l_E &= d_{31} U \frac{l}{h} \end{aligned} \quad (5.133)$$

Blockierkraft:

Ausdehnung in Koordinatenrichtung 1 durch äußere Kraft:

$$\Delta l_F = l s_{11}^E \frac{F}{A_F} \quad (5.134)$$

$$A_F = b h \quad (5.135)$$

Maximale Stellkraft:

$$\begin{aligned} F_{\max} &= \frac{d_{31} E_3}{s_{11}^E} A_F \\ F_{\max} &= \frac{d_{31}}{s_{11}^E} U b \end{aligned} \quad (5.136)$$

Energie:

$$W = \frac{1}{2} \frac{d_{33}^2}{s_{11}^E} E_3^2 V \quad (5.137)$$

Für den Einsatz in Aktoren werden Materialien mit hohen piezoelektrischen Koeffizienten benötigt. Diese bestehen aus:

- ferroelektrischen Materialien mit Perowskit-Struktur
- insbesondere aus piezoelektrischer Keramik mit nichtlinearen Kennlinien im Großsignalbetrieb

Ferroelektrische Materialien zeigen eine Kennlinie der elektrischen Polarisation in Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke nach Abbildung 5.39, die wie bei ferromagnetischen Materialien eine Hysterese im Großsignalverhalten aufweist. Unabhängig vom Vorzeichen der Polarisation erfolgt eine Kontraktion ($s_1 < 0$) des Materials mit zunehmendem Betrag der Polarisation $|P|$, so dass sich in der Dehnungs-Feldstärke-Charakteristik in Abbildung 5.39 b eine „Schmetterlingskurve“ ergibt. Sofern hinreichend lineare Auslenkungen gewünscht sind, dürfen piezoelektrische Keramiken nur im Kleinsignalbereich von $E = 0$ bis zur Depolarisationsfeldstärke, z. B. $E_C = -500 \text{ V/mm}$ betrieben werden.

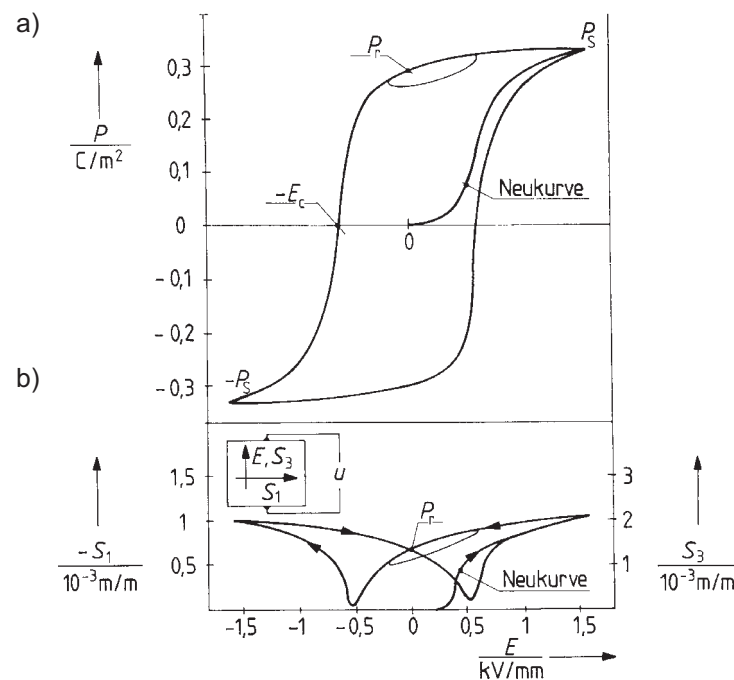


Abbildung 5.39: Großsignal-Kennlinien von ferroelektrischen Materialien

- a) Polarisations-Feldstärke-Charakteristik
- b) Dehnungs-Feldstärke-Charakteristik

Nach einer anfänglichen Polarisation der Piezo-Keramik besteht im feldfreien Zustand ($E = 0$) die Remanenzpolarisation P_r mit einer endlichen Verformung. Die in Abbildung 5.39 durch flache Ellipsen gekennzeichneten Kennlinienabschnitte bezeichnen den technisch verwendbaren Arbeitsbereich der Piezokeramik, der in Abbildung 5.40 vergrößert dargestellt ist. Im Großsignalbetrieb ist die Steigung der Dehnung etwa doppelt so hoch wie im Kleinsignalbetrieb.

Der Einsatz von Piezokeramik ist somit nur in einem begrenzten Feldstärkebereich sinnvoll:

$$-E_C < E < E_{BR} \quad (5.138)$$

Piezoelektrische Aktoren können nach Abbildung 5.41 in drei Grundkonfigurationen aufgebaut werden. Bei Scheibenaktoren zieht sich eine Scheibe aus Piezokeramik durch Anlegen

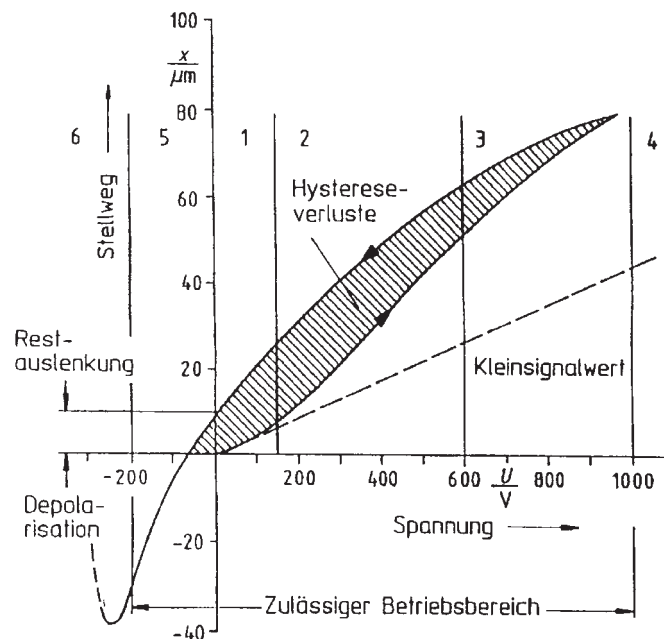


Abbildung 5.40: Stellweg-Feldstärke-Kennlinie einer Piezo-Keramik

einer Spannung zusammen und bewirkt im Verbund mit einer passiven Membran eine Durchbiegung. Bei einem Stapelaktor werden viele Scheibenaktoren zu einem Stapel zusammengefügt, der einen Stellweg auf Grund des Längseffekts ausführt. Bei Biegewandlern wird der Quereffekt ausgenutzt, indem eine piezoelektrisch kontrahierte Schicht mit einer neutralen Schicht verbunden ist.

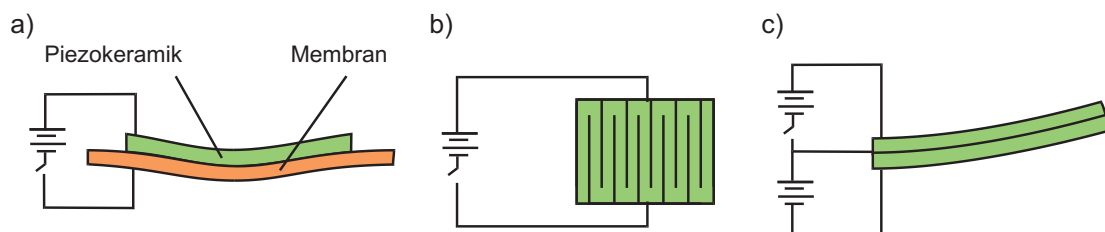


Abbildung 5.41: Grundkonfigurationen von piezoelektrischer Antrieben

- a) Scheibenaktor
- b) Stapelaktor
- c) Biegewandler

In Mikrosystemen werden grundsätzlich alle drei Typen von Piezo-Aktoren eingesetzt, jedoch wegen des flächenhaften Aufbaus bevorzugt:

- Scheibenaktor mit Membran
- Biegewandler

Ein Biegewandler besteht nach Abbildung 5.42a im einfachsten Fall aus einer passiven Schicht und der aktiven piezoelektrischen Schicht, die sich beim Anlegen einer Spannung auf Grund des Quereffekts zusammenzieht, so dass sich der Schichtverbund verbiegt und am Balkenende die Auslenkung x aufweist. Wird der Biegewandler durch eine äußere Kraft belastet, durchläuft der Bieger eine Kraft-Weg-Kennlinie nach Abbildung 5.42b, wobei sich mit steigender Steuerspannung die Kennlinien parallel verschieben.

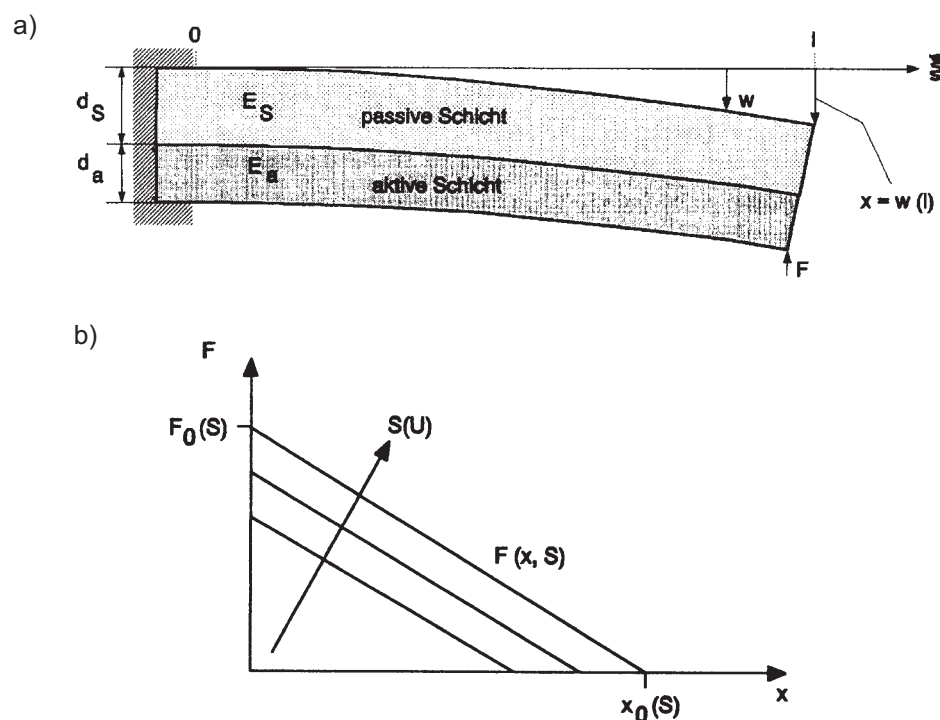


Abbildung 5.42: a) Querschnitt eines Biegewandlers
b) Kraft-Weg-Kennlinie mit Blockierkraft F_0 und Leerlaufauslenkung x_0

Die Berechnung der Biegelinie $w(\xi)$ erfolgt durch die Differentialgleichung:

$$w''(\xi) = \frac{1}{R(\xi)} = \frac{M(\xi)}{c_R(\xi)} \quad (5.139)$$

$w(\xi)$	Auslenkung bei ξ
$w(l)$	Auslenkung am Balkenende $\xi = l$
R	Krümmungsradius
M	Biegemoment
c_R	Biegesteifigkeit

Abkürzungen:

- Schichtdickenverhältnis $\delta = \frac{d_a}{d_s}$
- E-Modul-Verhältnis $\gamma = \frac{E_a}{E_s}$

Der Index a steht für die aktive Schicht, s für die passive Schicht.

Lineare Federkennlinie:

$$F(x, s) = F_0(s) - \frac{F_0(s)}{x_0(s)} x \quad (5.140)$$

Die Dehnung der aktiven Schicht beträgt im freigeschnittenen Zustand:

$$S = d_{31} \frac{U}{d_a} \quad (5.141)$$

Leerlaufauslenkung:

$$x_0(U) = 3 d_{31} U \left(\frac{l}{d_a} \right)^2 \frac{\phi_M}{\phi_C} = 3 S \frac{l^2}{d_a} \frac{\phi_M}{\phi_C} \quad (5.142)$$

Blockierkraft:

$$F_0(U) = \frac{3}{4} E_a d_{31} U b \left(\frac{d_a}{l} \right) \phi_M = \frac{3}{4} E_a S \left(\frac{b d_a^2}{l} \right) \phi_M \quad (5.143)$$

mit den Abkürzungen:

$$\phi_C = 1 + \frac{1}{\gamma \delta^3} + \frac{3}{1 + \gamma \delta} \left(1 + \frac{1}{\delta} \right)^2 \quad (5.144)$$

$$\phi_M = \left(1 + \frac{1}{\delta} \right) \frac{1}{1 + \gamma \delta} \quad (5.145)$$

b = Breite des Biegewandlers

Wenn die aktive Schicht eine Dicke $d_a = \text{const.}$ aufweist und die passive Trägerschichtdicke d_s und somit $\delta = d_a/d_s$ variiert, durchläuft die Leerlaufauslenkung x_0 ein Maximum (Abbildung 5.43).

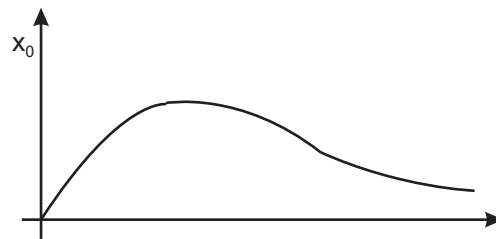


Abbildung 5.43: Abhängigkeit der Leerlaufauslenkung vom Schichtdickenverhältnis δ

Für gleichartige Schichtmaterialien gilt: $\delta = 1$, $\gamma = 1$

$$\begin{aligned}\phi_C &= 8 \\ \phi_M &= 1 \\ x_0(U) &= \frac{3}{8} d_{31} U \left(\frac{l}{d_a} \right)^2\end{aligned}\tag{5.146}$$

$$F_0(U) = \frac{3}{4} E_a d_{31} U b \left(\frac{d_a}{l} \right)\tag{5.147}$$

Piezoelektrische Biegewandler zeigen inzwischen vielseitige Anwendungen wie z. B. in Textilmaschinen, Blindenlesegeräten und Pneumatikventilen. Abbildung 5.44 zeigt einen typischen Aufbau eines Piezoventils.

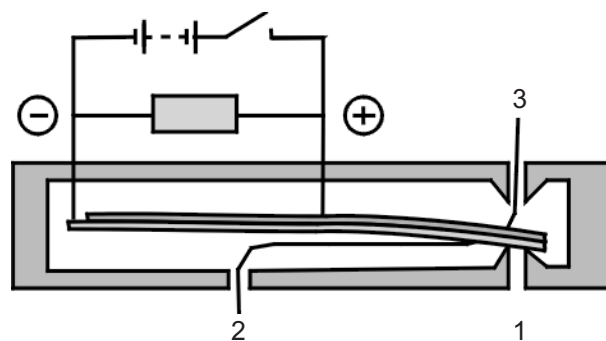


Abbildung 5.44: Pneumatikventil mit piezoelektrischem Biegewandler [Hörbiger]
1 Druckluftanschluss, 2 Arbeitskammer, 3 Entlüftungsanschluss

Nachteilig bei Biegewandlern mit einem Zweischichtaufbau nach Abbildung 5.42 a sind die hohen Steuerspannungen, die bei der Durchbruchfeldstärke von $E_{BR} = 2 \text{ kV/mm}$ je nach Schichtdicke d_a bis zu 500 V reichen können. In einer Vielschicht-Keramik (Multilayer-Piezokeramik) werden viele dünne Keramiksichten als aktiver Schichtverband mit einer niedrigen Steuerspannung betrieben. Die Einzelschichten zeigen Schichtdicken von $50 \mu\text{m}$ (in Produktion); Schichten mit $20 \mu\text{m}$ Dicke sind in der Entwicklung, die mit Nennspannungen von 24 V betrieben werden (Durchschlagsspannung 40 V).

5.2.2 Thermomechanische Aktoren

In thermomechanischen Aktoren werden Dehnungen von Formelementen durch thermische Energie erzeugt und dadurch erfolgt die Ausübung von Kräften bzw. Stellwegen. Die Erzeugung der thermischen Energie erfolgt durch elektrische Heizwiderstände. Tabelle 5.8 zeigt eine Übersicht.

Tabelle 5.8: Übersicht zu thermomechanischen Aktoren

Funktionsprinzip	Thermische Ausdehnung von Bimaterialien
Ausführungsform	meist Biegebalken Schichtverbund mit unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten Krümmung des Biegebalkens mit Radius R Kombination mit vorgespannten Formteilen → Schnappeffekt
Typische Betriebsarten	Pulsleistung mW...W Pulsdauer μ s...ms
Anwendungen	bistabile Schalter Ventile optische Spiegel, LWL-Schalter

Den Aufbau eines Zweischicht-Biegewandlers mit thermischem Bimaterialantrieb zeigt Abbildung 5.45. Die Berechnung der Auslenkung am Balkenende $x(l)$ erfolgt analog zur Berechnung des piezoelektrischen Biegewandlers und ergibt:

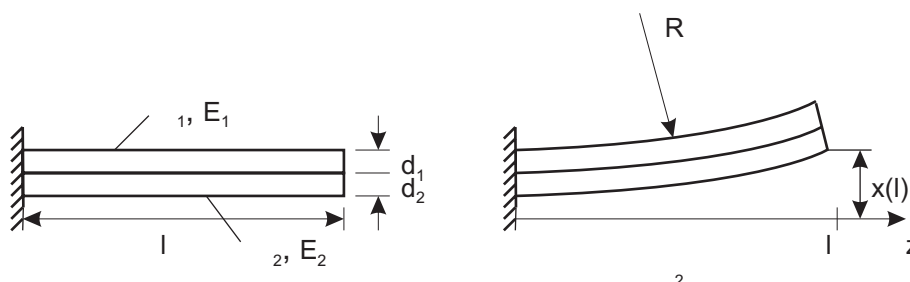


Abbildung 5.45: Thermischer Biegewandler

$$x(l) = \frac{l^2}{2R} \quad (5.148)$$

mit den Abkürzungen:

$$R = \frac{d_1 + d_2}{6} \frac{3(1 + \delta)^2 + (1 + \gamma\delta) \left(\delta^2 + \frac{1}{\gamma\delta} \right)}{\Delta\alpha \Delta T (1 + \delta)^2} \quad (5.149)$$

$$\delta = \frac{d_1}{d_2} \quad (5.150)$$

$$\gamma = \frac{E_1}{E_2} \quad (5.151)$$

$$\Delta \alpha = \alpha_2 - \alpha_1 \quad (5.152)$$

Für einen gleichartigen Schichtaufbau gelten folgende Vereinfachungen:

$$d_1 = d_2 = d \quad \rightarrow \delta = 1 \quad (5.153)$$

$$E_1 = E_2 \quad \rightarrow \gamma = 1 \quad (5.154)$$

$$\alpha_1 < \alpha_2 \quad (5.155)$$

$$x(l) = \frac{3l^2}{8d} \Delta \alpha \Delta T \quad (5.156)$$

Typische Werte von Materialpaarungen sind in Tabelle 2.18 (Kap. 2.2.3) zusammengestellt. Für Mikrosysteme gelten als wesentliche Anforderungen an die Materialpaarungen:

- großer Unterschied der Wärmeausdehnung
- Strukturierbarkeit in Mikrostrukturen
z.B. Al-Si oder Metall-Polymer

Verschiedene Mikrosysteme mit thermomechanischem Antrieb sind inzwischen vorgestellt worden. Ein grundsätzliches Problem stellt die Erzeugung einer andauernd ausgeübten Kraft dar, da die Heizleistung und damit das Steuersignal von der Wärmeableitung der eingebauten Komponente abhängt. Somit sind bistabile Schaltanordnungen mit stromlosem Haltezustand vorteilhaft.

Bistabiles Mikrorelais

Abbildung 5.46 a zeigt ein bistabiles Mikrorelais mit zwei thermischen Biegeantrieben auf der Schaltfeder, die mit Hilfe der Silizium-Oberflächen-Mikromechanik hergestellt wurde. Der geschlossene Zustand wird durch eine Schnappverbindung der Schaltkontakte erzielt (Abbildung 5.46 b). Die Thermoaktoren werden zeitlich versetzt nur beim Schaltvorgang betätigt (Abbildung 5.46 c).

Monostabiles Mikrorelais

Ein monostabiles Mikrorelais nach Abbildung 5.47 a besteht aus einem horizontal beweglichen Anker, der zwei Brückenkontakte schließt, sobald sich die Federn zur Aufhängung durch Wärmestrahlung ausdehnen und den Anker vorantreiben. Die Heizung der Federn erfolgt durch einen Heizfilm auf dem Substrat.

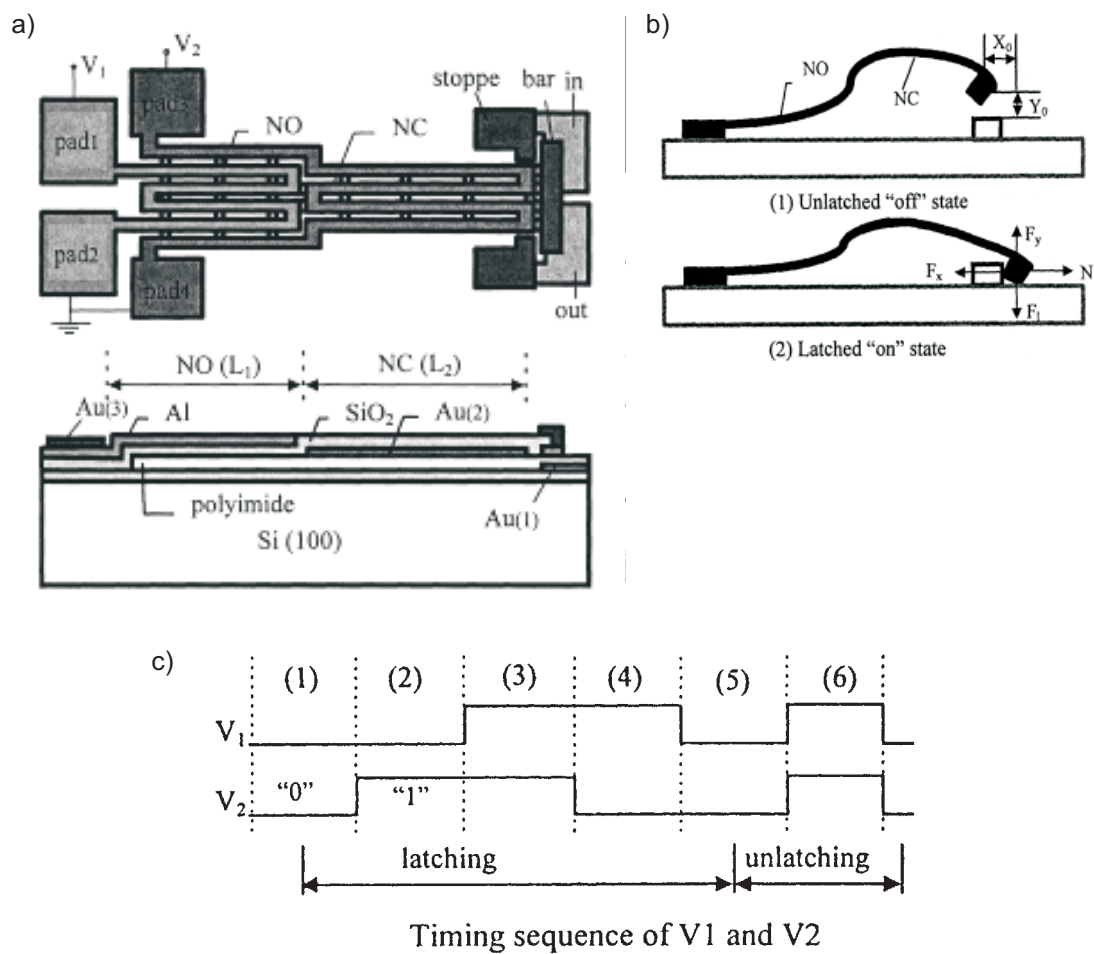


Abbildung 5.46: Bistabiles Mikrorelais mit thermischem Antrieb

a) und b) Ansicht; Biegefederlänge $860\ \mu\text{m}$, Schalhub $4\ \mu\text{m}$, Balkendicke $2\ \mu\text{m}$
c) Schaltvorgang; Schaltleistung $10\ \text{mW}$

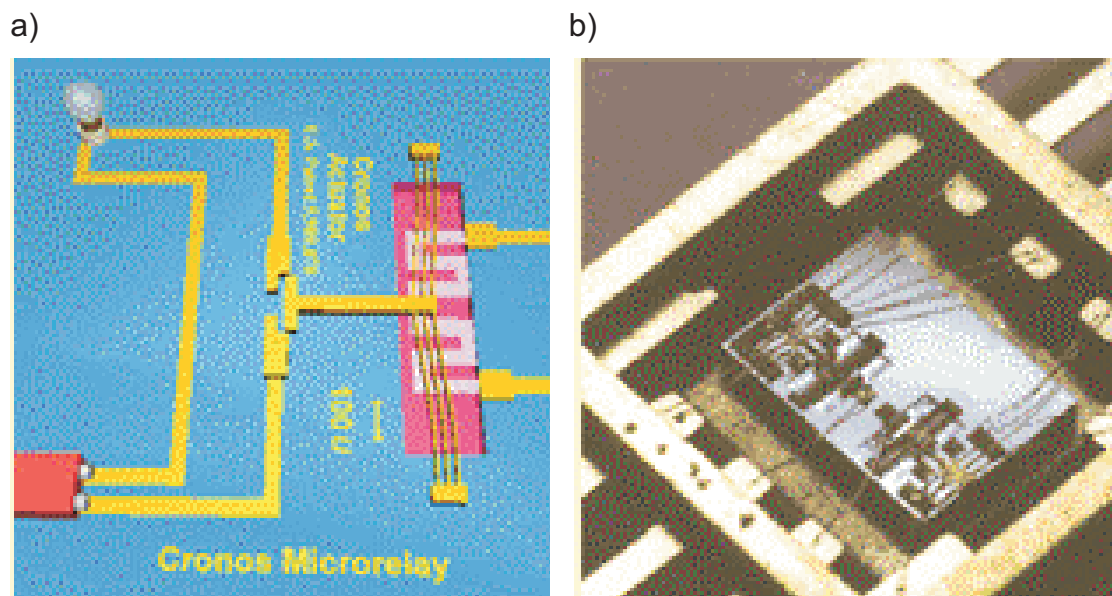


Abbildung 5.47: Monostabiles Mikrorelais mit thermischem Antrieb

[Cronos, JDS Uniphase, USA/NC]

a) Funktionsprinzip

b) Relais-Chip im Flatpack-Gehäuse

Das Schaltelement ist auf einem Silizium-Substrat in Opferschichttechnik hergestellt, wobei die Anker- und Federstrukturen aus galvanisch abgeschiedenem Nickel mit UV-LIGA-Maskierung bestehen. Ein Nachteil dieses Systems besteht im Heizstrom für den Haltezustand, so dass das Design durch den Kompromiss aus niedriger Steuerleistung und kurzer Schaltzeit erschwert wird.

Faseroptischer Schalter

Ein faseroptischer 1x2-Schalter ist nach Abbildung 5.48 in Silizium-Bulk-Mikromechanik realisiert worden. Der Schaltvorgang wird durch zwei thermische Aktoren, der erste für die horizontale Bewegung der Glasfaser und der zweite für die vertikale Fixierung der Faser, ausgeübt. Der Haltezustand erfolgt durch einen mechanischen Schnappmechanismus stromlos.

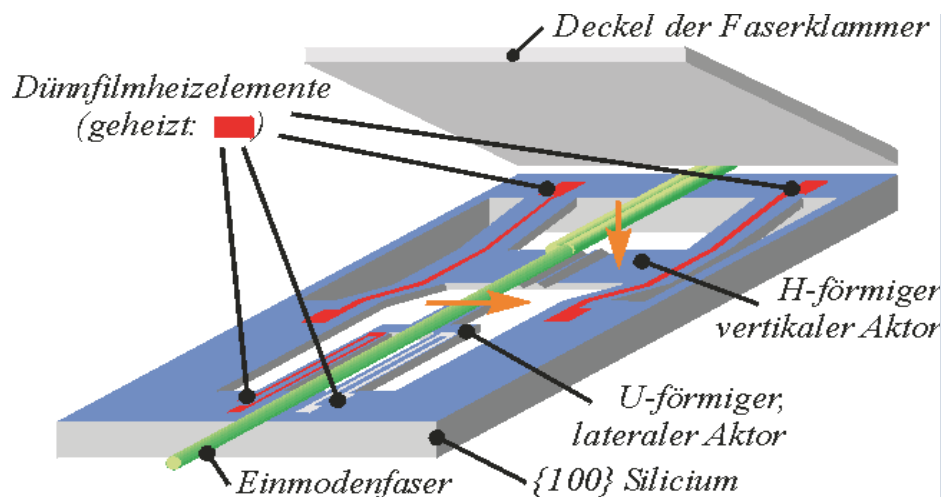


Abbildung 5.48: Mikromechanischer Faserschalter mit thermischem Bimorph
[Universität Dortmund]

Kapitel 6

Mikrofluidik

Die mikrotechnischen Fertigungsverfahren bieten vielfältige Möglichkeiten, miniaturisierte Kanalstrukturen, Membranen und Biegebalken mit höchster Präzision herzustellen. Somit sind in den letzten 10 Jahren eine Vielzahl von Komponenten für fluidische Systeme demonstriert worden, die sowohl für Flüssigkeiten als auch für Gase eingesetzt werden können. Der Begriff Mikrofluidik bezeichnet Komponenten und Systeme, die zur Übertragung von flüssigen und gasförmigen Medien („Fluid“) dienen und deren Abmessungen im Mikrometerbereich, d. h. deren Kammer- und Pumpvolumina im Bereich von einigen Mikrolitern ($1 \mu\text{l} = 1 \text{ mm}^3$) liegen, so dass eine hohe Dosiergenauigkeit möglich ist. Wesentliche Komponenten der Mikrofluidik sind Ventile und Pumpen. Komplexe Anordnungen aus mehreren verschiedenen Komponenten sind z. B. Dosiersysteme mit integriertem Durchflusssensor oder Analysesysteme mit Pumpen und chemischen Sensoren (*Lab-on-Chip*). Es wird unterschieden in:

- aktive Elemente mit treibender Funktion
- passive Elemente mit führender Funktion

Tabelle 6.1 zeigt eine Übersicht der Kenngrößen der Fluidodynamik in Analogie zur Elektrotechnik.

6.1 Mikroventile

Mikroventile werden in aktive Ventile mit Antrieb und passive Ventile ohne Antrieb unterteilt. In Tabelle 6.2 werden die aktiven Mikroventile nach ihren Antriebsprinzipien klassifiziert, wogegen die passiven Mikroventile hinsichtlich ihrer Aufbauform unterschieden werden.

Der Grundaufbau eines aktiven Mikroventils besteht nach Abbildung 6.1 wie bei konventionellen Ventilen aus einem feststehenden Ventilsitz und einer elastisch aufgehängten

Tabelle 6.1: Analogie von Fluiddynamik und Elektrotechnik [Gerlach]

Fluidmechanik			Elektrotechnik		
Durchflussmenge V	$[\text{m}^3]$		Elektrische Ladung Q	$[\text{As}]$	
Volumenstrom ϕ	$[\text{m}^3/\text{s}]$	$\phi = dV/dt$	Strom I	$[\text{A}]$	$I = dQ/dt$
Druckabfall Δp	$[\text{kg}/\text{ms}^2]$		Spannungsabfall U	$[\text{V}]$	
Reibungswiderstand α	$[\text{kg}/\text{m}^4\text{s}]$	$\Delta p = \alpha \phi$ laminar	Widerstand R	$[\text{V}/\text{A}]$	$U = R I$
Trägheit des Fluids β	$[\text{kg}/\text{m}^4]$	$\Delta p = \beta d\phi/dt$	Induktivität L	$[\text{Vs}/\text{A}]$	$U = L dI/dt$
Kompressibilität des Fluids bzw. Elastizität des Fluidelements γ $\gamma = dV/dp$	$[\text{m}^4\text{s}^2/\text{kg}]$	$\phi = \gamma dp/dt$	Kapazität C $C = dQ/dU$	$[\text{As}/\text{V}]$	$I = C dU/dt$

Ventilplatte. Die Ventilplatte kann durch Dünnschicht-Heizwiderstände auf Grund des thermomechanischen Effekts bewegt werden. Der Grundkörper und das Ventilplattenteil werden jeweils mit Hilfe der Silizium-Bulk-Mikromechanik hergestellt, wobei die kompletten Wafer zu einem Wafervereinigung gebondet werden und danach erst die einzelnen Ventile vereinzelt werden. Das Oberteil enthält eine durch anisotropes Ätzen hergestellte Membran mit einer zentralen Mittenverstärkung (Boss). Die Membran aus Silizium und die Heizfilm-Metallisierung aus Aluminium bilden einen bimetalischen Antrieb, der die Membran bewegen kann. Dadurch wird ein Spalt variabler Breite freigegeben, mit dem der Durchfluss gesteuert werden kann. Je nach Gestaltung der Schließlippen im Grundkörper bzw. der Dicke der Membranverstärkung kann das Ventil im Ruhezustand geschlossen (*normally-closed*) oder offen sein.

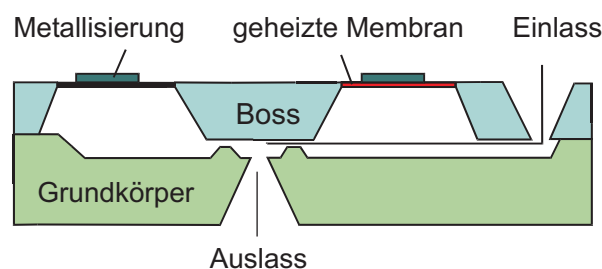
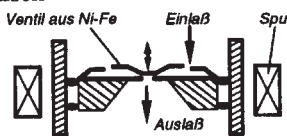
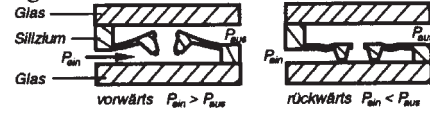
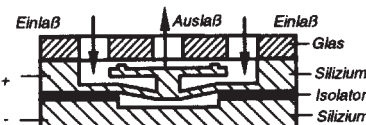
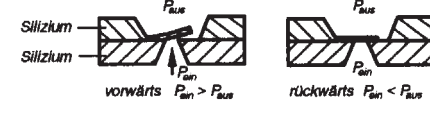
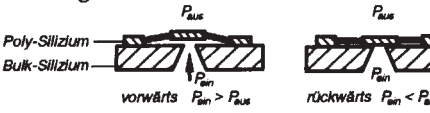
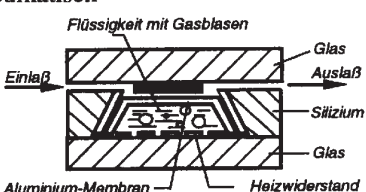
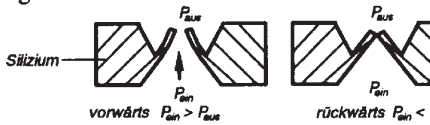
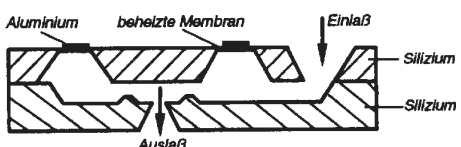
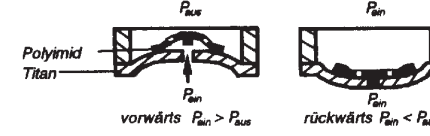
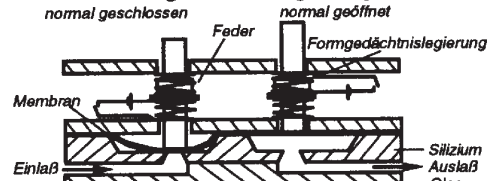
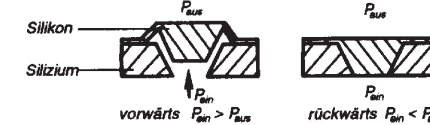


Abbildung 6.1: Thermomechanisches Mikroventil in Silizium-Mikromechanik

Maximaler Druckbereich 1...2 bar, maximaler Gasdurchfluss 100 ml/min bei einer Leistungsaufnahme von 300 mW [Jerman, IC Sensors]

Tabelle 6.2: Klassifikation von Mikroventilen [Gerlach]

aktive Ventile	passive Ventile
elektromagnetisch 	ringförmig 
elektrostatisch 	balkenförmig 
piezoelektrisch 	scheibenförmig 
thermopneumatisch 	V-förmig 
thermomechanisch 	membranförmig 
Antrieb durch Formgedächtnislegierung 	schwimmerförmig 

Derartige Ventilaufbauten werden auch mit piezoelektrischen, thermopneumatischen (Membran betrieben durch thermisch bedingten Luftdruck) oder elektrostatischen Antrieben realisiert. Eine Weiterentwicklung stellt ein 3-Wege-Ventil nach Abbildung 6.2 dar, das aus Silizium mit drei gebondeten Waferebenen hergestellt ist. Hier ist der Membranstempel vorgespannt, indem die Dichtlippe auf den Grundkörper um $10\ \mu\text{m}$ aus der Oberfläche vorsteht.

Einige charakteristische Daten betragen:

Chipabmessungen	$6 \cdot 6 \text{ mm}^2$
Membranabmessung	$4 \cdot 4 \text{ mm}^2$
Membrandicke	$20 \text{ }\mu\text{m}$
Maximaler Einlassdruck	6 bar
Maximaler Durchfluss bei $\Delta p = 6 \text{ bar}$	500 ml/min
Heizleistung	$< 1,5 \text{ W}$
Medien	trockene Gase (Pneumatik)

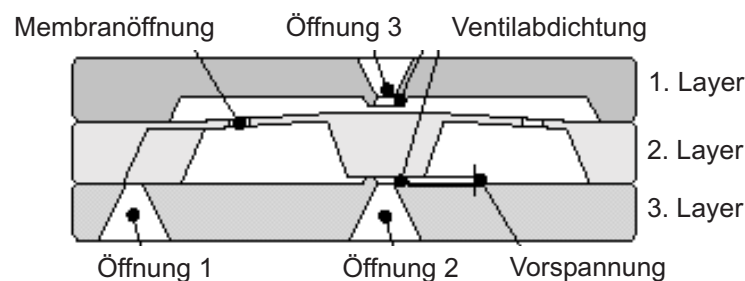


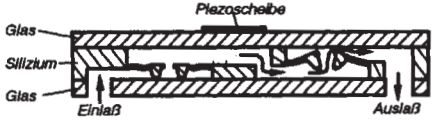
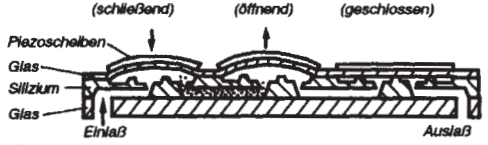
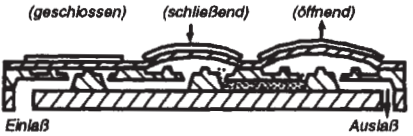
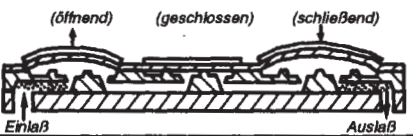
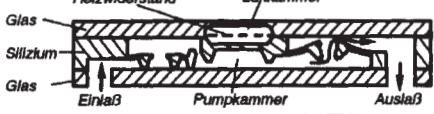
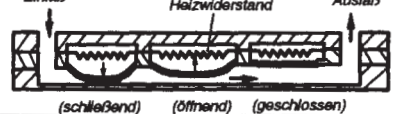
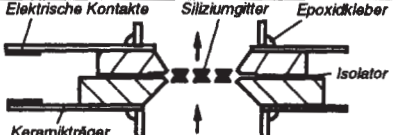
Abbildung 6.2: Schematischer Querschnitt eines thermomechanischen 3-Wege-Mikroventils [IMIT, Villingen-Schwenningen]

6.2 Mikropumpen

Mikropumpen lassen sich in mechanische (mit beweglichen Teilen) und nichtmechanische ohne bewegliche Teile unterscheiden (Tabelle 6.3). Mechanische Pumpen lassen sich in oszillierende und peristaltische Mikropumpen einteilen.

Der Grundaufbau einer oszillierenden Mikropumpe besteht aus zwei entgegengesetzt geschalteten passiven Ventilen, einer Pumpkammer und einem Antrieb (Abbildung 6.3). Die Ventilkappen bestehen aus anisotrop geätzten Silizium-Biegebalken mit einseitiger Einspannung. Die Oberseite der Pumpkammer besteht aus einer geschlossenen Silizium-Membran, die durch eine aufgeklebte Piezoaktorscheibe angetrieben wird. Die Piezokeramik-Scheibe und die Silizium-Membran bilden einen Scheibenaktor gemäß Abbildung 5.41, der allseitig eingespannt ist. Bei elektrischer Ansteuerung der Piezoscheibe biegt sich die Silizium-Membran nach unten und drückt einen Teil des Pumpkammervolumens aus dem Auslassventil heraus. Beim Entspannen des Piezoaktors entsteht in der Pumpkammer ein Unterdruck, so dass das Einlassventil öffnet und das Pumpmedium in die Kammer nachfließt. Dieses Mikropumpenmodell ist gleichermaßen für Flüssigkeiten und Gase geeignet und somit selbstansaugend.

Tabelle 6.3: Klassifikation von Mikropumpen [Gerlach]

mechanische Mikropumpen	
oszillierende Mikropumpen	peristaltische Mikropumpen
piezoelektrisch - mit Ventilen	piezoelektrisch (Pumpzyklus)
	- Einlaßphase 
- mit Diffusor/ Düse-Elementen	- Transportphase 
	- Auslaßphase 
elektrostatisch	
	
pneumatisch, thermopneumatisch	thermopneumatisch
	
nichtmechanische Mikropumpen	
elektrohydrodynamisch	Sonstige
	- elektroosmotisch - elektrochemisch - akustomechanisch

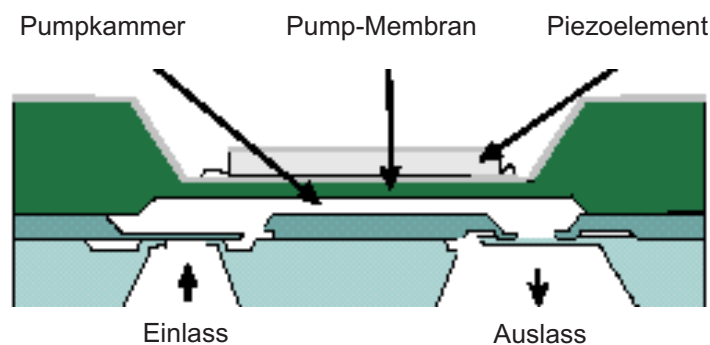


Abbildung 6.3: Mikropumpe aus Silizium mit Piezoscheibenaktor

Einige technische Daten der Mikropumpe:

Membranabmessungen	$5,7 \cdot 5,7 \text{ mm}^2$
Membrandicke	$40 \text{ }\mu\text{m}$
Piezoscheibenabmessung	$4 \cdot 4 \text{ mm}^2$
Piezoscheibendicke	$115 \text{ }\mu\text{m}$
Membranhub (Mitte) bei 120 V	$15 \text{ }\mu\text{m}$
Hubvolumen	85 nl
Pumprate bei $f = 130 \text{ Hz}$	1 ml/min

Nach dem gleichen Prinzip funktioniert eine Mikropumpe nach Abbildung 6.4, die durch Mikrospritzgießen aus Polycarbonat hergestellt ist und als Aktor ebenfalls eine Piezoscheibe enthält. Spritzgießformen sind durch LIGA-Technik bzw. Mikrofunkenerosion hergestellt worden. Dieser Aufbau und die Fertigungstechnik bilden einen ersten Ansatz für ein kostengünstiges Pumpsystem.

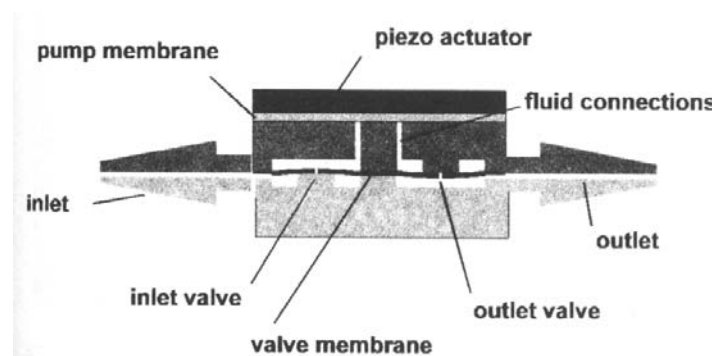


Abbildung 6.4: Querschnitt einer Mikropumpe aus Polycarbonat (Mikrospritzgießen) mit Piezoscheibenaktor [IMM, Mainz]

Einige technische Daten der Mikropumpe:

Äußere Abmessungen	$12 \cdot 12 \cdot 3,5 \text{ mm}^3$
Piezoscheibenabmessungen	$\varnothing 10 \text{ mm} \cdot 0,25 \text{ mm}$
Ventilmembrandicke	$2 \text{ }\mu\text{m}$
Maximale Druckdifferenz (bei Durchflußrate = 0)	2,1 bar
Maximale Pumprate bei 50 – 70 Hz	0,45 ml/min

6.3 Tintendrucktechnologie

Mechanische Nadeldrucker sind durch Laserdruck- und Tintendrucksysteme nahezu vollständig ersetzt worden. Beim Tintendruckverfahren werden feine Tintentropfen unter ho-

her Geschwindigkeit (bis zu 10 m/s) auf das zu bedruckende Papier gespritzt, wobei zwischen dem Druckkopf und dem Papier kein mechanischer Kontakt besteht (*non-impact-printing*). Zur Erzeugung der Tintentropfen bzw. des Tintenstrahls stehen zwei Verfahren zur Verfügung:

- Piezo-Jet
- Bubble-Jet (Blasenstrahl)

Die Tintendrucktechnik fand ihren Beginn 1977 mit der Piezoröhrchentechnik: dazu wurde die Tinte in einzeln gefertigten und montierten Röhrchen geführt und auf Grund eines mechanischen Druckstoßes in Form von Tropfen aus den Düsen ausgestoßen, wobei der Stoßimpuls durch aufgesteckte piezoelektrische Röhrchen erzeugt wird. Abbildung 6.5 zeigt die Evolution der Tintendruckköpfe an Hand eines Größenvergleichs. Die Piezo-Jet-Technik wird heutzutage in einer mikrotechnischen Anordnung nach Abbildung 6.6 in einem planaren Aufbau eingesetzt, indem eine Vielzahl von Tintenkanälen auf einem Substrat untergebracht sind. Bis heute bildet die Montage der Piezo-Scheibenaktoren einen beträchtlichen Fertigungsaufwand.

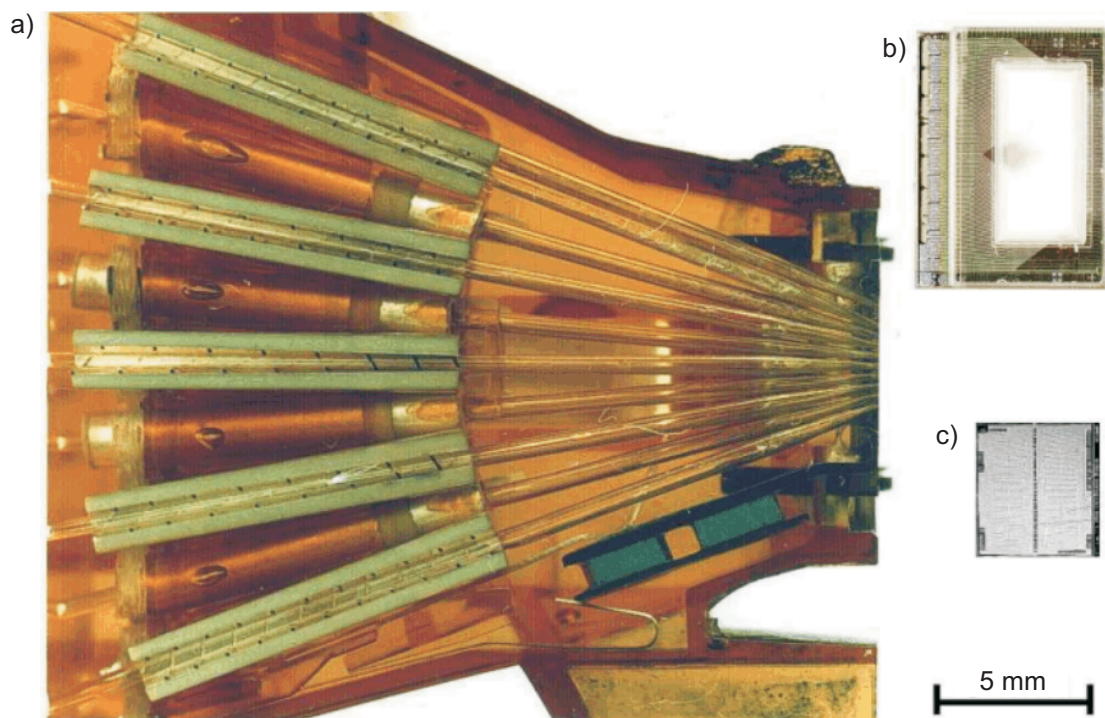


Abbildung 6.5: Meilensteine der Tintendrucktechnologie

- a) Piezo-Jet ab 1977
- b) Bubble-Jet ab 1985
- c) Mikrosystem ab 1993

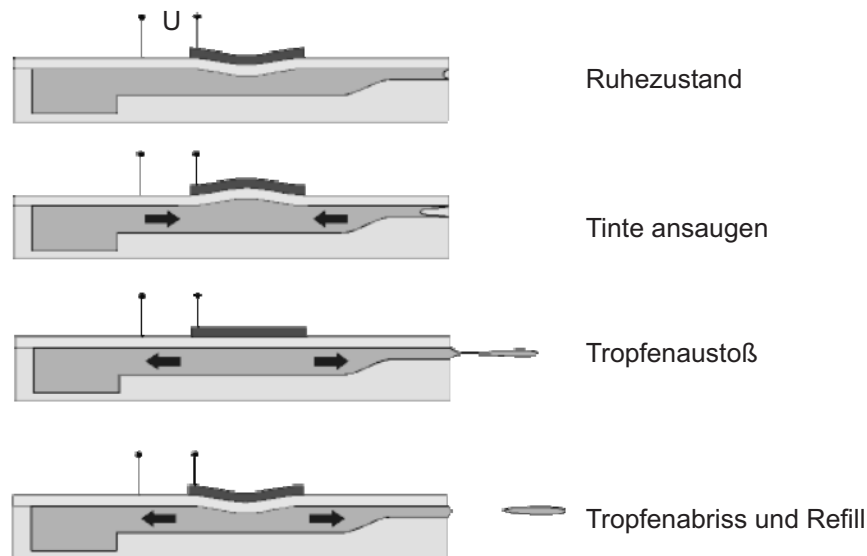


Abbildung 6.6: Piezo-Jet-Tintendruckkopf in planarer Aufbautechnik mit Piezoscheibenaktor [Wehl]

Seit etwa 1985 wurde zuerst von der Firma Canon das Bubble-Jet-Prinzip nach Abbildung 6.7 auf den Markt gebracht. Die Tinte wird von einem gemeinsamen Reservoir ausgehend in einzelnen Tintenkanälen zu den Düsen an der Stirnseite des Substrats geführt (Abbildung 6.8). Ein Heizwiderstand am Boden des Tintenkanals wird durch einen Stromimpuls erwärmt, so dass die darüberliegende Tinte in Form einer Blase verdampft. Die Dampfblase erzeugt einen Druckimpuls im Tintenkanal, so dass am freien Kanalende ein Tintentropfen aus der Düse ausgestoßen wird (Abbildung 6.7). Nach Abschalten des Heizimpulses implodiert die Dampfblase und der Druckkopf kehrt in den Ausgangszustand zurück.

Quantitative Abschätzung der Tropfenerzeugung:

Volumen eines Tintentropfens:

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 \quad (6.1)$$

Masse eines Tintentropfens:

$$m = \rho V \quad (6.2)$$

Kinetische Energie eines Tintentropfens:

$$W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m v^2 \quad (6.3)$$

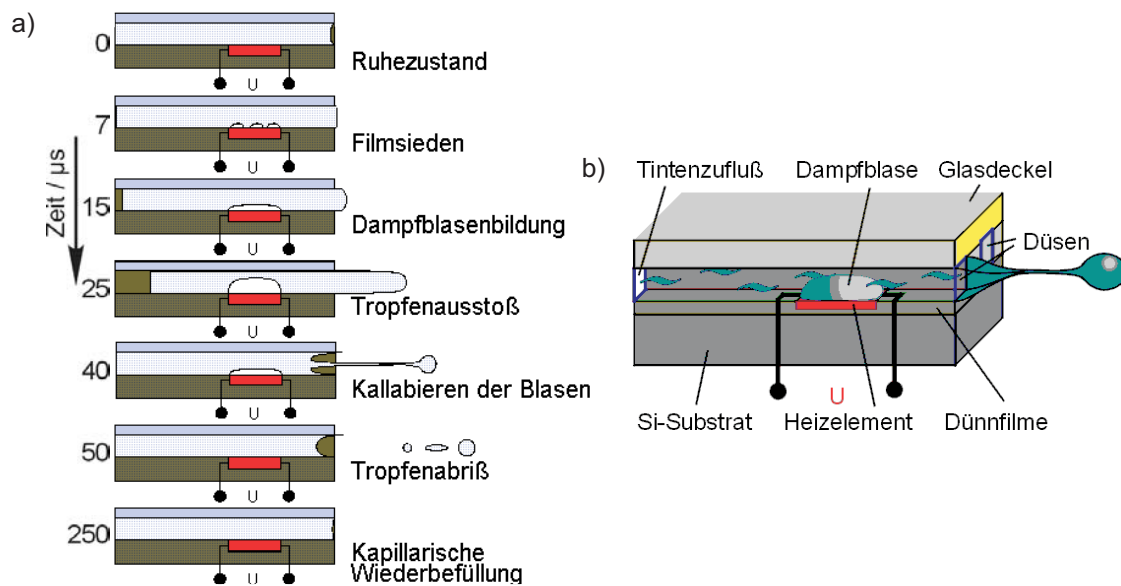


Abbildung 6.7: a) Tropfenerzeugung für einen Tintenstrahl durch Dampfblasen
b) Vergrößerte Ansicht des Tropfenaustritts

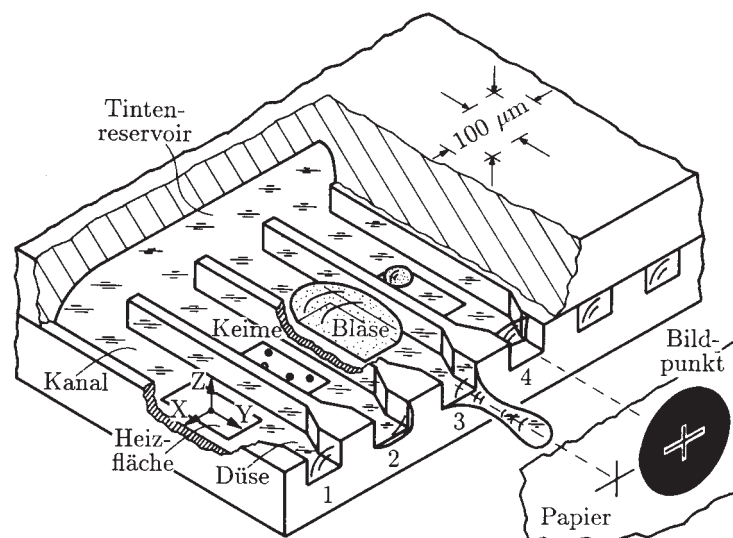


Abbildung 6.8: Aufbau eines Bubble-Jet-Tintendruckkopfs [Runge]

Die räumliche Auflösung von Tintendruckern wird durch die Bildpunktdichte (*dots per inch dpi*) definiert. Für heute übliche Tintendruker gilt:

Auflösung	600 dpi
Bildpunktabstand	$42,3 \mu\text{m}$
Tropfendurchmesser	$40 \mu\text{m}$
Tropfenvolumen	30 pl
Tropfenmasse	30 ng
Tropfengeschwindigkeit	10 m/s
Kinetische Energie eines Tropfens	1,6 nJ

Die elektrische Energie zur Erzeugung eines Tropfens beträgt:

$$W_{\text{el}} = U I \Delta t \quad (6.4)$$

mit

$$U = 25 \text{ V}$$

$$I = 200 \text{ mA}$$

$$\Delta t = 5 \mu\text{s}$$

$$W_{\text{el}} = 25 \mu\text{J}$$

Diese Abschätzung zeigt, dass nur ein verschwindend geringer Teil (ca. 10^{-4}) der Heizenergie in die kinetische Energie des Tropfens umgesetzt wird. Dies wird durch die hohe Wärmeleitfähigkeit der wässrigen Tinte und des Substrats verursacht. Um den Wärmefluss vom Heizelement in das Silizium-Substrat zu dämpfen, werden die Heizwiderstände auf einer dichten Isolationsschicht aus $2\text{...}3 \mu\text{m SiO}_2$ aufgebracht.

Tintendruckköpfe nach Abbildung 6.8 bestehen aus einem Dreischicht-Aufbau bestehend aus dem Substrat mit den Heizwiderständen und der Verdrahtung, einer Schicht zur Abgrenzung der Tintenkanäle und schließlich dem Deckel. Der Tintenaustritt erfolgt über die sorgfältig präparierte Stirnfläche (*Edge-Shooter*), wobei die Kantenpräparation eine Fehlerquelle in der Produktion darstellt.

Ein fertigungstechnisch günstigeres Konzept stellt das Backshooter-Prinzip nach Abbildung 6.9 dar, das hier mit einer monolithisch integrierten Ansteuerelektronik als komplettes Mikrosystem ausgestattet ist.

Im Gegensatz zu den konventionellen Systemen, bei denen der Tropfen an der Stirnseite eines Chipverbundes aus Grundplatte und Kanalplatte austritt, treten hier die Tropfen aus einer geätzten Düsenplatte heraus. Die Heizleiterbahnen befinden sich auf der Oberseite der Silizium-Membran und heizen die Tinte auf der Membranrückseite in der Tintenkanalmer auf (*Backshooter-Prinzip*). Die Tintenzufuhr erfolgt durch anisotrop geätzte Schlitze, die in ein $\langle 110 \rangle$ -Silizium-Substrat von der Rückseite aus mit senkrechten Seitenwänden

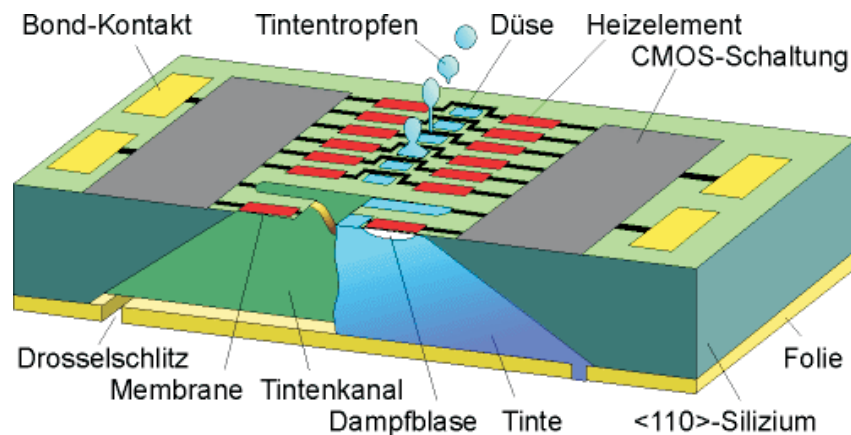


Abbildung 6.9: Schematischer Aufbau eines Tintendruckkopf-Mikrosystemchips nach dem Backshooter-Prinzip (teilweise mit Tinte gefüllt) [Wehl]

geätzt werden.

Tintendruckköpfe in Bubble-Jet- und Piezo-Jet-Technologie stellen heutzutage komplexe Mikrosysteme dar, die zu den Hauptträgern des Umsatzes von Mikrosystemen gehören.

6.4 Mikrofluidische Sonderanwendungen

Eine Vielzahl aktueller Entwicklungen von mikrofluidischen Systemen wie Dosiersystemen, Analysesystemen und Mikroreaktionssystemen sind seit etwa 1990 demonstriert worden.

Dabei fand das Bubble-Jet-Prinzip der Dampfblasenerzeugung eine interessante Anwendung als optischer Schalter nach Abbildung 6.10. Optische Wellenleiter sind auf einem Substrat als zwei sich kreuzende Arrays angeordnet. An den Kreuzungspunkten sind schmale Nuten mit senkrechten Wänden in das Substrat geätzt. Werden die Nuten mit einer Flüssigkeit gefüllt, die in ihrer Brechzahl an die Wellenleiter angepasst ist, können die optischen Wellenleitermoden die Kreuzungspunkte nahezu verlustfrei passieren.

Durch Heizelemente an den Kreuzungspunkten kann die Flüssigkeit in Form von Dampfblasen verdampft werden, so dass durch den Glas-Luft-Übergang an der Nut Totalreflexion eintritt und die Lichtwellen an den Nutwänden reflektiert werden. Dieses Grundprinzip ist in einer 32x32-Schaltmatrix nach Abbildung 6.11 eingesetzt worden.

Typische Kennwerte:

Durchschnittliche Einfügedämpfung	5 dB
Schaltzeit	< 10 ms
Nebensprechen	< -50 dB
Polarisationsunabhängig	

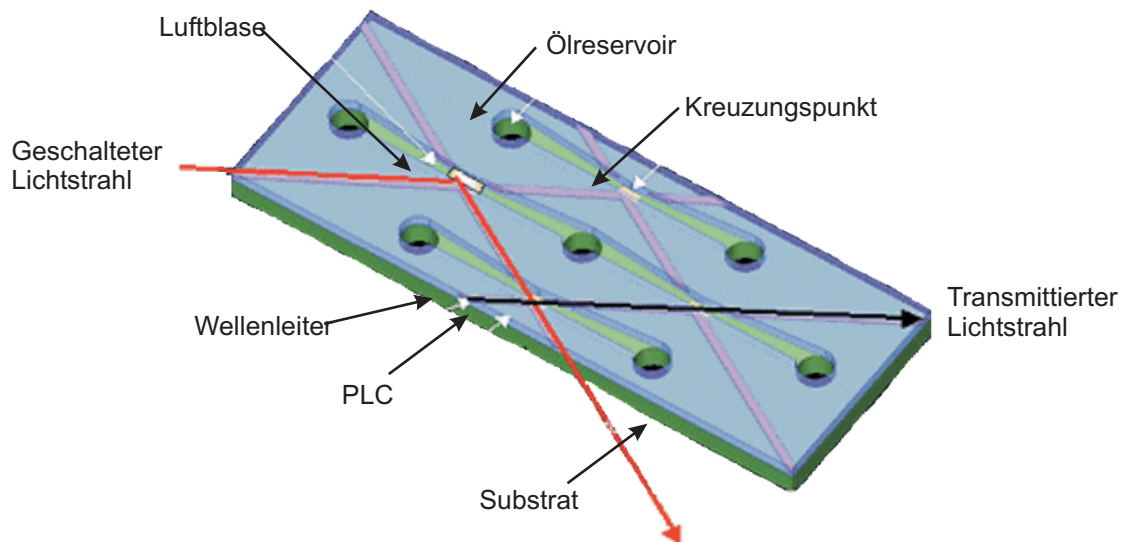


Abbildung 6.10: Thermokapillarer Schalter mit Dampfblase [Agilent Technologies]

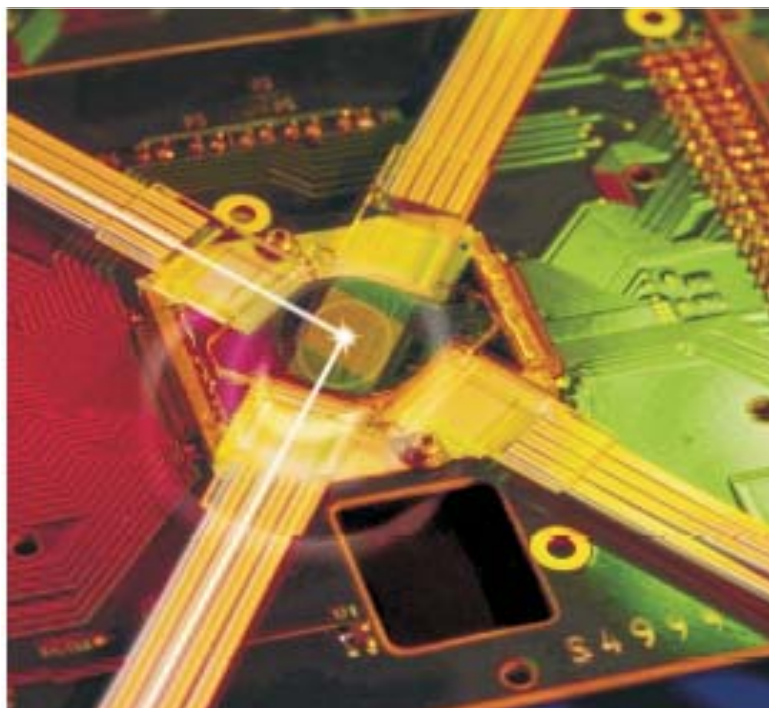


Abbildung 6.11: 32x32-Schaltmatrix mit thermokapillarem Schalter [Agilent Technologies]

Kapitel 7

Mikrosensoren

Messfühler und Sensoren zeigen eine hohe Vielfalt an Mess- und Wirkprinzipien sowie Bauformen. Durch den Einsatz der Mikrotechnik lassen sich eine Vielzahl von Sensortypen miniaturisieren oder zu robusten Messsystemen integrieren. Bedingt durch die kleinen Abmessungen der Strukturen und deren hohe Genauigkeiten lassen sich oftmals physikalische Effekte ausnutzen, die im makroskopischen Bereich zu geringe Empfindlichkeiten aufweisen würden. Die Vielfalt der zu erfassenden Messgrößen wird in der Regel durch die Ankopplung des zu messenden Prozesses an das Basis-Sensorelement auf eine kleine Anzahl von unmittelbar messbaren Messgrößen reduziert (Tabelle 7.1), so dass meistens eine indirekte Messung vorliegt.

Tabelle 7.1: Systematik und Übersicht von Mikrosensorelementen (Beispiele)

Messgröße	Wirkung / Signal	Effekt
Mechanische Verformung	Strom	Piezoresistiver Effekt
Mechanische Auslenkung	Elektrische Feldstärke	Kapazitätsänderung
Strömung / Temperaturdifferenz	Elektrischer Widerstand	Temperaturabhängiger Widerstand

7.1 Piezoresistive Sensoren

Analog zur elastischen Verformung (Kap. 2.2.1, Gleichung (2.7) und (2.8)) sind Stromdichte und elektrische Feldstärke in anisotropen Medien durch Tensoren verknüpft [Mescheder]:

$$E_j = \sum_{j=1}^3 \varrho_{ij} j_j \quad (7.1)$$

$$\sum_{s=j}^3 \frac{1}{\varrho_{is}} E_s = j_j + \sum_{j=1}^3 \left(\sum_{k,m=1}^3 \pi_{ij,km} T_{km} \right) j_j \quad (7.2)$$

$\pi_{ij,km}$ = piezoresistive Koeffizienten.

Bei kubischen Kristallen werden die Symmetrien ausgenutzt, so dass für die piezoresistiven Koeffizienten eine 6×6 -Matrix anstatt des Tensors verwendet wird:

$$\frac{1}{\varrho_0} \Delta \varrho_\lambda = \sum_{\mu=1}^6 \pi_{\lambda\mu} T_\mu \quad (7.3)$$

$$\frac{1}{\varrho_0} \begin{pmatrix} \Delta \varrho_1 \\ \Delta \varrho_2 \\ \Delta \varrho_3 \\ \Delta \varrho_4 \\ \Delta \varrho_5 \\ \Delta \varrho_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix} \quad (7.4)$$

Anordnungen zur Nutzung des piezoresistiven Effekts:

- Longitudinaleffekt: Strom $\parallel$ mechanische Normalspannung
- Transversaleffekt: Strom $\perp$ mechanische Normalspannung
- Schereffekt: Strom $\parallel$ oder $\perp$ zur mechanischen Scherspannung

Für kubische Kristalle wie Silizium können auf Grund der Kristallsymmetrien die piezoresistiven Koeffizienten π_L für den Longitudinaleffekt und π_T für den Transversaleffekt aus den Matrixelementen von (7.4) für die verschiedenen Kristalloberflächen und Stromrichtungen berechnet werden (Tabelle 7.2).

Umrechnung der piezoresistiven Koeffizienten in k-Faktoren (vgl. Kap. 2.2.1):

$$\frac{\Delta R}{R} = k S \quad S_i = \sum_j s_{ij} T_j \quad (7.5)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_L T_L + \pi_T T_T \quad T_i = \sum_j c_{ij} S_j \quad (7.6)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_L E_L S_S + \pi_T E_T S_T \quad (7.7)$$

Mit $k_L = \pi_L E_L$ und $k_T = \pi_T E_T$ ergibt sich

$$\frac{\Delta R}{R} = k_L S_S + k_T S_T \quad (7.8)$$

Tabelle 7.2: Longitudinale und transversale piezoresistive Koeffizienten bzw. k-Faktoren für ausgewählte Anordnungen [Mescheder]

Ober- fläche	Strom- richtung	π_L	Quer- richtung	π_T
(100)	[110]	$(1/2)(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})$	[110]	$(1/2)(\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44})$
(110)	[001]	π_{11}	[110]	π_{12}
(110)	[111]	$(1/3)(\pi_{11} + 2\pi_{12} + 2\pi_{44})$	[112]	$(1/3)(\pi_{11} + 2\pi_{12} - \pi_{44})$
(111)	[110]	$(1/2)(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})$	[112]	$(1/6)(\pi_{11} + 5\pi_{12} - \pi_{44})$

7.2 Drucksensoren

Das Messprinzip basiert auf der Verformung einer Membran durch Druck und der Detektion der Auslenkung durch:

- piezoresistiver Effekt
- kapazitiv: Abstand der beweglichen Membran zur festen Gegenelektrode

7.2.1 Piezoelektrischer Drucksensor

Die Anordnung von piezoelektrischen Messwiderständen auf einer Drucksensormembran gestattet den Betrieb in einer Wheatstone-Brücke. Hierbei erfolgt eine Ausnutzung der piezoresistiven Koeffizienten für radiale und tangentialer Richtung:

- longitudinaler Effekt Strom in radialer Richtung $\rightarrow + \Delta R$
- transversaler Effekt Strom in tangentialer Richtung $\rightarrow - \Delta R$

Integrierter Drucksensor

Die monolithische Integration der Signalverarbeitung mit einem Drucksensor in Oberflächen-Mikromechnik kann in einem modifizierten BiCMOS-Prozess [Siemens / Infineon Technologies] realisiert werden. Hierbei erfolgt eine Hohlraumätzung durch eine Opfer-schicht, für die hier das Feldoxid des BiCMOS-Prozesses verwendet wird.

7.3 Beschleunigungssensor

Messprinzip:

- bewegte seismische Masse m liefert Kraft auf Aufhängung $F_a = m a$
- Kraft bewirkt Auslenkung der Masse aus der Ruhelage
- Detektion der Auslenkung durch zwei Effekte messbar:
 - piezoresistiv
 - kapazitiv (Änderung Elektrodenabstand $\rightarrow$ Kapazitätsänderung)

Beschleunigungssensor in Bulk-Silizium-Mikromechanik

Berechnung eines typischen mikromechanischen Beschleunigungssensors:

Seismische Masse:

- Abmessung: $a = 2 \text{ mm}$ $b = 2 \text{ mm}$
- Silizium-Dicke: $d = 500 \text{ }\mu\text{m}$
- $m = \varrho_{\text{Si}} V$ $V = a b d$
- $m = 4,6 \text{ mg}$

Messbereiche:

$$\begin{aligned} a &= 1 \dots 50 \text{ g} \\ g &\approx 10 \text{ m/s}^2 \\ F &= m a \\ F_{\min} &= 4,6 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 = 46 \text{ }\mu\text{N} \\ F_{\max} &= 2,3 \text{ mN} \end{aligned}$$

7.4 Drehratensensor

Die Messung einer Drehrate kann durch Ausnutzen der Corioliskraft erfolgen (Abbildung 7.1). Die Corioliskraft wirkt senkrecht zur Bewegungsrichtung $\vec{v}$ einer Masse m , die sich um $\vec{\Omega}$ dreht:

$$\vec{F}_C = 2 m \vec{v} \times \vec{\Omega} \quad (7.9)$$

Der Sensor muss zwei Funktionen enthalten:

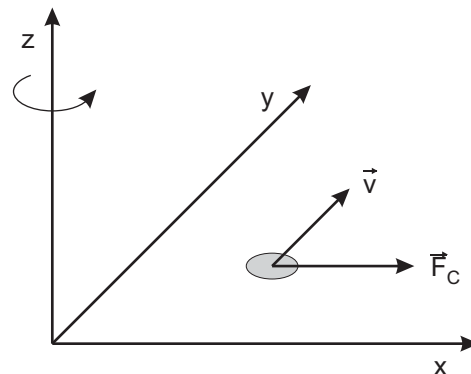


Abbildung 7.1: Drehratenmessung nach dem Coriolisprinzip

- Aktor zur Erzeugung einer linearen Primärbewegung, zweckmäßigerweise periodisch $\vec{v} = \vec{v}_0 \sin \omega t$
- Sensor zur Detektion der Sekundärschwingung

Somit besteht ein Drehratensensor aus einem gekoppelten Sensor-Aktor-System, das mikrotechnisch integriert hergestellt wird.

Anwendungen von Drehratensensoren:

- Navigationssysteme in Kfz (Unterstützung für GPS)
- Aktive Fahrwerksaufhängung in Kfz (ESP)
- Bildstabilisatoren in Video- und Fototechnik

Beispiel zur Dimensionierung eines Drehratensensors:

Auslenkung der Primärbewegung:

$$s = s_0 \sin \omega t$$

$$s_0 = 10 \mu\text{m}$$

$$f = 1 \text{ kHz}$$

$$v = \frac{ds}{dt} = \omega s_0 \cos \omega t$$

$$v_0 = 2 \pi f s_0$$

$$v_0 = 0,06 \text{ m/s}$$

Abmessungen der bewegten Masse m :

$$a = 2 \text{ mm}$$

$$b = 1 \text{ mm}$$
$$d = 2 \mu\text{m} \text{ (Dicke Poly-Si-Schicht)}$$

Masse:

$$m = \varrho V \quad \text{mit} \quad \varrho = 2,3 \text{ g/cm}^3$$
$$m = 9,2 \mu\text{g}$$

Drehrate:

$$\omega = 2\pi \frac{1}{s} \quad (1 \text{ Umdrehung/sec})$$

Corioliskraft:

$$F_C = 2 m v_0 \omega$$
$$F_C = 7 \text{ nN}$$

Federsteifigkeit der Aufhängung:

$$c = 0,1 \text{ N/m}$$

Auslenkung der Feder:

$$\Delta x = \frac{F}{c} = 70 \text{ nm}$$

Elektrodenabstand:

$$x_0 = 2 \mu\text{m}$$

Änderung der Messkapazität:

$$\frac{\Delta C}{C_0} = 3,5 \%$$

Design mit Rotationsantrieb

Ein kapazitiver Transversalaktor erzeugt nach Abbildung 7.2 eine Drehbewegung Ω_1 , die durch die zu messende Drehrate Ω zu einer Pendelbewegung ω_{Det} des Detektionssystems führt.

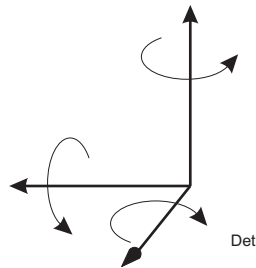


Abbildung 7.2: Prinzip eines Drehratensensors mit eingprägter Drehbewegung Ω_1 , zu messender Drehrate Ω und Pendelbewegung ω_{Det}

7.5 Luftmassensensor

Gasfluss-Messung durch Heißfilm-Sensor nach dem Anemometer-Prinzip:

- Temperaturgradient vom Heizleiter zur Umwelt
- Luftströmung kühlt bei Anströmung

Kapitel 8

Grundlagen des Entwurfsprozesses

Der Gestaltungsprozess für Mikrosysteme ist sehr komplex:

- Entwurf, Berechnung / Dimensionierung / Simulation
- Technologieablaufplan
- Photomaskendesign

greifen eng ineinander.

Unterschiede im Entwurfsprozess zwischen Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik:

- Mikroelektronik:
 - Wenige grundlegende Bauteiltypen
 - Zusammenschaltung weniger verschiedener Grundbausteine
 - Schaltungsaufbau im wesentlichen 2D
 - Fertigungstechnische Informationen *nicht* im Entwurfsprozess behandelt
 - Hohe Standardisierung
- Mikrosystemtechnik
 - Verflochtener Prozess zur Erstellung 3D-geometrischer Informationen
 - Planung des Fertigungsprozesses ist Teil des Entwurfs
 - Jede Strukturierungsebene mit Wirkung in 3. Dimension:
z.B. richtungsabhängige Ätzung, Ätzböschung, Unterätzung, Schichthöhen, Schichtstufen
 - Grundsätzlich hochgradig verkoppelte Systeme

Literaturverzeichnis

Übersicht zur Mikrosystemtechnik

- [1] W. Ehrfeld: *Handbuch Mikrotechnik*; Carl Hanser Verlag; München; 2002.
- [2] G. Gerlach und W. Dötzel: *Grundlagen der Mikrosystemtechnik*; Carl Hanser Verlag; München; 1997.
- [3] S. E. Lyshevski: *Nano- and Microelectromechanical Systems*; Fundamentals of Nano- and Microengineering; CRC Press LCC; 2001.
- [4] M. Madou: *Fundamentals of Microfabrication*; The Science of Miniaturization; CRC Press; Second Edition; 2002.
- [5] W. Menz und J. Mohr: *Mikrosystemtechnik für Ingenieure*; VCH Verlag; Weinheim; zweite Aufl.; 1997.
- [6] U. Mescheder: *Mikrosystemtechnik*; Konzepte und Anwendungen; Teubner Verlag; Stuttgart; 2000.
- [7] S. D. Senturia: *Microsystem Design*; Kluwer Academic Publishers; Boston, Bordrecht, London; 2001.
- [8] F. Völklein und T. Zetterer: *Einführung in die Mikrosystemtechnik*; Vieweg Verlag; Braunschweig / Wiesbaden; 2000.

Weiterführende Literatur

- [9] W. Bergmann: *Werkstofftechnik*; Teil 1: Grundlagen; Carl Hanser Verlag; München; 2000.
- [10] A. Heuberger: *Mikromechanik*; Springer-Verlag; Berlin / Heidelberg; 1989.
- [11] L. Hornbeck: *Digital Light Processing for Hight-Brightness, High-Resolution Applications*; Electronic Imaging EI '97; 10-12 Feb. 1997; San Jose, California, USA (www.dlp.com).

- [12] D. Jendritza: *Design, Großsignalbetrieb und Anwendung von Piezoaktoren*; Kap. 7 in: Jendritza, D. (Hrsg.): *Technischer Einsatz Neuer Aktoren*; Expert-Verlag; Kontakt & Studium; Renningen; Band 484; 2. verb. Auflage; 1998.
- [13] H. Jerman: *Electrically-activated, Normally-closed Diaphragm Valves*; Proc. Transducers '91; S. 1045-1048; San Francisco, USA; 1991.
- [14] K.-P. Kämper, J. Döpfer, W. Ehrfeld, S. Oberbeck: *A Self-Filling Low-Cost Membrane Micropump*; 11. Annual International Workshop on MEMS; 25.-29. Jan.1998; Heidelberg; 1998; S. 432-437.
- [15] R. Sautter: *Fertigungsverfahren*; Vogel-Verlag; 1. Auflage; 1997.
- [16] J. Schimkat: *Grundlagen und Modelle zur Entwicklung und Optimierung von Silizium-Mikrorelais*; Dissertation TU Berlin; D 83; 1996.
- [17] H. F. Schlaak: *Mikrorelais in Mikrotechnologie - Grenzen und Potentiale*; 15. VDE-Fachtagung Kontaktverhalten und Schalten; 22-24 Sep. 1999; Karlsruhe; VDE-Verlag.
- [18] H. F. Schlaak, F. Arndt, M. Hanke: *Silicon-microrelay with electrostatic moving wedge actuator - new functions and miniturisation by micromechanics*; Proc. Micro System Technologies '96; Potsdam; 1996; VDE-Verlag.
- [19] B. Schmidt: *Mikromechanische Aktoren*; Kap. 17 in: Jendritza, D. (Hrsg.): *Technischer Einsatz Neuer Aktoren*; Expert-Verlag; Kontakt & Studium; Renningen; Band 484, 2. verb. Auflage; 1998.
- [20] H. A. C. Tilmans, et. al.: *A Fully-Packaged Electromagnetic Microrelay*; 12th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems; MEMS; Jan. 17-21; 1999; Proc. IEEE.
- [21] W. Wehl: *Tintendrucktechnologie: Paradigma und Motor der Mikrosystemtechnik*; F&M Feinwerktechnik Mikrotechnik Mikroelektronik 103 (1995); S. 318-324; S. 486-491.