

Schlussbericht

BMBF-Verbundprojekt
Förderkennzeichen: 16SV839 /7
April 1998 bis Oktober 2001

MikroRel

Integrierte Mikrorelais für Anwendungen im Automobil

Teilvorhaben

Entwurf und Realisierung eines Mikro-Hochstrom-Relais

Bearbeiter

Dipl.-Ing. Mike Becker

Institut für Mikrosensoren, -aktuatoren und -systeme
Universität Bremen

Kufsteiner Strasse 28359 Bremen
Postfach 330440 28334 Bremen

Tel.: 0421 218 4725
FAX 0421 218 4774

Prof. Dr.-Ing. W. Benecke

Tel.: 0421 218 4698
email: wbenecke@imsas.uni-bremen.de

Inhaltsverzeichnis

1	Vorstellung des Projektes	2
1.1	Hintergrund und Inhalte des Projektes	2
1.2	Motivation für ein Mikrorelais	3
1.3	Vorgaben für das Projekt MikroRel.....	5
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens	6
1.4.1	Technische und wissenschaftliche Ausgangslage für das Projekt	6
1.4.2	Mechanische Schalter und Halbleiterschalter	6
1.4.3	Realisierbarkeit eines Mikrorelais unter Einhaltung der Spezifikationen	7
1.4.4	Stand der Mikrogalvanik als Herstellungstechnologie	7
1.5	Konsortium.....	8
1.6	Schwerpunkte des Projektes	9
1.7	Beiträge der Partner im Konsortium	9
2	Ergebnisse des Teilvorhabens.....	11
2.1	Auswahl zur Untersuchung von Kontaktmaterialien	11
2.1.1	Konzept zur Charakterisierung.....	12
2.1.2	Bewertung der Ergebnisse zur Untersuchung von Kontaktmaterialien.....	14
2.2	Umsetzungskonzepte für Mikrorelais	15
2.2.1	Hybridrelais	15
2.2.1.1	Konzept.....	15
2.2.1.2	Technologie zur Herstellung der Mikrokontakte	17
2.2.1.3	Schaltversuche	18
	Ausfallerscheinungen	21
2.2.1.5	Simulationen zum Hybridaufbau.....	22
2.2.1.6	Optimierungen	23
2.2.1.7	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	25
2.2.2	Integriertes Mikrorelais.....	26
2.2.2.1	Konzept zum integrierten Mikrorelais	26
2.2.2.2	Auswahl eines Aktuatorprinzips.....	27
2.2.2.3	Elektrostatischer Abrollaktuator - Funktionsprinzip	28
2.2.2.4	Erstes Design zum elektrostatischen Mikrorelais mit Abrollaktuator.....	30
2.2.2.4.1	Basis des ersten Designs	30
2.2.2.4.2	Dimensionierung des ersten Designs	31
2.2.2.4.3	Muster zum ersten Design	33
2.2.2.4.4	Bewertung des ersten Designs	33
2.2.2.5	Technologische Weiterentwicklungen zum Abrollaktuator	34
2.2.2.5.1	Beeinflussung von Stress in Nickelschichten während des Prozesses	34
2.2.2.5.2	Aktuatorbalken aus einer Nickelschicht	35
2.2.2.5.3	Beeinflussung von Streß in Nickelschichten durch Temperung	35
2.2.2.5.4	Diskussion des Konzeptes zu Aktuatorbalken aus einer Nickelschicht	37
2.2.2.6	Simulation und Redesign für integriertes Mikrorelais	39
2.2.2.6.1	Redesign.....	39
2.2.2.6.2	Simulationsergebnisse zum Redesign des Abrollaktuators.....	40
2.2.2.7	Technologie und Umsetzung.....	42
2.2.2.8	Muster.....	46
2.2.2.9	Diskussion der dargestellten Prozessfolge.....	47
2.2.2.10	Zusammenfassung von Daten zum Ansatz des integrierten Mikrorelais	48
2.2.2.11	Zusammenfassung und Bewertung zum integrierten Mikrorelais	49
2.3	Technologieentwicklungen	50
2.3.1	Galvanik	50
2.3.2	Strömungszelle	51
2.3.3	Benetzungsverhalten	51
2.3.4	Elektrochemische Untersuchungen an Elektrolyten	51
3	Zusammenfassung	52
4	Verwertbarkeit und Nutzen der Ergebnisse	54
5	Veröffentlichungen	56
6	Arbeitsgruppen.....	57
7	Literaturverzeichnis	59

1 Vorstellung des Projektes

Im diesem Abschnitt sollen zunächst die Hintergründe und Ziele des Projektes sowie das Zusammenwirken der Partner im Konsortium als Überblick dargestellt werden.

1.1 Hintergrund und Inhalte des Projektes

Das Projekt beschäftigte sich mit der Entwicklung eines integrierten Mikrorelais für Hochstromanwendungen mit Lasten von einigen Ampere mit schwerpunktmäßigem Blick auf die Anwendung im Automobil einerseits, und allgemeiner auf Anwendungen unter dem Begriff „Weiße Ware“ andererseits.

Die damalige Situation für ein solches Vorhaben war von anspruchsvollen Vorgaben und Rahmenbedingungen bestimmt. Zwei Aspekte waren von wesentlicher Bedeutung.

1. Der Relaismarkt ist auf der Kostenseite durch harte Konkurrenz umkämpft, so dass sich die Herstellungskosten von üblicherweise eingesetzten Relais prägend für Neuentwicklung darstellten.
2. Mechanische Schalter müssen sich im Zuge neuester Entwicklungen mit intelligenten Halbleiterleistungsschaltern vergleichen, so dass eine Trendvorhersage für den zukünftigen Einsatz von mechanischen Relais ambivalent diskutiert wird.

Mit diesem Hintergrund wurde deutlich, dass aus Anwendersicht die Entwicklung eines mikromechanischen Schalters nur attraktiv ist, wenn sich mit dem neuen System wesentliche Vorteile gegenüber der Konkurrenz von Seiten der traditionellen Relais und der Konkurrenz von Seiten der Halbleiterleistungsschalter erzielen lassen im Sinne eines Generationssprunges. Die Mikrosystemtechnik versprach aus bisherigen Anwendungserfahrungen, einen solchen Generationssprung durch neue Wirkprinzipien und Technologien zu ermöglichen. Für die Projektbearbeitung entwickelte sich aus dieser Situation die Aufgabe, sich begleitend mit der Hinterfragung der Motivation für die Entwicklung eines Mikrorelais kritisch auseinander zu setzen und die Anwendungsgebiete von schaltenden Elementen differenzierter zu betrachten.

1.2 Motivation für ein Mikrorelais

Im folgenden wird eine kurze Diskussion von Eigenschaften mechanischer Schalter und Halbleiterschalter dargestellt, um Motivationen für die Entwicklung eines Mikrorelais abzuleiten. Die Darstellung erfolgt dabei hinsichtlich Vor- und Nachteile von mechanischen Schaltern aus der Sicht des Relais.

Mechanisches Relais

- + Potentialtrennung
- + galvanische Trennung
- + Störungssicherheit (EMV)
- + Stromrichtung
- + Temperaturverhalten
- + Linearität
- + Spannungsfestigkeit

Halbleiterschalter

- Bauvolumen
- Steuerleistung
- Lebensdauer (Schaltspiele)
- Schaltfrequenz
- Kontaktprellen
- Stoßempfindlichkeit
- Kosten/Stück



Mikrorelais

- ⇒ Kombination von Schlüsseigenschaften
- ⇒ elektromechanischer Schalter in Mikroelektronikumgebung (SMD)
- ⇒ Optimierung von Stromtragfähigkeit und Bauvolumen

Abbildung 1.1: Gegenüberstellung von Eigenschaften mechanischer Relais und Halbleiterschalter

Beim mechanischen Relais besteht im Gegensatz zu Halbleiterschaltern eine Trennung der Potentiale im Steuer- und Lastkreis sowie eine galvanische Trennung im Lastkreis. Dies kann für technische Anwendungen gefordert sein z.B. unter Zuverlässigkeitskriterien oder bei Netzen unterschiedlicher Versorgungsspannung. Das Relais ist als mechanisches System robust gegen elektromagnetische Störungen und wird gemeinhin unter EMV-Aspekten eingesetzt.

In der Vergangenheit waren hohe Spannungsfestigkeiten bis in den kV-Bereich nur mit mechanischen Relais zu erzielen. Dies beginnt sich gegenwärtig zu verändern mit den Fortschritten in der Halbleitertechnik. Das Relais zeichnet sich aufgrund der metallischen Übergänge durch niedrige und weniger temperaturabhängige lineare Kontaktwiderstände aus. Das Schaltverhalten ist unabhängig von der Stromrichtung. Die maximale Schaltleistung ist nicht durch Dimensionierungsbedingungen begrenzt.

Halbleiterschalter weisen ein geringes Bauvolumen im Vergleich zum Relais auf. Sie benötigen weniger Steuerleistung. Halbleiterschalter sind prädestiniert für hohe Schaltfrequenzen und weisen eine hohe Lebensdauer im Hinblick auf die Schaltzyklen auf. Da es sich nicht um ein mechanisches System handelt, sind Halbleiterschalter nicht stoßempfindlich und es tritt kein Kontaktprellen auf. Dafür besteht die Anfälligkeit für elektromagnetische Störungen. Die Kosten pro Schaltereinheit sind durch Relais nicht zu unterbieten.

Die Gegenüberstellung der Schalterarten macht deutlich, dass Relais und Halbleiterschalter spezialisierte Bauelemente sind und für unterschiedliche Anforderungen eingesetzt werden. Trotz der Entwicklungen in der Halbleitertechnik wird aus Sicht der Anwender die Technik nicht ohne mechanische Relais auskommen [Ehn96][Gra96][Sie96][Ul96][5]. Relais werden dabei im wesentlichen aus Gründen der Zuverlässigkeit bei sicherheitsrelevanten Aufgaben eingesetzt. Halbleiterschalter können bevorzugt werden aus Gründen der elektronischen Steuerbarkeit und Integrationsfähigkeit. Im Einsatz der Relais spiegelt sich das traditionelle Vertrauen in eine etablierte Technik des mechanischen Schaltens wieder. Diese Vertrauenswürdigkeit bieten Halbleiterschalter bislang trotz etablierter Technologie gegenüber Relais nicht, vergleicht man Lebenszeit und Anfälligkeit für mögliche Störfälle. Die Entscheidung, welches Bauelement in welcher Dimensionierung für eine Anwendung eingesetzt werden soll, ist letztlich abhängig von den Eigenschaften die vom Anwender in den Vordergrund gerückt werden.

Die Entwicklung eines Mikrorelais kann dazu dienen, Schlüsseleigenschaften aus den beiden unterschiedlichen Technologien zu kombinieren, um die Entscheidungslücke für den Anwender zu schließen. Ein Mikrorelais verspricht die genannten Vorzüge von mechanischen Relais in Dimensionen der Mikroelektronik zu bringen. Die Reduzierung der beweglichen Massen und Geometrien lassen eine hohe Schaltdynamik und ein geringes Bauvolumen erwarten. Aufgrund des hohen technologischen Aufwandes, der oft mit den Technologien der Mikrosystemtechnik verbunden ist, müssen diese Vorzüge aus Anwendersicht dem Kostendruck standhalten, was in der Mikrosystemtechnik ähnlich wie in der Halbleitertechnik nur mit hohen Stückzahlen zu erzielen ist.

Der Anspruch im Projekt MikroRel war es, einen mechanischen Mikroschalter für Lasten von einigen Ampere zu entwickeln und der baulichen Umgebung und Ansteuerung der Mikroelektronik näher zu bringen. In der Hauptsache bedeutete dies eine Optimierung der Stromtragfähigkeit in Bezug auf eine mikroelektronische Baugröße durchzuführen.

Die Ausrichtung der Zielanwendung fiel aufgrund der attraktiven Stückzahlen auf den Automobilbereich mit allerdings anspruchsvollen Spezifikationen.

1.3 Vorgaben für das Projekt MikroRel

Die allgemein formulierten Vorgaben für die Bearbeitung des Projektes MikroRel sind in Tabelle 1.1 aufgeführt.

Laststrom (Spitzenwert)	> 5A (25A)
Lastspannung	12V (Automobil)
Spannungsabfall	< 100mV (bei 5A)
Übergangswiderstand	< 20mOhm
Kontaktkraft	> 5mN
Abreißkraft	> 1mN
Kontaktabstand	> 20µm
Temperaturbereich	-40°C bis 125°C
Lebensdauer	
mechanisch	> 10 ⁷ Zyklen
elektrisch	> 10 ⁵ Zyklen
Isolationsspannungen	500V
Leistungsaufnahme	< 60mW

Tabelle 1.1: Vorgaben für die Entwicklung eines Mikrorelais im Projekt MikroRel für den Automobileinsatz

Das Hauptaugenmerk lag auf der Schaltlast, die mit den verfügbaren Mitteln der Mikrosystemtechnik unter Berücksichtigung der Kosten und einer deutlichen Reduzierung des Bauvolumens maximiert werden sollte. Dies setzte zum einen Schwerpunkte der Entwicklung auf die Thematik der Kontaktwiderstände und Kontaktmaterialien. Zum anderen mussten die verfügbaren Aktuationsmöglichkeiten in der Mikrosystemtechnik im Hinblick auf hohe Kontaktkräfte sowie ein schnelles und weites Öffnen bewertet werden.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

1.4.1 Technische und wissenschaftliche Ausgangslage für das Projekt

Zu Beginn des Projektes waren Entwicklungen zu Mikrorelais bei verschiedenen Gruppen in Gange. Eine Auswahl von Arbeitsgruppen ist in Abschnitt 6 gegeben. Auf dem Markt etabliert waren Mikrorelais nicht, insbesondere nicht für Lastströme von mehr als 1A. Die Anwendung von Mikrorelais im Automobilbereich wurde bis dahin nicht angestrebt. Einschränkende Rahmenbedingungen wurden bereits in Abschnitt 1.1 genannt.

Im Laufe des Projektes kristallisierten sich zwei Schwerpunkte heraus. Aus einem hybriden Testsystem aus traditioneller Antriebstechnik und mikrogalvanisch hergestelltem Kontaktsystem ohne integrierten Antrieb, das nur zur Charakterisierung des Schaltverhaltens des Kontaktsystems geplant war, entwickelte sich ein eigenständiges Konzept zur Realisierung eines Mikrorelais. In [Hos93][Han94] wurde unter anderen Voraussetzung und mit anderen Zielvorgaben gezeigt, dass dieser hybride Ansatz umsetzbar ist und vielversprechend sein kann. Das Konzept im Projekt MikroRel versprach auf Seiten der Herstellungstechnologie, der Baugröße und der Schalteigenschaften einen weiteren Fortschritt.

Der zweite Ansatz beruht auf einem integriertem Mikrorelais mit elektrostatischem Abrollantrieb. Ein solcher Ansatz wurde unter anderem in [Schim94][Schi97] vorgestellt. Das Technologiekonzept zur Realisierung des Aktuators und des Gesamtsystems basierte im Projekt MikroRel jedoch auf Mikrogalvanik statt auf Siliziumtechnologie. Bei Umsetzung dieses Konzeptes unter Beherrschung dieser Technologie (s. a. Abschnitt 1.4.4) wurden Fortschritte hinsichtlich der Schaltlasten und der Art einer flexibleren Integration in der Mikrosystemtechnik gesehen.

1.4.2 Mechanische Schalter und Halbleiterschalter

Die Relais-technik befindet sich technisch und ökonomisch auf höchstem Fortschrittslevel, d. h. Entwicklungen finden auf höchstem Niveau statt, die jedoch keine bahnbrechenden Neuerungen mehr mit sich bringen. Die Diversifikation und Spezialisierung von Relais hinsichtlich Ausführungsform, Lastanforderungen und Einsatzgebieten ist breit gestreut. Die Entwicklung eines universell einsetzbaren Relais, zur Abdeckung eines breiten Anwendungsfeldes erscheint unter dem Druck von spezialisierten Ausführungsformen am Markt nicht durchsetzbar. Relais sind auf ihre Anwendungsfelder zugeschnitten.

Halbleiterschalter aus der Leistungselektronik befinden sich im Gegensatz zur Relais-technik in rasanter Entwicklung und stellen eine ernsthafte Konkurrenz für einen Teil der Relaisanwendungen dar. Voraussetzungen sind die Realisierung von vergleichbaren Stromlasten und verarbeitbaren elektrischen Spannungen bei hoher Zuverlässigkeit. Diese Voraussetzungen waren zu Beginn des Projektes MikroRel in Aussicht aber nicht uneingeschränkt gegeben. Wesentliche Vorzüge bieten sich aufgrund der mit der Elektronik integrierten Intelligenz der Leistungshalbleiterschalter. Die Steigerung der Komplexität stellte jedoch bislang nicht zwingend einen Gewinn an Zuverlässigkeit dar. Der Trend für den Einsatz und Teilersatz von Relais im Automobil zeichnete sich gleichwohl ab.

Die Motivation für die Entwicklung eines Mikrorelais bestand hauptsächlich in der Schließung der Lücke zwischen den spezialisierten Technologien von Relais und Halbleiterelektronik (s. a. Abschnitt 1.2).

1.4.3 Realisierbarkeit eines Mikrorelais unter Einhaltung der Spezifikationen

Zu Beginn des Projektes bestanden verschiedene ungeklärte Fragestellungen hinsichtlich der Realisierbarkeit des angestrebten Mikrorelais unter Einhaltung der geforderten Spezifikationen.

Es war nicht bekannt, welche Mindestkontaktkräfte tatsächlich erforderlich sind, um Kontaktwiderstände von weniger als $20\text{m}\Omega$ zu erhalten. Als Richtwerte für Bewertungen und Konzepte konnten vorerst Angaben aus der Literatur verwendet werden [Schim94][Hos93]. Es wurden zusätzlich eigene Untersuchungen angestrebt. Die Schaltlast von $5\text{A}/12\text{V}$ gab Anlass, das Auftreten von Abschaltlichtbögen zu befürchten. Es war davon auszugehen, dass galvanisch hergestellte Mikrokontakte bei Auftreten von Abschaltlichtbögen nicht einsatzfähig sein würden. Zur Bewertung dieser Fragestellung musste zunächst von Literaturangaben zur Grenze des Auftretens von Abschaltlichtbögen ausgegangen werden [Ger59][Mor98][Lin98]. Die Schaltlast befand sich demnach an der unteren Grenze für Abschaltlichtbögen, so dass die Einhaltung der Lastvorgaben zwar kritisch aber nicht unmöglich eingeschätzt wurde. Eine Schaltcharakterisierung wurde für die Projektdurchführung vorgesehen.

Die Wärmeentwicklung durch Verlustleistung bei Dauerlast unter der angestrebten Reduzierung des Bauvolumens galt als Unsicherheitsfaktor für die Realisierbarkeit. Es musste von Wärmeentwicklung im Kontaktbereich und von der Antriebsstufe ausgegangen werden. Die durchgeführte analytische Abschätzung der thermischen Entwicklung durch Leitungsverluste (in Anlehnung an DIN IEC 326, Teil 3) konnte bei geeigneter Dimensionierung der Zuleitung und den zu erwartenden Kontaktwiderständen eine Realisierung zulassen.

Die tatsächliche auftretenden Kontaktwiderstände, Wärmeentwicklungen und das Abschaltverhalten sollten in einer frühen Phase des Projektes untersucht werden

1.4.4 Stand der Mikrogalvanik als Herstellungstechnologie

Als Herstellungstechnologie wurde die Mikrogalvanik favorisiert. Unter Einsatz von Mikrogalvanik erschien es möglich, sowohl Kontaktmaterialien als auch mechanische Funktionsschichten für einen integrierten Antrieb herzustellen. Die Mikrogalvanik erlaubt unter gegebenen Rahmenbedingungen die Realisierung von Mikrosystemen unabhängig von Siliziumsubstraten und Siliziumtechnologie. Die Möglichkeit der Integration von galvanisch hergestellten Mikrosystemen durch Prozessierung auf Substraten, die bereits komplette Mikroelektronikschaltungen aufweisen, wurde bereits gezeigt. CMOS-kompatible Integration im Vergleich muss in strengen Grenzen erfolgen und ist zum Teil mit technologischen Einschränkungen verbunden, welche die Systemleistungsgrenze limitieren können. Der Aufwand, der bei CMOS-kompatibler Integration bei der Anpassung und Modifizierung der Prozessfolge zur Wahrung der Kompatibilität entsteht, kann dem Aufwand nahe kommen, der sich bei der Back-End-Methode im Anschluss durch die zusätzlichen Schritte mit allen Konsequenzen hinsichtlich Kosten und Ausbeute befindet. Diese Back-End-Methode stellt also nicht zwingend einen Vorteil gegenüber der CMOS-kompatiblen Integration dar, sie gewährt jedoch einen höheren Grad an Flexibilität für die Prozessierung und Integration.

Zu Beginn des Projektes stellte die Mikrogalvanik eine untersuchte und einsatzfähige Sondertechnologie in der Mikrosystemtechnik dar. Der industrielle Einsatz der Mikrogalvanik für die Herstellung von MEMS war aber bislang nicht etabliert aufgrund der hohen Anforderungen an die Prozessführung im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit von essentiellen mechanischen Eigenschaften von Funktionsschichten. Für die industrielle Anwendung dieser Technologie für ein Mikrorelais mussten zuverlässige Rahmenbedingungen geschaffen sein. Ein wesentlicher Anspruch der Arbeiten im Projekt MikroRel galt der Verbesserung dieser Rahmenbedingungen, um die Voraussetzungen für eine Herstellung eines Mikrorelais in Mikrogalvanik überhaupt zu ermöglichen.

1.5 Konsortium

Das Projekt MikroRel wurde gefördert im Rahmenprogramm Mikrosystemtechnik vom Bundesminister für Bildung und Forschung (BMBF) mit der VDI/VDE-IT GmbH als Projektträger.

Das Konsortium setzte sich wie folgt zusammen:

- Institut für Mikrosensoren, -aktuatoren und -systeme / Bremen
- Robert Bosch GmbH / Stuttgart / Ansbach
- Chemnitzer Wertstoffmechanik GmbH / Chemnitz
- Enthone OMI / Solingen

Kooperationspartner ohne Förderung:

- Hengstler GmbH / Wehingen

Unterauftragnehmer:

- Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM) / Berlin
- TU Chemnitz

1.6 Schwerpunkte des Projektes

Die Schwerpunkte des Projektes lassen sich annähernd chronologisch in die folgenden Blöcke einteilen:

- Recherche zu Spezifikationen und Normen, Literatur, Patenten
- Kontaktmaterialien
 - Bewertung und Auswahl
 - Messtechnik für Kontaktcharakterisierung
 - Charakterisierung
- Kontaktsysteme ohne integrierten Antrieb
 - Design und Entwicklung der Prozessfolge für galvanische Kontakte
 - Aufbau und Test von Kontaktsystemen mit externem Antrieb
 - Elektromagnetische Simulation zum Testaufbau
 - Konzept für Hybridrelais mit mikrogalvanischem Kontaktsystem und traditioneller elektromagnetischer Antriebstechnik
- Integrierte Spulen für elektromagnetischen Antrieb
 - Simulationen
 - Technologieentwicklung
 - Charakterisierung
- Integriertes Mikrorelais
 - Bewertung von Antriebskonzepten der Mikrosystemtechnik
 - Design und Technologieentwicklung für galvanisch hergestellten elektrostatischen Abrollaktuator
 - Simulationen zu Design eines elektrostatischen Mikrorelais
 - Herstellung und Charakterisierung von Testbalken und -aktuatoren
 - Methoden zur Anpassung der Aktuatoreigenschaften
 - Konzept für Gesamtsystem
 - Entwicklung der Technologiefolge für Testsystem
 - Konzepte für verschiedene Anwendungen

1.7 Beiträge der Partner im Konsortium

Im folgenden sind die Beiträge der einzelnen Partner als Übersicht für den vorliegenden Bericht des Teilvorhabens zusammengefasst.

IMSAS

- Projektkoordination
- Systemkonzepte, Design und Technologieentwicklung für
 - Kontaktsystem für Test und Hybridaufbau
 - elektrostatisches Mikrorelais
- Entwicklung und Herstellung von galvanischen Schichten
- Herstellung von Teststrukturen und Testaktuatoren
- Hybridaufbau eines elektromagnetischen Schalters
- Herstellung von elektrostatischen Mikroschalterelementen

Enthone OMI GmbH

- Analyseverfahren zur Überwachung von Elektrolytsystemen
- Entwicklung und Anpassung von Elektrolyten für Kontaktmaterialien und Funktionsschichten
- Optimierung von Elektrolytsystemen hinsichtlich der Abscheideeigenschaften (z.B. Schichtstress)
- Elektrolyt- und Kleinteileversorgung

Robert Bosch GmbH

- Machbarkeitsstudie und Patentrecherche
- Technologieentwicklung zu galvanischen Spulen für ein integriertes elektromagnetisches Mikrorelais
- Simulationen zur Optimierung, Herstellung und Charakterisierung von Planarspulen
- Simulationen zum Hybridaufbau eines hybriden elektromagnetischen Mikrorelais aus Kontaktsystem und traditioneller Spule
- Material und Geräte zur Kontaktcharakterisierung
- Kontaktcharakterisierung unter Bedingungen aus Relaisbranche

CWM GmbH

- Entwicklung und Herstellung eines Aufbaus zur Charakterisierung des Kontaktwiderstandes von galvanischen Schichten
- Messung des Kontaktwiderstandes an verschiedenen Materialien für Kontaktkräfte im mN-Bereich
- Materialcharakterisierung galvanischer Schichten zur Optimierung von galvanischen Schichten (E-Modul, Härte, Rauheit, Kornstruktur)

IZM

- Unterstützung der Technologieentwicklung durch ausgewählte Charakterisierungsaufgaben
 - Haftfestigkeiten von Schichtverbänden
 - Thermografische Messungen an Schaltkontakten
 - Einfluss von Temperungen auf galvanische Schichten
 - Oberflächencharakterisierungen
- Server für den Datenaustausch der Projektpartner
- Unterstützung der Simulationen zum elektrostatischen Mikrorelais

TU Chemnitz

- Durchführung der Simulationen zum elektrostatischen Mikrorelais

Hengstler GmbH

- Begleitung des Projektes hinsichtlich Anforderungen / Normen
- Unterstützung mit Kleinmaterial aus der Relaisbranche für Messaufbauten
- Unterstützung beim elektromagnetischen Hybridaufbau

2 Ergebnisse des Teilvorhabens

Die im Teilvorhaben erzielten Ergebnisse werden im folgenden dargestellt. Die Bezüge zu Ergebnisse von Arbeiten der Partner werden zur Wahrung des Gesamtzusammenhanges an den betreffenden Stellen nur kurz dargestellt. Hinsichtlich detaillierter Darstellungen dieser Ergebnisse ist auf die Berichte der Partner zu verweisen.

2.1 Auswahl zur Untersuchung von Kontaktmaterialien

Zu Beginn des Projektes konzentrierten sich die Arbeiten auf die Auswahl geeigneter Kontaktmaterialien zur Erfüllung der Anwendungsfunktion. Aus Literaturangaben und Fachgesprächen konnten geeignete Materialien ausgefiltert werden. Kriterien waren die Anwendung, der Lastfall und die Prozessierbarkeit.

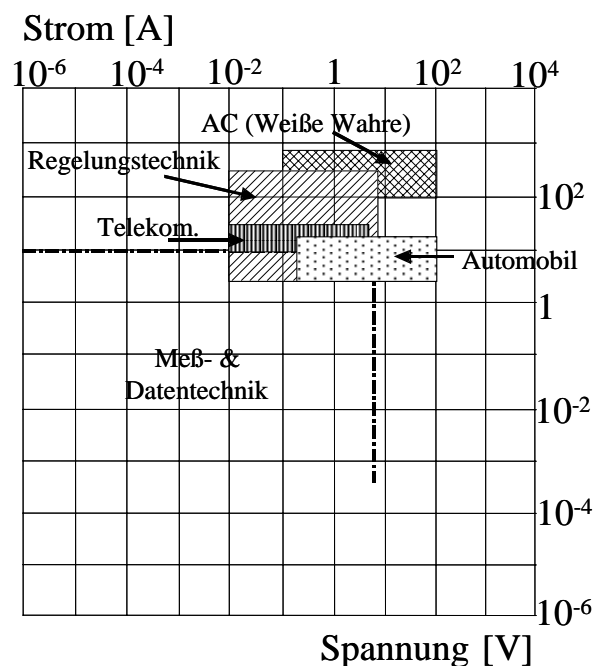


Abbildung 2.1: Einteilung von Lastfällen nach Anwendungsgebieten (nach J. Weiser)

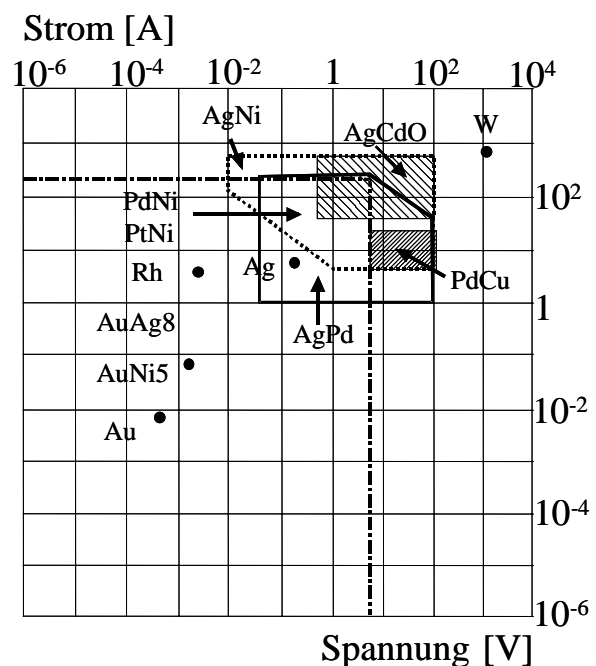


Abbildung 2.2: Einteilung von Kontaktmaterialien für unterschiedliche Lastfälle (nach J. Weiser)

Aus Abbildung 2.1 zur Einteilung der Lastfälle nach Anwendungen geht hervor, dass im Automobil Relais für Lastströme unter 1A bis 100A benötigt werden.

Hinsichtlich des Auftretens von Abschaltlichtbögen bestanden zunächst bedenken, da der Lastfall mit 5A bei 12V an der Grenze zum Auftreten von Abschaltlichtbögen anzusiedeln war. Aus diesem Gesichtspunkt wären Materialien mit Oxidanteilen zu bevorzugen. Ferner wurde für die Spezifikation klar, dass ein schnelles und weites Ausschalten erforderlich ist, um das Auftreten von Abschaltlichtbögen zu vermeiden. Für eine Vorabbewertung von Kontaktmaterialien waren unter anderem Strom-Spannungs-Werkstoffdiagramme und Härte-Elastizitäts-Werkstoffdiagramme heranzuziehen. Eine Einteilung von Kontaktmaterialien nach Belastungsfällen ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Im Ergebnis wurden Materialien wie AuCo, AuNi, PdNi, Ag und Au für die Untersuchung auf ihre Kontakteigenschaften ausgewählt, da diese Legierungen prozesstechnisch auch mittels Mikrogalvanik auf Wafersubstraten zu verarbeiten waren.

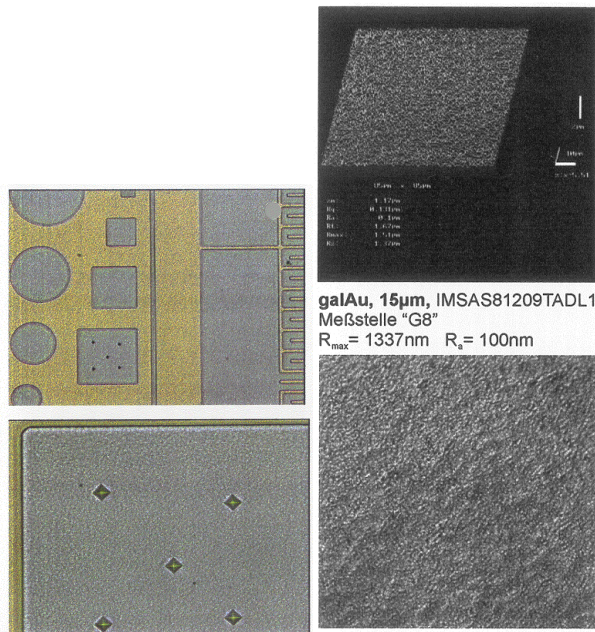


Abbildung 2.4: Teststrukturen zur Ermittlung von Härte und Elastizitätsmodul durch registrierende Mikrohärteprüfung und Beispiel für Rauheitsmessung mittels Laserscanning-Verfahren (durchgeführt von CWM)

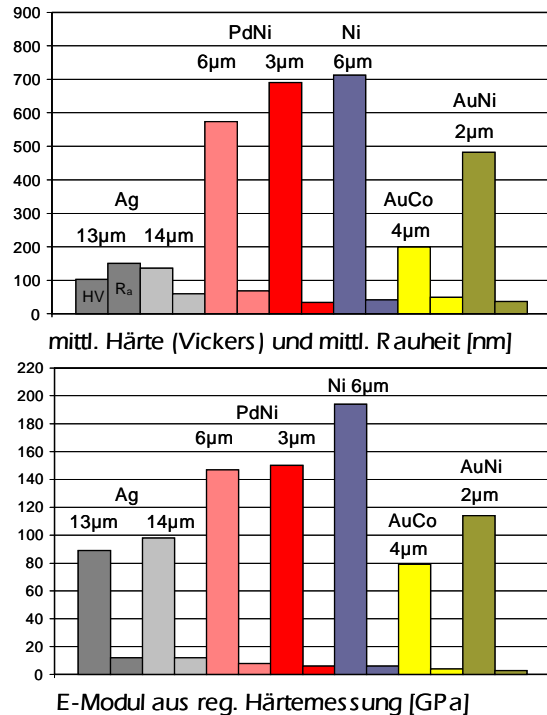


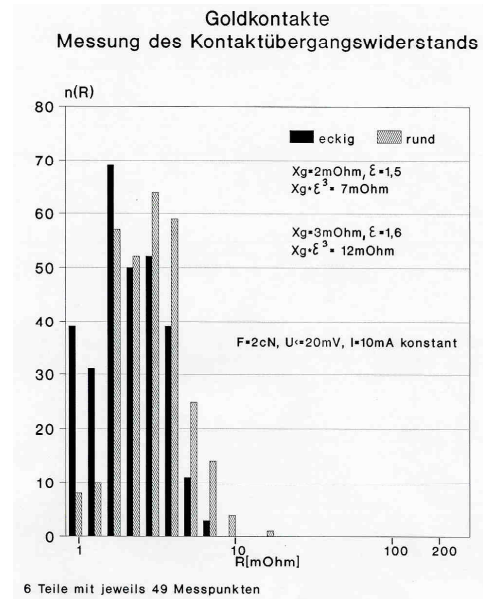
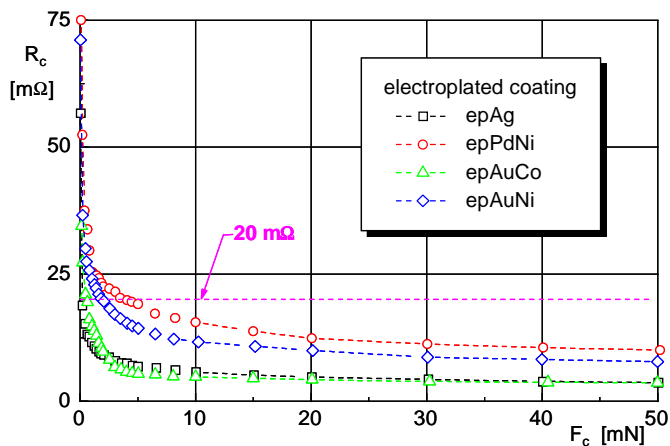
Abbildung 2.5: Ergebnisse der Härte-, E-Modul- und Rauheitsmessungen an galvanisch hergestellten Schichten (verschiedene Dicken)

Die Materialcharakterisierung untersuchte Eigenschaften der galvanisch hergestellten Kontaktschichten wie Rauheit, Härte und E-Modul. Den Ergebnissen nach zeigten sich Ag und AuCo als Favoriten, da dort Härte bzw. E-Modul am geringsten waren (Abbildung 2.5).

Nach der Materialcharakterisierung wurden Kontaktstrukturen hergestellt, an denen der Übergangswiderstand zu einem Gegenkontakt aus Gold bei den zu erwartenden Kontaktkräften bestimmt wurde. Dies wurde zum ersten an einer herkömmlichen Anlage bei der Firma Bosch in Ansbach durchgeführt unter üblichen minimalen Lasten um 20mN (Abbildung 2.6). Dabei wurden auf der Kontaktfläche mehrere Messungen durchgeführt. Zum zweiten wurde von der CWM ein Messstand konstruiert, gefertigt und verwendet, um bei Kontaktkräften unter 1mN Übergangswiderstände zu messen. Die Messungen auf der Anlage von Bosch dienten dann als Verifikation des neuen Messstandes durch Vergleich der Werte bei 20mN.

Die Charakterisierung des Kontaktwiderstandes bei Kräften um 1mN bestätigten den Schluss hinsichtlich der Eignung von AuCo Schichten. Bei Kontaktkräften um 10mN befanden sich die untersuchten Materialien alle unterhalb der spezifizierten Grenze von 20mΩ. Bei AuCo ist die Plateaubildung bereits gut ausgeprägt, was sich im Betrieb günstig bei Schwankungen der Kontaktkraft in einzelnen Schaltzyklen auf die Stabilität des Kontaktwiderstandes auswirken würde.

Kontaktkraft-Widerstands messung



Dr. J. Vogel / Chemnitzer Werkstoffmechanik GmbH (CWM)

Dipl.-Ing. H. Mayer / Robert Bosch GmbH / Ansbach

Abbildung 2.6: (links) Kontaktkraft-Widerstandsmessung mit Messstand der CWM GmbH an galvanische abgeschiedenen Materialien für Kräfte von weniger als 1mN bis 50mN (rechts) Kontaktkraft-Widerstandsmessung bei Bosch/Ansbach mit herkömmlich eingesetztem Messstand an galvanischen Schichten mit Messpunkteverteilung

2.1.2 Bewertung der Ergebnisse zur Untersuchung von Kontaktmaterialien

In der ersten Phase des Projektes wurde durch Betrachtung der Literatur und Theorie eine Vorauswahl an Materialien getroffen. Aus den Ergebnissen aus der Materialcharakterisierung zu mechanischen Eigenschaften konnte eine erste Bewertung von galvanischen Schichten im Hinblick auf ihre Eignung als Kontaktmaterial getroffen werden, wobei AuCo und Ag favorisiert wurden.

Als ein wesentliches Ergebnis ist die von der CWM GmbH realisierte Messeinrichtung zur Bestimmung des Kontaktwiderstandes bei Kontaktkräften unter 1mN hervorzuheben. Erst mit Hilfe dieser Messeinrichtung war es im Verbund möglich, die fundierte Bewertung der Materialien für die Eignung in einem Mikrorelais zu treffen, um die Vielfalt der Materialien zur Integration in den umzusetzenden Prozessflow einzugrenzen. Die eingesetzten Messmethoden standen damit nicht nur für die Weiterentwicklung und Auswahl von galvanischen Kontaktmaterialien, sondern auch für die prozessbegleitende Überwachung der Schichteigenschaften zur Verfügung.

Die untersuchten galvanisch abgeschiedenen Metalle erwiesen sich alle im Hinblick auf die Spezifikationen als einsetzbar. Mit der fundierten Bewertung der galvanisch hergestellten Kontaktmaterialien wurde die Grundlage für die weitere Umsetzung eines Mikrorelais geschaffen. Den nächsten Schritt stellte somit die Integration der Materialien in einem Herstellungsprozess dar.

Zur Vervollständigung der Charakterisierungsmethoden wurden zu diesem Zeitpunkt ebenfalls Vorbereitungen getroffen für Untersuchungen von Lichtbogenentwicklung und Verschleißverhalten bei hohen Schaltzyklen.

2.2 Umsetzungskonzepte für Mikrorelais

Es gab zwei Richtungen zur Realisierung eines Mikrorelais. Das erste Konzept bestand aus der Kombination von Mikrokontakten, die ursprünglich zur Charakterisierung gedacht waren, mit traditioneller elektromagnetischer Antriebstechnik. Der Ansatz für ein integriertes Mikrorelais basierte auf elektrostatischer Aktuation mit galvanisch hergestelltem Abrollaktuator. Das Hybridkonzept wurde nicht bis zur Prototypenstufe fortgeführt, da der Schwerpunkt auf einem integrierten Mikrorelais zu sehen war.

2.2.1 Hybridrelais

2.2.1.1 Konzept

Durch Kombination der auf Wafersubstraten mikrogalvanisch hergestellten Kontaktsysteme, die zunächst keinen integrierten Antrieb besaßen, mit traditioneller elektromagnetischer Antriebstechnik sollte zunächst lediglich die Charakterisierung mikrotechnisch hergestellter Kontaktsysteme möglich gemacht werden als Vorstufe zur Untersuchung auf die Eignung für eine integrierte Lösungsform eines Mikrorelais. Ein Konzept zur Realisierung und Einbettung in ein SMD-fähiges Gehäuse wurde erst nach erfolgreicher Durchführung der Schaltversuche weitergeführt als alternative Realisierungsform (Abbildung 2.7). Ein hybrider Ansatz wurde früher schon verfolgt [Hos93][Han94].

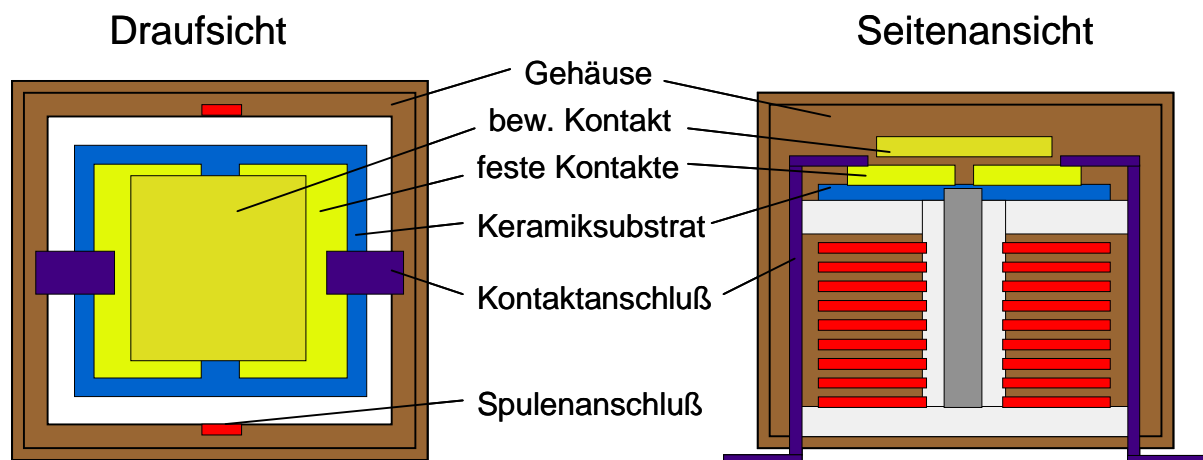


Abbildung 2.7: Konzept zum Aufbau eines Hybridrelais aus Mikrokontaktchip und traditionellem elektromagnetischem Antrieb in SMD-Gehäuse

Die Umsetzung für den Antrieb sah einen magnetischen Kreis vor, beginnend durch den mit einer Spule umwickelten Kern über den Weg des beweglichen Kontaktes und zurückgeführt über zwei seitliche Schenkel.

Die Einzelteile für das Kern-Spulensystem wurden von Hengstler GmbH bereitgestellt und am IMSAS als Prototyp für den Antrieb der Mikrokontakte zusammengesetzt (Abbildung 2.8).

Hybridaufbau Kontaktsystem und Spule (Chipmaß 6x6mm²)

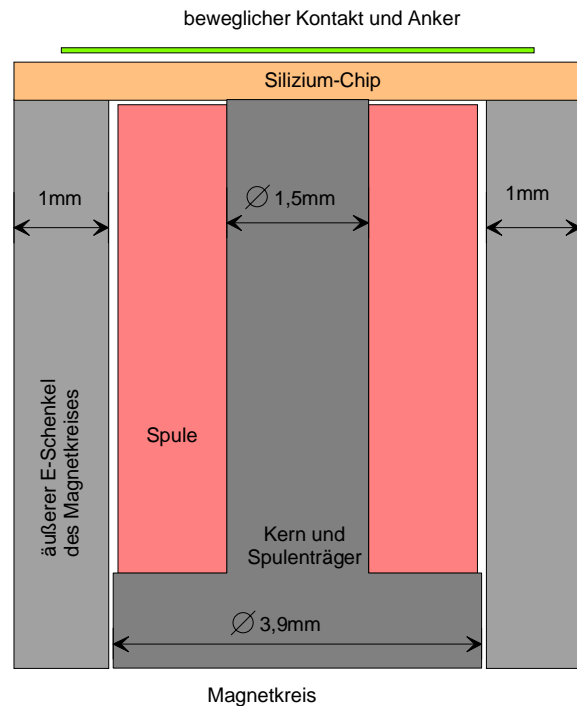
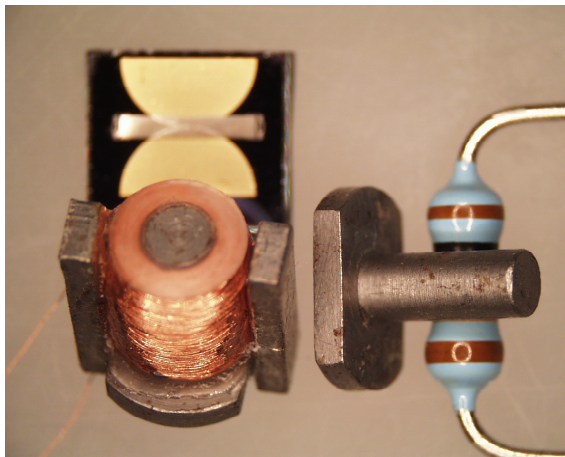


Abbildung 2.8: (rechts) Konzept für Integration des Kontaktchips im elektromagnetischen Antriebskreis (links) mikrotechnische Umsetzung des Antriebsteils (Kontaktchip 6x6mm²)

2.2.1.2 Technologie zur Herstellung der Mikrokontakte

Die Technologie zur Herstellung der Mikrokontakte basiert im wesentlichen auf mikrogalvanischen Prozessen (Abbildung 2.10).

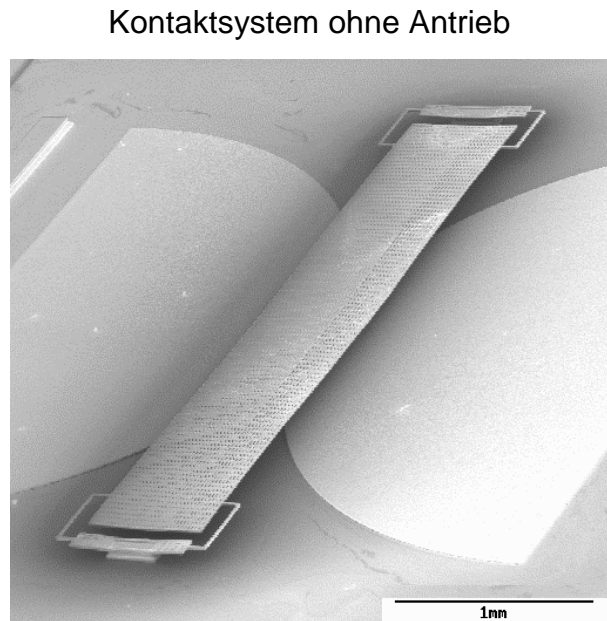


Abbildung 2.9: REM-Aufnahme eines galvanisch hergestellten Kontaktsystems ohne integrierten Antrieb bestehend aus zwei festen Kontakten und einer beweglichen Kurzschlussbrücke

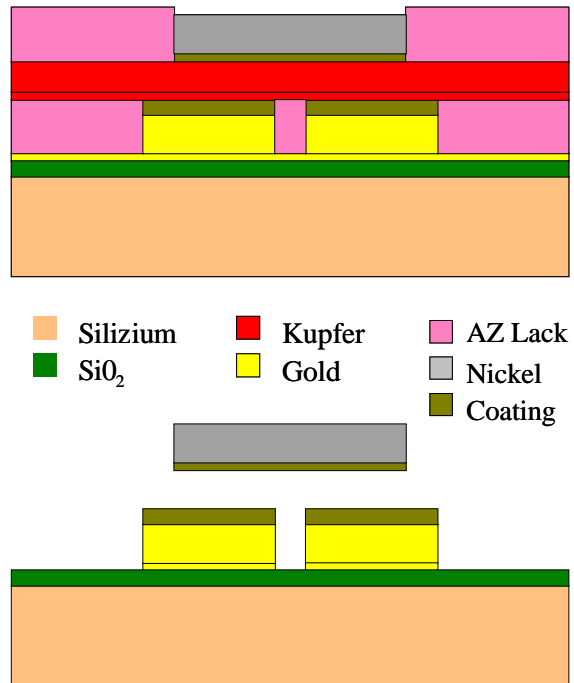


Abbildung 2.10: Schichtaufbau des galvanischen Kontaktsystems ohne integrierten Antrieb bei der Herstellung und nach Freilegung

Es wurden Siliziumsubstrate mit 500µm Dicke eingesetzt. Auf einer Startschicht werden in einer strukturierten Mikroform aus Fotolack die festen Kontakte galvanisch abgeschieden (Abbildung 2.10). Es folgt ein Galvanikschritt als Coating mit dem Kontaktmaterial der Wahl wie z.B. AuCo. Die Mikroform bleibt aus Planaritätsgründen für die nächsten Schritte bestehen. Es wird ganzflächig eine Opferschicht von einigen 10µm Dicke galvanisiert. Diese wird nasschemisch mittels Fotolackmaske strukturiert, um die festen Bereiche auf dem Substrat für den beweglichen Kontakt freizulegen. In einer Mikroform für den beweglichen Kontakt aus Fotolack wird schließlich zunächst ein Coatingmaterial für den beweglichen Kontakt und darüber magnetisch leitendes Material wie z. B. Ni galvanisiert. Die Lackmikroform für den Anker, die Kupferopferschicht und die Mikroform für die festen Kontakte werden zur Freilegung der beweglichen Elemente nasschemisch entfernt.

In Abbildung 2.9 ist eine REM-Aufnahme eines Kontaktsystems gezeigt. Die festen Kontakte wurden in dieser Variante halbrund ausgeführt. Der bewegliche Kontakt ist hier nur als schmale Kurzschlussbrücke ausgeführt, die über Federstrukturen mit dem Substrat mechanisch verbunden ist. Zur Unterstützung der Freilegung ist die Kurzschlussbrücke perforiert.

2.2.1.3 Schaltversuche

An den Mikrokontakten, die in verschiedenen Designvarianten und Materialkombinationen vorlagen, wurden mit dem Aufbau, wie in Abbildung 2.8 dargestellt, Schaltversuche durchgeführt.

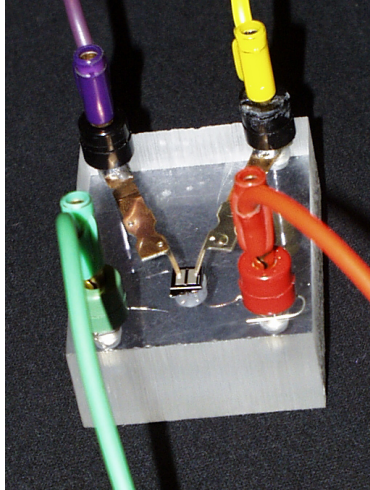


Abbildung 2.11: Kontaktierung für Schaltversuche an den Mikrokontakten mit elektromagnetischem Testaufbau

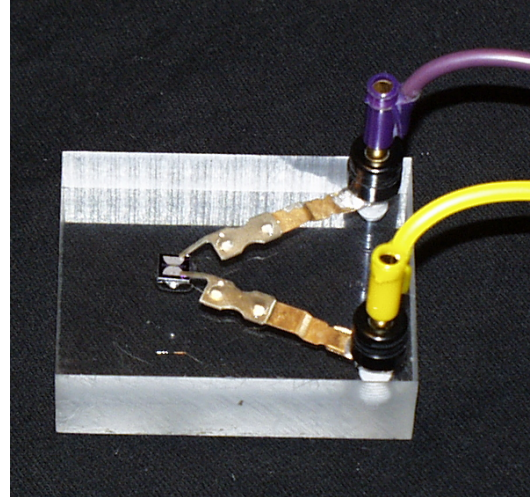


Abbildung 2.12: Kontaktierung für thermographische Untersuchungen an den Mikrokontakten mit Permanentmagnet

In Abbildung 2.11 ist der Testaufbau für die Schaltversuche gezeigt. Das Kern-Spulensystem ist in einen Acrylglasblock eingelassen. Die elektrische Kontaktierung wurde von der Oberseite des Kontaktchips mit Kontaktnadeln hergestellt. Die Spule wurde ohne weitere Beschaltung betrieben. In Versuchen zur Maximallast und Thermographie wurde für den Kontaktschluss ein Permanentmagnet unter dem Kontakt eingelassen (Abbildung 2.12).

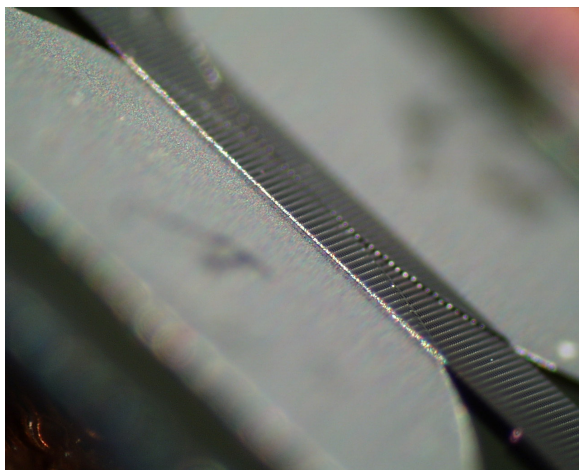


Abbildung 2.13: Kurzschlussbrücke geschlossen bei Bestromung der Antriebsspule

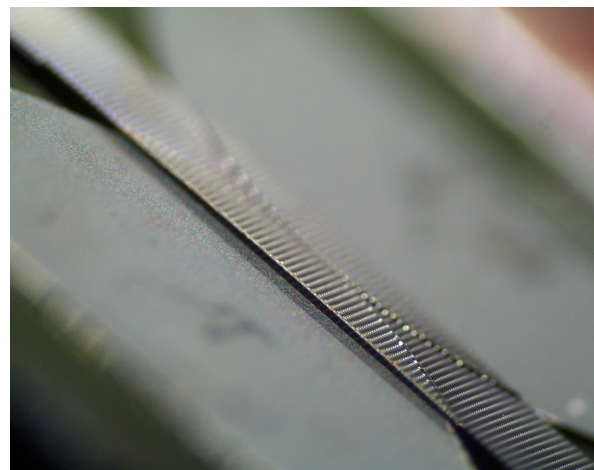


Abbildung 2.14: Kurzschlussbrücke geöffnet ohne Bestromung der Antriebsspule

In Abbildung 2.13 ist die Kurzschlussbrücke bei Bestromung und in Abbildung 2.14 ohne Bestromung der Spule gezeigt. Der bewegliche Kontakt liegt bei Ansteuerung ganzflächig auf den festen Kontakten auf.

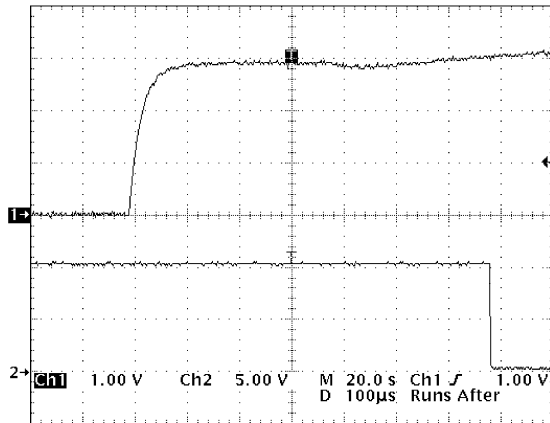


Abbildung 2.15: Einschaltzeit 700µs
CH1: Steuerkreis (Spulenspannung)
CH2: Lastkreis Abfall der Kontaktspannung

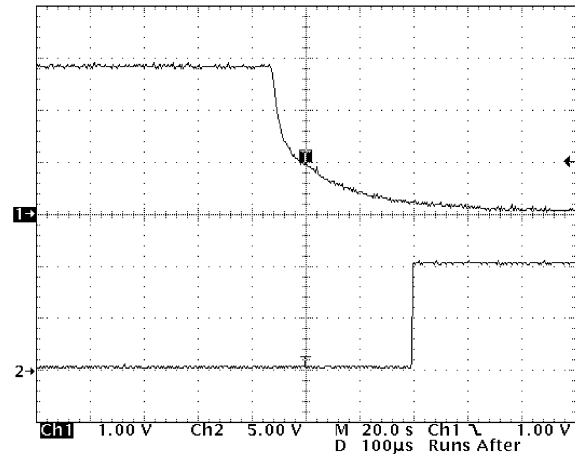


Abbildung 2.16: Ausschaltzeit 300µs
CH1: Steuerkreis (Spulenspannung)
CH2: Lastkreis Anstieg der Kontaktspannung

Elektrische Messungen ergaben eine Einschaltzeit von 700µs (Abbildung 2.15) und eine Ausschaltzeit von 300µs (Abbildung 2.16). Der wesentliche Anteil der Verzögerung liegt vermutlich bei der nicht optimierten Anpassung des Magnetkreises, also der überdimensionierten Induktivität. Bei den Versuchen wurde kein Prellen beobachtet.

Die Steuerleistung bewegte sich je nach Kontaktdesign zwischen 300 bis 500mW, was auf die mangelhafte Anpassung des Kontaktchips zur Antriebsseite zurückzuführen ist. Für die Schaltversuche war dies zunächst nicht von Bedeutung. Für die Realisierung eines Hybridrelais sind an dieser Stelle einige Möglichkeiten zur Optimierung gegeben.

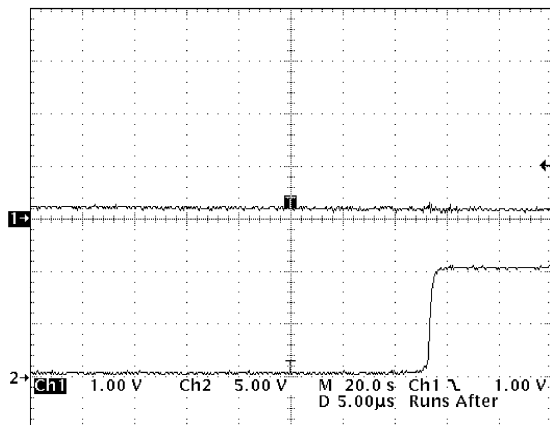


Abbildung 2.17: Ausschaltvorgang
CH1: Steuerkreis (Spulenspannung)
CH2: Lastkreis Anstieg der Kontaktspannung

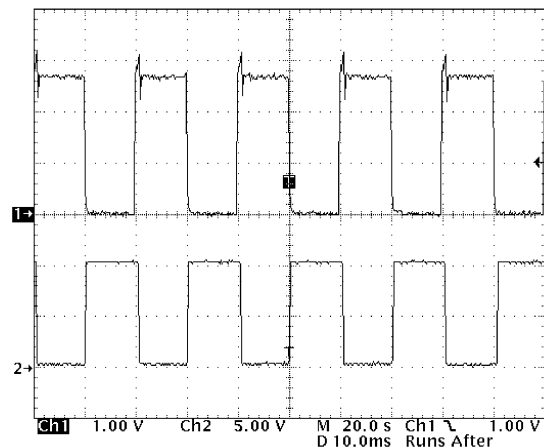


Abbildung 2.18: 50Hz Schaltfrequenz
CH1: Steuerkreis (Spulenspannung)
CH2: Lastkreis (Kontaktspannung)

In Abbildung 2.17 ist ein Öffnungsvorgang zeitlich feiner aufgelöst. In Abbildung 2.18 wurden mehrere Perioden bei 50Hz Schaltfrequenz aufgezeichnet. Die Stromlast betrug hier nur 100mA. Die Überhöhungen an der steigenden Flanke des Signals im Steuerkreis (CH1) sind auf die fehlende Beschaltung des Steuerkreises zurückzuführen.

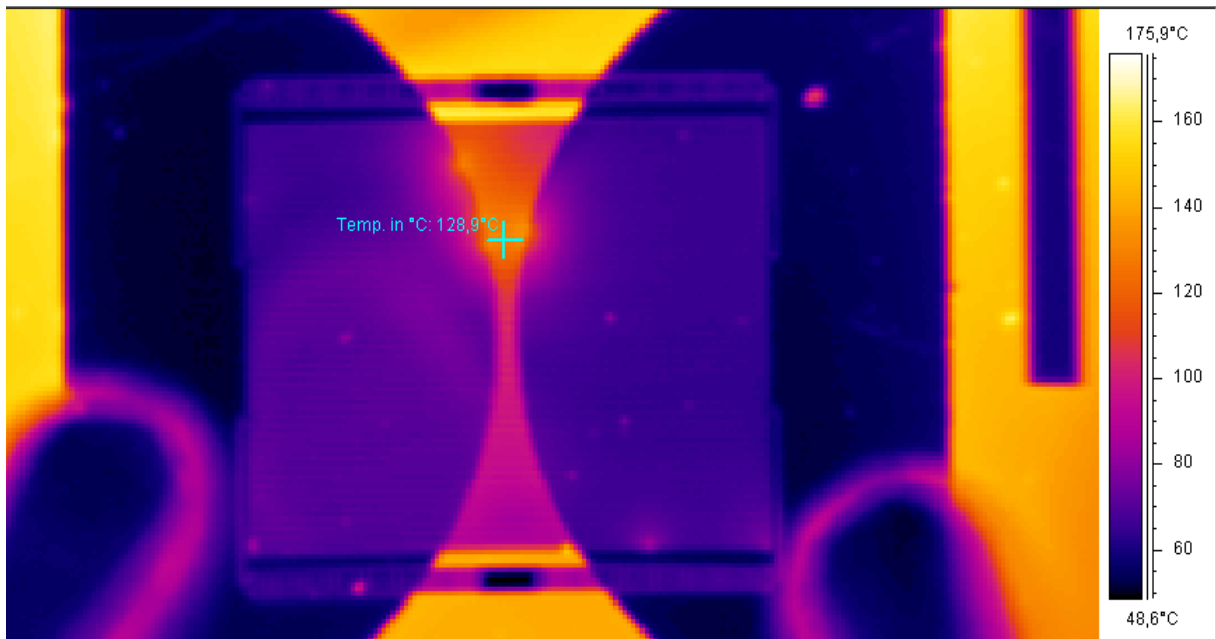


Abbildung 2.19: Wärmebild eines geschlossenen Kontaktes bei 200mA Dauerlast lokale Fehlerstelle mit Spottemperatur ca. 130°C

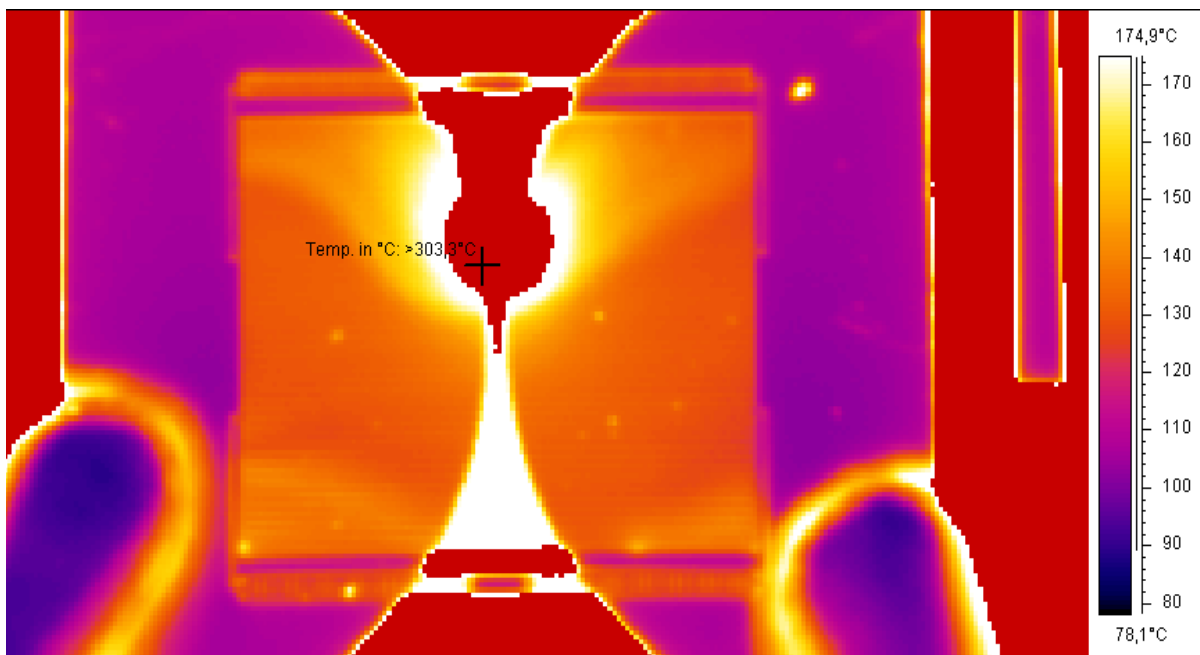


Abbildung 2.20: Wärmebild eines geschlossenen Kontaktes bei 2,8A Dauerlast lokale Fehlerstelle mit Spottemperatur > 300°C

Mit einer Wärmebildkamera wurde am IZM Berlin die Wärmeentwicklung bei Dauerlast des Mikrokontaktes untersucht. Hierfür wurde der Kontakt in dem Aufbau mit Permanentmagnet verwendet (Abbildung 2.12), damit die Steuerleistung nicht das Bild verfälscht. Der Mikrokontakt wurde in 200mA-Schritten bis 2,8A Dauerlast belastet. Der Ausfall war in diesem Beispiel auf einen „Hot Spot“ zurückzuführen, der vermutlich auf einem Partikel beruht. Weiterführende Untersuchungen waren erst an optimierten Kontakten der zweiten Generation geplant. Diese Optimierungen der Kontakte wurden jedoch später zugunsten der integrierten Lösung in den Hintergrund gestellt und konnten im Projekt nicht abgeschlossen werden.

2.2.1.4 Ausfallerscheinungen

Temporäre Ausfälle traten zunächst in Schaltversuchen mit Parametern wie Schaltfrequenz von 50Hz und 100mA Schaltlast aufgrund thermischer Effekte auf bei Verwendung eines provisorischen Spulen-Kern-Aufbaus. Ursache war hier die thermische Verlustleistung im Antriebskreis aufgrund der nicht optimierten Auslegung des Magnetkreises. Durch die thermische Ausdehnung des beweglichen Kontaktes konnte sich dieser aufgrund der Topographie der bis dahin hergestellten Mikrokontakte mit den festen Kontakten verkeilen.

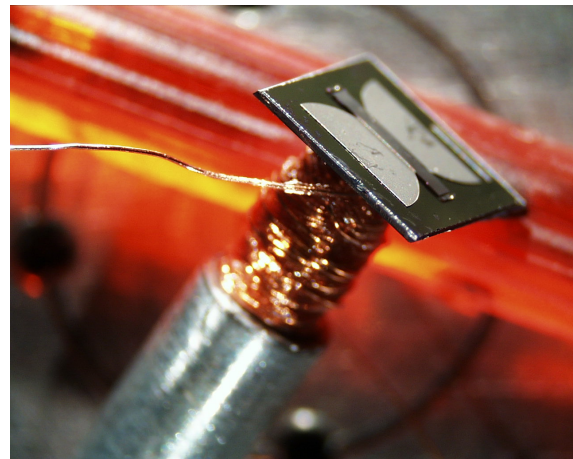
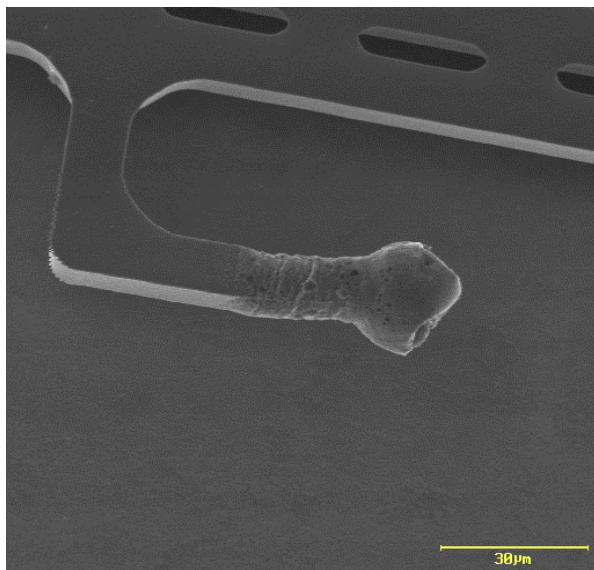


Abbildung 2.21: Provisorischer Spule-Kern-Aufbau mit Kontaktchip für erste Schaltversuche

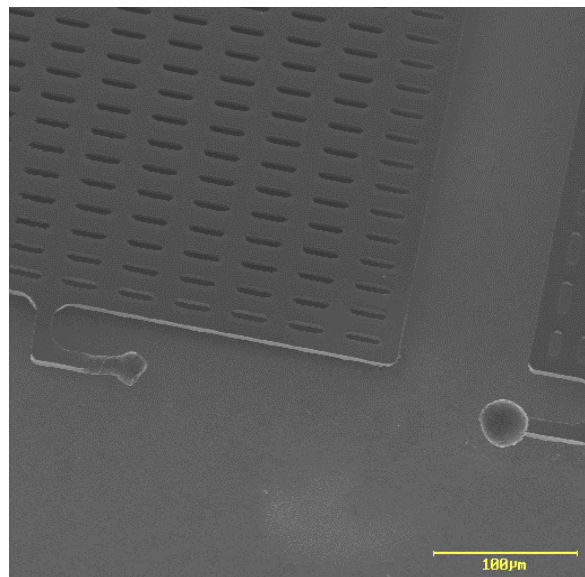
Durch Einsatz von Kältespray konnte dieser Effekt reproduzierbar rückgängig gemacht werden. Diese Versuche führten zu dem bereits in Abbildung 2.8 gezeigtem verbessertem Magnetkreislaufbau. Die Steuerleistung war mit dem neuen Aufbau auf weniger als 300mW zu reduzieren.

Ab Lastströmen unter Schalten von über 1A traten Ausfälle durch Verschmelzungen an den Federstrukturen und an den Kanten des beweglichen Kontaktes nach etwa 100 Schaltzyklen auf.



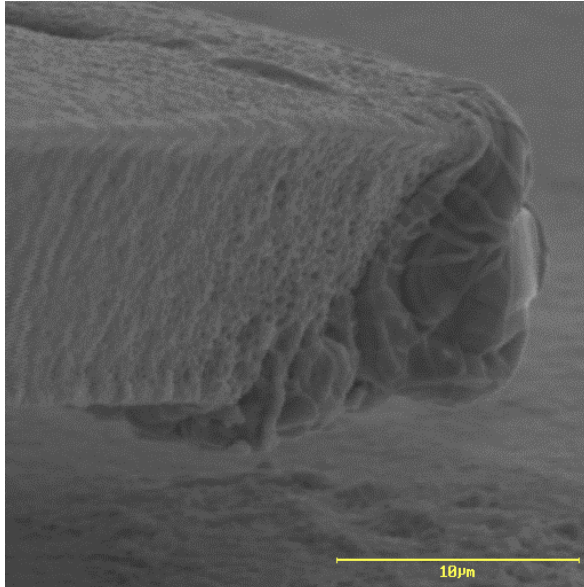
1 Crebleg nach I=1A

Abbildung 2.22: Ausfall des Kontaktes durch Schmelzen der Federstrukturen bei Ausschalten ab Lasten von 1A



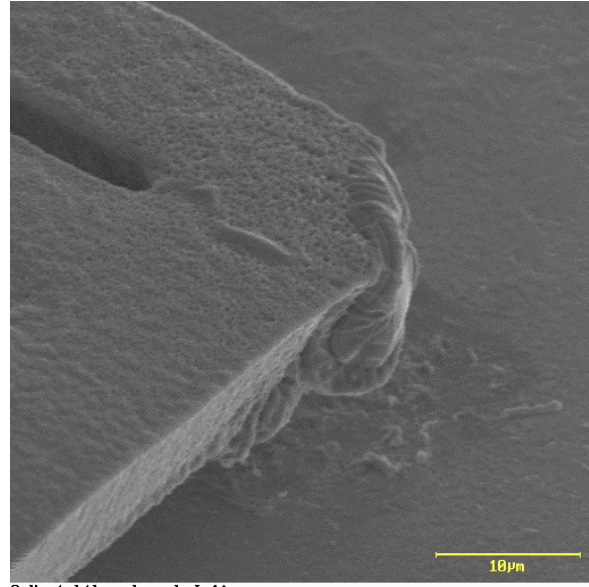
2 Crebleg nach I=1A

Abbildung 2.23: Ausfall des Kontaktes durch Schmelzen der Federstrukturen bei Ausschalten ab Lasten von 1A



5 Kontaktbrand nach I=1A

Abbildung 2.24: Ausfall des Kontaktes durch Schmelzungen an Kontaktkanten beim Ausschalten ab Lasten von 1A



3 Kontaktbrand nach I=1A

Abbildung 2.25: Ausfall des Kontaktes durch Schmelzungen an Kontaktkanten beim Ausschalten ab Lasten von 1A

Diese Ausfälle waren auf Mängel im Design und der Technologiefolge zurückzuführen. Vermutlich führt die beim Abschalten überhöhte Belastung an Kanten und Federstrukturen zu den Ausfällen. Durch Maßnahmen in der Technologie und im Design lassen sich diese Ausfälle vermeiden. Der bewegliche Kontakt kann beispielsweise mit einer leicht konvexen Biegung erzeugt werden, so dass beim dynamischen Vorgang des Abschaltens nicht die Kanten als letzte Kontaktflächen belastet werden. Ebenso können die Federstrukturen von einer Belastung geschützt werden.

2.2.1.5 Simulationen zum Hybrid Aufbau

Zur Optimierung der Anpassung von Magnetkreis und Kontaktchip wurden bei Bosch Untersuchungen mittels Simulation durchgeführt. Hierfür wurden verschiedene Geometrieparameter und Spulenparameter variiert, die technologisch realisierbar sind. Kernfragen waren, inwieweit sich die Bauhöhe für Kern und Spule reduzieren lässt und welche Kräfte beim Anziehen und im geschlossenen Zustand zu erwarten sind.

Als Ergebnis ließ sich zusammenfassen, dass magnetische Kräfte im Bereich 10-100mN realisierbar sind, wobei die Kraft über die Spalthöhe relativ konstant bleibt. Eine Optimierung der Kraftwirkung ließe sich erzielen durch die Maximierung der Ankerdicke und die Maximierung der Amperewindungszahl. Diese Effekte ändern sich nur geringfügig bei Reduzierung der Bauhöhe für das Spulen-Kern-System von 6mm auf 3mm.

2.2.1.6 Optimierungen

Verschiedene Möglichkeiten zur Optimierung des galvanisch hergestellten Kontaktsystems haben sich herausgestellt.

Diese Optimierungen sollten in der nächsten Generation der Kontakte umgesetzt werden, wurden jedoch zugunsten der integrierten Lösung in den Hintergrund gestellt und konnten im Projekt nicht abgeschlossen werden.

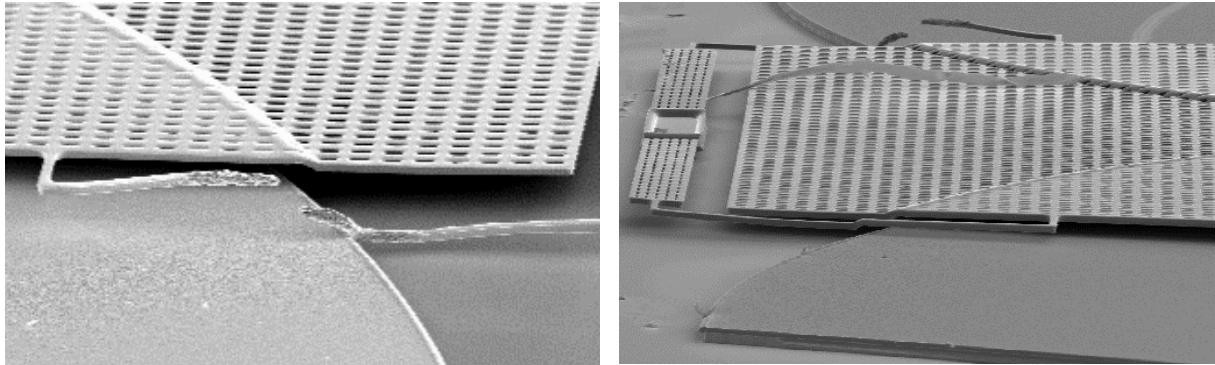
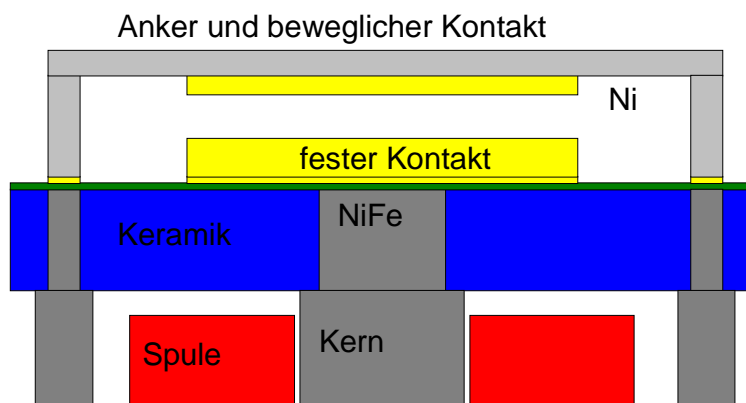


Abbildung 2.26: Die konforme Abbildung des perforierten Kontaktes an den Kanten der festen Kontakte kann zu Verklebungen des beweglichen Kontaktes bei thermisch bedingter Ausdehnung führen. Es treten ferner Ausfälle des beweglichen Kontaktes durch Überlastung der Federstruktur an Kanten der festen Kontakte auf.

- Federstrukturen dürfen nicht über Bereichen der festen Kontakte liegen, um Verschmelzungen zu vermeiden (Abbildung 2.22).
- Eine Topographie des beweglichen Kontaktes, die die festen Kontakte abbildet, ist hinsichtlich thermisch bedingtem Verkeilens zu vermeiden. Dies bedeutet, dass die festen Kontakte bei der Herstellung keinesfalls über ihre Mikroform hinaus wachsen dürfen. Dadurch lässt sich ferner die Ausbildung eines Linienkontaktes an den Kanten vermeiden (Abbildung 2.26).
- Als Material für den Anker kann NiFe statt reines Ni verwendet werden, um die magnetische Leitfähigkeit zu verbessern und die benötigte Steuerleistung im Antrieb zu reduzieren. Wie die Simulationen zeigen, ist die Dicke des Ankers dabei zu maximieren.
- Auf die Perforation des beweglichen Kontaktes (Abbildung 2.26) kann verzichtet werden, um den Widerstand zu vermindern. Zur Freilegung bzw. Entfernung der Opferschicht genügen Ätzlöcher in Abstand von einigen 100µm.
- Der bewegliche Kontakt soll mit einer leichten konvexen Biegung von den festen Kontakten weg versehen werden, um Belastungen an den Kanten des beweglichen Kontaktes zu vermeiden (Abbildung 2.25).
- Die elektrische Kontaktierung kann mit rückseitiger Durchkontaktierung des Substrates realisiert werden. Der Zuleitungswiderstand kann so durch die hohe Querschnittsfläche reduziert werden. Bei den vorliegenden Kontakten muss der erforderliche Querschnitt bei der begrenzten Dicke der Schichten durch die große Breite der Kontakte erkauft werden.

- Es sollten nach Möglichkeit isolierende Substrate wie Keramik verwendet werden, die magnetisch leitende Durchkontaktierungen aufweisen, um den magnetischen Widerstand, der sonst durch den Spalt in Höhe der Substratdicke entsteht, zu minimieren (Abbildung 2.27).
- Die Simulationen zeigen, dass die Bauhöhe für den Spulen-Kern-Aufbau auf 3mm reduziert werden kann. Bei zusätzlicher Optimierung der Anpassung von Mikrokontakt an die Antriebsseite lässt sich aus den Rechnungen die Steuerleistung auf bis zu 100mW vermindern.



bisheriger Testaufbau mit Silizium-Chip

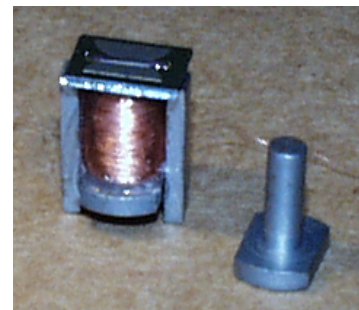


Abbildung 2.27: (links) Konzept für Optimierung der Anpassung von Antriebsseite und Kontaktchip mittels magnetisch leitender Durchkontaktierung des Substrates zur Reduzierung des magnetischen Widerstandes im Magnetkreis

(rechts) bisheriger Testaufbau ohne Optimierung der Bauhöhe, des Magnetkreises und Kontaktchips

2.2.1.7 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Es konnten erfolgreich Kontaktmuster ohne integrierten Antrieb hergestellt werden, die für die Charakterisierung der eingesetzten Materialien geeignet waren. Die prinzipielle Prozessfolge insbesondere die kombinierte Opferschichttechnologie mit Lack und Kupfergalvanik konnte etabliert werden. Für eine Verbesserung der Prozessfolge würde man hier Planarisierungsschritte einfügen wie z.B. Polieren. Es zeigten sich jedoch Schwierigkeiten bei der Beherrschung der mechanischen Spannungen in den abgeschiedenen Schichten. Dies bedeutet, dass die Coatingmaterialien nicht beliebig einsetzbar waren. Für den Einsatz von Ag war es notwendig, den Elektrolyten zu modifizieren, da sich aufgrund des hohen pH-Wertes die Lackformen als nicht stabil im Elektrolyten herausstellten. Insbesondere bei AuCo und PdNi waren die Spannungen und Verbiegungen im beweglichen Kontakt sehr stark ausgeprägt, die eine einwandfreie Funktion verhinderten. Die begonnenen Optimierung mit NiFe-Elektrolyten für die Verbesserung der magnetischen Leitfähigkeit konnten hinsichtlich der Stressreduktion nicht beendet werden.

Die Schaltversuche an den Kontakten waren angesichts der Schaltzeiten unter 1ms, Schaltlasten bis 2A und dem prellfreien Verhalten vielversprechend. Die Zahl der untersuchten Schaltzyklen bei 50Hz blieb jedoch auf einige 10^4 Zyklen begrenzt. Langzeit- und Verschleißuntersuchungen konnten nicht durchgeführt werden, so dass die Charakterisierungen letztlich nicht umfassend sind. Die ersten Untersuchungen zur Wärmeentwicklung stellen trotz der positiven Ergebnisse daher nur einen Anfang zur Bewertung der Kontakte dar.

Aus der Notwendigkeit, die galvanisch abgeschiedenen Materialien auf ihre Kontakteigenschaften zu untersuchen, entstand schließlich das Konzept für die Realisierung eines Hybridrelais. Es wurden die Fehlermechanismen bzw. die Optimierungsmöglichkeiten beim Design, bei der Herstellung der Kontakte sowie dem Gesamtkonzept erkannt. Auch die Ergebnisse der Simulationen zur Optimierung der Antriebsseite sind erfolgversprechend für eine technische Realisierung.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen erscheint der Nachweis der technologischen Durchführbarkeit eines Mikrorelais für Lasten über 1A im hybriden Aufbau mit mikrogalvanisch hergestellten Kontaktsystemen und traditioneller elektromagnetischer Antriebstechnik gelungen. Für eine Weiterführung des Konzeptes ist jedoch hinsichtlich mechanischen Spannungen noch Handlungsbedarf bei der Beherrschung der galvanischen Abscheidungen für Kontakt- und Funktionsschichten zu sehen. Das Konzept konnte im Projekt zugunsten der Konzentration auf die integrierte Lösung nicht bis zur Prototypenstufe weitergeführt werden. Die Voraussetzungen für eine Umsetzung des Konzeptes bei einer Neuauflage der Thematik ist aus technologischer Sicht bei Aufgreifen der Optimierungsansätze von diesem Stand aus ohne weiteres möglich.

Im Hinblick auf ein integriertes Mikrorelais war der nächste Schritt im Projektverlauf nun die Verbindung des galvanisch hergestellten Kontaktsystems mit einem geeignetem integriertem Aktuator.

2.2.2 Integriertes Mikrorelais

Nach der Charakterisierung der Kontaktmaterialien und den Schaltversuchen an Kontaktsystemen ohne integrierten Antrieb galt es nun den integrierten Aktuator für die Anforderungen der Zielanwendung zu realisieren. Im folgenden werden der Projektverlauf und die Ergebnisse dargestellt.

2.2.2.1 Konzept zum integrierten Mikrorelais

Das generelle Konzept zum Aufbau des integrierten Mikrorelais ist in Abbildung 2.28 dargestellt.

Kontaktierung von der Rückseite
 geringer Zuleitungswiderstand

First-level package durch
Deckelung auf Waferlevel

- planare Bondflächen
- mech. und elektr. S chirmung
- definierte Balkenauslenkung

Verbindung auf Platine

- geringe Bauhöhe

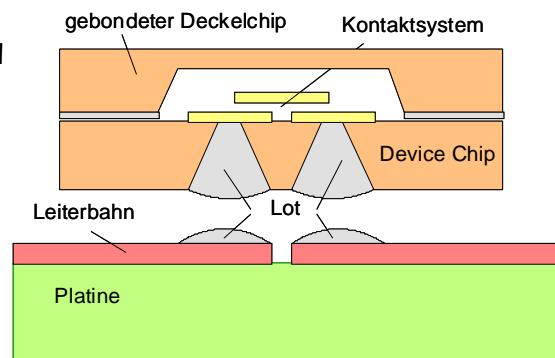


Abbildung 2.28: Systemkonzept zur Realisierung eines integrierten Mikrorelais

Die Ergebnisse der Schaltversuche zum Kontaktsystem ohne integrierten Aktuator zeigten, dass Dauerlasten von mehr als 1A durchaus möglich sind und dies ohne nennenswerte Erwärmung der Kontaktflächen. Der erforderliche Leitungsquerschnitt wird allerdings bei begrenzter Schichtdicke auf einige 10µm nur durch Dimensionierung in die Breite erzielt. Daher sah das Gesamtkonzept eine Kontaktierung von der Rückseite des Chips vor. Der Zuleitungswiderstand und die Kontaktflächen ließen sich gegenüber der Kontaktsysteme ohne integrierten Antrieb reduzieren. Die Realisierung dieser Durchkontaktierung wäre technologisch mit Siliziumsubstraten möglich, aber mit hohem Aufwand verbunden. Die Verwendung von isolierenden Substraten war für die Umsetzung eher zu favorisieren. Die rückseitige Kontaktierung versprach weitere Vorteile hinsichtlich planarer Bondflächen für ein First-Level-Packaging auf Waferlevel mittels Waferbonden. Der Deckel stellt einerseits einen mechanischen Schutz gegen Partikel dar. In diesem Deckel wäre zudem eine elektrische Schirmung gegen Störeinflüsse möglich durch einfache Metallbeschichtung des Deckelwafers in der Kavität und auf der Bondseite bei elektrischer Kontaktierung auf definiertem Potential. In Verbindung mit dem angestrebten elektrostatischen Abrollaktuator sollte der Deckel ferner als definierter Anschlag für den geöffneten Zustand fungieren. Der SMD-fähige Gesamtaufbau versprach eine sehr geringe Bauhöhe von nur einigen mm.

2.2.2.2 Auswahl eines Aktuatorprinzips

Die Auswahl des Aktuatorprinzips musste gegenüber den Vorstellungen zu Beginn des Projektes angesichts der Spezifikationen überdacht werden. Der Anforderung hinsichtlich Lasten von 5A und mehr standen Aktuatorprinzipien mit hohen Steuerleistungen entgegen. Andererseits wurden schätzungsweise Kontaktkräfte von mehr als 10mN benötigt. Somit wurden die zur Verfügung stehenden Aktuatorprinzipien für die Anforderung im Projekt neu bewertet.

	elektrostatisch	thermisch	elektromagnetisch
Kontaktkraft	☹	☺	☹
Flächenbedarf	☹	☺	☹
Dynamik	☺	☹	☹
Verlustleistung	☺	☹	☹
		(sofern monostabil)	
Aufbau & Beispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Biegebalken (einseitig / beidseitig) • Abrollantrieb • Plattenkondensator (out of plane) • Interdigitalstruktur 	<ul style="list-style-type: none"> • Biegebalken (einseitig / beidseitig) • Membrane • bistabile Balken 	<ul style="list-style-type: none"> • hybrid: Magnet, Spule • integriert: Planarspule Spirale, Mäander • 3D-Spule mit Kern

weitere Ansätze: piezoelektrisch, Formgedächtnismaterialien

=> Berücksichtigung bei Bewertung und Auswahl für Mikrorelais:
Zielanwendung und technologischer Aufbau

Abbildung 2.29: Einordnung von Antriebsprinzipien in der Mikrosystemtechnik für Mikrorelais

Das thermische Prinzip wurde verworfen trotz der am höchsten zu erwartenden Kräfte und Stellwege wegen der ebenfalls hohen zu erwartenden Steuerleistung, die zusätzlich zu den Wärmeverlusten in den Zuleitung und der Kontaktstelle zumindest bei monostabilen Strukturen auftritt. Beim thermischen Aktuator musste von einer thermischen Querempfindlichkeit auf Wärme aus anderen Quellen ausgegangen werden. Bedenken zur Langzeitstabilität bei dauergeheizten Systemen waren zu berücksichtigen. Den wichtigsten Einwand stellte die im Vergleich langsamste Schaltdynamik dar, insbesondere im Hinblick auf die Forderung nach schnellem Öffnen, um Schaltfunken zu vermeiden.

Beim elektromagnetischen Prinzip stand, wenn auch in geringerem Maße, die benötigte Steuerleistung zur Felderzeugung entgegen. Die Erzeugung von ausreichend starken Magnetflüssen mit Mikrospulen und die Integration von magnetischen Materialien für die Flussführung wurde als aufwendig eingeschätzt. Dennoch wurde dieser Ansatz verfolgt, der sich zunächst auf die Optimierung von Planarspulen konzentrierte, welche bei der Firma Robert Bosch GmbH durchgeführt wurde.

Gleichzeitig wurde ein elektrostatisches Prinzip favorisiert trotz der nur niedrigen zu erwartenden Stellkräfte und üblichen hohen benötigten Steuerspannungen von mehr als 12V. Das elektrostatische Prinzip verhindert zwar die direkte Ersetzung klassischer Relais aufgrund der verschiedenen Ansteuerungsart, jedoch waren die niedrigsten Steuerleistungen und die beste Dynamik zu erwarten, zumal die Alternativen nicht erfolgversprechender erschienen.

Für weitere Ansätze wie die Verwendung von Formgedächtnismaterialien galten die gleichen Bedenken wie für thermische Aktuatoren, zumal die prozesstechnische Integration dort als aufwendig zu bewerten ist. Hinsichtlich der Kompatibilität mit den einsetzbaren Prozessen wurde dies auch für integrierte piezoelektrische Aktuatoren gesehen.

Für die Bewertung und Auswahl des Aktuationsprinzips ist entscheidend, welche Realisierungsform gewählt werden kann, so dass für die Realisierung des Mikrorelais für Hochstromanwendungen der elektrostatische Abrollaktor als geeignet erschien trotz der erkannten Risiken, die bei elektrostatischer Aktuation hinsichtlich der Einhaltung der Spezifikationen zur Steuerspannung und zu den Kontaktkräften bestanden.

2.2.2.3 Elektrostatischer Abrollaktor - Funktionsprinzip

Das Prinzip des angestrebten Abrollaktors ist in Abbildung 2.30 dargestellt. Der Aktuator besteht aus einem einseitig fixierten Beigebalken, der sich aufgrund des mechanischen Spannungsgradienten im Schichtaufbau aus der Substratebene herauswölbt. Der Balken ist durch elektrostatische Anziehung zwischen geladenen Elektroden antreibbar, wobei der Balken die eine Elektrode darstellt und sich die Gegenelektrode fest auf dem Substrat befindet. Bei dem Aktuierungsvorgang kann sich der minimale Luftspalt, der sich im geöffneten Zustand am Ort der Fixierung befindet, in Abrollrichtung fortsetzen, wobei dort stets hohe elektrostatische Kräfte wirken können.

Funktionsprinzip

- einseitig fixierter Biegebalken
 - Schichtsystem mit mechanischem Spannungsgradienten
=> Biegung aus der Substratebene
 - elektrostatische Anziehung zwischen geladenen Elektroden
 - minimaler Luftspalt mit hohen Feldkräften setzt sich fort
- ⇒ Vorteil zu Plattenkondensator:
Auslenkung größer als minimaler Luftspalt (Opferschicht)

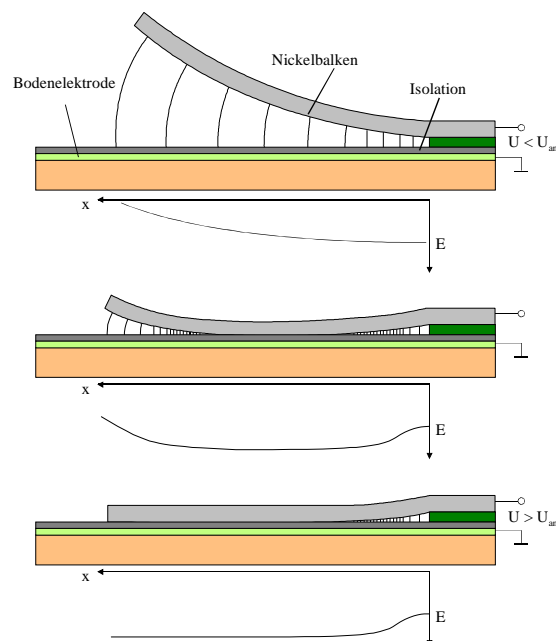


Abbildung 2.30: Funktionsprinzip eines elektrostatischen Abrollaktors

Der Vorteil ist bei diesem Aktuatortyp, dass die maximale Auslenkung, die am Ende des Balkens vorliegt, nicht gleichbedeutend ist mit dem minimalen Luftspalt, in dem effektiv der größte Teil der Feldkräfte wirkt, wie es bei Plattenkondensatoranordnungen der Fall ist.

Vergleichbare Stellwege in Plattenkondensatoranordnungen lassen sich mit dem Abrollaktor bei niedrigeren Aktuonionsspannungen erzielen. Die maximale Auslenkung ist bei gegebener Krümmung des Balken durch die Länge des Balkens definierbar, während die Aktuonionsspannung bei konstanter Krümmung nicht zunimmt.

Wesentlich ist ferner, dass das Schließen eine schnappende Charakteristik besitzt, wobei aber ein tatsächliches Abrollen nur bei gegebener Elastizität des Balken stattfinden kann.

Dieser Aktuatortyp erfüllte in der Bewertung die Randbedingungen für das angestrebte Mikrorelais gegenüber den anderen diskutierten Typen am umfassendsten. Schaltverluste treten im wesentlichen nur beim Umschalten auf. Die gespeicherte Energie im Aktuator steigt mit sinkendem Elektrodenabstand, so dass ausreichende Kontaktkräfte zu erwarten sind. Die Auslenkung lässt sich durch die Länge bei gegebener Krümmung der Balken, die durch die anvisierte Aktuonionsspannung vorgegeben wird, dimensionieren. Die Schaltdynamik insbesondere im Hinblick auf eine schnelle und weite Öffnung zur Vermeidung von Abschaltlichtbögen ist vielversprechend.

Als Herausforderung war jedoch die technologische Umsetzung zu sehen, da die Kontrolle von Schichtspannungen eine anspruchsvolle Aufgabe darstellt.

Die prinzipielle Funktionsfähigkeit dieser Aktuatortypen ist in der Fachwelt mehrfach gezeigt worden, so dass eine generelle Realisierbarkeit nicht in Frage gestellt wurde.

2.2.2.4 Erstes Design zum elektrostatischen Mikrorelais mit Abrollaktuator

2.2.2.4.1 Basis des ersten Designs

Die ersten Designansätze waren geprägt von der Integration des Kontaktsystems mit dem Aktuortyp. Das Kontaktsystem sollte aus zwei festen Kontakten bestehen, die mittels des Abrollaktuators über die bekannte Kurzschlussbrücke miteinander in Kontakt gebracht werden konnten (Abbildung 2.31). Hierfür wurden zwei Aktuatorbalken seitlich vom Kontaktsystem vorgesehen, die über eine Federstruktur isoliert mit dem beweglichem Kontakt verbunden werden sollten.

Angedacht wurden Konzepte zur Realisierung einer Höhentopographie der festen Kontakte, was technologisch möglich ist, aber zunächst aus Prioritätsgründen nicht bearbeitet wurde.

Die Maße der festen Kontaktflächen waren vorgegeben mit 4mm x 2mm. Die Balkenlänge wurde im Layout durch unterschiedliche Ausdehnung des fixierten Bereiches von 3mm bis 4,5mm variiert. Die Balkenbreite betrug etwa 800µm. Es wurden verschiedene Geometrien für die Federstrukturen und den beweglichen Kontakt berücksichtigt.

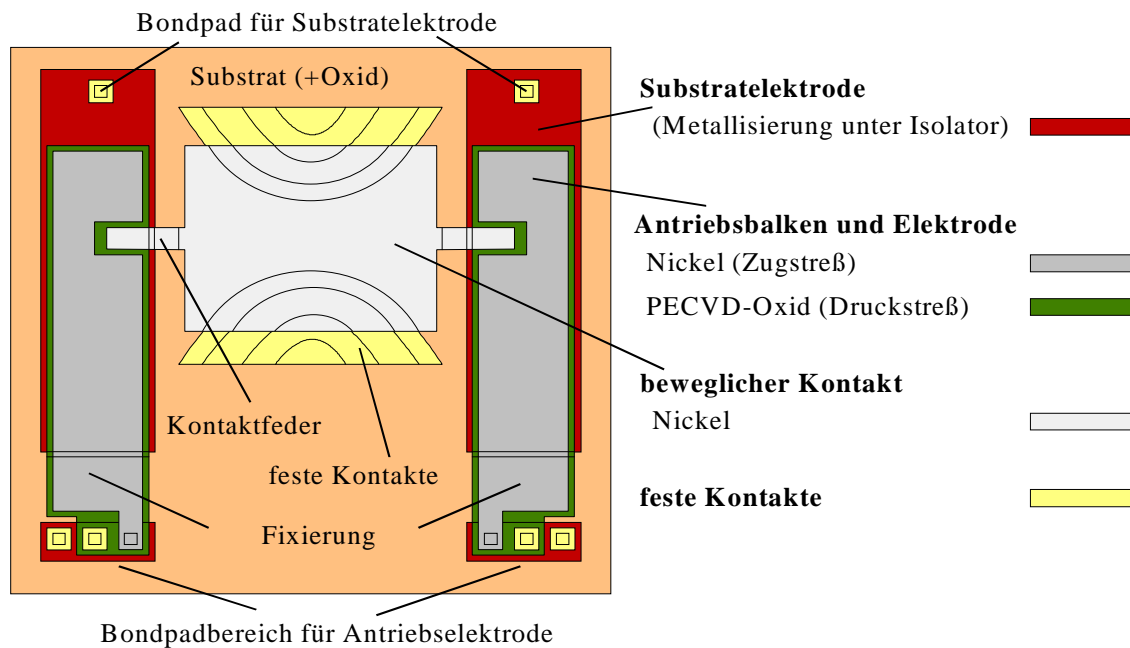
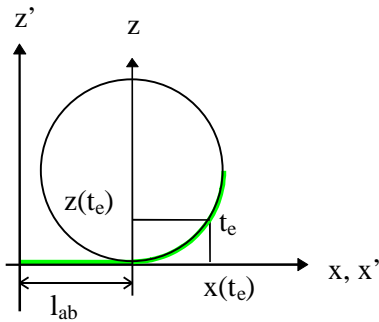


Abbildung 2.31: Konzeptdarstellung des ersten Designs für integriertes Mikrorelais mit elektrostatischem Abrollaktuator

Als nachteilig bei diesem Ansatz stellte sich heraus, dass die Aktuatorbalken aus einem Zweischichtverbund unterschiedlicher Materialien und unterschiedlichen Spannungszuständen bestehen zur Definition der Krümmung. Zusätzlich musste die isolierende Schicht eine mechanische Funktion zur Übertragung der Energie im Aktuerteil als Kraft auf die Kontakte erfüllen. Hierfür wurden zwei Opferschichten benötigt zur Definition eines Kontaktüberhubes.

Auslenkung und Kräfte

Auslenkung



$$z(t_e) = R \left[1 - \cos\left(\frac{L_B - l_{ab}}{R}\right) \right]$$

Abreißkraft

$$F_{Haft} + F_G < F_{ab} = k \cdot z(t_e) = 3 \frac{c_R}{L_B^3} R \left(1 - \cos\left(\frac{L_B}{R}\right) \right)$$

Kontaktkraft

$$W_{K,mech} = \frac{1}{2} F_K z_{\bar{U}}$$

$$* W_{K,el} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} C (U_{an}^2 - U_{ab}^2) = \frac{1}{4} \frac{A_{KA}}{d} \epsilon_0 \epsilon_r (U_{an}^2 - U_{ab}^2)$$

$$W_{K,mech} = W_{K,el}$$

$$\Rightarrow F_K = \frac{1}{2} \frac{A_{KA}}{d} \epsilon_0 \epsilon_r (U_{an}^2 - U_{ab}^2) \frac{1}{z_{\bar{U}}}$$

Elektrische Abrollspannung

Ansatz

Betrachtung der im System gespeicherten mechanischen und elektrischen Energie

$$W_{mech} = \frac{1}{2} \frac{L}{R^2} \int_z \underbrace{E(z)b(z)}_{c_R} (z - z_{nF})^2 dz = \frac{1}{2} \frac{L c_R}{R^2}$$

$$W_{el} = \frac{1}{2} C U^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \frac{A}{d_{eff}} U^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \frac{L_E b_E}{d_{OS} + \frac{d_1}{\epsilon_r}} U^2$$

$$W_{mech} = W_{el}$$

$$\Rightarrow U_{RB} = \sqrt{\frac{c_R d_{eff} L}{R^2 \epsilon_0 L_E b_E}} = \sqrt{\frac{c_R d_{eff} L}{R^2 \epsilon_0 b}}$$

(für $L = L_E$ u. $b = b_E$)

Balkenbiegung bei Mehrschichtsystemen

Biegeradius

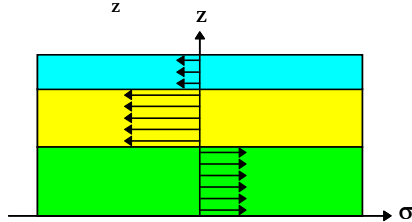
$$R = \frac{c_R}{M_L}$$

Biegesteifigkeit

$$c_R = \int_z b(z) E(z) (z - z_{nF})^2 dz$$

Biegemoment

$$M_L = \int_z \sigma(z) b(z) (z - z_{nF}) dz$$



Neutrale Faser

$$z_{nF} = \frac{\int_z b(z) E(z) z dz}{\int_z b(z) E(z) dz}$$

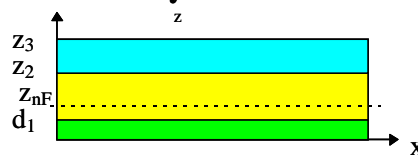


Abbildung 2.33: Analytische Grundlagen zur Beschreibung wesentlicher Größen des Mikrorelais im Abhängigkeitsschema von Abbildung 2.32

2.2.2.4.3 Muster zum ersten Design

Es wurden Muster der Aktuatoren hergestellt ohne Integration des Kontaktsystems. Im Vordergrund stand zunächst die Untersuchung des Antriebsteils zur Charakterisierung der wesentlichen Eigenschaften.

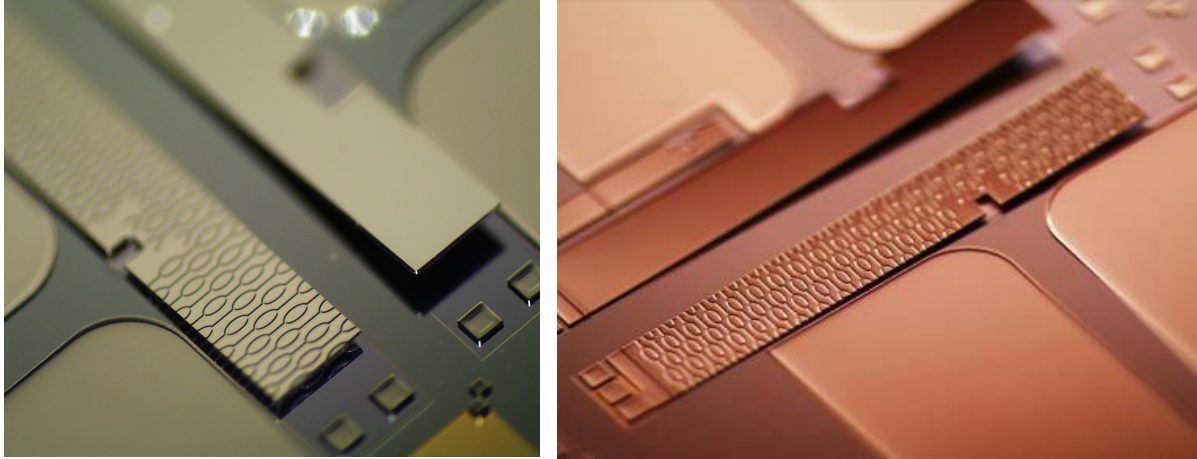


Abbildung 2.34: Aktuatortestbalken im Zweischichtverbund aus PECVD-Oxid und galvanischer Nickelschicht nach dem ersten Design

Die Balken bestanden aus etwa $2\mu\text{m}$ PECVD-Oxid unter einer Nickelschicht von etwa $15\mu\text{m}$. Das PECVD-Oxid wurde mit Druckstress, das Nickel mit Zugstress abgeschieden. So dass sich durch die Prozessführung Auslenkungen am Balkenende zwischen $100\mu\text{m}$ und $500\mu\text{m}$ je nach Designvariante einstellen. Es wurden verschiedene Strukturierungsmethoden untersucht, um die Auslenkung der Balken zu beeinflussen.

Vom Design abhängig wurden Aktuationsspannungen von 30V bis 40V ermittelt. Die Dicke der galvanischen Opferschicht aus Cu betrug etwa $1\mu\text{m}$.

2.2.2.4.4 Bewertung des ersten Designs

Als nachteilig stellte sich die Realisierung der Balkenkrümmung im Zweischichtverbund heraus. Die Stresskontrolle ist mit zwei beteiligten Materialien nur ungenügend durchzuführen. Zudem sind thermisch bedingte Verbiegungen zu erwarten aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten.

Es traten in den Schaltversuchen temporäre Haftungserscheinungen der Aktuatorbalken auf der isolierten Substratelektrode nach Entladung der Kapazität auf. Die Balken lösten sich erst nach undefinierten und unreproduzierbaren Zeiten wieder vom Substrat. Dieses wurde zurückgeführt auf Oberflächeneffekte zwischen dem Isolator auf der Substratelektrode (PECVD-Nitrid) und der unteren Balkenschicht aus PECVD-Oxid. Bei den auftretenden Feldstärken muss davon ausgegangen werden, dass die Isolierschichten bei engem Kontakt mit parasitären Ladungen belastet werden, die ein nachhaltiges Haften verursachen können. Hier müssen die Isolatormaterialien oder deren Kombination neu bewertet werden.

Zusätzlich erhöht das isolierende Oxid zwischen den Elektroden unnötig den effektiven Luftspalt zwischen den Elektroden, so dass die hohen Aktuationsspannungen nachvollziehbar sind. Der Luftspalt bedingt durch die Opferschichtdicke ist ohnehin mit $1\mu\text{m}$ recht hoch für elektrostatische Aktuatoren. Bei dieser Auslegung ist es jedoch stets erforderlich, dass die Opferschicht für den

Aktuator dicker sein muss als für das Kontaktsystem, um einen Kontaktüberhub zu realisieren, der erst die Übertragung der elektrostatischen Kräfte auf die Kontakte möglich macht, so dass der Reduzierung der Aktuatorspannung mit diesem Designkonzept unüberwindliche Grenzen gesetzt waren.

Aus den geschilderten Erfahrungen der Prozessierung und den Messungen ergaben sich wesentliche Ansätze zur Optimierung des Designs, die in Zusammenhang mit den zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Simulationsergebnissen in ein Redesign eingeflossen sind.

2.2.2.5 Technologische Weiterentwicklungen zum Abrollaktuator

2.2.2.5.1 Beeinflussung von Stress in Nickelschichten während des Prozesses

Aus der Bewertung der Aktuatorbalken im Zweischnittverbund wurde die Notwendigkeit deutlich, die Balken aus einem Material ohne PECVD-Schicht herzustellen. Hierfür sollten Testbalken nur mittels Nickelgalvanik hergestellt werden. Im Vordergrund standen zunächst die Möglichkeiten zur Beeinflussung des mechanischen Spannungsgradienten innerhalb der Nickelschicht, um die Balkenbiegung zu definieren. Da der Spannungszustand von Nickelschichten wesentlich von den Abscheidebedingungen während des Galvanikprozesses abhängt, wurde der Einfluss der Stromdichte bei der Abscheidung als ein Parameter unter vielen näher untersucht.

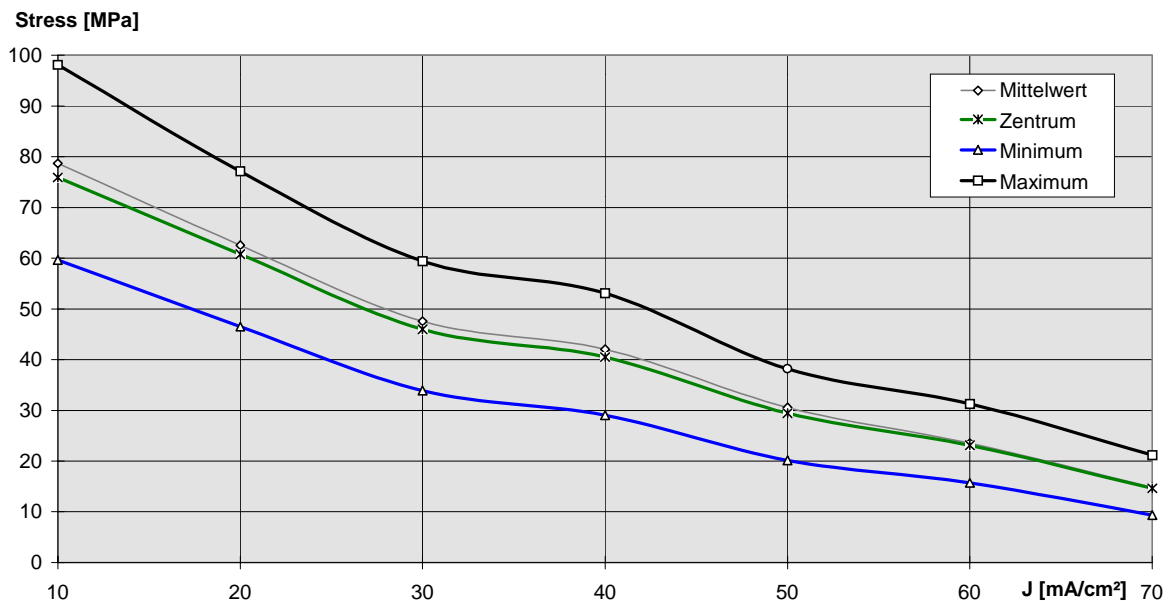


Abbildung 2.35: Abhängigkeit der mechanischen Spannung von der Abscheidestromdichte in ganzflächig galvanisch abgeschiedenen Nickelschichten auf Siliziumsubstraten ermittelt durch Vergleich der Wafergeometrie vor und nach der Abscheidung (Wert im Zentrum des Wafer, Mittelwert, Maximum und Minimum aus verteilten Messpunkten über den Wafer bei einer mittleren Schichtdicke von 19,7µm)

An ganzflächigen Waferabscheidungen wurde mittels Charakterisierung der Wafergeometrie vor und nach der Abscheidung der in Abbildung 2.35 dargestellte Zusammenhang zwischen Abscheidestromdichte und Normalspannung in der Nickelschicht bei dem von uns eingesetztem und etabliertem Nickelprozess gefunden. Dargestellt ist der aus verteilten Messpunkten auf dem Wafer aufgetretene Minimalwert, Maximalwert, Mittelwert und Wert im Zentrum des Wafers. Demnach verschiebt sich die Zugspannung in den Nickelschichten im Bereich von 10mA/cm^2 und 70mA/cm^2 mit zunehmender Stromdichte recht linear zu niedrigeren Werten. Somit ist es möglich durch aufeinanderfolgende Abscheidung mit mindestens zwei unterschiedlichen Stromdichten zielgerichtet Spannungsgradienten zu erzeugen. Dabei sind Spannungsgradienten, die ohnehin über die Schichtdicke bei einer festen Stromdichte entstehen noch zu berücksichtigen.

2.2.2.5.2 Aktuatorbalken aus einer Nickelschicht

Schließlich wurden freigelegte Nickelbalken nach dem vorliegenden Design mit zwei verschiedenen Stromdichten bei einer Gesamtdicke von etwa $15\mu\text{m}$ hergestellt. Diese Testbalken waren nicht antreibbar, wurden also ohne die Substratelektrode prozessiert, um die Anwendbarkeit des Verfahrens zu bewerten.

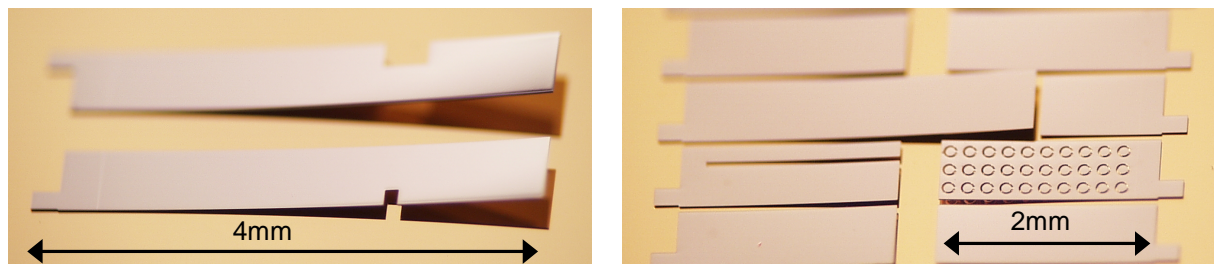


Abbildung 2.36: Nicht antreibbare Nickelbalken mit Stressgradient durch zweistufigen Galvanikprozess mit unterschiedlichen Stromdichten (70mA/cm^2 und 10mA/cm^2)

Die in Abbildung 2.36 gezeigten Balken wurden mit 70mA/cm^2 und 10mA/cm^2 galvanisiert, so dass die untere Lage des Balken eine niedrigere Zugspannung als die obere Lage aufwies. Es stellten sich Auslenkung an den Balkenenden je nach Design zwischen $200\mu\text{m}$ und $300\mu\text{m}$ ein.

2.2.2.5.3 Beeinflussung von Streiß in Nickelschichten durch Temperung

Im Zusammenhang mit der Beherrschung von mechanischen Spannungen in galvanischen Schichten ist bekannt, dass sich der Spannungszustand bei Temperatureinwirkung durch Rekristallisationen signifikant verändern kann. Im Hinblick auf die Einstellung definierter Spannungszustände ist dies bereits bei der Entwicklung des Systems zu berücksichtigen gewesen. An hergestellten beweglichen Testbalken ohne Antrieb wurden am IZM in Berlin Temperungen durchgeführt.

Diese Testbalken bestanden wiederum aus einem Zweischichtverbund von Nickelschichten, die mit unterschiedlicher Stromdichte prozessiert wurden. Untersucht wurden auch Balken, die nur aus jeweils einer der zu kombinierenden Schichten bestand. Sowohl die Zweischichtbalken als auch die Balken der Einzelschichten wurden auf mechanische Eigenschaften vor und nach der Temperung bei der CWM GmbH untersucht.

Wesentlich bei der Temperung waren drei Aspekte. Es sollte ermittelt werden, wie sich der Verbiegungszustand der Aktuatorbalken bei Temperung verändert. Ferner

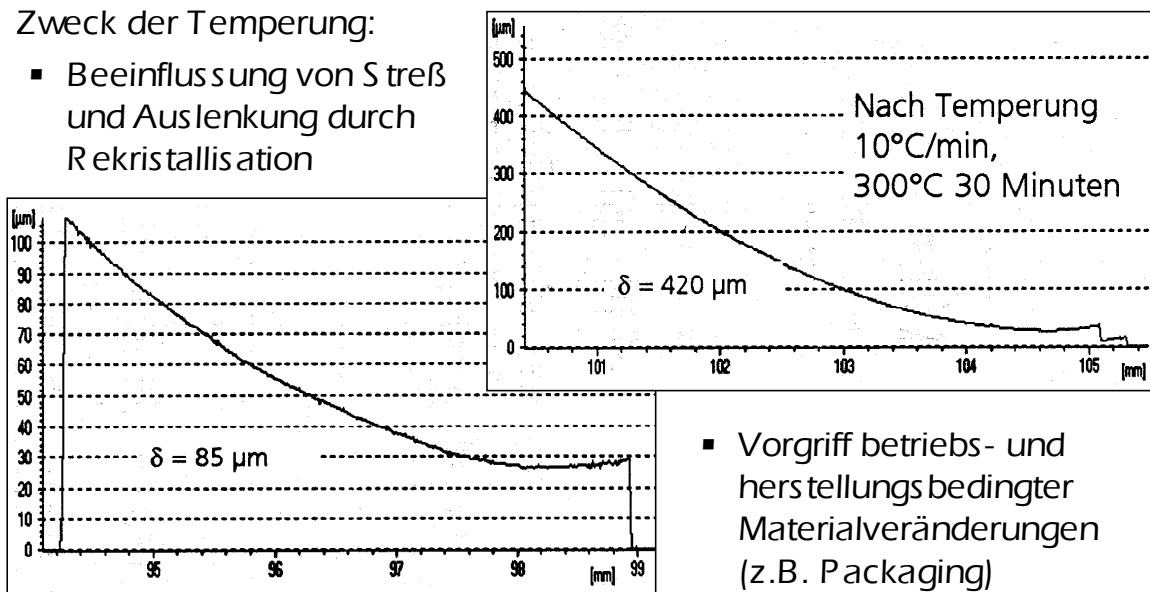
war zu klären, ab welcher Temperungsdauer bei der Haltetemperatur keine wesentlichen Änderungen im Verbiegungszustand mehr auftreten.

Der eine Hintergrund war, ob sich eine Temperung gezielt nutzen lässt, um den Verbiegungszustand der Aktuatorbalken zu definieren. Der andere Hintergrund war, durch die Temperung bei einer maximalen Temperatur vergleichbar mit einem burn-in dafür zu sorgen, dass sich das Gefüge einerseits bei Folgeprozessen mit Temperaturbelastungen wie z.B. beim Packaging andererseits im Betrieb durch Wärmeverluste nicht mehr verändert. Letztlich war auch entscheidend, ob sich die elastischen Eigenschaften durch die Temperung verändern und dies bereits bei der Dimensionierung des Bauteils berücksichtigt werden muss.

Balken aus zwei Nickelschichten

Zweck der Temperung:

- Beeinflussung von Streß und Auslenkung durch Rekristallisation



- Vorgriff betriebs- und herstellungsbedingter Materialveränderungen (z.B. Packaging)

Abbildung 2.37: Auslenkung von Testbalken aus zwei mit unterschiedlichen Stromdichten abgeschiedenen Nickelschichten vor und nach Temperung bei 300°C

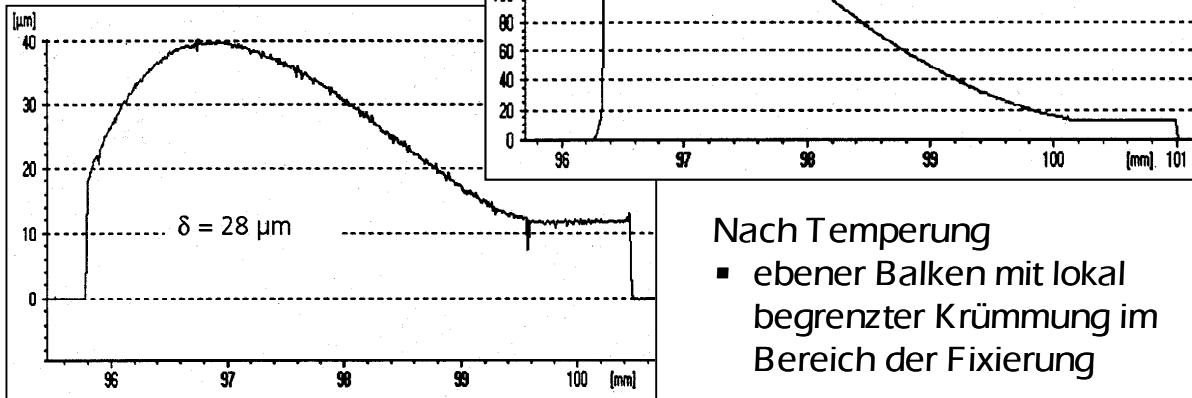
Bei den zweischichtigen Testbalken, die bereits die gewünschte Verbiegung aufwiesen, intensivierte sich nach der Temperung bei 300°C, welche als deutlich über der maximal auftretenden Temperatur bei der Herstellung und im Betrieb angenommen wurde, der Verwölbungszustand erheblich (Abbildung 2.37). Die erzeugten Krümmungen waren deutlich zu hoch, um bei Aktuationsspannungen unter 40V bewegt zu werden.

Die Temperung bei den Balken aus nur einer Schicht, waren dagegen sehr vielversprechend. Im ungetemperten Zustand wiesen die Balken einen örtlich abhängigen und entgegengesetzt zur Wunschrichtung gerichteten Spannungsgradienten auf (Abbildung 2.38). Nach der Temperung waren diese Balken in Wunschrichtung vom Substrat gebogen. Hinzu kommt, dass es möglich war, die Krümmung auf einen Bereich nahe der Fixierung zum Substrat zu begrenzen, was sich im Hinblick auf das Schaltverhalten favorisieren lässt.

Balken aus einer Nickelschicht

Vor der Temperung:

- konkave Balkenbiegung am Balkenende zum Substrat



Nach Temperung

- ebener Balken mit lokal begrenzter Krümmung im Bereich der Fixierung

Abbildung 2.38: Auslenkung von Testbalken von bei einer konstanten Stromdichte abgeschiedenen Nickelschichten vor und nach Temperung bei 300°C

Durch die Ergebnisse der Versuche am IZM konnte weiterhin geschlossen werden, dass die Änderung des Verwölbungszustandes während der Temperung einem stationären Zustand zustrebt und in zyklischen Temperungen stabil ist.

Die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften vor und nach Temperung ergaben, dass sich die Härte der Schichten signifikant verringert, das Elastizitätsmodul dagegen kaum bzw. auf einen gleichmäßigen Wert reduziert wird.

Hinsichtlich der Details zu den Ergebnissen vom IZM und der CWM GmbH muss hier auf die entsprechenden Berichte der Partner verwiesen werden.

2.2.2.5.4 Diskussion des Konzeptes zu Aktuatorbalken aus einer Nickelschicht

Die Realisierung der Abrollaktuatoren aus einem einzigen Material wie Nickel erschien angesichts der Erfahrungen zum ersten Design aus Abschnitt 2.2.2.4 notwendig, wobei Nickel sich aufgrund der mechanischen Eigenschaften und der im allgemeinen verfügbaren Prozesstechnik als Material für elastische Funktionsschichten anbietet. Die Vorteile von elektrostatisch betriebenen Abrollaktuatoren aus Nickel für das integrierte Mikrorelais werden im folgenden zusammengefasst.

Durch den Einsatz von Nickel als einziges Material für den Aktuatorbalken werden thermisch bedingte Verbiegungen aufgrund unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten vermieden. Das Bauteil wird dadurch unabhängiger von der Umgebungstemperatur einerseits und der Wärmeentwicklung im Bauteil andererseits, was in Anbetracht der Schallleistung für das Mikrorelais relevant ist. Bei dem prozessierten galvanischem Nickel kann mit gewisser Unschärfe von gut untersuchten Materialparametern ausgegangen werden durch mehrjährige Erfahrung bei den Partnern aus der Charakterisierung der hergestellten Schichten. Die Reproduzierbarkeit und Kontrolle der Schichteigenschaften ist bei Nickelschichten

weniger kritisch zu sehen als bei PECVD-Schichten. Die Dimensionierung und Herstellung des Aktuators wird durch den Einsatz nur einer Schicht eines Materials in einem Prozessschritt deutlich vereinfacht und präziser.

Da sich gezeigt hat, dass sich durch die galvanische Prozessführung der benötigte Verbiegungszustand beeinflussen lässt, ist die technologische Umsetzung als durchführbar einzuschätzen, zumal weitere Beeinflussungsmöglichkeiten auf den Spannungszustand während der Prozessierung gegeben sind, die im Projekt nicht systematisch untersucht werden konnten. Diese sind auf seiten der Chemie die Elektrolytzusätze oder der Einsatz gänzlich unterschiedlicher Bäder für zweistufige Galvanikschritte. Auf seiten der Abscheidparameter bieten frequenzveränderliche Strom- oder Spannungsformen Einflussfaktoren auf die Definition von Spannungszuständen in den Nickelschichten.

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Temperung unterstützen den Einsatz von Nickel als einzige Funktionsschicht des Abrollaktuators. Es wurde erkannt, dass eine Temperung notwendig ist, um Gefügeänderungen durch nachträgliche Temperaturbelastungen vorzubeugen, sei es in Nachfolgeprozessen wie das Packaging, sei es im späteren Betrieb.

Es konnte gezeigt werden, dass eine Temperung in Abstimmung mit den Herstellungsparametern der Galvanik geeignet ist, den Verwölbungszustand der Balken gezielt zu beeinflussen und zu stabilisieren, wobei die elastischen Eigenschaften des Materials kaum verändert werden.

Bei der Verwendung von PECVD-Schichten als Partner in einem Mehrschichtverbund erscheinen diese Möglichkeiten der Beeinflussung nicht gegeben, zumal die Nachteile wie in Abschnitt 2.2.2.4.4 beschrieben zusätzlich entgegenstehen.

Die Erkenntnisse zur Spannungsbeeinflussung durch Variation der Abscheidparameter und Temperung bildeten die technologische Grundlage für die später durchgeführte Designüberarbeitung.

Der kombinierte Galvanik- und Temperungsprozess konnte nur im Ansatz und nicht systematisch evaluiert werden, so dass Aussagen über die Grenzen und Reproduzierbarkeit nicht zu treffen waren. Die qualitativen Ergebnisse reichten aber aus, um zu einer aussichtsreichen Bewertung im Hinblick auf die spätere Anwendung des Verfahrens für die Realisierung des integrierten Mikrorelais zu kommen.

2.2.2.6 Simulation und Redesign für integriertes Mikrorelais

Auf der Basis der Simulationen, die am IZM durchgeführten wurden, und der technologischen Optimierungsansätze wie in Abschnitt 2.2.2.5 beschrieben, entstand ein Redesign und ein optimierter Technologieablauf für das integrierte Mikrorelais mit elektrostatischem Abrollaktuator.

In Abschnitt 2.2.2.6.1 wird das Designkonzept dargestellt. In Abschnitt 2.2.2.6.2 werden die Simulationsergebnisse des IZM zum ersten Design und dem Redesign zusammengefasst. Hinsichtlich der ausführlichen Beschreibung ist auf den Bericht der Partner zu verweisen.

2.2.2.6.1 Redesign

Das Konzept zum Redesign basierte weiterhin auf dem Systemkonzept mit rückseitiger Kontaktierung und Deckelchip wie in Abschnitt 2.2.2.1 beschrieben und ist in Abbildung 2.39 dargestellt.

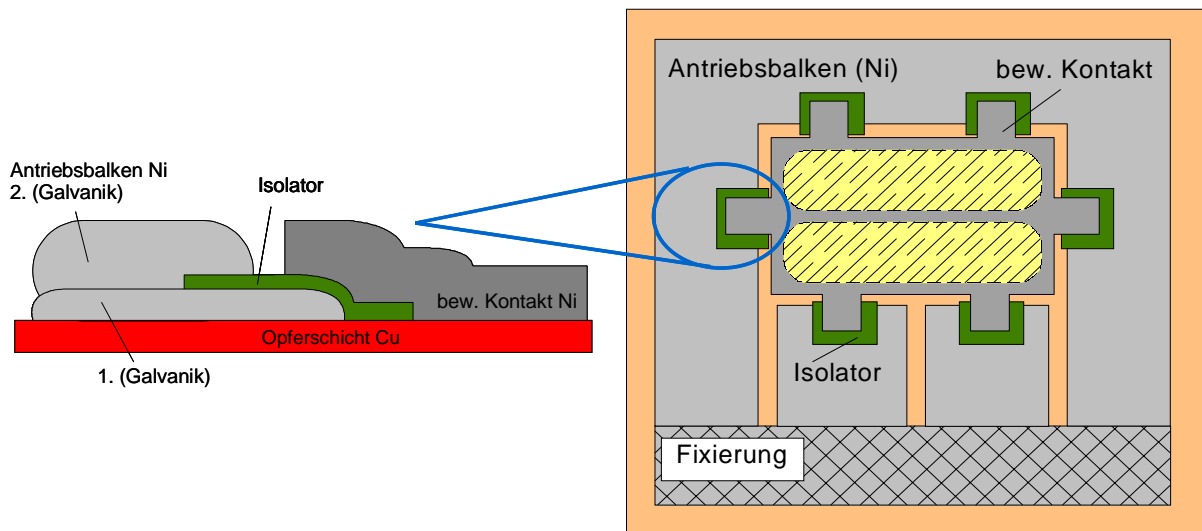


Abbildung 2.39: Konzept zum Redesign des integrierten Mikrorelais mit elektrostatischem Aktuator

Das Kontaktsystem setzt sich aus zwei festen Kontakten auf dem Substrat und dem beweglichem Kontakt zusammen. Der Aktuator besteht aus Nickel und umschließt den Kontaktbereich allseitig, wobei er einseitig fest mit dem Substrat fixiert ist. Die Vorteile der vollständigen Realisierung des Aktuators mit Nickelgalvanik wurden in Abschnitt 2.2.2.5.4 dargelegt. Der Aktuator ist in mehrere Balken unterteilt, um die Querverwölbung über die Breite der einzelnen Balken zu reduzieren. Der bewegliche Kontakt ist mit dem Nickelaktuator von vier Seiten über eine isolierende Schicht verbunden. Die Gegenelektrode auf dem Substrat ist zum beweglichen Balken isoliert, und wird rückseitig kontaktiert (nicht dargestellt).

In diesem Design wurden die Kontaktabmessungen um den Faktor zwei reduziert. Der Zuleitungswiderstand wird bei dem Konzept durch den Querschnitt der rückseitigen Öffnung im Substrat bestimmt, so dass die Kontaktbreite reduziert werden konnte. Die Verbindungspunkte zwischen Aktuator und beweglichem Kontakt wurden allseitig um den beweglichen Kontakt angeordnet. Die Kombination der Nickelschichten im Verbindungsbereich wurde so gewählt, dass der überwiegende Teil der mechanischen Kräfte nicht durch die Isolationsschicht, sondern durch die

Nickelschichten getragen wird. Diese Veränderungen dienten der Erhöhung der Kraftübertragung vom Aktuator auf die Kontakte, deren Notwendigkeit durch die Simulationen gezeigt wurde.

Eine fundamentale Änderung des Designs besteht bei der Opferschicht. Es wurde nur noch eine Opferschicht benötigt, die auf Dicken bis zu 300nm reduziert werden konnte. Erst diese Möglichkeit ließ laut den Simulationsdaten Aktuationsspannungen um 20V erwarten. Es gab hinsichtlich des Überhubes somit keine Abhängigkeit von zwei Opferschichten mehr. Der Überhub entsteht durch Galvanik der festen Kontaktbereiche mit 1µm bis 2µm Dicke nach der Freilegung der Strukturen, ohne die anderen Strukturen zu beschichten. Dadurch stehen die festen Kontaktbereiche um den Betrag der Galvanikdicke aus der Oberfläche des Substrates heraus, die bei der Herstellung des beweglichen Kontaktes zuvor abgebildet wurde.

Die Veränderungen im Design und der Technologiefolge führten zur Vereinfachung der Prozessführung und nach Aussage der Simulationsergebnisse zur Annäherung an die geforderten Zielspezifikationen.

2.2.2.6.2 Simulationsergebnisse zum Redesign des Abrollaktuators

Die Simulationen zum elektrostatischen Mikrorelais wurden am IZM in Berlin bzw. an der TU Chemnitz durchgeführt. Teilergebnisse werden hier nur zusammengefasst dargestellt. Hinsichtlich detaillierter Ergebnisse ist auf den entsprechenden Teilbericht zu verweisen.

Die Simulationen zum ersten Design zeigten, dass die elektrostatischen Kräfte nur ungenügend auf die Kontakte zu übertragen waren. Das Design der Federsysteme war zu diesem Zeit nicht dahingehend optimiert worden. Die Aktuationsspannungen waren ferner deutlich zu hoch. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse und der Erfahrungen bei der Prozessierung der ersten Aktuatoren entstand das Redesign, welches auch zur Optimierung der Technologieparameter verwendet wurde.

In Abbildung 2.40 ist die Topographie des Mikrorelais im angezogenen Zustand dargestellt. Die Fixierung befindet sich links. Unter Nutzung von Symmetrien ist nur eine Hälfte simuliert worden.

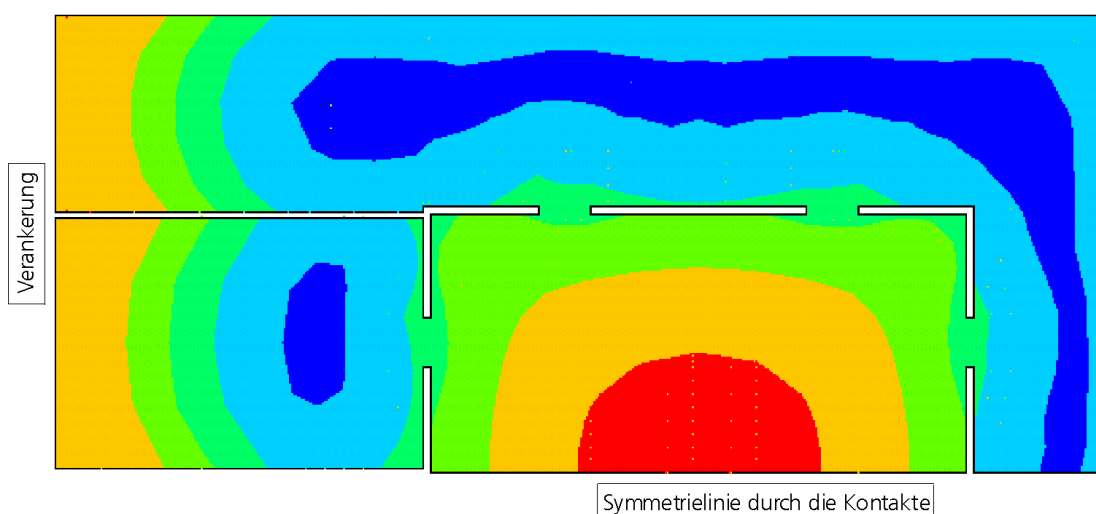


Abbildung 2.40: Verwölbung des integrierten Mikrorelais (Redesign) im vollständig angezogenen Zustand (linke Halbebene und 90° gedreht, vgl. Abbildung 2.39)

Es zeigte sich, dass der Aktuator bei geeigneter Dimensionierung der beteiligten Schichten im angezogenen Zustand um die festen Kontakte herum auf dem Substrat aufliegt. Obwohl dieser Bereich aufgrund der Verwölbung der Nickelbalken nicht vollflächig ist, kann mit dem Redesign somit eine bessere Verteilung der Kräfte auf die festen Kontakte erreicht werden. Dies ist erkennbar an dem Höhenprofil im Kontaktbereich.

In Abbildung 2.41 ist der hysteresebehaftete Verlauf der Kontaktkräfte auf die beiden festen Kontakte in Abhängigkeit einer zyklischen Aktuationsspannung dargestellt. Die Opferschichtdicke beträgt hier 500nm, der Überhub 1,5 μ m.

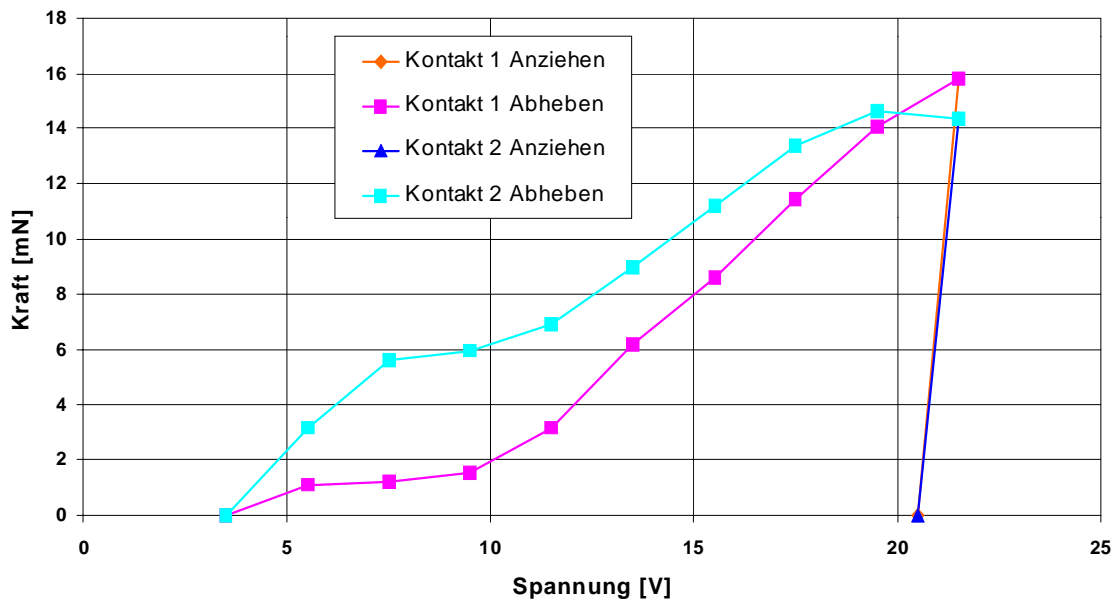


Abbildung 2.41: Numerisch ermittelte Kontaktkraft beim Redesign auf den beiden festen Kontaktflächen in Abhängigkeit der zyklisch veränderten Aktuationsspannung bei optimierten Parametern (Luftspalt 500nm, Überhub 1,5 μ m)

Bei Erhöhung der Aktuationsspannung aus dem geöffneten Zustand erfolgt der Kontaktschluß sehr plötzlich bei Spannungen um 21V. Die maximale Kontaktkraft wird dabei sofort etabliert. Die Kontaktkräfte auf die beiden festen Kontaktbereiche sind nicht gleich groß aufgrund der Unsymmetrie. Als minimale Kontaktkraft sind 14mN zu erwarten. Beim Reduzieren der Spannung zum Öffnen reduziert sich die Kontaktkraft nur schleichend bis Abfallen des Kontaktes bei etwa 4V. Diese Charakteristik ist hinsichtlich der Belastung der Kontakte ungünstig, sofern sich der Kontaktwiderstand über diesen Kraftbereich stark verändert (vgl. Abbildung 2.6).

Als Ergebnis konnte festgestellt werden, dass ausreichende Kontaktkräfte erzielt werden können mit diesem Design. Hinsichtlich der Aktuationsspannungen konnte eine drastische Reduzierung ermöglicht werden, die Einhaltung der Spezifikation von 12V war jedoch nicht zu erreichen bei den gewählten Dimensionen des Gesamtsystems.

Die Ergebnisse gaben dennoch Anlass, die Technologiefolge für das Redesign umzusetzen.

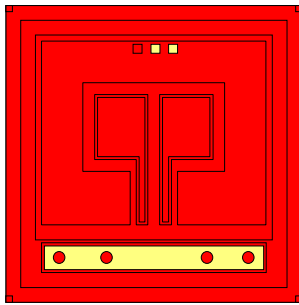
2.2.2.7 Technologie und Umsetzung

Zunächst stand die Entwicklung des Aktuators und Integration mit dem Kontaktsystem im Vordergrund, so dass vorerst auf Siliziumsubstraten prozessiert wurde. Es wurde für die weitere Vorgehensweise zunächst keine Durchkontaktierung vorgesehen, so dass die herzustellenden Systeme aufgrund der vorderseitigen Kontaktierung nur Testsysteme für niedrige Schaltlasten darstellen konnten. Eine rückseitige Durchkontaktierung kann nach erfolgreicher Realisierung der integrierten Schaltfunktion im Prozessflow ergänzt werden.

Im folgenden wird der Technologieablauf für die Testsysteme des Mikrorelais-Redesigns bei vorderseitiger Kontaktierung auf Siliziumsubstraten dargestellt.

<p>Block 1</p>	<div data-bbox="343 712 643 1010"></div> <div data-bbox="730 719 1362 864"><ul style="list-style-type: none">▪ Siliziumsubstrat + thermisches Oxid▪ Haftvermittler Cr + Galvanikstartschicht Au▪ naßchemische Strukturierung (feste Kontaktflächen und Elektrode)</div> <div data-bbox="743 893 1347 1010"></div> <p data-bbox="343 1055 1402 1272">Auf isolierenden Substraten wird die Galvanikstartschicht mit Haftvermittler aufgebracht mittels Sputtern. Die Startschicht samt Haftvermittler werden nasschemisch mittels Fotolackmaske strukturiert, so dass Bereiche für die festen Kontakte, die Substratelektrode und die Aktuatorfixierung elektrisch voneinander isoliert sind. In dieser Ebene werden Sägemarken zur Begrenzung des Chips realisiert.</p>
<p>Block 2</p>	<div data-bbox="343 1346 643 1644"></div> <div data-bbox="730 1352 1310 1464"><ul style="list-style-type: none">▪ Abscheidung Elektrodenisolator (Nitrid)▪ naßchemische Strukturierung (Kontaktflächen und Aktuatorfixierung)</div> <div data-bbox="743 1518 1347 1644"></div> <p data-bbox="343 1682 1402 2011">In Block 2 wird eine ganzflächig aufgebrachte Isolationsschicht nasschemisch mittels Fotolackmaske strukturiert. Hier werden nur die Bereiche der Aktuatorfixierung und der festen Kontakte freigegeben, so dass dort wieder die Startschicht für die Galvanik zugänglich ist. Zusätzlich wird der Randbereich des Chips freigelegt für die angestrebte Verbindung mit einem Deckelchip. Hierfür ist allerdings die Durchkontaktierung des Substrates Voraussetzung, welche nicht im Projekt realisiert wurde. In diesem Design wurden daher zusätzlich Öffnungen für Bondpads vorgesehen.</p>

Block 3

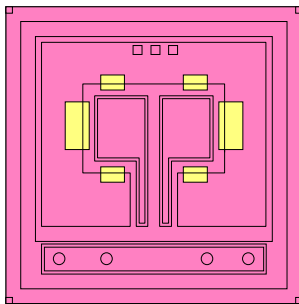


- Haftvermittler Ti und Opferschicht Cu
- naßchemische S trukturierung (Aktuatorfixierung)

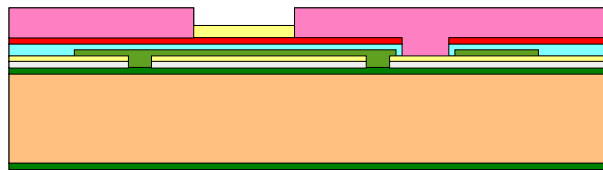


In Block 3 wird die Opferschicht mit Haftvermittler aufgebracht mittels Sputtern oder Bedampfen. Die Opferschichtdicke kann so auf 300nm reduziert werden. Durch nasschemische Strukturierung mittels Fotolackmaske werden nur die Bereiche der Bondpads und der Aktuatorfixierung freigelegt, so dass dort die feste Startschicht für die Galvanik wieder zugänglich ist.

Block 4

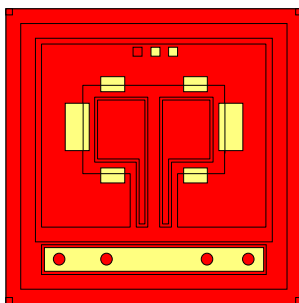


- Galvanik Au 2µm für Verbindung zum beweglichen Kontakt

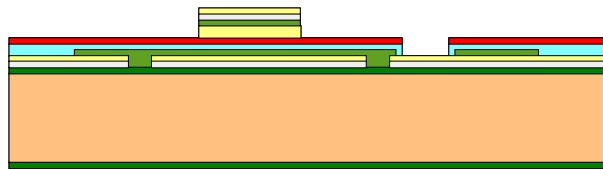


In Block 4 wird mittels strukturierter Galvanik in Fotolackmikroform ein Sockel in den Bereichen der Kontaktfedern abgeschieden. Dieser Sockel entspricht der ersten Galvanik für den Aktuator, wie in Abbildung 2.39 beschrieben. Dies dient der Verstärkung der Verbindungsstellen des Aktuators mit dem beweglichem Kontakt.

Block 5

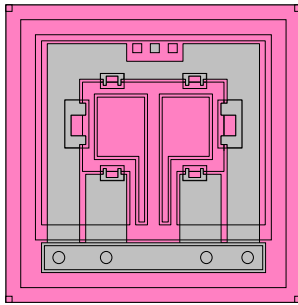


- Abscheidung Isolator (S U8-Lack)
- Haftvermittler und Galvanikstartschicht
- S trukturierung der Verbindungsbereiche

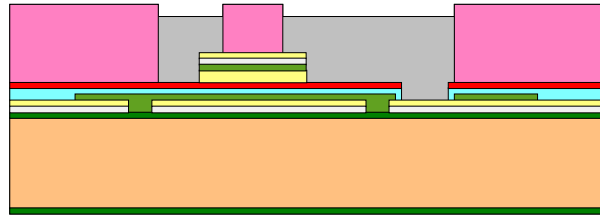


In Block 5 wird ganzflächig ein Isolator aufgebracht. Auf diesem Isolator wird wieder eine Startschicht für Galvanik benötigt. Das Schichtpaket wird strukturiert, so dass der Isolator den Sockel für die Verbindungsflächen an der Kante zum beweglichen Kontakt überlappt. So ist eine elektrisch isolierte Verbindung vom beweglichen Kontakt zum Aktuator möglich.

Block 6

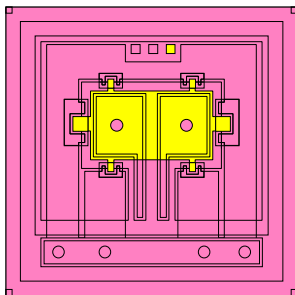


▪ Ni-Galvanik der Aktuatorstruktur

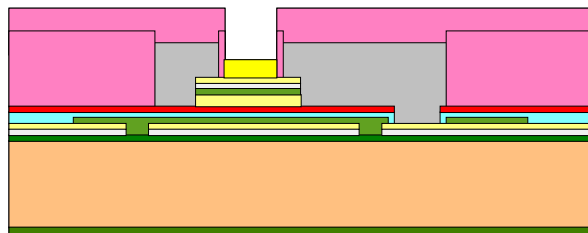


In Block 6 wird der Aktuator galvanisiert in einer Mikroform aus Fotolack. Dabei wird ein Teil auf dem Isolator über dem Verbindungssockels abgeschieden. Die Startschicht auf dem Verbindungsisolator, welche von der Substratstartschicht elektrisch isoliert ist, wird erst während des Galvanikprozesses durch Überwachsen kontaktiert. Die Lackmikroform bleibt für die folgenden Prozesse bestehen.

Block 7

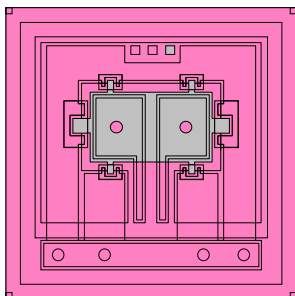


▪ Galvanik Kontaktmaterial

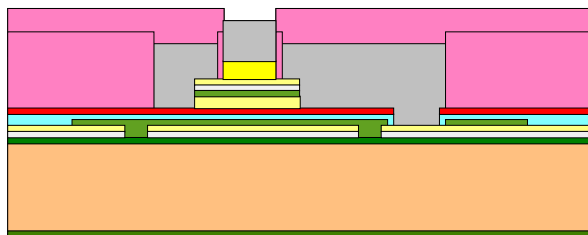


In Block 7 wird eine dünne Lackschicht zur Abdeckung aufgebracht. Es wird nun die Mikroform für den beweglichen Kontakt erzeugt, in der zunächst ein Kontaktmaterial galvanisiert wird.

Block 8

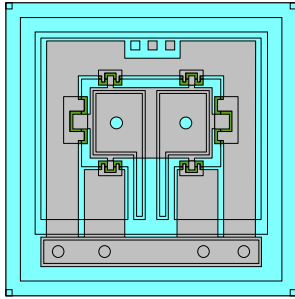


▪ Galvanik beweglicher Kontakt Ni

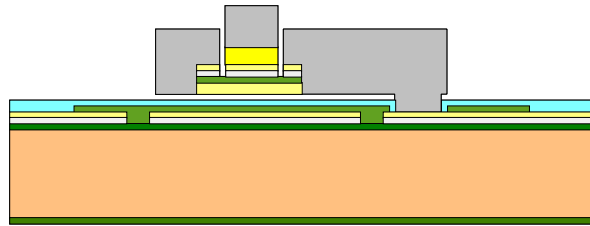


Zur mechanischen Verstärkung wird eine weitere Schicht aus Nickel darüber abgeschieden.

Block 9

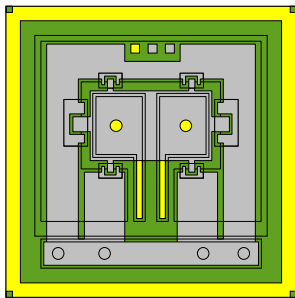


- Strukturierung Startschicht auf Isolator
- Entfernung Opferschicht und Haftvermittler

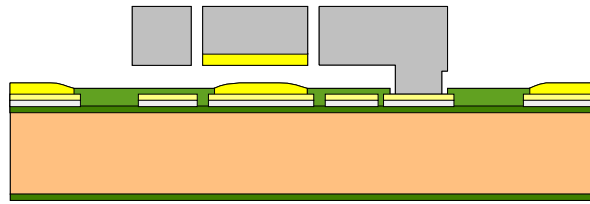


Nach Entfernung der Fotolackschichten wird nasschemisch ohne Fotolackmaske die Startschicht auf dem Verbindungsisolator im Zwischenraum zwischen Aktuator und beweglichem Kontakt entfernt zur elektrischen Isolierung. Im Anschluss wird die Opferschicht samt Haftvermittler nasschemisch durch Unterätzung entfernt. Der Aktuator mit dem beweglichem Kontakt ist nun freigelegt und aktuerbar.

Block 10



- Galvanik der festen Kontakte ($2\mu\text{m}$) nach Freilegung des Aktuators



In Block 10 werden die festen Kontaktbereiche galvanisch mit Kontaktmaterial beschichtet. Hierfür besteht eine leitende Verbindung zum Außenrahmen des Chips, so dass die festen Kontakte und die Rahmen galvanisiert werden können. Erst durch Sägen der Chips werden dann die Kontaktflächen im Rahmenbereich elektrisch voneinander getrennt.

2.2.2.8 Muster

Der Prozessflow gemäß Abschnitt 2.2.2.7 wurde zunächst an Mustern der Aktuatoren ohne beweglichen Kontakt getestet (Abbildung 2.42).

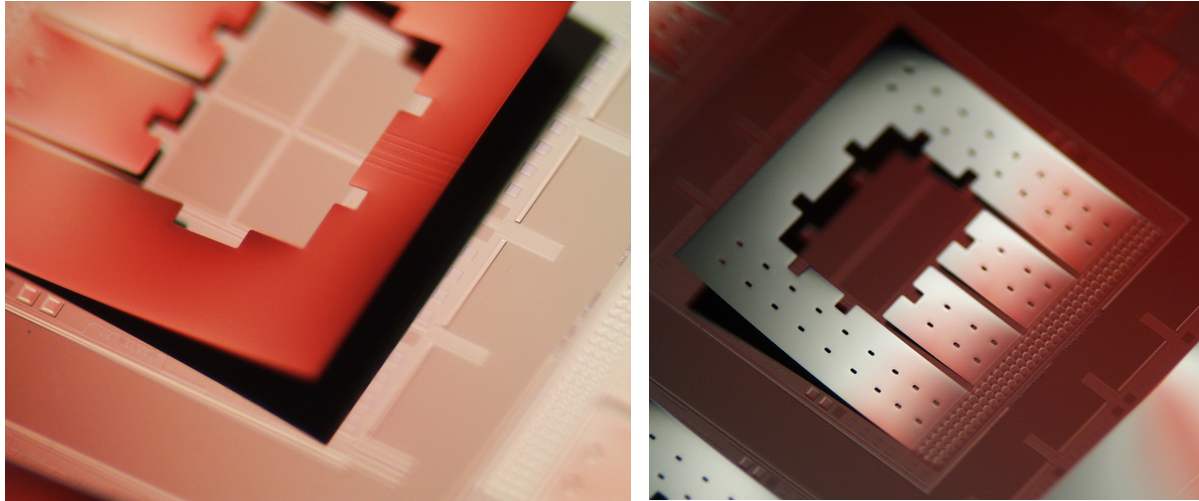


Abbildung 2.42: Muster von Aktuatoren aus Nickel ohne beweglichen Kontakt gemäß des Redesigns zum integrierten Mikrorelais mit elektrostatischem Abrollaktuator; links: Design ohne Ätzlöcher; rechts Design mit Ätzlöchern

Es konnten Aktuatorstrukturen gemäß dem Redesign hergestellt werden. Die Prozessschritte ohne den beweglichen Kontakt erwiesen sich als technologisch umsetzbar.

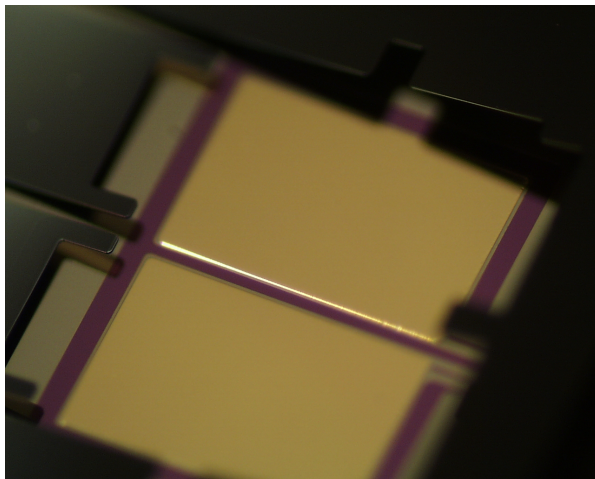


Abbildung 2.43: Bereich der festen Kontakte galvanisiert nach der Opferschichtentfernung mit $2\mu\text{m}$ Au

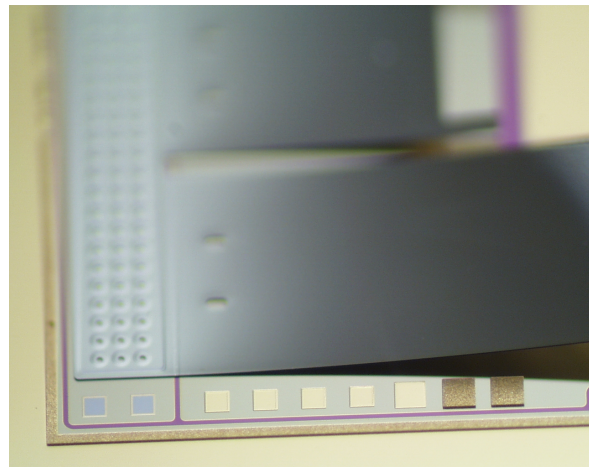


Abbildung 2.44: Bereich der Aktuatorfixierung nach galvanischer Abscheidung der festen Kontakte und Entfernung der Opferschicht; Der Aktuator wurde nicht beschichtet.

Der Prozessschritt der Galvanik der festen Kontakte nach der Freilegung gemäß Block 10 in Abschnitt 2.2.2.7 wurde erfolgreich durchgeführt. In Abbildung 2.43 sind die Bereiche der festen Kontakte mit $2\mu\text{m}$ Gold galvanisiert worden. Der Aktuator wurde dabei aufgrund der elektrischen Trennung nicht galvanisiert, wie in Abbildung 2.44 zu sehen ist.

2.2.2.9 Diskussion der dargestellten Prozessfolge

Die Prozessfolge konnte im Projekt nur für die Herstellung von Aktuatoren ohne beweglichen Kontakt durchgeführt werden. Die Durchführbarkeit dieser Schritte konnte positiv bewertet werden. Bis dahin unbekannte Prozesse wie die Galvanik der festen Kontakte nach der Freilegung der Strukturen zur Einstellung des Überhubes erwiesen sich als durchführbar.

Ebenso die Kontaktierung der zunächst elektrisch isolierten Startschicht auf dem Verbindungsisolator während des Galvanikprozesses für die Aktuatorbalken wurde erfolgreich durchgeführt. Die Realisierbarkeit der isolierten Verbindung von beweglichem Kontakt und Aktuator bei galvanischer Herstellung der Teilsysteme ist damit grundsätzlich belegt.

Die Freilegung der Strukturen ist mit der Technologie ohne größere Ätzlöcher zur Unterstützung der Unterätzung selbst bei Opferschichtdicken von einigen 100nm möglich. Eine Opferschichttechnologie mit dünnen Schichten ist für dieses System fundamental. Im Bereich der Aktuatorfixierung erwiesen sich vereinzelte Ätzlöcher aber als hilfreich.

Bei der Durchführung der Prozessschritte für den beweglichen Kontakt ergaben sich zunächst Schwierigkeiten. Diese lagen zum einen bei der isolierten Verbindung des Aktuators mit dem beweglichen Kontakt. Das zunächst eingesetzte Nitrid als elektrischer Isolator erwies sich als nicht prozessierbar in Zusammenhang mit der gesamten Prozessfolge. Als Isolatormaterial wurde daher auf SU8-Lack ausgewichen. Die Prozessierung dieser Einzelschritte erwies sich als durchführbar. Es wäre allerdings eine Designanpassung im Bereich der Verbindungsstellen nötig gewesen, so dass die Anwendung für das Gesamtsystem in der Projektlaufzeit nicht mehr umzusetzen war.

Das zweite Problem bei der Herstellung des beweglichen Kontaktes lag bei der Galvanik des Kontaktmaterials, die nicht ausreichend spannungsfrei durchzuführen war. Es zeigte sich, dass für den Einsatz der Kontaktmaterialien noch mehr Entwicklungsaufwand hinsichtlich der Prozessstabilität zu betreiben war. Die generelle Durchführbarkeit der Galvanik des beweglichen Kontaktes steht dabei nicht in Zweifel.

Das gezeigte Technologiekonzept basiert im wesentlichen auf der Technologie der Mikrogalvanik. Für die Realisierung eines Mikrorelais werden hohe Anforderungen an die Technologie gestellt, jedoch zeigen sich keine Alternativen im Hinblick auf die Realisierung von elektrischen Kontakten für hohe Lasten. Eine Ausrichtung des technologischen Gesamtkonzeptes auf die Mikrogalvanik erscheint damit als sinnvoll, zumal die generelle Durchführbarkeit durch die erreichten Ergebnisse gezeigt ist. Der Einsatz von Mikrogalvanik als substratunabhängige Technologie erlaubt erst die Durchführung des Konzeptes zur rückseitigen Durchkontaktierung unter Verwendung von isolierenden Substraten. Die dargestellte Prozessfolge ist mit dem erreichten Stand geeignet, für die Realisierung des Mikrorelais auf diesen Substraten mit elektrischen Durchführungen übertragen zu werden.

2.2.2.10 Zusammenfassung von Daten zum Ansatz des integrierten Mikrorelais

- Elektrostatischer Abrollaktuator Bewegungsrichtung: out of plane
 - Herstellung in Oberflächenmikromechanik
 - Niedertemperaturprozesse (max 200°C) mit Schwerpunkt Mikrogalvanik
=> Prozessierung nicht beschränkt auf Si-Substrat
- | | | |
|----------------------------|-----------------------------|-------------|
| o Ni | Balkenfunktionsschicht | 10µm...15µm |
| | beweglicher Kontakt | 25µm...30µm |
| o Au, Ag, AuCo, AuNi, PdNi | Coatingmaterial | 1µm...4µm |
| o PECVD-Nitrid | Isolation Substratelektrode | 200nm |
| o SU8-Lack | Isolation Antrieb/Kontakt | 2µm...3µm |
| o Sputtern/Bedampfen Cu | Opferschicht | 250nm |
- Freilegung und Strukturierungen naßchemisch (Lackmaske)
 - Opferschichttechnologie unproblematisch; nur vereinzelte Ätzlöcher zur Unterstützung der Freilegung nötig
 - 8 Maskenebenen (Antrieb inkl. Kontaktsystem)
 - Chipmaß aktuell 6 x 6 mm²
 - Aktuatorabmessungen 4 x 4 mm²
 - Kontaktierung z. Z. von der Vorderseite => nur geringe Lastströme

Vorgesehen:

- isolierende Substrate mit Durchkontaktierung (Übertragbarkeit der Prozessfolge ist gegeben)
- Konzept zum First-Level-Packaging mit Deckelchip per Waferbonding auf Waferlevel (auch unter Schutzatmosphäre möglich)

2.2.2.11 Zusammenfassung und Bewertung zum integrierten Mikrorelais

In zwei Designdurchläufen konnte der Nachweis der Funktionsfähigkeit des elektrostatischen Abrollaktuators aus galvanischen Schichten geführt werden. Ergebnisse aus Simulationen führten in Zusammenhang mit den Prozessenerfahrungen zu einem erfolversprechenden Redesign im Hinblick auf die Realisierung eines integrierten Mikrorelais für Schaltlasten von einigen Ampere. Die Spezifikation der Aktuationsspannung von 12V für den Automobilbereich war jedoch bisher nicht einzuhalten. Im Hinblick auf die Bordnetzumstellung auf 42V wurde dies nicht als hinderlich für die Weiterverfolgung gesehen.

Der Einsatz von Nickelschichten als Funktionsschicht des Aktuators erwies sich als vielversprechend. Insbesondere die Erkenntnisse aus den Temperungsversuchen sind als grundlegend für eine Fortführung der Thematik anzusehen im Hinblick auf die gezielte Beeinflussung des Verwölbungszustandes und der Vermeidung von Materialänderungen bei der Herstellung und im Betrieb.

Die Einzelprozesse der Technologiefolge konnten erfolgreich durchgeführt werden, die Gesamtprozessfolge konnte vereinfacht und optimiert werden, so dass die Realisierbarkeit des Gesamtsystems gegeben ist. So wurden Teilsysteme wie Aktuatoren ohne beweglichen Kontakt auf Siliziumsubstraten hergestellt.

Ausstehend blieben Muster an elektrisch schaltfähigen Mikrorelais. Dies wurde verhindert durch anfängliche technologische Schwierigkeiten bei der isolierten Verbindung des Aktuators mit dem beweglichem Kontakt. Die gefundene Lösung für die Realisierung führte innerhalb der Laufzeit nicht mehr zur Umsetzung. Daher stehen weiterhin die Charakterisierung des Schaltverhaltens, Dauertests und Ermittlung der maximalen Schaltlast aus, die eine abschließende Bewertung des integrierten Ansatzes mit elektrostatischem Aktuator erst zulassen könnte.

Es bestehen jedoch aussichtsreiche Konzepte zur Umsetzung des Gesamtsystems, die mangels der Muster nicht mehr bearbeitet wurden. Diese sind zum ersten die Realisierung einer niederohmigen Zuleitung bei Übertragung der Prozessfolge auf durchkontaktierte isolierende Substrate. Der zweite Aspekt besteht bei der Realisierung des First-Level-Packagings mit Deckelchip durch Bonden auf Waferlevel. Bei Verbindung dieser Aspekte werden einige Vorzüge für ein integriertes Mikrorelais möglich wie z. B. hohe Schaltlasten bei geringer Bauform, guter mechanischer sowie elektromagnetischer Schutz und Verschluss in Schutzatmosphäre, niedrige Steuerleistung und Einsatz über großen Temperaturbereich. Die Konzepte sind durch den Ergebnisstand in Vorbereitung gebracht worden, so dass ein integriertes Mikrorelais mit elektrostatischem Abrollaktuator bei Wiederaufgriff der Thematik vielversprechend erscheinen und umgesetzt werden kann.

2.3 Technologieentwicklungen

In diesem Abschnitt werden Ergebnisse des Teilvorhabens zu Technologieentwicklungen zusammengefasst, die in den vorigen Abschnitten wegen ihres grundlegenden Charakters nicht erläutert wurden.

2.3.1 Galvanik

Die Erfahrung mit der Mikrogalvaniktechnologie zeigt, dass der Einsatz von Mikrogalvanik zur Realisierung von Mikrosystemen eine fundierte Kenntnis aller an der Prozessführung beteiligten Parameter erfordert. Eine der Bestrebungen auf dem Weg zum Mikrorelais bestand im Rahmen des Konsortiums mit beteiligtem Elektrolythersteller und Partnern im Bereich der Materialcharakterisierung, die mikrogalvanischen Prozessführung für industrielle Anwendungen nutzbarer zu beschreiben.

Die Konstellation des Konsortiums erwies sich als fruchtbar, da im Zusammenwirken mit den Partnern des Projektes die Entwicklungen zu galvanischen Schichten in Anlehnung an das Schema in Abbildung 2.45 durchgeführt werden konnten.

Prozeßkontrolle

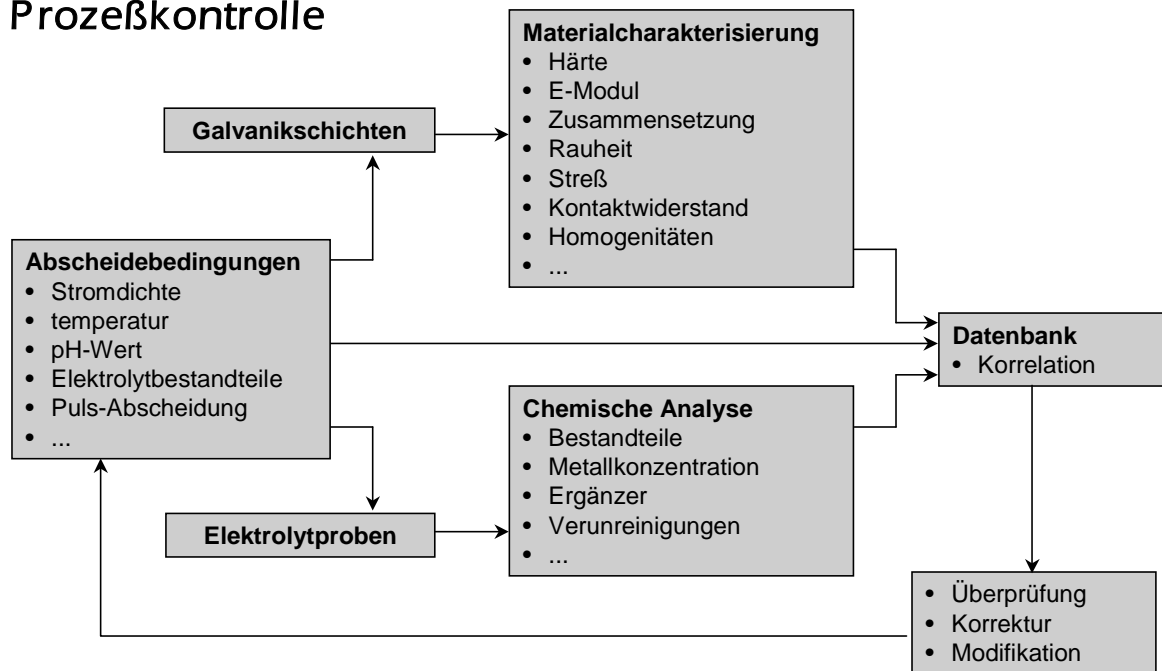


Abbildung 2.45: System zur gezielten Entwicklung und Kontrolle galvanischer Funktionsschichten

Die Korrelation der Materialcharakterisierung an galvanischen Schichten mit den Abscheidebedingungen und den Elektrolyteigenschaften sollte der gezielten Anpassung der Prozessführung auf die Anforderungen der Anwendung für die galvanischen Funktionsschichten dienen.

Die Vorgehensweise diente im Projekt der Durchführung der galvanischen Schichtentwicklung. Das Ziel des Projektes war es jedoch nicht, ein solches System der Prozesscharakterisierung zu etablieren und einem Anwenderkreis nutzbar zu machen. Dies ist ein empfehlenswertes eigenständiges Vorhaben. Die im Projekt durchgeführten Charakterisierungen und Untersuchungen sind aber auch stets in diesen Kontext einzuordnen.

2.3.2 Strömungszelle

Um den Einfluss der Strömung bei der galvanischen Abscheidung auf die Schichteigenschaften zu charakterisieren, wurde am IMSAS eine Strömungszelle entwickelt, die es erlaubt, gezielt laminare Strömungsbedingungen zu variieren und unter Rotation abzuschneiden. Die Strömungsverhältnisse können mit Schwebeteilchen visualisiert werden. Eine quantitative Auswertung der Strömungsgeschwindigkeit kann durch Einsatz eines Grau-Wert-Korrelationsverfahrens, das bei der CWM GmbH entwickelt wurde, durchgeführt werden. Die Korrelation zu Schichteigenschaften wurde erstmals für Nickelabscheidungen durchgeführt.

Die Arbeiten zu dieser Charakterisierungsmethode sind im Anfang begriffen. Die Ergebnisse sind grundlegender Natur und sind nur indirekt in die Entwicklung zum Mikrorelais für die Beeinflussung von Schichteigenschaften eingeflossen.

Die Methode zeigte sich als geeignet, Elektrolyte auf ihre Empfindlichkeit auf Strömungsunterschiede zu untersuchen, so dass hiermit ein wesentlicher Faktor bei der galvanischen Schichtentwicklung erfasst werden kann.

2.3.3 Benetzungsverhalten

Ein gutes Benetzungsverhalten ist wesentlich für den Einsatz der Mikrogalvanik für die strukturierte Abscheidung in Negativformen. Mangelnde Benetzungsfähigkeit kann eine Abscheidung aus dem Elektrolyten in den vertieften Negativformen verhindern oder unkontrollierbar machen.

Es wurden daher am IMSAS Untersuchungen des Benetzungsverhaltens von verschiedenen Elektrolyten auf Wafersubstraten durchgeführt mittels Kontaktwinkelmessungen. Diese Untersuchungen dienten der Bewertung der eingesetzten Elektrolyte für strukturierte Abscheidungen in der Mikrogalvanik und gaben Hinweise auf Entwicklungsbedarf zur Verbesserung der Benetzungsfähigkeit auf Seiten der Elektrolytchemie und der Prozessführung.

2.3.4 Elektrochemische Untersuchungen an Elektrolyten

Hintergrund der elektrochemischen Untersuchungen war es, Möglichkeiten der Einflussnahme auf Schichteigenschaften durch zeitlich veränderliche Abscheidungsparameter zu finden. Zu diesem Zwecke wurden am IMSAS Methoden wie zyklische Voltammetrie, Potentiometrie, Amperometrie, Impedanzanalyse und Messungen an rotierenden Scheibenelektroden zur Charakterisierung der verwendeten Elektrolyte eingesetzt.

Die im Aufbau begriffenen Untersuchungsmethoden stellen aus wissenschaftlicher Sicht einen wichtigen Bestandteil für die Etablierung von galvanischen Prozessen für die Mikrosystemtechnik dar. Es handelte sich um grundlegende Arbeiten zur Modellierung des galvanischen Abscheidungsprozesses. Der Stand der Ergebnisse konnte nur begrenzt in die Entwicklung der galvanischen Schichten für das Mikrorelais einfließen. Für zukünftige Entwicklungen können die Methoden ausgebaut werden, um gemäß dem Schema in Abbildung 2.45 die Möglichkeiten der Einflussnahme auf Schichteigenschaften im Sinne eines Schichtdesigns zu bereichern.

3 Zusammenfassung

Das Projekt MikroRel war motiviert von der Bestrebung, mit den aufkommenden Technologien der Mikrosystemtechnik die Möglichkeit eines Fortschrittsschubes in der Relaistechnik zu nutzen. Vielversprechend waren dabei das Schaltverhalten mit hoher Dynamik und die Reduzierung des Bauvolumens trotz Schaltlasten von einigen Ampere. Die Anforderungen aus der Automobilbranche, die als primäre Anwender aufgrund der attraktiven Stückzahlen angesprochen wurde, waren nicht nur aus technologischer, sondern auch aus kommerzieller Sicht anspruchsvoll. Die Konkurrenz auf Seiten der Leistungshalbleiterbauelemente stellte eine zweite zu berücksichtigende Rahmenbedingung dar.

Die Ergebnisse des Projektes lassen sich wie folgt zusammenfassen.

Als wissenschaftliche Ergebnisse sind die gewonnenen Erkenntnisse zur Technologie der Mikrogalvanik auf dem Weg zur Realisierung eines mikrogalvanisch hergestellten integrierten Mikrorelais zu bewerten. Aus Bedarf im Projekt wurden verschiedene Untersuchungsmethoden eingesetzt, um zu einer nutzbaren Beschreibung und Beeinflussung der Prozesse zu gelangen. Hervorzuheben sind die an Elektrolyten durchgeführten Impedanzanalysen und Modellbildungen sowie die Strömungsuntersuchungen mit einer Versuchszelle zur Beschreibung wesentlicher Mechanismen und deren Wirkung auf die galvanische Abscheidung. Im Mittelpunkt stand die Beeinflussung von mechanischen Spannungen durch verschiedene Parameter der Prozessführung. Ferner sind die durchgeführten Untersuchungen zur Spannungsbeeinflussung von Nickelschichten durch Temperungsprozesse aufschlussreich und weiterführend für die Entwicklung von Aktuatoren mit galvanisch hergestellten spannungsbehafteten Funktionsschichten aus Nickel.

Im Hinblick auf die Realisierung des Mikrorelais wurde zunächst eine Vorausbewertung von Kontaktmaterialien für die Anforderungen des Projektziels durchgeführt. Die in Frage kommenden galvanisch hergestellten Materialien wurden auf relevante Eigenschaften zur Kontaktthematik charakterisiert, wobei die Realisierung von Messungen des Kontaktwiderstandes für Kräfte unter 1mN bei der CWM GmbH hervorzuheben sind.

Im nächsten Schritt wurde mit den charakterisierten Materialien ein mikrogalvanisch hergestelltes Mikrokontaktsystem von 6x6mm² ohne integrierten Antrieb realisiert. Dieses wurde mit einem hybriden Antrieb aus traditioneller Antriebstechnik für Schaltversuche kombiniert. In diesen Schaltversuchen konnten Schaltzeiten von weniger als 1ms, Dauerlasten von mehr als 2A und Schaltlasten von bis zu 1,5A ermittelt werden. Thermografische Untersuchungen, Simulationen zur Kombination des elektromagnetischen Hybridantriebes mit dem Mikrokontaktsystem und Optimierungen zu Konzepten und zur Herstellungssequenz führten schließlich zu einem eigenständigen Ansatz eines Hybridrelais. Dieser Ansatz wurde zugunsten der Konzentration auf ein integriertes Mikrorelais nicht fortgeführt. Die Voraussetzungen für eine Umsetzung des Konzeptes bei einer Neuauflage der Thematik ist aus technologischer Sicht bei Aufgreifen der Optimierungsansätze von diesem Stand aus ohne weiteres möglich.

Der nächste Entwicklungsschritt bestand in der Integration eines Antriebs mit dem Mikrokontaktsystem. Es zeigte sich während des Projektverlaufs, dass eine Neubewertung eines integrierten elektromagnetischen Mikroantriebs notwendig wurde. Die Bewertung fiel im Hinblick auf die Projektanforderungen auf einen elektrostatischen Abrollantrieb. In zwei Iterationen aus Design, Simulation und technologischer Umsetzung entstanden aufgrund der Orientierung auf Elektrostatik und der komplexen Technologie nur Teilsysteme eines Gesamtkonzeptes für die

Realisierung des Mikrorelais. Es wurden zum Nachweis der Schaltfunktionalität des Antriebskonzeptes Mikroschalter unter Beschränkung auf die wesentlichen Technologieschritte hergestellt. Eine Charakterisierung der Testsysteme, die den Anforderungen der Relaisanwendung gerecht wird, konnte über den Funktionsnachweis des elektrostatischen Schaltsystems hinaus nicht mehr durchgeführt werden.

Für den letzten Entwicklungsschritt der Realisierung des Gesamtkonzeptes mit durchkontaktierten isolierten Substraten und First-Level-Packaging mittels Deckelchip im Waferbondverfahren wäre ein weiterer Iterationsschritt nötig gewesen, so dass das Projekt mit dem vorliegendem konzeptionellem und technologischem Stand beendet werden musste.

4 Verwertbarkeit und Nutzen der Ergebnisse

Das Projekt konnte nicht mit der Realisierung eines Demonstrators beendet werden, so dass eine direkte Verwertbarkeit der Projektergebnisse im Sinne einer kommerziellen Produktrealisierung nicht gegeben ist. Die Ergebnisse des Projektes sind von grundlegender und vorbereitender Art. Folgende Aspekte lassen sich differenzieren.

1. Das Projektergebnis zur Thematik eines Mikrorelais kann als Vorarbeit für Folgevorhaben auf dem Gebiet der Mikrorelais betrachtet werden, sowohl für einen Hybridansatz als auch für ein integriertes elektrostatisches Mikrorelais.
2. Die Arbeiten zum galvanisch hergestellten elektrostatischen Abrollaktuator sind nicht auf Mikrorelaisanwendungen beschränkt. Der Einsatz dieses Aktuators ist allgemein für schaltende Anwendungen in der Mikroaktorik denkbar (vgl. [Hel01]).
3. Neben den Teilergebnissen zum Mikrorelais wurden auf wissenschaftlicher Ebene neue Erkenntnisse bei der Technologie der Mikrogalvanik gewonnen, die der Anwendung für industrielle Zwecke und Entwicklungen zu Gute kommen.

Die drei Aspekte werden im folgenden näher erläutert.

1. Potentiale für Folgevorhaben

Die Marktbeurteilung, der Spezialisierungsgrad von Relais sowie die Literaturdurchsicht belegt, dass Relais auch zukünftig nicht vollständig durch Halbleiterschalter ersetzt werden [Ehn96][Gra96][Sie96][Ulb96][5]. Es zeigte sich aber, dass die Anwendung von Mikrorelais im Automobilbereich aufgrund der Rahmenbedingungen derzeit nicht auf die erwartete Nachfrage stößt.

Es kommen nur Anwendungsfelder in Betracht, in denen die dargestellten sich bietenden Vorzüge eines solchen Systems gegebenenfalls höhere Kosten als unter Einsatz von Standardrelais rechtfertigen. Der technologische Fortschritt bei Realisierung des Hybridansatzes oder des integrierten elektrostatischen Mikrorelais ist gegeben, die Relevanz der sich bietenden Vorzüge ist jedoch für eine Marktdurchsetzung gegenüber dem Stand der Technik noch nicht akzeptiert. Die Akzeptanz wird erst steigen, wenn Mikrorelais in ihrer Entwicklungsstufe einen Schritt weiterkommen. Die Möglichkeiten für diese Entwicklungsschritte konnten in diesem Projekt nicht ausgereizt sondern nur aufgezeigt werden.

Die Projektergebnisse sind direkt zur Verwertung für eine Fortsetzung der Entwicklungen geeignet. Sowohl der Hybridansatz als auch das Konzept zum integrierten elektrostatischen Mikrorelais sind nach Beurteilung des Stands zum Projektende technologisch realisierbar. Die Prüfung der ausbaureifen Konzepte unter Aspekten der industriellen Verwertung bei präziser Definition der Einsatzgebiete und Anforderungen ist bisher durch einen breiten Anwenderkreis nicht erfolgt. Diese Prüfung erscheint jedoch vielversprechend. Denn aufbauend auf dem technologischen Stand und auf den Konzepten fehlt lediglich eine Iteration der technologischen Konzeptumsetzung und die konkrete Umsetzung des Packagings, um in Folgevorhaben zu Prototypen zu gelangen, die einen realen Fortschritt darstellen können.

2. Galvanisch hergestellter elektrostatischer Abrollaktuator

Die Entwicklungen zum galvanisch hergestellten elektrostatischen Abrollaktuator sind allgemein in der Mikroaktorik verwertbar. Der Aktuatortyp ist seit längerem in der Fachwelt bekannt. Die Herstellung ausschließlich in Mikrogalvaniktechnologie erfolgte in diesem Projekt jedoch erstmalig. Dies bringt einige Vorzüge mit sich. Die Anwendung dieses Aktuatortyps ist aufgrund der weitgehenden Unabhängigkeit der Herstellungstechnologie vom Substrattyp flexibler in Herstellungsabläufe einzubinden und wird damit einem größerem Feld von Anwendungen nutzbar. Die Herstellung des Aktuators kann auch auf vorprozessierten Substraten erfolgen. Die bis hierhin bekannten Herstellungsmethoden für diesen Aktuator müssen dagegen die Kompatibilität zur Halbleiterherstellungstechnologie strenger berücksichtigen. Der Einsatz nur eines Funktionsschichtmaterials statt bisher einer Kombination unterschiedlich spannungsbehafteter Materialien verspricht einen zuverlässigeren Betrieb unter schwankenden Betriebsbedingungen. Die Möglichkeiten der Spannungsbeeinflussung und Kontrolle sind vielversprechend und im Projekt grundlegend untersucht worden. Die weiteren Entwicklungsschritte dahingehend sind aufgezeigt.

Die erreichten technologischen Fortschritte und Entwicklungspotentiale machen den Aktuator für alle schaltenden Anwendungsfelder in der Mikroaktorik mit Anforderung an große Auslenkungen, niedrige Steuerleistung und hohe Dynamik interessanter als bisher. Geometriedaten und Systemparameter sind weitgehend dimensionierbar und an die Anwendung anzupassen. Beispielsweise bietet der Bereich der RF-MEMS Einsatzmöglichkeiten für den Aktuator als kapazitiver Schalter oder Filterelement mit hoher Kapazitätsänderung oder als metallischer Schalter wie im Projektvorhaben MikroRel, jedoch mit weit geringeren Anforderungen an die Schaltlast.

3. Wissenschaftliche Ergebnisse zur Mikrogalvanik

Die Anwendung eines weiten Spektrums an Charakterisierungsmethoden war einerseits für die Technologie der Mikrogalvanik, und andererseits für die Anwender der Charakterisierungen erkenntnisgewinnend. Das Spektrum lässt sich zu einem System von Methoden für die Entwicklung von mikrogalvanischen Prozessen definieren, das anwendbar für andere Vorhaben ist, deren Bestandteil eine gezielte Prozessführung und Beeinflussung von Schichteigenschaften ist.

Die Zusammensetzung eines Konsortiums aus Anwender der Mikrogalvanik, Elektrolythersteller und Partner für Materialprüfungen an Mikroschichten ist für ein Design von galvanischen Schichten nach ähnlichem Schema wie in Abbildung 2.45 förderlich. Als Ergänzung eines Konsortiums zur Thematik der Mikrogalvanik wären Vertreter aus der Branche der Galvanikanlagenhersteller wünschenswert. Die Zusammenarbeit der fachbezogenen Spezialisten auf den Teilgebieten im Projekt MikroRel erwies sich aufgrund der Teilung der spezialisierten Ressourcen als wirtschaftlich für den Erkenntnisgewinn. Darüber hinaus dienen die Erfahrungen der Kooperation in neuen Vorhaben als Starthilfe für Projektbearbeitungen mit entsprechenden Schwerpunkten.

Die im Projekt angestrebte Systematik bei der Mikrogalvanikentwicklung trägt nicht nur bei beteiligten Partnern des Projektes zur Erhöhung der Qualität, sondern auch bei industriellen Nachfragen im Zusammenhang mit Projektvorhaben zur Erhöhung der Akzeptanz von Mikrogalvanik als zuverlässige Herstellungstechnologie für Mikrosysteme bei und bildet die Grundlage für neue wissenschaftliche und kommerzielle Aktivitäten.

5 Veröffentlichungen

D. Lütke Notarp, M. Becker, A. Menz, W. Benecke, Development Of Electrical Contact Materials In MEMS, 9th Intern. Conf. Modern Materials & Technologies, Cimtec '98, Florence, Italy 14-19th June 1998, Poster Discussion 2

D. Lütke Notarp, M. Becker, W. Benecke, Control of electroplating depositions in MEMS-fabrication, Proc. 3rd Int. Conf. Micro Materials, MicroMat 2000, Germany, Berlin, April 17-19, 2000

M. Becker, D. Lütke Notarp, J. Vogel, E. Noack, V. Großer, W. Benecke, B. Michel, Application of electroplating in MEMS-micromachining exemplified by a microrelay, Proc. 3rd Int. Conf. Micro Materials, MicroMat 2000, Germany, Berlin, April 17-19, 2000

M. Becker, D. Lütke Notarp, J. Vogel, E. Noack, V. Großer, W. Benecke, B. Michel, Application of electroplating in MEMS-micromachining exemplified by a microrelay, 3rd Int. Conf. Micro Materials, MicroMat 2000 (Poster Session (P66)), Germany, Berlin, April 17-19, 2000

M. Becker, D. Lütke Notarp, J. Vogel, E. Kieselstein, J.-P. Sommer, K. Brämer, V. Großer, W. Benecke, B. Michel, Application of electroplating in MEMS-micromachining exemplified by a microrelay, Microsystem Technologies 7 (2001) 4, 196-202

6 Arbeitsgruppen

Verschiedene Arbeitsgruppen beschäftigen sich mit der Thematik von Mikrorelais und Mikroschaltern unter verschiedenen Aspekten. Der angegebenen Liste in Abschnitt 7 und der tabellarischer Übersicht liegt keine Wertung zugrunde. Es wird ferner kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben. Es sind weit mehr Arbeitsgruppen zur Thematik der Mikrorelais und Mikroschalter in der Fachwelt bekannt, so dass die Angaben lediglich dem Einstieg in die Thematik dienen können.

Als Überblick wird im folgenden eine Auswahl von Arbeitsgruppen zusammengestellt.

Auswahl von Arbeitsgruppen zu Mikrorelais

E. Fullin, H. A. C. Tilmans, H. Ziad et al.	Elektromagn. Mikrorelais	CSEM, University of Neuchatel, Schweiz CP Clare, Hasselt, Belgium Imec, Leuven, Belgium
W. P. Taylor, M. G. Allen et al.	Elektromagn. Mikrorelais	Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA
J. Schimkat, H. J. Gevatter, S. K. Hesse et al. L. Kiesewetter H. F. Schlaak, et al.	Elektrost. Mikrorelais mit Abrollaktuator	TU Berlin TU Berlin TU Berlin TU Cottbus (damals) Siemens AG, München
I. Schiele, B. Hillerich et al.	Elektrostat. Mikroschalter mit Abrollaktuator	Fraunhofer IFT, München
E. J. J. Kruglick, S. Kristofer, J. Pister et al.		Sensor and Actuator Center, University of California Berkely, USA
H. Guckel, T. Earles T. Ohnstein et al.	Elektromagn. Hybridrelais	University Wisconsin, USA Honeywell Inc., Bloomington, USA
M.-A. Gretillat, N. F. de Rooij et al.	Integriertes CMOS-kompatibles elektrostat. Mikrorelais	IMT, University of Neuchatel, Schweiz
S. Roth, N. F. de Rooij et al	Elektromagn. Mikrorelais	IMT, University of Neuchatel, Schweiz
M. Adamschik, S. Ertl et al.	Mikrorelais aus Diamant	Universität Ulm
S. Hannoe, H. Hosaka et al.	Elektromagn. Hybridrelais	Interdisciplinary Research Labs, Tokyo, Japan
B. Rogge, J. Schulz, J. Mohr, W. Menz et al.	Elektromagn. Mikrorelais	Forschungszentrum Karlsruhe
J. A. Wright et al.	Elektromagn. Mikrorelais	California, Institute of Technology, Pasadena, USA
P. M. Zavracky, S. Majumber, N. E. McGruer et al.	Elektrost. Mikroschalter	Northeastern University, Boston, USA
H. Matoba et al.	Thermischer bistabiler Schalter	Sharp Coop., Japan
M. Sakata et al.	Elektrostat. Mikrorelais; thermischer Schalter	OMRON Corporation, Kyoto, Japan

Auswahl von Arbeitsgruppen im Bereich RF-Applikationen

S. Zhou, X.-Q. Sun et al.	Microelectronics Research Center, Newark, USA
P. M. Zavracky, S. Majumber, N. E. McGruer et al.	Northeastern University, Boston, USA
J. Y. Park, G. H. Kim, K. W. Chung, J. U. Bu	LG Corporate Institute of Technology, Seoul, Korea
J. H. Park, K. Kang, N. Kang, C. Kim, C. Song, C.-Y. Cheon, Y. Kwon, Y.-K. Kim	Samsung Advanced Institute of Technology, University of Seoul, Seoul National University, Korea
M. Ulm, M. Reimann, T. Walter et al.	Robert Bosch GmbH, Gerlingen Schillerhöhe
J. J. Yao et al.	Rockwell Science Center, California, USA
C. T.-C. Nguyen	University of Michigan, Ann Arbor, USA

Beispiel elektrostatischer Abrollaktuator für Mikrospiegelanwendungen

M. A. Helmbrecht, R. S. Muller et al. ([Hel01])	Sensor & Actuator Center, University of California, Berkeley, USA
---	--

7 Literaturverzeichnis

- [1] Bahnbrechend: Mikrorelais setzt Maßstäbe in puncto Miniaturisierung und Antriebsprinzip, Zeitschriftenaufsatz: Elektronikpraxis, Band 34 (1999) Heft 2, Seite 40-41
- [2] Relais. Marktübersichten: Elektromechanische Relais, Halbleiter- und Photovoltaik-Relais, Zeitschriftenaufsatz: Markt und Technik, (1998) Heft Sonderheft 4/98 e-kompakt, Seite 108-115
- [3] Relais. Marktübersicht: Elektromechanische Relais, Markt und Technik, (1998) Heft 12, Seite 65,67-72
- [4] Vorteil der 'Minirelais' liegt in der Herstellung. Elektromechanische Relais in Mikrosystemtechnik, Markt und Technik, (1998) Heft 26, Seite 48-49
- [5] Georgia Tech fertigt Minirelais in Halbleitertechnik auf Wafer. Winzige Stromschalter sollen Einsatz in Autoelektronik finden, Zeitschriftenkurzaufsatz: Die Computer Zeitung, (1998) Heft 10, Seite 36
- [6] Elektromechanische Relais, Marktübersichten, Markt und Technik (e-kompakt), (2000) Heft 26, S. 69-80
- [7] Relais-technik, Relais zwischen Allocation und Überproduktion, Zeitschriftenaufsatz: Markt und Technik, (2000) Sonderheft Elektromechanik Juli 2000, S. 6-22
- [Ada99] M. Adamschik, S. Ertl, P. Schmid, P. Gluche, A. Flöter, E. Kohn, Electrostatic Diamond Micro Switch, Proc. Transducers '99, Sendai, Japan
- [Ada00] M. Adamschik, P. Schmid, S. Ertl, P. Gluche, A. Flöter, E. Kohn, Performance of High Speed Diamond Micro Switch, Proc. 3rd Int. Conf. Micro Materials, MicroMat 2000, Germany, Berlin, April 17-19, 2000
- [All96] R. Allan, Simplified process is used to make micromachined fet-like four-terminal microswitches and microrelays, Electronic Design, Band 44 (1996) Heft 14, Seite 31-32
- [Ash96] M. Ashauer; A. Czarnowske; K. Hiltmann; W. Lang; H. Sandmaier, Silicon thermal micro relays with multiple switching states, Proc. of Eurosensors X, the 10th European Conf. on Solid-State Transducers, Vol. 4, Leuven, B, Sep 8-11, 1996, Band 10,4 (1996) Seite 1189-1192
- [Bra98] P. Braumann; A. Koffler; K. H. Schröder, The switching behaviour of different silver-tin-oxide materials in automotive relays, ICEC 98, 19th Internat. Conf. on Electric Contact Phenomena, Nuremberg, D, 14-17 Sep, 1998, (1998) Seite 97-103
- [Bru96] D. de Bruyker, J. B. Chevrier, K. Baert, R. Puers, H. Löwe, A Silicon Micromachined Magnetic Actuator Using A Two Layer Electroplating Process, ACTUATOR 96, 5th International Conference on New Actuators, 26-28 June 1996, Bremen, Germany
- [Cas95] F. Castelli, Basic components of digital instrumentation for industry by electromagnetic micro relays, IAS 95, 1995 IEEE Ind. Applications Conf., Conf. Record, Vol. 2, Orlando, USA, Oct 8-12, 1995, Band 30,2 (1995) Seite 1723-1726
- [Che99] R. T. Chen, H. Nguyen, M. C. Wu, A Low Voltage Micromachined Switch By Stress-Induced Bending, Proceedings IEEE MEMS Workshop '99, Orlando, Florida USA, (1999)

- [Dra95] J. Drake, H. Jerman, B. Lutze, M. Stuber, An Electrostatically Actuated Micro-Relay, The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX, Stockholm, Sweden, June 25-29, 1995
- [Dra97] H. Draxler, Elektrische Kontakte für kleine und mittlere Lasten - Grundlagen und Anwendungshinweise; Kontaktverhalten und Schalten, 14. Kontaktseminar, Karlsruhe, D, 24.-26. Sep, 1997, VDE-Fachberichte, VDE-Fachber., Band 51 (1997) Seite 7-19
- [Ear96] T. Earles, P. Mangat, J. Klein, H. Guckel, Magnetic Microactuators For Relay Applications, ACTUATOR 96, 5th International Conference on New Actuators, 26-28 June 1996, Bremen, Germany
- [Ehn96] A. Ehnert, Verdrängen intelligente Leistungsschalter bald Relais?, Zeitschriftenaufsatz: Elektronik Industrie, Band 27 (1996) Heft 10, Seite 62-64
- [Elw95] M. Elwenspoek, M. Weustink, R. Legtenberg, Static and Dynamic Properties of Active Joints, The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX, Stockholm, Sweden, June 25-29, 1995
- [Fis98] K. Fischer; H. Guckel, Long throw linear magnetic actuators stackable to one millimeter of structural height, Microsystem Technologies, Band 4 (1998) Heft 4, Seite 180-183
- [Flu96] J. H. J. Fluitman, Micro Actuator Principles, ACTUATOR 96, 5th International Conference on New Actuators, 26-28 June 1996, Bremen, Germany
- [Ful98] E. Fullin, J. Gobet, H. A. C. Tilmans, J. Bergqvist, A New Basic Technology For Magnetic Micro-Actuators, Proc. IEEE Micro Electro-Mechanical Systems, Heidelberg, Germany, 25-29 January 1998, pp. 143-147
- [Gar96] G. Garus, Ohne Klappern in die Zukunft? Schütz und Halbleiterrelais im Vergleich, Zeitschriftenaufsatz: Elektro Automation, Band 49 (1996) Heft 5, Seite 78,80,81
- [Gra96] A. Graf, Geringere Systemkosten durch Zusatzfunktionen. SIPMOS-Hochstromschalter in der Kfz-Elektronik, Zeitschriftenaufsatz: Siemens Components, Band 34 (1996) Heft 5, Seite 186-188
- [Ger59] L. H. Germer, Electrical breakdown between close electrodes in Air, J. of Applied Physics, Vol. 30, No 1 (1959) 41-47
- [Gre66] J. A. Greenwood, J. B. P. Williams, Contact of nominally flat surfaces, Proc. Roy. Soc. A 295 (1966) 300-319
- [Gre94] M.-A. Gretillat, P. Thiebaud, N. F. de Rooij, C. Linder, Electrostatic polysilicon microrelays integrated with MOSFETs, Proc. MEMS 94, Oiso, 97-101
- [Gre95] M.-A. Gretillat, et al., Integrated circuit compatible electrostatic polysilicon microrelays, J. Micromech. Microeng., 5 (1995), pp. 156-160
- [Gre97a] M.-A. Gretillat, Y.-J. Yang, E. S. Hung, V. Rabinovich, G. K. Ananthasuresh, N. F. de Rooij, S. D. Senturia, Nonlinear Electromechanical Behavior of an Electrostatic Microrelay, International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Chicago, June 16-19, 1997
- [Gre97b] M.-A. Gretillat, Electrostatic Polysilicon Microrelays, Dissertation Universität Neuchatel, Schweiz, 1997
- [Gre99a] M.-A. Gretillat, F. Gretillat and N. F. de Rooij, Relay with Electrostatic Actuation and Metallic Contacts, Proc. Transducers '99, pp. 1280-1283, Sendai, Japan

- [Gre99b] M. A. Gretillat; F. Gretillat; N. F. deRoos, Micromechanical relay with electrostatic actuation and metallic contacts, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Band 9 (1999) Heft 4, Seite 324-331
- [Guc94] H. Guckel, T. R. Christenson, T. Earles, J. Klein, D. Zook, T. Ohnstein, M. Karnowski, Laterally Driven Electromagnetic Actuators, *Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head, South Carolina, June 13-16 1994
- [Guc95] H. Guckel, T. Earles, J. Klein, D. Zook, T. Ohnstein, Electromagnetic Linear Actuators With Inductive Position Sensing For Micro Relay, Micro Valve And Precision Positioning Applications, *The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX*, Stockholm, Sweden, June 25-29, 1995
- [Häl90a] B. Hälg, On a Micro-Electro-Mechanical Nonvolatile Memory Cell, *IEEE Transactions On Electron Devices*, Vol. 37, No.10, pp 2230-2236, October 1990
- [Han94] S. Hannoe, H. Hosaka, H. Kuwano, K. Yanagisawa, Mechanical and electrical characteristics of Ultra-low-force-contacts used in micromechanical relays, *Proc. 17th Int. Conference on Electrical Contacts*, Nagoya 1994, 185-190
- [Han96] S. Hannoe; H. Hosaka, Electrical characteristics of micro mechanical contacts, *Zeitschriftenaufsatz: Microsystem Technologies*, Band 3 (1996) Heft 1, Seite 31-35
- [Has94] E. Hashimoto; H. Tamaka; Y. Suzuki; Y. Uenishi; A. Watabe, Thermally controlled magnetization actuator (TCMA) using thermosensitive magnetic materials, *IEEE Micro Electro Mechanical Syst.*, Oiso, J, Jan 25-28, 1994, (1994) Seite 108-113
- [Has95] E. Hashimoto, Y. Uenishi, A. Watabe, Thermally controlled magnetization microrelay, *8th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators and Eurosensors IX. Part 1 (of 2)*, Stockholm, Sweden, 06/25-29/95
- [Has97] E. Hashimoto; H. Tanaka; Y. Suzuki; Y. Uenishi; A. Watabe, Thermally controlled magnetization actuator for microrelays, *IEICE Transactions on Electronics*, Band E80-C (1997) Heft 2, Seite 239-245
- [Hel01] M. A. Helmbrecht, U. Srinivasan, C. Rembe, R. T. Howe, R. S. Muller, Micromirrors for Adaptive-Optics Arrays, *Proc. 11th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators*, Vol. 2, Munich, Germany, June 10-14, 2001
- [Hes98a] S. K. Hesse, M. Hanke, H. F. Schlaak, Dimensionierung elektrostatischer Mikrorelais-Antriebe, *F&M* 106 (1998) 7-8, S 546-548, Carl Hanser Verlag, München
- [Hes98b] S. K. Hesse, Konzeption, Analyse und Optimierung von elektrostatisch angetriebenen mikromechanischen Umschaltern, *Deutsche Dissertation: (1998)*, TU Berlin
- [Hil97] K. Hiltmann; M. Ashauer; H. Sandmaier; W. Lang, Silicon thermal microrelays with multiple switching states, *Sensors and Actuators, A, Physical*, Band A62 (1997) Heft 1-3, Seite 612-615
- [Hir99] A. Hirata, K. Machida, H. Kyuragi, M. Maeda, A Micromechanical Switch as the Logic Elements for Circuits in Multi Chip Module on Si (MCM-Si), *Proceedings IEEE MEMS Workshop 99*, Orlando, Florida USA, (1999)
- [Hol67] R. Holm, *Electrical Contacts*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, NY, 1967
- [Hos93] H. Hosaka, H. Kuwano, K. Yanagisawa, Electromagnetic Microrelays: Concepts and Fundamental Characteristics, *Sensors and Actuators A*, Vol A40, 41-47 (1994)
- [Hos94] H. Hosaka, H. Kuwano, and K. Yanagisawa, Electromagnetic microrelay: Concepts and fundamental characteristics, *Interdisciplinary Research Laboratories*, Nippon Telegraph and Telephone Corporation, 3-9-11 Midori-cho, Musashino-shi, Tokyo 180 (Japan), 1994

- [Hym99] D. Hyman, J. Lam, B. Warneke, A. Schmitz, T. Y. Hsu, J. Brown, J. Schaffner, A. Walston, R. Y. Loo, M. Mehregany, J. Lee, Surface-micromachined RF MEMS switches on GaAs substrates, International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, Volume 9, Issue 4, 1999, pp 348-361
- [Jud96] J. W. Judy, R. S. Muller, Batch-Fabricated, Addressable, Magnetically Actuated Microstructures, Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head, South Carolina, June 2-6 1996
- [Kim00] J. Kim, C.A. Bolle, R. A. Boie, J. V. Gates, A. G. Ramirez, S. Jin, D. J. Bishop, Integration and Packaging of MEMS Relays, Proc. SPIE Vol. 4019 (2000)
- [Kru98] E. J. J. Kruglick, S. Kristofer, J. Pister. Micronewton Contact Characterization for MEMS Relay, 19th International Conference on Electric Contact Phenomena, Nuremberg Germany, September 1998, pp 53-57
- [Kru99] E. Kruglick, J. Pister, S. J. Kristofer, Lateral MEMS microcontact considerations, J. Microelectromech. Sys., Volume 8, Issue 3, 1999 Pages 264-271
- [Lee99] Jong-Hyun-Lee; Myung-Lae-Lee; Won-Ick-Jang; Chang-Auck-Choi; Jin-Won-Joo, Bistable planar polysilicon microactuators with shallow arch-shaped leaf springs, Micromachined Devices and Components V, 20-21 Sept. 1999, Santa Clara, CA, USA, Proceedings of the SPIE, Band 3876 (1999) Seite 274-279
- [Lew94] J. Lewiner, D. Perino, H. Nishimura, F. Kasano, M. Ichiya, Electrostatic Relay with Electret by Using Micromachining Techniques, Proc. 17th Int. Conference on Electrical Contacts, Nagoya 1994, 193-200
- [Li00] Z. Li, D. Zhang, T. Li, W. Wang, G. Wu, Bulk micromachined relay with lateral contact, J. Micromech. Microeng. 10 (2000)
- [Lin98] M. Lindmayer, J. Paulke, Einfluß der Kontaktgeometrie auf die Lichtbogenzündung bei der Kontakttrennung, ICEC 98, 19th Internat. Conf. on Electric Contact Phenomena, Nuremberg, D, 14-17 Sep, 1998, (1998)
- [Löc95] B. Löchel, A. Maciossek, M. Rothe, W. Windbracke, Micro Coils Fabricated By UV Depth Lithography And Galvanopating, The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX, Stockholm, Sweden, June 25-29, 1995
- [Maj97] S. Majumder, N. E. McGruer, P. M. Zavracky, G. G. Adams, R. H. Morrison, J. Krim, Measurement And Modeling Of Surface Micromachined, Electrostatically Actuated Microswitches, International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Chicago, June 16-19, 1997
- [Mat94a] H. Matoba, C.-J. Kim, R. S. Muller, Fabrication of a Bistable Snapping Microactuator, Micro-system technologies 1994 / 4th International Conference on Micro-Electro-, Opto-, Mechanical Systems and Components, Berlin, October 19-21, 1994
- [Mat94b] H. Matoba, T. Ishikawa, C.-J. Kim, R. S. Muller, A bistable snapping microactuator, Proc. MEMS 94, Osio, 45-50
- [Mat99] R. Mattiuzzo, Technologie-Symbiose: Neue Schaltkonzepte mit Silizium-Mikrorelais in MEMS-Technologie, Zeitschriftenaufsatz: F + M, Feinwerktechnik, Mikroelektronik, Band 107 (1999) Heft 6, Seite 18-20
- [Mil00a] V. Milanovic, M. Maharbiz, A. Singh, B. Warneke, N. Zhou, H. K. Chan, K. S. J. Pister, Microrelays for BatchTransfer Integration in RF Systems, Proc. MEMS 2000, Miyazaki
- [Mil00b] D. C. Miller, W. Zhang, V. M. Bright, Microrelay Packaging Technology Using Flip-Chip Assembly, Proc. MEMS 2000, Miyazaki

- [Mor98] L. Morin; N. B. Jemaa; D. Jeannot; J. Pinard; L. Nedelec; J. P. Mercier, A study of new contacts materials under break arc in automobile area, ICEC 98, 19th Internat. Conf. on Electric Contact Phenomena, Nuremberg, D, 14-17 Sep, 1998, (1998) Seite 89-96
- [Non97] P. Nonhoff-Arps, Klassenkampf. Kupfer kontra Silizium: Trends in der Relais-technik, Zeitschriftenaufsatz: Elrad - Magazin für Elektronik und technische Rechneranwendungen, (1997) Heft 1, Seite 40-44
- [Ono00] Takahito Ono, Dong Youn Sim, and Masayoshi Esashi. Micro-discharge and electric breakdown in a micro-gap. J. Micromech. Microeng. 10 (2000) 445- 451
- [Ost97] P. M. Osterberg, S. D. Senturia, A Test Chip For MEMS Material Property Measurement using Electrostatically Actuated Test Structures, J. Microelectromechanical System, Vol. 6, No.2, June 1997
- [Par00] J. Y. Park, G. H. Kim, K. W. Chung, J. U. Bu, Electroplated RF MEMS capacitive Switches, Proc. MEMS 2000, Miyazaki
- [Par01] J. H. Park, K. Kang, N. Kang, C. Kim, C. Song, C.-Y. Cheon, Y. Kwon, Y.-K. Kim, A 3-Voltage Actuated Micromachined RF Switch for Telecommunications Applications, Proc. 11th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators, Vol. 2, Munich, Germany, June 10-14, 2001
- [Pet79] K. E. Petersen, Micromechanical Membrane Switches on Silicon, IBM J. Res. Develop., Vol. 23, No. 4, 376-385 (1979)
- [Que95] H. J. Quenzer, A. Maciossek, B. Wagner, H. Pott, Surface Micromachined Metallic Microactuator With Buckling Characteristics, The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX, Stockholm, Sweden, June 25-29, 1995
- [Ren97a] H. Ren, Entwurf von Mikrozungen-Aktoren und Realisierung eines bistabilen magnetischen Mikrozungen-Aktors, Deutsche Dissertation: Fortschrittberichte VDI, Reihe 21: Elektrotechnik, Band 233 (1997) Seite 1-160 (160 Seiten, 70 Bilder, 16 Tabellen, 106 Quellen), Düsseldorf: VDI, ISBN 3-18-323321-5
- [Ren97b] H. Ren, E. Gerhard, Design and fabrication of a current-pulse-excited bistable magnetic microactuator, Sensors and Actuators, A, Physical, Band 58 (1997) Heft 3, Seite 259-264
- [Rog95] B. Rogge, J. Schulz, J. Mohr, A. Thommes, W. Menz, Fully Batch Fabricated Magnetic Microactuators Using A Two Layer LIGA Process, The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX, Stockholm, Sweden, June 25-29, 1995
- [Rog96] B. Rogge, J. Schulz, J. Mohr, A. Thommes, Magnetic Microactuators Fabricated By The LIGA-Technique For Large Displacements Or Large Forces, ACTUATOR 96, 5th International Conference on New Actuators, 26-28 June 1996, Bremen, Germany
- [Rot00] S. Roth, C. Marxer, G. Feusier, N.F. de Rooij, one mask Nickel Micro-Fabricated reed Relay, Proc. MEMS 2000, Miyazaki
- [Roy95a] S. Roy, M. Mehregany, Fabrication of electrostatic nickel microrelay by surface micromachining, Proc. IEEE Microelectromechanical Sys. Conference, Amsterdam Netherlands, pp. 353-357 1995
- [Roy95b] S. Roy; M. Mehregany, Design, fabrication, and characterization of electrostatic microrelays, Micromachined Devices and Components, Austin, USA, Oct 23-24, 1995, Proc., SPIE, Band 2642 (1995) Seite 64-73

- [Sak89] M. Sakata, An Electrostatic Microactuator for Electro-Mechanical Relay, Proc. IEEE Workshop on Micro Electromechanical Systems, Salt Lake City, USA, 1989, 149-151
- [Sak99] M. Sakata, Y. Komura, T. Seki, K. Kobayashi, K. Sano, S. Horiike, Micromachined relay which utilizes single crystal silicon electrostatic actuator, Proceedings IEEE MEMS Workshop '99, Orlando, Florida USA, (1999), pp. 21-24
- [Sax98] H. Sax, Leistung mit Köpfchen: 'Smarte MOSFETs' - Leistungsschalter mit integrierter Logik, Zeitschriftenaufsatz: Elektronik, München, Band 47 (1998) Heft 5, Seite 46-48
- [Schie97] I. Schiele, J. Huber, C. Evers, B. Hillerich, F. Kozlowski, Micromechanical Relay with Electrostatic Actuation, International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Chicago, June 16-19, 1997
- [Schie98] I. Schiele, J. Huber, B. Hillerich, F. Kozlowski, Surface micromachined electrostatic microrelay. Sensors and Actuators, A 66 (1998), pp.345- 354
- [Schie99] I. Schiele, B. Hillerich, Comparison of Lateral and Vertical switches for application as microrelays, J. of Micromechanics and Microengineering, (9), 1999, pp (146-150)
- [Schim94] J. Schimkat, L. Kiesewetter, H.-J. Gevatter, F. Arndt, A. Steckenborn, H. F. Schlaak, Moving Wedge Actuator: An Electrostatic Actuator for Use in a Microrelay, Micro System Technologies 94 Conference, Berlin 1994, 989-996
- [Schim96a] J. Schimkat, Grundlagen und Modelle zur Entwicklung und Optimierung von Silizium-Mikrorelais, Dissertation Technische Universität Berlin, 1996
- [Schim96c] J. Schimkat; H. J. Gevatter, Silicon-microrelay with moving wedge actuator, 41. Internat. Wissenschaftlichen Kolloquium, Wandel im Maschinenbau durch Feinwerktech. und Mikrosystemtech., Bd. 1, Ilmenau, D, 23.-26. Sep, 1996, (1996) Seite 256-261
- [Schim96b] J. Schimkat, H.-J. Gevatter, L. Kiesewetter, Gold-Nickel als Kontaktwerkstoff für ein Silizium-Mikrorelais, F&M 104 (1996) 7-8, S. 515-518
- [Schim97a] J. Schimkat, L. Kiesewetter, Neuer Aktuator für Silizium-Mikrorelais - Wie der Wanderkeilantrieb für optimales Schaltverhalten sorgt, Carl Hanser Verlag, F&M 105, (1997), Heft 1-2, S. 38-42
- [Schim97b] J. Schimkat, Das Verhalten elektrischer Schaltkontakte bei Kontaktkräften im Millinewton-Bereich, Kontaktverhalten und Schalten, 14. Kontaktseminar, Karlsruhe, D, 24.-26. Sep, 1997, VDE-Fachberichte, VDE-Fachber., Band 51 (1997) Seite 21-28
- [Schim98a] J. Schimkat, Das Verhalten elektrischer Schaltkontakte bei Kontaktkräften im Millinewton-Bereich, 19th Int. Conf. Electric Contact Phen., ICEC 98, 14 -17 Sept., 1998, Nuremberg, Germany
- [Schim98b] J. Schimkat, Contact materials for microrelays, Proc. MEMS 98, 25-29 Jan. 1998, Heidelberg, Germany, (1998) Seite 190-194
- [Schla96] H. F. Schlaak, F. Arndt, M. Hanke, Switching Characteristics of Silicon-Microrelay with Electrostatic Actuator, Micro System Technol. 96, 5th Internat. Conf. on Micro Electro, Opto, Mechanical Syst. and Components, Potsdam, D, Sep 17-19, 1996
- [Schla98] H. F. Schlaak; F. Arndt; M. Hanke, Switching characteristics of silicon-microrelay with electrostatic actuator, ICEC 98, 19th Internat. Conf. on Electric Contact Phenomena, 19. ITK, 19. Internat. Tagung über Elektrische Kontakte, Nuremberg, D, 14-17 Sep, 1998, (1998) Seite 59-64
- [Sek97] T. Seki, M. Takuya, M. Matsumoto, Thermal Buckling Actuator For Micro Relays, International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Chicago, June 16-19, 1997

- [Sie96] R. Siepmann, Relais - im Kfz gefragt wie nie, Components 33 (1996), S. 82-83
- [Sim96] J. Simon, S. Saffer, C. J. Kim, A Micromechanical Relay with a Thermally-driven Mercury Micro-Drop, Proc. IEEE Microelectromech. Sys. Conf., San Diego, pp. 515-520 (1996)
- [Sim97] J. Simon, S. Saffer; C. J. Kim, A liquid-filled microrelay with a moving mercury microdrop, Journal of Microelectromechanical Systems, Band 6 (1997) Heft 3, Seite 208-216
- [Sun96] X.-Q. Sun, X. Gu, W. N. Carr, Lateral In-Plane Displacement Microactuators with Combined Thermal and Electrostatic Drive, Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head, South Carolina, June 2-6 1996, pp. 152-155
- [Sun98] X.-Q. Sun, K. R. Farmer, W. N. Carr, A Bistable Microrelay Based On Two-Segment Multimorph Cantilever Actuators, Proc. IEEE Micro Electro-Mechanical Systems, Heidelberg, Germany, 25-29 January 1998, pp. 143-147
- [Tam00] T. Tamai, Mechanisms of the low contact resistance properties for Ag-Pd-Mg contacts, Proc. Annual Holm Conf. Electrical Contacts, 2000, Pages 94-101
- [Tay96a] W. P. Taylor, M. G. Allen, A Fully Integrated Magnetically Actuated Micromachined Relay, Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head, South Carolina, June 2-6 1996
- [Tay96b] W. P. Taylor; M. G. Allen, C. R. Dauwalter, A packaging compatible fully integrated micromachined relay, ISHM 96, 1996 Internat. Symp. on Microelectronics, Minneapolis, USA, Oct 8-10, 1996, Proc., SPIE, Band 2920 (1996) Seite 202-207
- [Tay97] W. P. Taylor, M. G. Allen, Integrated Magnetic Microrelay: Normally Open, Normally Closed, and Multi-Pole Devices, International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Chicago, June 16-19, 1997
- [Tay98] W. P. Taylor, O. Brand, M. G. Allen, Fully Integrated Magnetically Actuated Micromachined Relays, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 7, No. 2, pp 181-191, June 1998
- [Thi00] E. Thielicke, E. Obermeier, Microactuators and their technologies, Mechatronics, Volume 10, Issues 4-5, June 2000, Pages 431-455
- [Til98] H. Tilmans, Relais einmal anders, Zeitschriftenaufsatz: Design und Elektronik Themenheft, (1998) Heft 11 Electronica, Seite 24,26-28
- [Til99] H. A. C. Tilmans, E. Fullin, H. Ziad, M. D. J. Van de Peer, J. Kesters, E. Van Geffen, J. Bergqvist, M. Pantus, E. Beyne, K. Baert, F. Naso, A Fully-Packaged Electromagnetic Microrelay, Proc. IEEE MEMS, Orlando, U.S.A., 17 -21 Jan 99
- [Til00] H. A. C. Tilmans, M. D. J. Van de Peer, E. Beyne, Indent reflow sealing (IRS) technique - a method for the fabrication of sealed cavities for MEMS devices, J. Microelectromech. Sys., Volume 9, Issue 2, 2000, Pages 206-217
- [Ulb96] H. Ulbricht, Ohne elektromechanische Relais läuft auch in Zukunft nichts, F&M 104 (1996) 1-2, S 27-31, Carl Hanser Verlag, München
- [Ulm01] M. Ulm, M. Reimann, T. Walter, R. Müller-Fiedler, E. Kasper, Scalability of Capacitive RF MEMS Switches, Proc. 11th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators, Vol. 2, Munich, Germany, June 10-14, 2001
- [Vog98] V. Voganov, N. Belov, S. Terry, Bimetallic Beam Actuators, The 194th Meeting Electrochem. Soc. Inc., Vo 98-2 No 1157, Nov 1-6, 1998

- [Wal00] J. A. Walker, The future of MEMS in telecommunications networks, J. Micromech. Microeng. 10 (2000) R1-R7
- [Wei98] J. Weiser, Switching contacts in relays, Konferenz-Einzelbericht: ICEC 98, 19th Internat. Conf. on Electric Contact Phenomena, 19. ITK, 19. Internat. Tagung über Elektrische Kontakte, Nuremberg, D, 14-17 Sep, 1998, (1998) Seite 15-21
- [Wit98] G. Witter; Z. Chen, Dynamic welding resistance comparisons of silver and silver metal oxides, Konferenz-Einzelbericht: ICEC 98, 19th Internat. Conf. on Electric Contact Phenomena, 19. ITK, 19. Internat. Tagung über Elektrische Kontakte, Nuremberg, D, 14-17 Sep, 1998, (1998) Seite 355-359
- [Wri97] J. A. Wright, Y. Tai, S. Chang, A large-force, fully integrated MEMS magnetic actuator, Proc. Transducers 1997, Chicago, IL, Vol. 2, pp. 793-796
- [Wri99] J. A. Wright, Y.-C. Tai, Magnetostatic MEMS Relays For The Miniaturization Of Brushless DC Motor Controllers, Proc. IEEE MEMS, Orlando, U.S.A, 17 -21 Jan 1999
- [Won00] J.-E. Wong, J. H. Lang; M. A. Schmidt, An Electrostatically-Actuated MEMS Switch for Power Applications, Proc. MEMS 2000, Miyazaki
- [Yam95] N. Yamada, Y. Yokoyama, H. Tanaka, Fabrication Of Wrapped Micro Coils Wound Around A Magnetic Core, The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX, Stockholm, Sweden, June 25-29, 1995
- [Yao95] J. J. Yao, M. F. Chang, A Surface Micromachined Miniature Switch For Telecommunications Applications With Signal Frequencies From DC Up To 4 GHz, The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX, Stockholm, Sweden, June 25-29, 1995
- [Yao00] J. J. Yao, RF MEMS from a device perspective, J. Micromech. Microeng. 10 (2000)
- [Zav97] P. M. Zavracky, N. E. McGruer, S. Majumber, Micromechanical Switches, J. Micromech. Sys., Vol. 6, pp. 3-9, 1997
- [Zav99] P. M. Zavracky, McGruer, E. Nicol ; R. H. Morrison, D. Potter, Microswitches and microrelays with a view toward microwave applications, International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, Volume 9, Issue 4, 1999, Pages 338-347
- [Zha99] Y. Zhang, Y. Zhang, R. B. Marcus, Thermally Actuated Microprobes for a new Wafer probe Card, J. Microelectromech. Sys., Vol 8, NO. 1, March 1999
- [Zho97] S. Zhou, X. Q. Sun, W. N. Carr, A Micro Variable Inductor Chip Using MEMS Relays, Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, Chicago, June 16-19, 1997
- [Zho99] Shifang Zhou, Xi-Qing Sun, and William N Carr, A monolithic Variable inductor network using microrelays with combined thermal and electrostatic actuation. J. Micromech. Microeng. 9 (1999), pp. 45 -50
- [Zia96a] H. Ziad, D. Debruyker, J.-B. Chevrier, K. Baert, Towards Integrated, Microrelays Using Electromagnetic Actuation, Eurosensors X, 8-11 September 1996, Leuven, Belgium
- [Zia96b] H. Ziad; K. Baert; H. A- C. Tilmans, Design considerations of the electrical contacts in (micro)relays, Micromachined Devices and Components II, Austin, USA, Oct 14-15, 1996, Proc., SPIE, Band 2882 (1996) Seite 210-217