

M. Sc. Hua Ren, Mainz

**Entwurf von Mikrozu-  
ngens-  
Aktoren und Realisierung  
eines bistabilen  
magnetischen  
Mikrozu-  
ngens-Aktors**

Reihe **21**: Elektrotechnik

Nr. **233**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>IX</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>XVIII</b>
<b>1 Problematik der Herstellung stromführender Mikrozunge</b>	<b>1</b>
1.1 Einleitung: Mikrosystemtechnik heute	1
1.2 Stromführende Mikrozunge und Mikrokontaktierung in der Mikrosystemtechnik	2
1.2.1 Kontaktproblematik	4
1.2.2 Leitungsproblematik bei der statischen Kontaktierung	7
1.2.3 Anforderungen an die Mikrozunge zur elektrischen Kontaktierung	9
1.3 Mikrokontaktierungssystem für Chip-Test als Anwendungsbeispiel	9
1.3.1 Problematik und Tendenz	9
1.3.2 Mikrozungen-Spinne mit TAB-Technik	11
<b>2 Entwurf von Mikrozungen-Aktoren zur elektrischen Mikrokontaktierung</b>	<b>14</b>
2.1 Grundstruktur und Antriebsverfahren	14
2.1.1 Grundstruktur	14
2.1.2 Antriebsverfahren	15
2.2 Passive Mikrokontaktzungen	16
2.3 Piezoelektrische Mikrozungen-Aktoren	20
2.3.1 Piezo-Effekt und Anwendungsdaten	20
2.3.2 Piezoelektrischer Mikrozungen-Aktor mit einer Bimorph-Struktur	22
2.3.3 Wegübersetzung für piezoelektrische Mikrozungen-Aktoren	24
2.4 Thermomechanischer Mikrozungen-Aktor	25
2.4.1 Thermomechanisches Antriebsverfahren in der Mikrosystemtechnik	25

2.4.2	Thermomechanischer Mikrozuengen-Aktor mit planarem Heizwiderstand	25
2.5	Elektrostatischer Mikrozuengen-Aktor	27
2.5.1	Elektrostatische Kräfte und Anwendung in der Mikrosystemtechnik	27
2.5.2	Elektrostatischer Mikrozuengen-Aktor	27
<b>3</b>	<b>Berechnung und Analyse der Übertragungscharakteristik von Mikrozuengen-Aktoren</b>	<b>29</b>
3.1	Motivation und Konzept	29
3.2	Herleitung der Elastizitätsgleichungen	31
3.2.1	Durchbiegung einer Mikrozunge beim Angriff einer Kraft am Zungenende .	31
3.2.2	Durchbiegung der Zunge infolge der piezoelektrischen und thermomechanischen Antriebe	35
3.2.3	Durchbiegung der Zunge des elektrostatischen Mikrozuengen-Aktors infolge Steuerspannung	41
3.3	Berechnete Ergebnisse und Diskussion	44
3.3.1	Federsteife und Übertragungscharakteristik	45
3.3.2	Abhängigkeit der Übertragungscharakteristik von der Zungenhöhe	50
3.4	Bewertung	52
3.4.1	Passive Mikrokontaktzunge	53
3.4.2	Piezoelektrischer Mikrozuengen-Aktor	53
3.4.3	Thermomechanischer Mikrozuengen-Aktor	56
3.4.4	Elektrostatischer Mikrozuengen-Aktor	57
<b>4</b>	<b>Konstruktion eines bistabilen magnetischen Mikrozuengen-Aktors</b>	<b>58</b>
4.1	Konzept und Funktionsprinzip	59
4.2	Analyse des magnetischen Kreises	60
4.2.1	Flußverhältnisse	60
4.2.2	Kräftewirkung an der Zunge	62
4.2.3	Deformation und dynamisches Verhalten der Zunge	65

4.3	Strukturierung und Dimensionierung	67
4.3.1	Prinzip und Präzisierung	67
4.3.2	Luftspaltfläche	69
4.3.3	Breite und Länge der flußführenden Zunge	70
4.3.4	Länge der Luftspalte	70
4.3.5	Dimensionierung des magnetischen Leiters und des Dauermagneten	72
4.3.6	Kontrolle der Induktion und der resultierenden Kraft	75
4.4	Diskussion	75
4.4.1	Breite $W_b$ der flußführenden Zunge	76
4.4.2	Länge $\delta_0$ der Luftspalte	77
4.4.3	Querschnittsfläche $A_{sp}$ der Luftspalte	78
4.4.4	Permeabilitätszahl $\mu_r$	79
4.4.5	Abmessung des Magneten	80
4.4.6	Optimierung der Form der flußführenden Zunge	81
<b>5</b>	<b>Herstellung des magnetischen Mikrozuengen-Aktors</b>	<b>84</b>
5.1	Konzept	84
5.2	Materialien und Grundelemente des Aktors	85
5.2.1	Galvanisch abgeschiedene weichmagnetische Ni-Fe-Legierung	86
5.2.2	Substrat	88
5.2.3	Opferschicht	89
5.2.4	Auswahl des Dauermagneten	90
5.3	Herstellungsprozeß	91
5.3.1	Strukturierung von Opferschicht und Ni-Fe-Legierungsschicht	91
5.3.2	Öffnen der Fenster für die Erregerspule und Strippen des Resists	94
5.3.3	Ätzen der Opferschicht, Wicklung der Erregerspule und Einsatz des Dauermagneten	94
5.4	Besondere Prozeßschritte	95
5.4.1	Beschichtung des UV-positiven Photoresists	96
5.4.2	Lithographie des dicken UV-positiven Photoresists	98
5.4.3	Galvanische Chrom-Abscheidung	103
5.4.4	Galvanische Abscheidung der Ni-Fe-Legierung	106

---

5.5	Herstellungsergebnis des Muster-Aktors	115
<b>6</b>	<b>Verifizierung der Funktionsfähigkeit des Musters</b>	<b>117</b>
6.1	Verhalten des Mikroaktors bei Anregung	117
6.2	Maximale belastbare Kontaktkraft $F_k$ und resultierende Kraft $F_r$	117
6.3	Messung der physikalischen Eigenschaften der Ni-Fe-Legierung	119
6.3.1	Zusammensetzung	119
6.3.2	E-Modul und Zugfestigkeit	120
6.3.3	Hystereseschleife, Permeabilitätszahl und Sättigungsinduktion	123
<b>7</b>	<b>Ausblick</b>	<b>127</b>
	<b>Literatur</b>	<b>132</b>