

Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau
Fachgebiet Entwurf Mechatronischer Antriebe



Ermittlung günstiger Magnetkreisformen zur Fertigung von Magnetventilen in Batchtechnologie

BACHELORARBEIT

Vorgelegt von

Martin Enders

Matrikelnummer

35298

Matrikel

M05

Ausgegeben am

01.12.2009

Fertig gestellt zum

31. März 2010

Verantwortlicher Hochschullehrer

Jun.-Prof. Dr.-Ing. Tom Ströhla

Betreut von

Dipl.-Ing. Sören Rosenbaum (FG EMA)

Dipl.-Ing. Boris Goj (FG MMS)

Dipl.-Ing. Stefan Hampl (FG MMS)

Ilmenau 2010

Ilmenau, den 10.11.2009

Aufgabenstellung für die Bachelorarbeit

für Herrn Martin Enders

Thema: „Ermittlung günstiger Magnetkreisformen zur Fertigung von Magnetventilen in Batchtechnologie“

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Forschungsprojekts BatchMag werden neue Forschungsansätze zur Herstellung von Magnetventilen in Batchtechnologie evaluiert. Dabei sollen parallelisierbare Fertigungsverfahren, wie z.B. MIM, LiGA, Faltflex, LTCC und Verfahren der Oberflächen- und Volumenmikromechnik auf ihre Eignung untersucht werden.

In dieser Arbeit sollen systematisch Konzepte für batchtaugliche Magnetventile aufgestellt und überprüft werden. Die Varianten sind zu bewerten und ein optimales technisches Prinzip ist zu ermitteln. Weiterführend ist das optimale technische Prinzip zu dimensionieren und zu simulieren.

Die Aufgabenstellung der Bachelorarbeit umfasst folgende Punkte:

- Einarbeitung in die Thematik Batchfertigung und die dazugehörigen Technologien,
- Literatur- und Patentrecherche zu existierenden Ventilen,
- Klassifikation gefundener Ansätze hinsichtlich ihres Umsetzungspotentials im Batch und ihrer Leistungsfähigkeit,
- Erarbeitung mehrerer möglicher Varianten für ein batchtaugliches Magnetventil auf Prinzipiebene,
- Bewertung der Ergebnisse und Vergleich mit konventionellen Magnetventilbauformen,
- Dimensionierung und Simulation des als optimal befundenen technischen Prinzips.

Die Ergebnisse sind schriftlich zu dokumentieren (2 Belegexemplare mit CD/DVD) und zu verteidigen.

Ausgabedatum: 01.12.2009
Abgabedatum: 31.03.2010
Verantwortlicher Hochschullehrer: Jun.-Prof. Dr.-Ing. Tom Ströhl
Betreuer: Dipl.-Ing. Sören Rosenbaum (FG EMA)
Dipl.-Ing. Boris Goj (FG MMS)
Dipl.-Ing. Stefan Hampl (FG MMS)



Unterschrift des verantwortlichen Hochschullehrers



Unterschrift des Studierenden

Ehrenwörtliche Erklärung

Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Verwendung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Werken wörtlich oder sinngemäß übernommenen Gedanken sind unter Angabe der Quellen gekennzeichnet. Ich versichere, dass ich bisher keine Prüfungsarbeit mit gleichem oder ähnlichem Thema bei einer Prüfungsbehörde oder anderen Hochschule vorgelegt habe.

.....
Ort, Datum Unterschrift

Danksagung

Im Rahmen der Bachelorarbeit meines Mechatronikstudiums an der Technischen Universität Ilmenau wurde mir dieses Thema anvertraut. Mein Interesse an diesem Fachgebiet wuchs durch die Vorlesung „elektrische Motoren und Aktoren“.

An dieser Stelle bedanke ich mich bei allen, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben. Besonders danke ich meinen Betreuern Dipl.-Ing. S. Rosenbaum, Dipl.-Ing. S. Hampl und Dipl.-Ing. B. Goj, die mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite standen und durch ihre fachliche Kompetenz über die eine oder andere Hürde halfen. Weiterhin bedanke ich mich bei Dr. T. Thelemann, der mir stets bei Fragen zur LTCC-Technik weiter half.

Natürlich gilt der Dank auch an alle, die diese Arbeit gelesen haben und halfen, den einen oder anderen Fehler zu beseitigen.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit untersucht Möglichkeiten zur Fertigung von miniaturisierten elektromagnetischen Ventilen. Dabei werden funktionelle Aspekte verschiedener Fertigungstechnologien, Magnetkreise und Ventilbauformen hinsichtlich ihrer Eignung für parallele Fertigungsprozesse untersucht und dargelegt.

Magnetische Aktoren werden bei miniaturisierten Ventilen bisher wenig eingesetzt, weisen aber im Vergleich zu elektrostatischen oder piezoelektrischen Aktoren im Mini- und Mikrobereich teilweise größere Stellkräfte bei größeren Hübten auf, wenn sie optimal angesteuert werden.

In dieser Arbeit werden Magnetkreisgrundformen systematisiert und hinsichtlich ihrer Eignung als Aktor bewertet. Hubanker-Topf-Magnete sind im besonderen für miniaturisierte Anwendung geeignet, und werden zur Aufstellung von drei Varianten verwendet.

Die Literatur- und Patentrecherche zeigte auf, dass miniaturisierte Ventile kaum einen elektromagnetischen Aktor besitzen und dass eine Fertigung im Batch bisher nicht umgesetzt wurde.

Die drei Varianten ermöglichen diese parallele Fertigung und wurden geometrisch dafür ausgelegt. Es werden Prinzipie und Richtlinien für ein LTCC-, ein MIM- und einem Silizium-Ventil dargestellt und bewertet.

Abstract

This bachelor-thesis investigates different ways of producing miniaturized electromagnetic valves in parallel process called batch. Therefore, various basic magnetic shapes are analyzed regarding their magnetic force and their producibility with following technologies. The LTCC-, the MIM- and the micro system technology are to be available and have also been tested for their aptitude in parallel processing. Electromagnetic actuators are seldom used in miniaturized valves though they feature higher forces and deviations than piezo-electric and electrostatic valves if they are optimal controlled. According to the research, there are only a few hits for miniaturized electromagnetic valves. Anymore, three variants were created and assessed including all the above-named technologies. For those, guidelines and principles were displayed and assessed.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen	III
1 Einleitung	1
1.1 Einführung	1
1.2 Aufgabenpräzisierung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Definitionen	3
2.2 Mikrosystemtechnik	3
2.2.1 Die MIM-Technik (Metal Injection Molding)	3
2.2.2 Die Falt-Flex-Technik	6
2.2.3 Die LTCC - Technik	7
2.3 Die Ventiltechnik	9
2.3.1 Miniaturisiertes Ventil	9
2.4 Magnetkreise	10
2.4.1 Allgemeines zu Magnetkreisen	10
2.4.2 Grundformen und Variationen	10
2.4.3 Zusammenfassung	13
3 Auswahl geeigneter Magnetkreisformen	14
3.1 Einschränkungen hinsichtlich der Ankerbewegung	14
3.2 Untersuchungen auf Batchtauglichkeit	14
4 Patent- und Literaturrecherche	17
4.1 Patente	17
4.2 Publikationen	22
4.3 Zusammenfassung und Auswertung	25
5 Systementwurf	28
5.1 Funktionsstruktur	28
5.2 Erarbeitung möglicher Varianten auf Prinzipiebene	29
5.2.1 Variante 1	29
5.2.2 Variante 2	32
5.2.3 Variante 3	34
5.3 Auswertung	34

6 Zusammenfassung und Ausblick	38
6.1 Zusammenfassung	38
6.2 Ausblick	39
Literaturverzeichnis	40
Anhang	
A Ferromagnetisches Tape	43

Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen

Symbol	Bedeutung	Einheit
Φ_{mag}	magnetischer Fluss	Wb
k_{Cu}	Kupferfüllfaktor	
R_a	Oberflächenrauheit	
W_{el}	elektrische Energie	J
W_{halt}	Haltenergie	J
W_{mech}	mechanische Energie	J
W_{rueck}	Rückführungsenergie	J
W_{therm}	thermische Energie	J
LCP	Liquid Crystal Polymer - Flüssigkristallpolymer	
LIGA	Lithographie Galvanik Abformung	
LTCC	Low Temperature Co-fired Ceramics	
MEMS	Mikro-Elektro-Mechanisches-System	
MIM	Metal Injection Molding - Metallpulverspritzgießen	
PATON	Landespatentzentrum Thüringen	
PDMS	Polydimethylsiloxan	
PE	Plasmaätzen	
PI	Polyimid	
PIM	Powder Injection Moulding - Pulverspritzgießen	
PM	Permanentmagnet	
PTFE	Polytetrafluorethylen	
RIE	Reaktives Ionenstrahlätzen	

Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich mit klassischen Verfahren nach [MIM10]	4
2.2	Vor- und Nachteile der MIM-Technik	5
2.3	Vor- und Nachteile der Falt-Flex-Spule	6
2.4	Vor- und Nachteile der LTCC-Technik	8
2.5	Zusammenfassung aller Grundstrukturen und ihrer Variationen	13
4.1	Wertempfindungstabelle zur Bewertung der Patente und Publikationen	25
4.2	Auswertung der Recherche	27
5.1	Wertempfindungstabelle zur Bewertung der aufgestellten Varianten	36
5.2	Bewertungstabelle	36

Abbildungsverzeichnis

1.1	Kostenvergleich mit herkömmlichen Montagetechnologien [Bat09]	1
2.1	MIM Prozessablauf [MIM09]	5
2.2	Die Falt-Flex-Technik [Fal09]	6
2.3	LTCC Prozessablauf nach [Rar06]	7
2.4	Möglichkeiten der LTCC-Technik [Fal09]	7
2.5	Beispielhafte Formgebungsmöglichkeiten [Rar06]	8
2.6	Mikroventil auf Siliziumbasis [Fra02]	9
2.7	magnetischer Reihenkreis nach [Rie04]	11
2.8	Neutrale Reihenkreise nach [Rie04]	11
2.9	Polarisierte Reihenkreise nach [Rie04]	11
2.10	Neutraler Parallelkreis nach [Rie04]	12
2.11	Polarisierter Parallelkreis nach [Rie04]	12
2.12	Polarisierter Brückenkreis ermöglicht stromlose Endlagen nach [Rie04]	12
3.1	Reihenkreis mit einem Arbeitsluftspalt	15
3.2	Reihenkreis mit zwei Arbeitsluftspalten	15
3.3	Parallelkreis mit zwei Arbeits- und einem parasitären Luftspalt	16
3.4	Parallelkreis mit vier Arbeitsluftspalten	16
4.1	Klappanker - Bilderreihe	18
4.2	Hubankerantrieb mit zwei Spulen	19
4.3	Ventil mit Permanentmagnet im Hubanker	20
4.4	Ventil auf Si-Basis	21
4.5	Mikroventil [Bon06]	22
4.6	PDMS-Ventil-Bilderreihe	23
4.7	MEMS-Ventil	24
4.8	Elektromagnetisches Mikroventil nach [SLA00]	25
5.1	Funktionsstruktur eines Ventils	28
5.2	Prinzip Variante 1	30
5.3	Einpresspatrone [Cam10]	31
5.4	Wesentliche Prozessschritte	31
5.5	Prinzip Variante 2	32

5.6	Details	33
5.7	Prinzip Variante 3	34

1 Einleitung

1.1 Einführung

Ein stetiger Zuwachs der Nachfrage an miniaturisierten Ventilen in Branchen wie dem Automobilbau, Mikroreaktionstechnik, Bioanalytik und der Raumfahrt und der Drang nach immer kleineren und leistungsfähigeren Applikationen bringt die klassische Mechatronik bezüglich ihrer Rentabilität immer näher an die Grenzen des seriellen und montageorientierten Fertigungs [Bon06]. Einen möglichen Ausweg und die Entwicklung neuer Designkonzepte bietet die Mikrosystemtechnik mit ihren batch-orientierten Fertigungsverfahren und somit den Schritt zur parallelen Fertigung mit geringerem Montageaufwand.

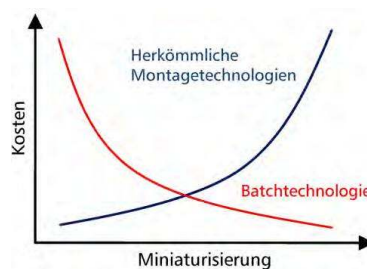


Abbildung 1.1: Kostenvergleich mit herkömmlichen Montagetechnologien [Bat09]

Diese Bachelorarbeit untersucht bestehende technische Magnetkreise auf ihr Potential zur Miniaturisierbarkeit und Fertigungsmöglichkeit im Batch mit dem Ziel, miniaturisierte Ventile mit klassischen elektromagnetischen Antrieben mit hoher Parallelität in der Fertigung und niedrigem Montageaufwand herstellen zu können. Dazu wird untersucht, wie sich verschiedene Bauformen von Magnetkreisen mit einer Reihe von Technologien wie z.B. der LTCC-Technik prinzipiell umsetzen lassen.

Die Aufgabe dieser Arbeit ist es, ein technisches Prinzip eines batch-tauglichen Magnetventils zu erarbeiten, zu bewerten und mit konventionellen Magnetventilbauformen zu vergleichen. Dieses Prinzip ist zu dimensionieren und zu simulieren.

1.2 Aufgabenpräzisierung

Das Ventil soll mit Batch-Technologien gut parallel fertigbar sein und aus möglichst wenig Einzelteilen bestehen. Ein weiteres Ziel ist die Integration mehrerer Funktionen in einem Bau-

teil. Es soll kompakt und robust ausgelegt werden, mit der Möglichkeit, es in Ventilinseln zukünftig einsetzen zu können. Der Entwurf soll sich auf ein 2/2-Wege-Ventil mit einem elektromagnetischem Aktor konzentrieren. Eine Erweiterung zu einem $x/2$ -Wege-Ventil ist nicht auszuschließen. Im Detail sind die Anforderungen an die Konstruktionsrichtlinien (siehe Abschnitt 2) der einzelnen Fertigungsverfahren zu berücksichtigen.

Um einen besseren Überblick über die Aufgabenstellung und deren Teilaufgaben zu bekommen, erfolgt eine Aufgabenpräzisierung. Zu Beginn ist ein Einarbeiten in grundlegende Fertigungstechnologien wie die MIM-Technik (Metal Injection Molding), die LTCC-Technik (Low Temperature Cofired Ceramics), die Falt-Flex-Technik, die LiGA-Technik (Lithographie Galvanik Abformung) und die Oberflächen- und Volumenmikromechanik notwendig. Anschließend wird in einer Patent- und Literaturrecherche die Systematisierung und Kategorisierung der Inhalte der PATON-Recherche durchgeführt und relevante Patente und Publikationen in dieser Arbeit dokumentiert.

Diese Ansätze werden nach erarbeiteten Einteilungskriterien gegenübergestellt und bewertet. Basierend auf diesen Ergebnissen werden mehrere Varianten auf Prinzipienebene mit dem Ziel entwickelt, dass verschiedene Fertigungsverfahren zur Anwendung kommen. Dabei ist zu beachten, dass die fertigungstechnologisch bedingten Restriktionen berücksichtigt werden. Abschließend werden Bewertungskriterien und -maßstäbe aufgestellt und die Varianten in einer Bewertungstabelle bewertet. Aufgrund der zeitintensiven Recherche und der Tatsache, dass Materialeigenschaften von ferromagnetischen LTCC-Tapes weitgehend unbekannt sind, wurde mit Herrn Rosenbaum vereinbart, die Teilaufgaben der Dimensionierung und Simulation entfallen zu lassen.

Zur Zeit dieser Arbeit existieren zwar miniaturisierte elektromagnetische Ventile, aber sie sind weder mittels MIM- noch mittels LTCC-Technik gefertigt. Sie weisen kaum Ansätze für einen batch-kompatiblen Fertigungsprozess auf. Einige Publikationen von Ventilen, die auf Siliziumwafer gefertigt werden, weisen um Größenordnungen kleinere Abmessungen auf und sind hervorragend für eine Fertigung im Batch geeignet, da ihre Prozessschritte parallel mit mikro-systemtechnischen Verfahren durchführbar sind. Es sind somit grundlegende Untersuchungen notwendig, welcher Magnetkreis bei welcher Fertigungstechnologie mit welcher Ventilbauform eine hinreichende Funktionalität erreicht und wie sich diese Prinzipie umsetzen lassen. Es bietet sich an, die Magnetkreise und die Fertigungsverfahren systematisch gegenüber zu stellen, eventuelle Ansätze aus der Recherche zu betrachten und anschließende Überlegungen anzustellen, wie sinnvolle Prinzipie umsetzbar sind.

Da keine Forderungen weder nach einem bestimmten Arbeitsmedium, noch zu absoluten Nennweiten, Durchflussraten oder Arbeitsdrücken bestehen, werden nur die allgemeinen Forderungen nach der Verwendung elektromagnetischer Aktoren, der genannten Fertigungsverfahren, nach einfacher Ventilbauform, batchkompatibilität, Miniaturisierbarkeit und geringen Montageaufwand berücksichtigt.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden im Abschnitt 2.1 grundlegende Begriffe erläutert. Abschnitt 2.2 befasst sich mit den Fertigungsverfahren der Mikrosystemtechnik hinsichtlich deren Möglichkeiten, Vor- und Nachteilen und Restriktionen. Im Abschnitt 2.3 werden Ventile in ihren Ausführungsformen und Varianten vorgestellt und im Abschnitt 2.4 werden Bauformen von Elektromagneten systematisiert und erläutert.

2.1 Definitionen

Batch-Fertigung

Der Begriff „Batch“ beschreibt bei der Siliziumwaferherstellung eine handliche Kiste, in der üblicherweise 25 Wafer transportiert werden. Im weiteren Sinne beschreibt der Begriff „Batch-Fertigung“ Verfahren aus der Mikrosystemtechnik, in der auf einem Wafer eine Vielzahl von gleichen Strukturen gleichzeitig prozessiert werden [VZ06].

Mikroventil

Als Mikroventil werden Ventile bezeichnet, deren Abmessungen sich im Mikrometerbereich befinden [wik10].

2.2 Mikrosystemtechnik

Die hier genannten Verfahren (MIM-, Falt-Flex- und LTCC-Technik) stellen keine „klassischen“ Verfahren der Mikrosystemtechnik dar. Da sie jedoch für eine parallele Fertigung geeignet sind, lassen sie sich mit solchen Verfahren (wie z.B. der LiGA- oder Ätztechnik) kombinieren und erweitern somit die Möglichkeiten der Formgebung und Integration.

2.2.1 Die MIM-Technik (Metal Injection Molding)

Gegenüber der Feinwerktechnik und herkömmlichen Fertigungsverfahren bietet die MIM-Technik die Möglichkeit, komplexe geometrische Bauteile zu fertigen und dabei enge Toleranzen einzuhalten (siehe Tabelle 2.1). Parallele Fertigung ist durch die Anordnung mehrerer Bauteile,

verbunden durch Stege, in einem Guss realisierbar [MIM10]. Die MIM-Technik, die die breite Werkstoffpalette der Pulvermetallurgie und die nahezu unbegrenzte Formgebungsfreiheit des Kunststoffspritzgießens in sich vereint, ermöglicht es, durch das Mischen hochfeiner Metallpulver nahezu beliebige Materialeigenschaften (rostfrei, hitzebeständig, nichtmagnetisch, ferromagnetisch) zu realisieren [Ste10]. Die Details dieses Verfahrens sind in der Projektarbeit von Björn Bonitz [Bon06] ausführlich erläutert und werden hier nur kurz zusammengefasst.

Eigenschaft	Feinguss	Pulvermetallurgie	MIM
min. Bohrungs- \emptyset	2 mm	1 mm	0,1 mm
max. Tiefe einer 2 mm Sackbohrung	2 mm	4 mm	20 mm
min. Wandstärke	2 mm	1,5 mm	0,1 mm
Toleranzen bei 14 mm Abmessung	+/- 0,2 mm	+/-0,06 mm..0,27 mm	+/- 0,06 mm
Oberflächenrauheit R_a	0,01 mm	0,002 mm	0,0004 mm
min. Gewicht	5 g	1 g	0,03 g

Tabelle 2.1: Vergleich mit klassischen Verfahren nach [MIM10]

Entscheidungskriterien zur Wahl des MIM-Verfahrens sind

- kleine Bauteile aus Stahl oder metallischen Legierungen,
- komplexe Geometrie bei hoher Stückzahl,
- für spritzgussfähige Teile anwendbar, sowie
- für Teile mit engen Toleranzen.

Das Verfahren

Im Allgemeinen ist das MIM-Verfahren ein Spritzgießprozess, bei dem ein Granulat, bestehend aus einem Metallpulver-Bindergemisch mit einem Spritzgießautomat zu einem sogenannten Grünteil umgeformt wird. Dies geschieht, indem das erhitzte und aufgeschmolzene Granulat unter hohem Druck in eine Spritzform gepresst wird. Wegen der Abkühlungsschwindigkeit wird der Spritzdruck erhöht um die Spritzform stetig gefüllt zu halten, bis durch das Abkühlen die Formmasse erstarrt ist. Dieser Zustand des Werkstückes wird als Grünteil bezeichnet, da der Binder dem Bauteil diese Farbe verleiht. Anschließend wird der Binder in der Entbindungsanlage entfernt und es entsteht das Braunteil. Hier sind die Partikel des Pulvergemisches schon dichter gepackt, weisen jedoch keine feste Verbindung zueinander auf. Daher wird im anschließenden Sinterprozess das Braunteil gesintert und somit zum Fertigteil weiterverarbeitet. Abbildung 2.1 stellt den Ablauf anhand eines Bauteils exemplarisch dar.

Gestaltungsmöglichkeiten

Mit der MIM-Technologie lassen sich Bohrungen, Schlitze, Nute, Innen- und Außengewinde und Aussparungen fertigen. Hinterschneidungen lassen sich mit erhöhten Aufwand realisieren.

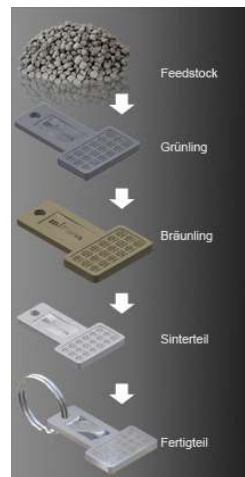


Abbildung 2.1: MIM Prozessablauf [MIM09]

Vorteile	Nachteile
Gute Formgebungsmöglichkeiten [MIM10]	hohe Materialkosten
Hohe Werkstoffdichten (96%-100%)	hohe Werkzeugkosten
sehr gute Oberflächengüte	hohe Prozesskosten
enge Toleranzen	nur für kleine Teile geeignet
vielseitiges Werkstoffangebot	nur bei mittleren bis komplizierten Geometrien wirtschaftlich

Tabelle 2.2: Vor- und Nachteile der MIM-Technik

Weitere Möglichkeiten sind Beschriftungen, Oberflächenstrukturen und Hohlräume (Lost- Core-MIM- Verfahren).

Gestaltungsrichtlinien

Um den Verzug und die inneren Spannungen zu reduzieren und um Material und Kosten zu sparen sind gleiche Wandstärken erforderlich oder allmähliche Übergänge bei unterschiedlichen Wandstärken zu gestalten. Gleiche Radien vereinfachen die Formgebung der Spritzgussform. Wandstärken sollten so dünn wie möglich und so dick wie nötig dimensioniert werden um ebenfalls Material- und Herstellungskosten zu senken. Die Vermeidung von Hinterschneidungen spart den Einsatz von Schieber oder Kerne und steigert somit die Wirtschaftlichkeit. Bei aufeinander treffenden Fließfronten können Festigkeitsminderungen auftreten, daher ist eine sinnvolle Angussgestaltung notwendig. Scharfe Kanten und Ecken sollen vermieden werden, denn abgerundete Kanten und Ecken ermöglichen ein leichteres Ausformen beim Spritzgießen. Um ein Ausformen des Bauteils zu ermöglichen müssen Ausformschrägen am Bauteil vorgesehen werden.

2.2.2 Die Falt-Flex-Technik

Die Fortschritte in der Feinstleitertechnik auf flexiblen Polymerfolien (PI oder LCP) mit Dicken unter $100\ \mu\text{m}$ ermöglichen die Herstellung feinsten Strompfade und durch das Falten dieser Folien (siehe Abbildung 2.2(a)) den Einsatz miniaturisierter Spulen.

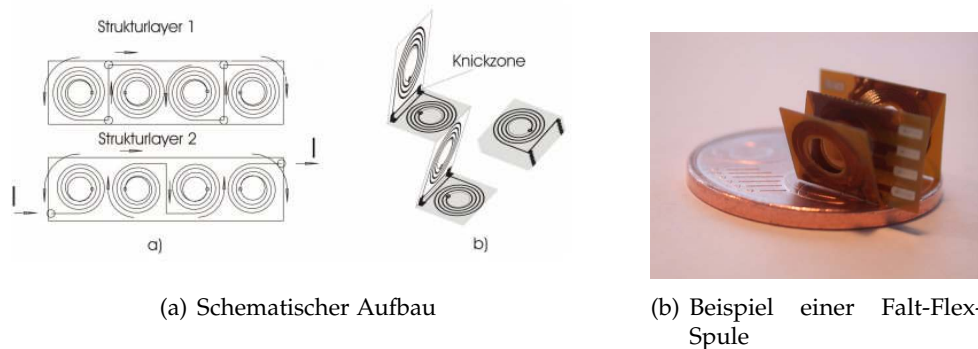


Abbildung 2.2: Die Falt-Flex-Technik [Fal09]

Durch das Verkleben der Lagen kann ein kompaktes Bauelement erzeugt werden, das zudem Kontaktierungsmöglichkeiten nach außen bereit stellt. Aufgrund deckungsgleicher Anordnung der Strompfade und Schichtung in mehreren Lagen werden Vias benötigt, um den Kontakt auf die andere Seite der Faltebene zu erzeugen. Diese werden hergestellt, indem der Randbereich eines definierten Loches durch galvanisches Abscheiden eines Leitermaterials vollständig bedeckt wird. Mittels Laserbearbeitung kann die Form des Spulenkörpers nachträglich frei verändert werden. Weiterhin ermöglicht diese Technologie die Integration mehrerer gekoppelter Spulen in einen Bauteil [MST06]. Die Vor- und Nachteile der Technologie sind in Tabelle 2.3 zusammengefasst.

Vorteile	Nachteile
kostengünstiger als LTCC	geringer Kupferfüllfaktor $k_{Cu} < 0,25$ [MST06]
feine Strukturierbarkeit	benötigt weiteres Bauteil für Eisenkreis
freie Formgebung (Laser-/ Plasmabohren)	Stromdichten von $23\ \text{A}/\text{mm}^2$ [MST06]
zweilagige Leiterbilddefinition	
Werte unter $15\ \mu\text{F}$ wurden erreicht	

Tabelle 2.3: Vor- und Nachteile der Falt-Flex-Spule

2.2.3 Die LTCC - Technik

Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) ist eine Technologie zur Herstellung von Mehrschichtschaltungen auf der Basis von gesinterten Keramikträgern [wik09a]. Neben anderen elektrischen Bauelementen können auch Spulen (siehe Abbildung 2.4) hergestellt werden. Die Abbildung 2.3 stellt den Prozessablauf grafisch dar.

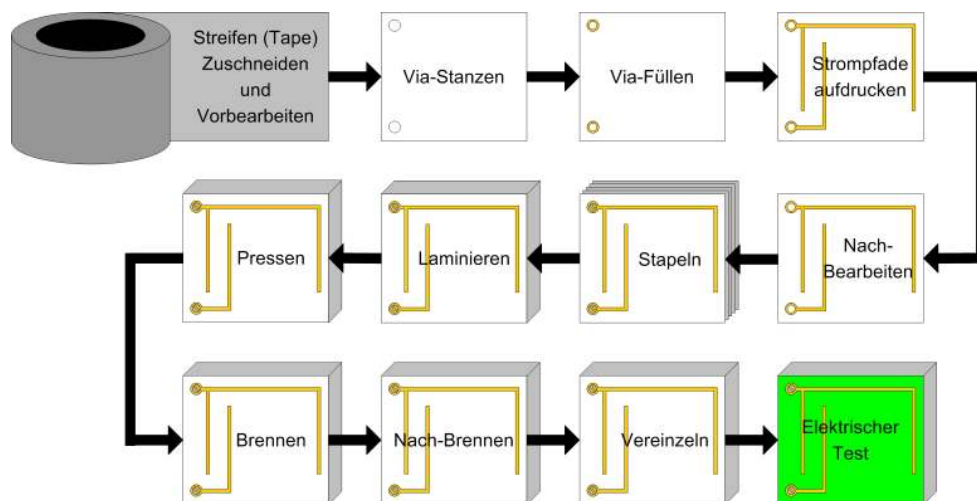
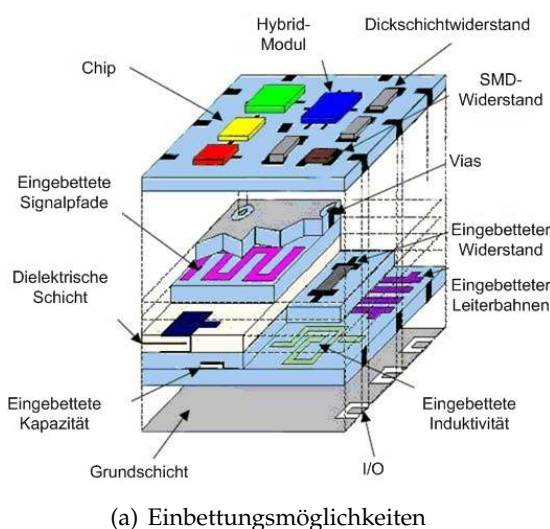


Abbildung 2.3: LTCC Prozessablauf nach [Rar06]



(a) Einbettungsmöglichkeiten



(b) Beispiele von LTCC-Spulen

Abbildung 2.4: Möglichkeiten der LTCC-Technik [Fal09]

Dabei werden dünne Keramikfolien (Green-Tapes) als bedruckbare Basis verwendet. Im ungesinterten Zustand (Grünteil) werden die metallischen Bahnen aus Gold, Silber, Platin oder Palladiumlegierungen mittels Dickschicht-Siebdruckverfahren aufgebracht. Anschließend werden die einzelnen laminierten Lagen übereinander gestapelt, gepresst und bei 850-900°C gesintert. Beim Sintern schrumpft das Bauteil in laterale Richtung um 12% und in vertikaler Richtung

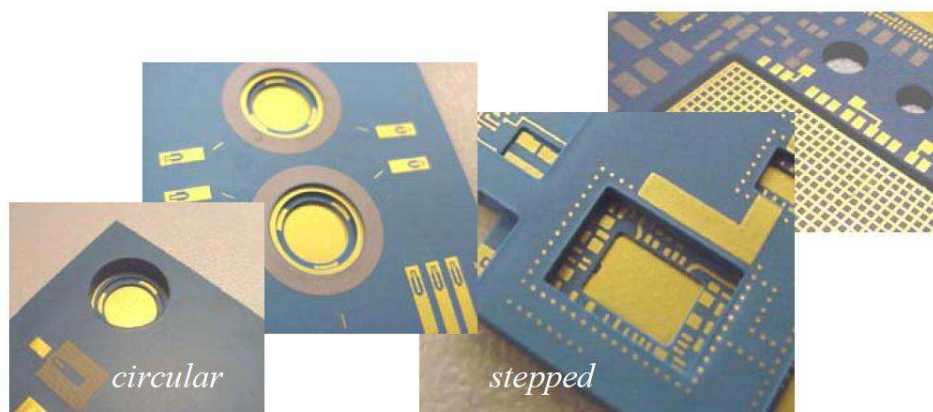


Abbildung 2.5: Beispielhafte Formgebungsmöglichkeiten [Rar06]

Vorteile	Nachteile
Schutz eingebetteter Bauelemente	Kupferfüllfaktor bei $k_{Cu} < 0,25$
parallele Strukturierung	Permeabilität von $\mu = 150$ [Her10]
gleicher Schichten	vergleichsweise teuer
dreidimensionaler Aufbau	Keramik ist spröder Werkstoff
ferrokeramische Substrate erhältlich	
dauerhafte Stromdichten von 100 A/mm^2 möglich	
Strukturierung per Laser/Stanzen	

Tabelle 2.4: Vor- und Nachteile der LTCC-Technik

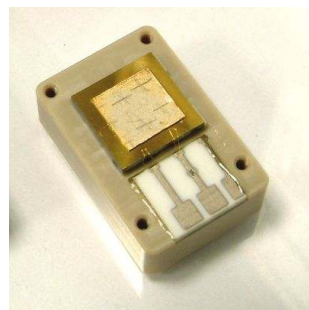
um 17% [RHE10]. Die nötigen Kontaktflächen einer Spule können wahlweise auf der Ober- oder Unterseite angebracht werden. Bei einer Dickschicht-Oberfläche können die Kontakte wahlweise durch Löt- oder Bonden hergestellt werden. Bei einer Dünnschicht-Oberfläche werden zum Bonden Gold-Pads und zum Löt- oder Bonden Nickel-Gold-Pads galvanisch aufgebracht. Für die Foliendicke können $100 \mu\text{m}$, $130 \mu\text{m}$ und $200 \mu\text{m}$ gewählt werden [LTC09]. Die Firma Dupont [DuP10] stellt auch Tapes mit Dicken von $54 \mu\text{m}$, $127 \mu\text{m}$ und $254 \mu\text{m}$ her. Nach Aussagen von Herrn Dr. Thelemann der Firma *Micro – Hybrid Electronic GmbH* [LTC09] existieren folgende Formgebungsmöglichkeiten: Es können in das Tape durch einen Prägeschnitt Vertiefungen gedrückt werden, um die Leiterbahnenhöhe zu vergrößern. Die Leiterbahnenbreite ist ab einem Mindestwert von $120 \mu\text{m}$ und Mindestabstand von $120 \mu\text{m}$ erweiterbar. Der Mindestabstand eines Leiters bis zum Bauteilrand beträgt $300 \mu\text{m}$. Somit stehen zwei Dimensionen zur Verfügung, den Leiterquerschnitt bei Bedarf zu erhöhen. Jedoch ist ein Kupferfüllfaktor von $k_{Cu} < 0,25$ zu erwarten.

2.3 Die Ventiltechnik

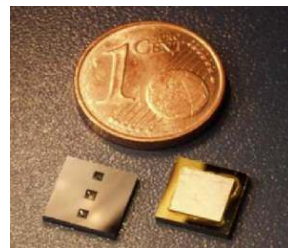
Ein Ventil ist eine technische Baugruppe, die den Fluss eines Gases oder einer Flüssigkeit steuert bzw. kontrolliert. Es werden zwei wesentliche Gruppen von Ventilen unterschieden: aktive und passive Ventile [Bon06]. Passive Ventile geben lediglich die Durchflussrichtung des Mediums vor und aktive Ventile können gezielt angesteuert werden. Entscheidende Auswahlkriterien von Ventilen sind z.B. Durchflussrate, Druckbelastbarkeit und Schaltzeiten. Bei aktiven Ventilen wird weiterhin zwischen Proportionalventilen und Schaltventilen unterschieden [But08]. Schaltventile ermöglichen die Zustände „auf“ und „zu“ bzw. „Anker ausgelenkt“ und „Anker nicht ausgelenkt“ und sind zum Dosieren geeignet. Proportionalventile ermöglichen zusätzlich das Anfahren von Zwischenstellungen auf stetige Art und Weise und finden Anwendung bei der Steuerung von Volumenströmen. Ein weiteres Unterscheidungskriterium ist das Prinzip der Energiewandlung im Ventilantrieb. Es wird in hydraulische, pneumatische und elektromechanische Ventile eingeteilt. Daneben werden verschiedene Arten von Dichtkörpern unterschieden. Es gibt Klappen-, Kugel-, Teller-, Schieber- und Schlauch-Quetsch-Ventile.

In dieser Arbeit wird ein aktives, elektromagnetisches Ventil behandelt, das vorzugsweise als Sitzventil ausgeführt wird.

2.3.1 Miniaturisiertes Ventil



(a) Mikroventil



(b) Größenvergleich

Abbildung 2.6: Mikroventil auf Siliziumbasis [Fra02]

Da der Trend zur Bauraumverkleinerung, Gewichtsreduzierung und zu komplexer werdenden Anlagen geht, ist eine Miniaturisierung der Ventile unumgänglich. Dabei sollen Leistungsfähigkeit, Zuverlässigkeit und Robustheit möglichst gesteigert werden. Durch Auftreten von Skalierungseffekten aufgrund der geringeren Abmessungen kommen neue Antriebsprinzipie wie z.B. elektrostatische, piezoelektrische, bimetallbasierende, thermomechanische und formgedächtnisbezogene Aktoren hinzu. Da sich diese Arbeit auf elektromagnetische Aktoren konzentriert, wird auf die alternativen Prinzipie nicht näher eingegangen.

Ein elektromagnetisches miniaturisiertes Ventil zeichnet sich dadurch aus, dass der Ventilkörper

auf Basis der Reluktanzkraft bewegt wird. Es beinhaltet somit Bauelemente zur Erzeugung eines magnetischen Flusses (Spule) und deren Führung (Eisenkreis) sowie ein bewegtes Bauelement (Anker). Durch den optionalen Einsatz eines oder mehrerer Permanentmagnete können Endlagen leistungslos gehalten werden. Weiterhin bezeichnet der Begriff miniaturisiertes Ventil die kleineren Abmessungen des Ventils gegenüber herkömmlichen Varianten mit Nennweiten weniger Millimeter.

2.4 Magnetkreise

Magnetkreise sind geschlossene Pfade eines magnetischen Flusses Φ und finden in Elektromotoren, Generatoren und Transformatoren die häufigste Anwendung [wik09b].

2.4.1 Allgemeines zu Magnetkreisen

Die Aufgaben der Magnetkreise bestehen in der Wandlung elektrischer in mechanische Energie und der Führung des magnetischen Flusses. Man unterscheidet zwei wesentliche Gruppen: polarisierte und neutrale Magnetkreise, wobei polarisierte Magnetkreise Permanentmagnete enthalten, die magnetische Feldenergie speichern und in gewünschten Arbeitspunkten Kräfte erzeugen [KEQ⁺08].

2.4.2 Grundformen und Variationen

Weitere Einteilungskriterien sind die Bauformen und entsprechende Modifikationen, die Lage des Arbeitsluftspaltes und die Ankerbewegung. Um die Grundstruktur weiterhin charakterisieren zu können, wird bei polarisierten Magnetkreisen der Verlauf der magnetischen Flüsse betrachtet. Daraus lassen sich drei verschiedene Grundstrukturen ableiten. Sie werden mit Reihenkreis, Parallelkreis und Brückenkreis bezeichnet [Rie04].

Elektromagnete mit magnetischem Reihenkreis

Im magnetischen Reihenkreis wird nur eine Masche vom magnetischen Fluss durchströmt. In Abbildung 2.7 sind rotationssymmetrische Topfmagnete mit neutralen a) und polarisierten b) Magnetkreis dargestellt. Dabei ist 1 Anker, 2 Stator, 3 Erregerspule, 4 Arbeitsluftspalt, 5 parasitärer Luftspalt und 6 Permanentmagnet.

Bei den neutralen Reihenkreisen lassen sich Ausführungen mit (Abbildung 2.8 a)) und ohne (Abbildung 2.8 b)) parasitären Luftspalt realisieren, wobei in den meisten Fällen parasitäre Luftspalte unerwünscht sind, da sie auf die Kraft-Wege-Kennlinie ungünstige Auswirkungen

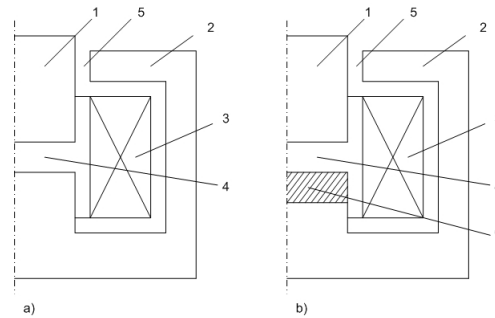


Abbildung 2.7: magnetischer Reihenkreis nach [Rie04]

besitzen. Zu beachten ist, dass es Unterschiede in dem statischen und dynamischen Verhalten gibt, die es bei der Auswahl zu berücksichtigen gilt.

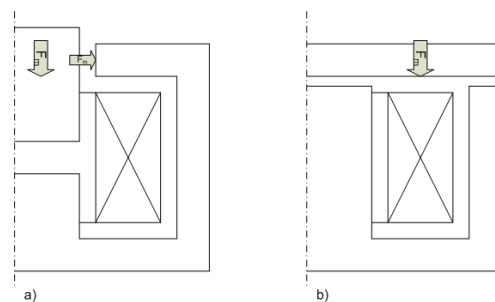


Abbildung 2.8: Neutrale Reihenkreise nach [Rie04]

Polarisierte Reihenkreise können als Tauchanker-Topfmagnet (Abbildung 2.9 a)) und als Flachanker-Topfmagnet (Abbildung 2.9 b)) umgesetzt werden. Die Abbildung verdeutlicht dies bei Reihenkreisen mit einem und mit zwei Arbeitsluftspalten.

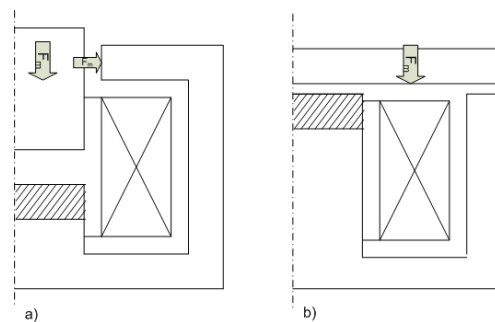


Abbildung 2.9: Polarisierter Reihenkreise nach [Rie04]

Elektromagnete mit magnetischem Parallelkreis

Im Parallelkreis sind zwei magnetische Maschen miteinander gekoppelt. Hier ergeben sich eine Vielzahl an Möglichkeiten Permanentmagnete (PM) anzuordnen und den magnetischen Fluss zu verteilen. In Abbildung 2.10 sind neutrale Parallelkreise mit a) zwei und b) vier aktiven Luftspalten und in Abbildung 2.11 polarisierter Bauformen mit a) ein PM im Koppelzwei, b)

zwei PM im Stator, c) zwei PM im Anker, d) ein PM im Anker, e) ein bewegter PM im Anker und f) unsymmetrisch polarisierter Parallelkreis dargestellt.

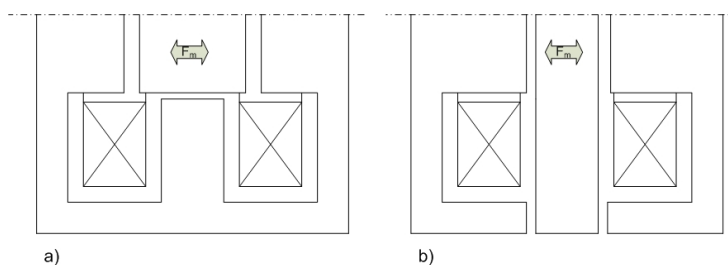


Abbildung 2.10: Neutraler Parallelkreis nach [Rie04]

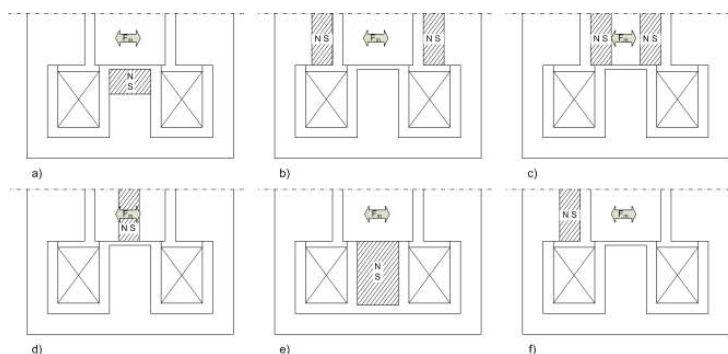


Abbildung 2.11: Polarisierter Parallelkreis nach [Rie04]

Elektromagnete mit magnetischem Brückenkreis

Der magnetische Brückenkreis besteht prinzipiell aus drei Maschen. Dabei ist zu beachten, dass durch die Aufteilung des magnetischen Flusses eher weniger Magnetkraft für die bidirektionale Bewegung zur Verfügung steht als bei Reihenkreisen. Allerdings sind hier die meisten Variationen möglich und die Entkopplung der magnetischen Flüsse von Permanentmagneten und Spulen ist ebenso umsetzbar. Somit kann der Widerstand, der von den Permanentmagneten hervorgerufen wird im Maschenfluss der Spule umgangen werden. In Abbildung 2.12 sind Variante a) mit einem und b) mit zwei Permanentmagneten sowie stromlose Mittelstellung beim Einsatz von c) einen und d) zwei Permanentmagneten prinzipiell dargestellt.

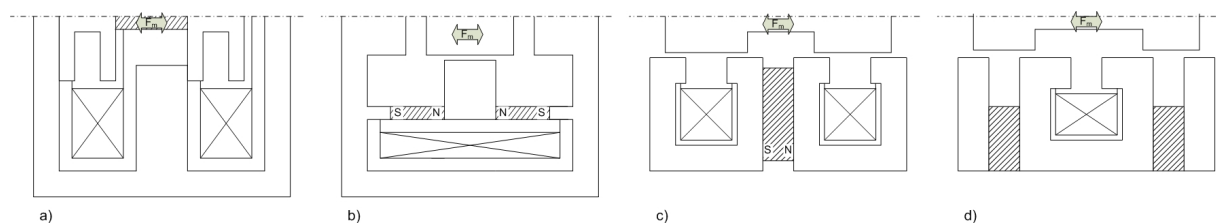


Abbildung 2.12: Polarisierter Brückenkreis ermöglicht stromlose Endlagen nach [Rie04]

2.4.3 Zusammenfassung

Die im vorigen Abschnitt dargelegten Grundformen und deren Variationen wurden hinsichtlich des Magnetflusses und deren Quellen eingeteilt. In Tabelle 2.5 sind diese zusammen gefasst und hinsichtlich ihrer Bewegungsmöglichkeiten untersucht. In dieser Tabelle ist gut zu erkennen, dass es möglich ist, eine gewünschte Bewegungsform mit verschiedenen Bauformen zu realisieren. Nähere Untersuchungen der Magnetkreisformen folgen im Kapitel 3.

Bauform	Variation	Feder	Ankerbewegung	Bemerkungen
Neutraler Reihenkreis	1	o	unidirektional	einfachster Aufbau Rückstellkraft z. B. durch Gewichtskraft des Ankers
	2	x	unidirektional	eine stromlos stabile Endlage
Polarisierter Reihenkreis	1	o	unidirektional	Gewichtskraft größer Haltekraft bringt Anker in Ausgangslage
	2	x	unidirektional	eine stromlos stabile Endlage (PM)
	3	o	bidirektional	zwei stabile Endlagen (Umkehrhubmagnet)
	4	x	unidirektional	eine stromlos stabile Endlage durch Feder realisiert
	5	x	unidirektional	eine stromlos stabile Endlage Rückstellen durch Änderung der Bestromungsrichtung
	6	x	unidirektional	kontinuierlich verstellbarer Anker
Neutraler Parallelkreis	1	o	bidirektional	bistabiler Umkehrhubmagnet
	2	x	bidirektional	3 Stellungen, Mittelstellung stromlos
	3	x	bidirektional	wie Variante 2, kontinuierlich verstellbar
Polarisierter Parallelkreis	1	o	bidirektional	bistabiler Magnetschalter
	2	x	bidirektional	Haltekraft kleiner als Variante 1
	3	x	bidirektional	stabile Mittellage und Anker kontinuierlich verstellbar
	4	x	bidirektional	drei stabile Positionen
	5	x	bidirektional	eine stromlose Endlage, ein PM, asymmetrischer Aufbau
Neutraler Brückenkreis	1	o	bidirektional	stabile, stromlose Mittellage kontinuierlich verstellbar
	2	o	bidirektional	tristabil
Polarisierter Brückenkreis	1	o	bidirektional	stabile, stromlose Mittellage kontinuierlich verstellbar
	2	o	bidirektional	bistabil
	3	x	bidirektional	stabile, stromlose Mittellage kontinuierlich verstellbar
Legende:		o	-nicht vorhanden	x - vorhanden

Tabelle 2.5: Zusammenfassung aller Grundstrukturen und ihrer Variationen

3 Auswahl geeigneter Magnetkreisformen

Im Abschnitt 2.4.2 wurde ein Überblick über Magnetkreisgrundformen erarbeitet. Um sich jedoch auf einige Wenige zu beschränken, werden in diesem Kapitel mögliche Auswahlkriterien festgelegt.

3.1 Einschränkungen hinsichtlich der Ankerbewegung

Da ein 2/2-Wege-Ventil nur zwei Zustände benötigt (geöffnet, geschlossen), ist es sinnvoll, Magnetkreise mit nur zwei Ankerpositionen zu betrachten. Zudem werden neutrale Magnetkreise ohne Feder ebenfalls ausgegrenzt, da sie entweder bestromte stabile Endlagen besitzen oder diese mittels Gewichtskraft erreichen. Hinsichtlich der Miniaturisierung sollte die Gewichtskraft nicht als Haltekraft in Betracht gezogen werden, da einerseits die Einbaulage vorgegeben wird und andererseits der erreichbare Staudruck den Forderungen nicht genügt. Ein weiterer Aspekt ist, dass eine kontinuierlich einstellbare Ankerstellung nicht notwendig ist, da es die Aufgabenstellung nicht fordert. Diese Kriterien engen die Auswahl hinsichtlich der Ankerbewegung ein. Um die Zahl der möglichen Magnetkreisformen weiter zu reduzieren, werden im folgenden Abschnitt die verbleibenden Magnetkreise hinsichtlich ihrer Batchtauglichkeit untersucht.

3.2 Untersuchungen auf Batchtauglichkeit

Basierend auf die o.g. Ausschlusskriterien werden die verbleibenden Grundformen auf mögliche Fertigungsverfahren zur Realisierung der einzelnen Komponenten untersucht. Des Weiteren wird die Leistungsfähigkeit der Magnetkreise betrachtet.

Variante A und B: Der Reihenkreis mit einem aktiven und einem parasitären Luftspalt

Das Joch des in Abbildung 3.1 dargestellten Tauchankermagneten lässt sich mittels MIM-Verfahren zwar herstellen, jedoch erschweren Hinterschneidungen das Verfahren. Zu beachten ist, dass das Einsetzen der Spule nur dann möglich ist, wenn das Joch aus zwei Teilen hergestellt wird. Wird die Spule im LTCC-Verfahren gefertigt, muss eine zylindrische Aussparung koaxial der Wicklungen vorstrukturiert (Laser, Stanzen) werden, um dem Tauchanker seinen Bewegungsraum zu gewährleisten. Vorteilhaft bei diesen Verfahren ist die Freiheit, Kontaktpads an beliebiger Stelle des Spulenkörpers anbringen zu können. Die Verwendung einer Faldflex-Spule

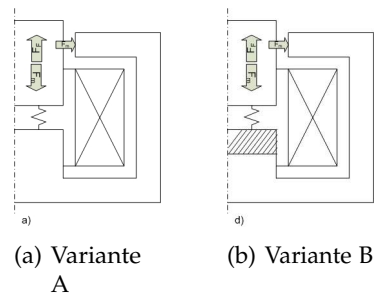


Abbildung 3.1: Reihenkreis mit einem Arbeitsluftspalt

ist ebenso denkbar und kostengünstiger als eine LTCC-Spule. Auch eine herkömmlich gewickelte Spule kann verwendet werden. Dabei ist zu beachten, ob die Spule im Ventil Kontakt zum Arbeitsmedium hat. Die Verwendung eines heterogenen Federankers [Bon06] ist hier zu empfehlen, da die Funktionen der Führung und der Feder mit dem Anker gekoppelt sind. Eine Mäanderfeder, aus Federstahlblech mittels Sprühätzen gefertigt, kann die hier geforderten Funktionen erfüllen und lässt sich gut parallel fertigen (siehe [Bon06]). Der parasitäre Luftspalt wirkt sich negativ auf die Leistung des Magnetkreises aus. Dafür besitzt diese Variante eine leistungslos gehaltene Endlage.

Variante C und D: Der Reihenkreis mit zwei Arbeitsluftspalten

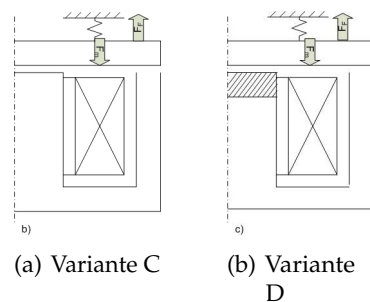


Abbildung 3.2: Reihenkreis mit zwei Arbeitsluftspalten

Das Joch (siehe Abbildung 3.2(a)) lässt sich auch hier mittels der MIM-Technik problemlos realisieren und braucht aus nur einem Teil gefertigt zu werden. Eine auf Silizium basierende Ausführung ist in zwei Schichten sehr gut realisierbar, jedoch werden zusätzliche ferromagnetische Materialien zur Flussführung benötigt. Dabei trägt eine Schicht die Spule und bildet das Joch und die andere Schicht dient als Membran. Die Besonderheiten der Spule entsprechen denen der Variante A mit dem Unterschied, dass hier keine parasitären Luftspalte vorhanden sind. Der Anker und die Feder lassen sich bei beiden Fertigungstechnologien in einem Bauteil integriert umsetzen. Wird ein Permanentmagnet in den Eisenkreis integriert (siehe Abbildung 3.2(b)), können zwei Endlagen leistungslos gehalten werden. Weiterhin lassen sich diese Bauformen auch leicht als Klappanker realisieren, welche ähnliche Eigenschaften bezüglich des Magnetkreises und der Fertigung aufweisen.

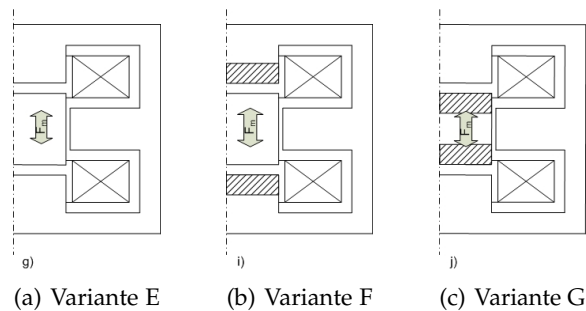
Variante E, F und G : Der Parallelkreis mit zwei aktiven und einem parasitären Luftspalt

Abbildung 3.3: Parallelkreis mit zwei Arbeits- und einem parasitären Luftspalt

Aufgrund des Vorhandenseins zweier Spulen sollte das im MIM-Verfahren gefertigte Joch aus Fertigungsgründen (Siehe Abschnitt 2.2.1) aus drei Teilen bestehen. Dieser Umstand wird hinsichtlich der Batchfertigung als ungünstig betrachtet. Eine Fertigung in LTCC-Technik erleichtert zwar die Integration der Spulenwicklungen, jedoch ist auch hier das Einbringen eines Ankers aufwändig. Eine Konstruktion auf Siliziumbasis kann realisiert werden, indem an einen Wafer beidseitig eine Spule mittels LiGa-Verfahren aufgebracht wird und darüber eine von der Spule isolierten ferromagnetischen Schicht zum Leiten des magnetischen Flusses aufgebracht wird. Eine Führung des Ankers ist durch eine Mäanderfeder oder einer Membran denkbar. Die Realisierung ist jedoch aufwändiger als bei Variante C. Bei Verwendung von Permanentmagneten (Abbildung 3.3(b) und 3.3(c)) können zwei Endlagen leistungslos gehalten werden, was den Leistungsverlust des parasitären Luftspaltes kompensiert.

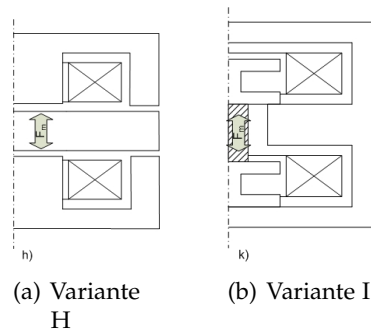
Variante H und I: Der Parallelkreis mit vier Arbeitsluftspalten

Abbildung 3.4: Parallelkreis mit vier Arbeitsluftspalten

Die Formgebung des Jochs stellt für die MIM-Technik keine Herausforderung dar. Es ist lediglich notwendig, das Joch aus mehreren Einzelteilen zu fügen, was sich für eine Verwendung im Batch als nachteilig erweist. Bei Verwendung der LTCC-Technik ist die Formgebung leichter zu realisieren, jedoch wird die Integration eines Ankers aufwändig. Auch eine Realisierung mit Siliziumtechniken ist ungeeignet, da die zu strukturierenden Geometrien zu kompliziert sind. Daher werden diese Varianten nicht weiter verwendet.

4 Patent- und Literaturrecherche

Aus der Vielzahl bereits existierender Magnetventile werden in diesem Kapitel diejenigen betrachtet, die ein hohes Potential an Miniaturisierbarkeit sowie an batch-kompatiblen Fertigungsmöglichkeiten haben. Die hier erörterten Patente und Publikationen wurden aus einer PATON-Rechere entnommen. Dabei wurden aus einem Pool von 80 Treffern 20 ausgewählt, deren Inhalt sich mit Ventilbauformen beschäftigt. Die meisten davon bestanden aus zu vielen Einzelteilen und wurden daher in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

4.1 Patente

Die hier erörterten Patente und Offenlegungsschriften beinhalten Lösungen zur Realisierung verschiedener Bauformen von Magnetventilen. Die Zeichnungen sind dem Original prinzipiell nachempfunden und wurden auf das Wesentliche reduziert.

Offenlegungsschrift DT 23 35 460 A1 [Wil75]

Das in Abbildung 4.1(a) dargestellte 2/2-Wege-Magnetventil ist ein Klappankermagnetventil, das bevorzugt als Vorsteuerventil vor Vergasern für verschmutzte Fluide eingesetzt wird. Das Patent zeichnet sich dadurch aus, dass die Ankerrückführung mittels einer Blattfeder (1) erzeugt wird und zum Schutz vor Verschmutzung mit einem nichtferromagnetischem Schlauch (2) überzogen ist. Des Weiteren ist über dem Dichtsitz ein nichtferromagnetisches Material (3) galvanisch aufgebracht, damit ferromagnetische Partikel im Fluid weniger am Anker haften können. Das Joch (4) und der Spulenkörper (5) werden auf den Kern bis an einen Anschlag geschoben und mit einem selbstsperrenden Ring befestigt.

Für die Fertigung im Batch (siehe Abbildung 4.1) ist der federgeführte Anker (1) besonders geeignet, da ein Prototyp mit ähnlicher Funktionsweise bereits getestet wurde (siehe: [Bon06]) und Erfahrungen bezüglich der Formgebung gesammelt wurden. Das Joch (2) lässt sich im MIM-Verfahren umsetzen und die mittels LTCC- oder Falt-Flex-Technik hergestellte Spule (3) einsetzen. Des Weiteren kann dieses Prinzip mit wenig Teilen realisiert werden. Nachteilig ist, dass die Spule Kontakt zum Arbeitsmedium besitzt. Es empfiehlt sich, die Spulenkontakte und Kabel zu isolieren. Die Keramik eines LTCC-Spulenkörpers ist resistent gegen Industrieluft und Säuren. Lediglich einige Laugen können hier Schaden verursachen. Die Funktion des Eisenrückschlusses und des Gehäuses lassen sich in einem MIM-Bauteil integrieren. Um das Ventil zu schließen sollte ein nichtferromagnetischer Deckel (4) aufgebracht werden.

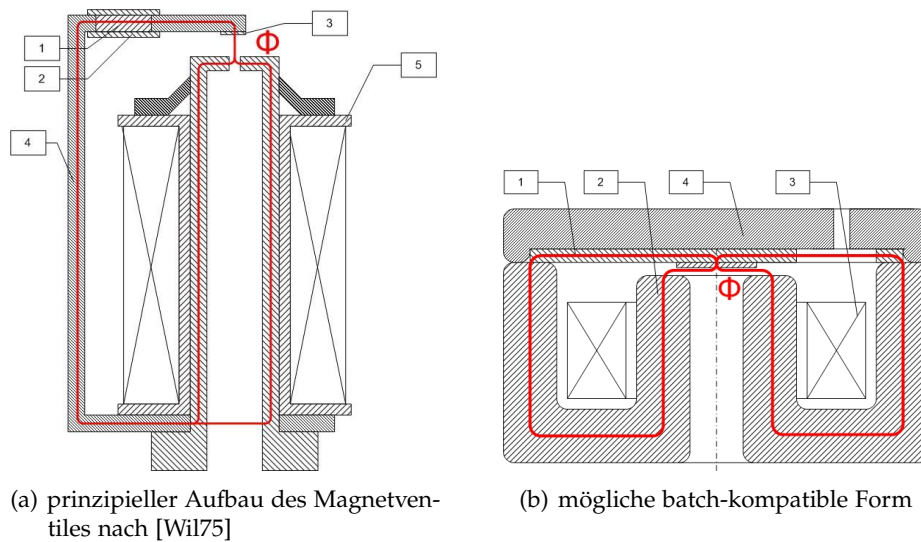


Abbildung 4.1: Klappanker - Bilderreihe

Die Vorgabe der MIM-Technologie fordert gleiche Wandstärken. Es ist somit zu testen, ob der zentral liegende Fluidkanal mit gleicher Wandstärke wie die äußeren Wände so umsetzbar ist, dass möglichst wenig Bauraum verschenkt bzw. verschwendet wird. Des Weiteren werden Rundungen an Kanten und Ecken gefordert. Problematisch wird dies an den innen liegenden Kanten des Gehäuses, da so die Spule nicht an den Wänden des Gehäuses anliegt und somit ein Luftspalt entsteht. Bei den LTCC-Spulen lassen sich nach Aussagen der Firma *Micro – Hybrid Elektronik GmbH* [LTC09] die Kanten mit mehreren Möglichkeiten abrunden bzw. fassen. Zum Einen kann das Grünteil vorm Sinterprozess gelasert werden. Zum Anderen kann der Spulenkörper im gesinterten Zustand ultraschallgestützt gefräst werden.

Gebrauchsmusterschrift DE 20 2008 015 303 U1 [Bür08]

Das Konzept dieses Hubankertriebes zielt auf eine gute Miniaturisierbarkeit. Die Besonderheit dieses Patentes liegt darin, dass zwei Spulen den magnetischen Fluss erzeugen und somit größere Kräfte möglich sind. Der Aufbau ist der Abbildung 4.2(a) zu entnehmen. Es ist gut zu erkennen, dass der Hubanker (1) und das Joch (2), beides bestehend aus weichmagnetischem Material, den Eisenkreis schließen. Der mit einem Dichtsitz (4) versehene Anker wird in diesem Fall durch eine Feder (3) rückgeführt. Dieses Patent ist dadurch gekennzeichnet, dass die Einzelteile standardisiert sind und somit Variationen in der Ausführung leicht möglich sind. Bei der Fertigung im Batch ist von Vorteil, dass zwei Spulen eingebracht werden, um somit größere Kräfte zu erzeugen. Jedoch ist es notwendig, den Eisenkreis aus mindestens zwei Teilen herzustellen, da dieser die Spule völlig umschließt. Somit ist es ein Ventil, das große Magnetkräfte erzeugt und eine mittlere Teileanzahl enthält.

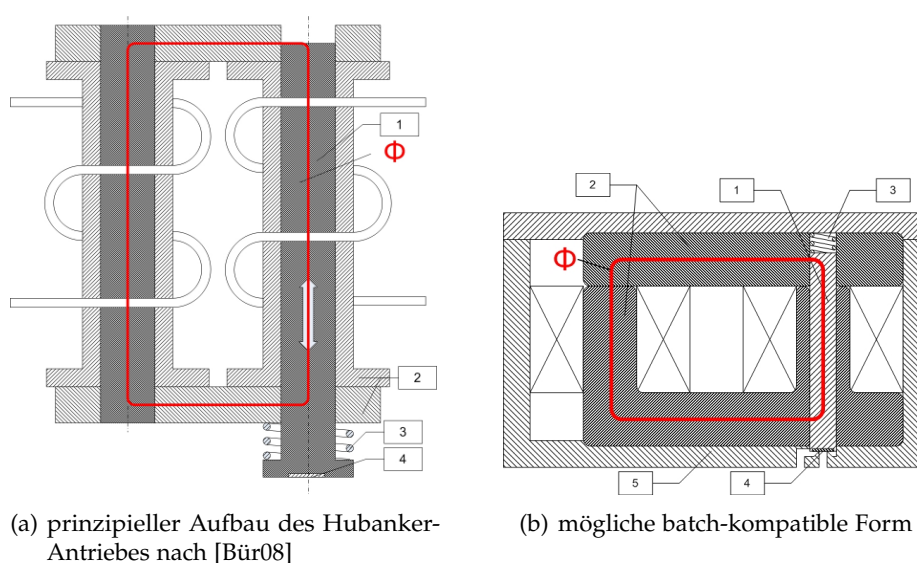


Abbildung 4.2: Hubankertrieb mit zwei Spulen

Eine in Abbildung 4.2(b) dargestellte batch-kompatible Bauform zeigt folgende Restriktionen: Die Verwendung von zwei Spulen benötigt mehr als den doppelten Bauraum als alle anderen aufgezeigten Varianten. Um den Dichtsitz und die Fluidkanäle auszuformen, bedarf es an zusätzlichen Bauteilen, die, wie hier abgebildet, gleichzeitig als Gehäuse (5) fungieren. Einen Eisenkreis per MIM-Verfahren zu fertigen hat auch hier die Konsequenz der abgerundeten Kanten und kann zur Folge haben, dass die Spulenkörper an ihrer Bohrung gefast bzw. abgerundet werden müssen, wenn parasitäre Luftspalte unerwünscht sind. Die Position der Feder wurde aus Gründen der Vereinfachung der Bolzenform geändert. Das gesamte Prinzip fordert viel Platz, ist aber für höhere Drücke des Arbeitsmediums geeignet.

Offenlegungsschrift DT 26 00 196 A1 [MLF76]

Dieses Tauchanker-Magnetventil (Abbildung 4.3(a)) ist durch seine Verwendung für Vergaser in Fahrzeugen gekennzeichnet. Die Besonderheiten sind zum Einen ein fest stehender Kern (1) bestehend aus einem Weicheisenmaterial und zum Anderen, dass der Bolzen (2) aus einem Dauermagnetmaterial gefertigt und über Magnetkräfte mit dem Ventilkörper (3) verbunden ist. Bei Bestromung der Spule wird das Ventil geschlossen, indem der Bolzen von der Spule weg gedrückt wird. Um Bauraum zu sparen, kann der Permanentmagnet direkt in der Bohrung der Spule (5) positioniert werden. Es ist möglich, den Eisenkreis mit zwei Bauteilen zu fertigen und somit die Teileanzahl auf fünf zu beschränken. Ein wesentlicher Vorteil ist der Verzicht auf eine Feder und die Anwendung einfacher Geometrien. Nachteilig ist der Ventilsitz, der sehr genau gefertigt werden muss, um eine gute Dichtigkeit zu erreichen. Eventuell ist das Einvulkanisieren einer Dichtung notwendig. Ein weiterer Nachteil ist die Notwendigkeit einer Führung des Bolzens. Hier ist Verschleiß nicht auszuschließen.

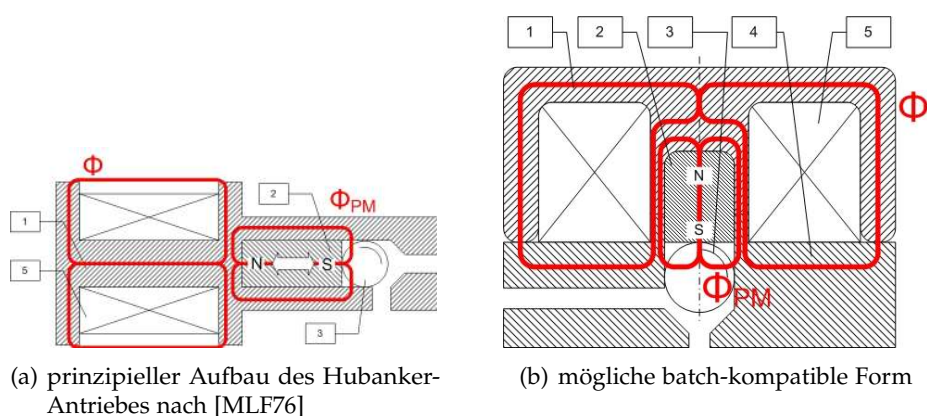


Abbildung 4.3: Ventil mit Permanentmagnet im Hubanker

Die Abbildung 4.3(b) stellt eine schichtweise Bauform dieses Ventils dar. Der Permanentmagnet (2) wurde in die Spule (5) getaucht, um Bauraum zu sparen und die Fluidkanäle werden mit einem nichtferromagnetischem Material ausgeformt (4). Es wurde erreicht, den Eisenkreis aus nur einem Bauteil zu fertigen, was jedoch zu erhöhten Streufeldern führt.

Offenlegungsschrift: WO 99/17749A1 [TM99]

Das in Abbildung 4.4(a) dargestellte Prinzip eines miniaturisierten Ventils arbeitet nach dem Prinzip „normal geschlossen“. Es beinhaltet eine Spule (3), die einen auf der Membran (1) angebrachten ferromagnetischen Körper (2) anzieht und somit das Ventil öffnet. Bis auf den Dichtsitz und -körper (4) besteht das Ventil aus strukturierten Siliziumwafer und -träger. Diese beinhalten die Grundplatte (5), die Membran (6) und die Abdeckung (7). Ein wesentlicher Vorteil ist eine vom Arbeitsmedium getrennte Anordnung der Spule und die damit einhergehende Verringerung des Ventilkammervolumens. Nachteilig ist die Konstruktion aufgrund der Verwendung von drei Siliziumsubstraten, die den Aufwand in Montage und Fertigung erhöht. Weiterhin ist die Anordnung der Spule, wie sie prinzipiell dargestellt wird, erschwert umzusetzen, sodass eine alternative Anordnung gefunden werden muss.

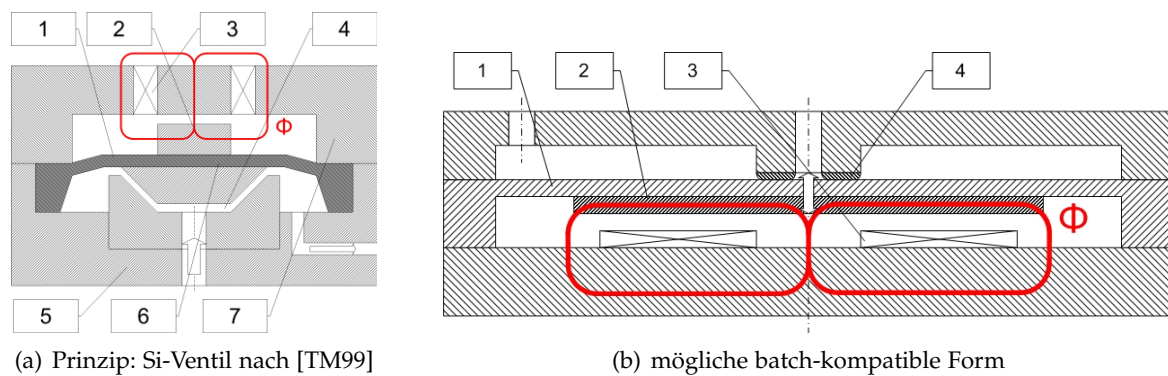


Abbildung 4.4: Ventil auf Si-Basis

Abbildung 4.4(b) stellt eine Anordnung dar, die für die Fertigung im Batch geeigneter ist. Die Spule wurde auf die Innenseite des Ventils gebracht, was eine vereinfachte Fertigung ermöglicht und die Spule vor Umwelteinflüssen besser schützt. Die einzelnen Schichten wurden in ihrer Geometrie vereinfacht und sind „stapelbar“. Eine Endmontage besteht somit nur noch aus dem Bonden oder Kleben von drei aufeinander gestapelten Wafern. Das Stapeln mehrerer Wafer setzt hohe Positioniergenauigkeit voraus und erhöht den Montageaufwand.

Durch Perforationen können die einzelnen Ventile durch Abbrechen voneinander getrennt werden.

4.2 Publikationen

Konstruktion eines Mikroventils unter Nutzung der MIM-Technologie

Diese Projektarbeit befasste sich bereits mit der Entwicklung eines miniaturisierten Magnetventils, wobei das Gehäuse mit der MIM-Technologie und der funktionsintegrierte Anker mit einer isotropen Sprühätztechnik gefertigt wurden [Bon06]. In Abbildung 4.5 ist eine Explosionsansicht dieses Ventils dargestellt. Die hierauf basierende Projektarbeit *Untersuchung von Ventilinselkonzepten für ein magnetisches Mikroventil* [Ree09] schlüsselt das Problem der wechselseitigen elektromagnetischen Beeinflussung zweier benachbarter Ventile in einer Simulation auf: Es kam zu instabilen Endlagen der Anker bzw. konnte der Anker nicht mehr aus seiner Endlage gelöst werden. Des Weiteren kommt hinzu, dass eine 0,1 mm dicke Klebefolie zwischen *Lochplatte* und *unterer Eisenrückschluss* (siehe Abbildung 4.5) den Abstand zum *Permanentmagnet unten* vergrößert und somit die Haltekräfte der beiden Endlagen sehr unterschiedlich sind. Die Kraft auf den Anker im geschlossenen Zustand beträgt $-0,11\text{ N}$ während bei der gegenüberliegenden Ankerstellung eine Kraft von $0,62\text{ N}$ wirkt. Die Konsequenzen waren einerseits die Neudimensionierung der Permanentmagnete und andererseits Maßnahmen zur Verringerung der wechselseitigen Beeinflussung der Magnetfelder durch Anbringen von Blechen zwischen den einzelnen Mikroventilen.

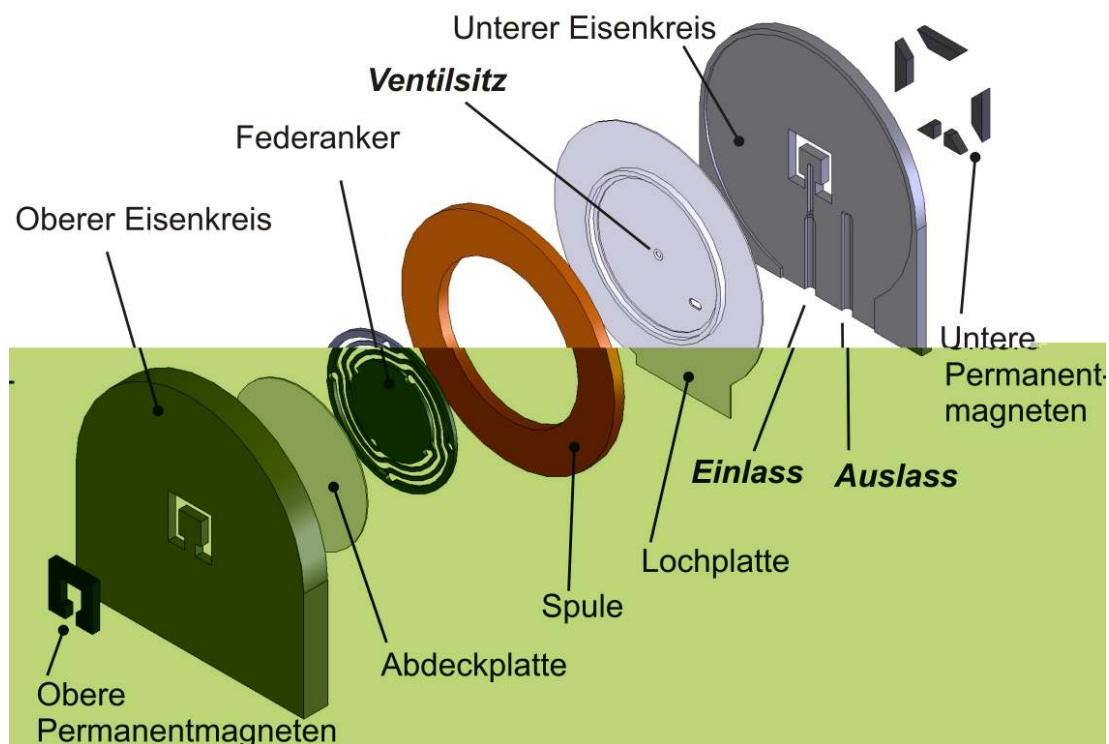


Abbildung 4.5: Mikroventil [Bon06]

Magnetisch angesteuertes PDMS-Ventil

Das in Abbildung 4.6(a) dargestellte Funktionsprinzip eines Mikroventils basiert auf dem Einsatz einer 25 μm dünnen Membran (1) aus Polydimethylsiloxane (PDMS). Die vorgestellte Dimensionierung ist in [GPG07] nachzulesen. Bei diesem Prinzip wird ein Magnet (2) an einen Metallbolzen (3) angenähert. Dieser Bolzen wird aufgrund der Reluktanzkraft angezogen und formt die PDMS-Membran derart aus, dass der Fluidkanal teilweise oder ganz geschlossen wird. Die PDMS-Membran dient neben der Funktion als Dichtkörper gleichzeitig als Rückstellfeder. Bemerkenswert ist die Anzahl der Einzelteile, die sich aus Permanentmagnet, Membran, Bolzen und Eisenkreis bzw. Ventilkörper zusammensetzt. Der Bauraum kann hier ebenfalls wie bei Abbildung 4.3(a) verringert werden, indem der Metallbolzen als Tauchanker ausgeführt und mittels Reluktanzkraft bewegt wird.

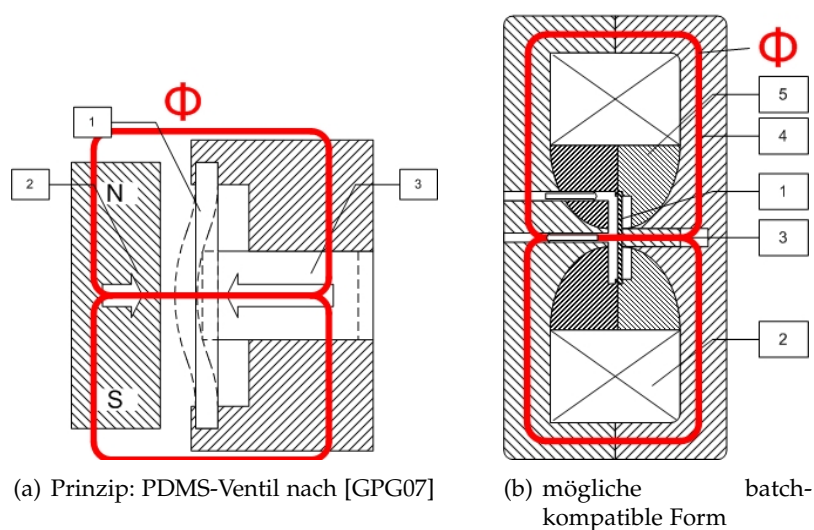


Abbildung 4.6: PDMS-Ventil-Bilderreihe

Die in Abbildung 4.6(b) dargestellte Form einer möglichen Ausführung erzeugt die Reluktanzkraft mit einer Spule (2) und dem Bolzen (3) wurde zwischen die Spulenwicklungen gebracht, um Bauraum zu sparen. Das Gehäuse (4) bildet gleichzeitig den Eisenkreis und konzentriert den magnetischen Fluss auf den Bolzen. Ein weiteres Bauteil (5) wird benötigt, um den Fluidkanal auszubilden und um die Membran zu halten. Möglicherweise kann durch geeignete Formgebung auf dieses Bauteil verzichtet werden. Zu beachten ist, dass sich der Metallbolzen frei bewegen kann. Dies schränkt die Einbaulagenvielfalt ein. Bei der Formgebung sollte darauf Rücksicht genommen werden. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Einzelteile zwar schichtweise gefügt werden können, der Aufwand aber hoch ist. Denn die dargestellten Rundungen fordern geringe Fertigungstoleranzen und ein Abdichten der Ventilkammer.

Bistabiles MEMS-Ventil [MEM09]

Ein auf Siliziumbasis aufgebautes MEMS-Ventil ist in Abbildung 4.7a) dargestellt. Abbildung 4.7b) stellt den Anker mit Mäanderfeder (2) in der Draufsicht dar. Das Ventil ist in zwei zueinander symmetrischen Schichten aufgebaut: eine strukturierte Siliziumschicht (6) ist mit einem weichmagnetischen Material (3) beschichtet und eine Öffnung (5) dient als Fluidkanal. Permanentmagnete (1) dienen dem leistungslosen Halten der beiden Endlagen. Das Ventil arbeitet bistabil und ermöglicht den Durchfluss des Mediums nur während des Schaltvorganges, da nur dann Ein- und Auslass geöffnet sind. Dadurch ist es möglich, mittels pulsweitenmodulierter Ansteuerung eine quasikontinuierliche Durchflussrate einzustellen. Das Vorhandensein zweier Spulen (4), die außerhalb des Ventilkörpers ungeschirmt angebracht sind, stellt sich als nachteilig heraus, da einerseits die Streufelder benachbarte Ventile in einer Ventilinsel beeinträchtigt werden und andererseits diese Spulenkörper gegenüber Umwelteinflüssen ungeschützt sind. Eine Passivierungsschicht sollte daher angebracht werden.

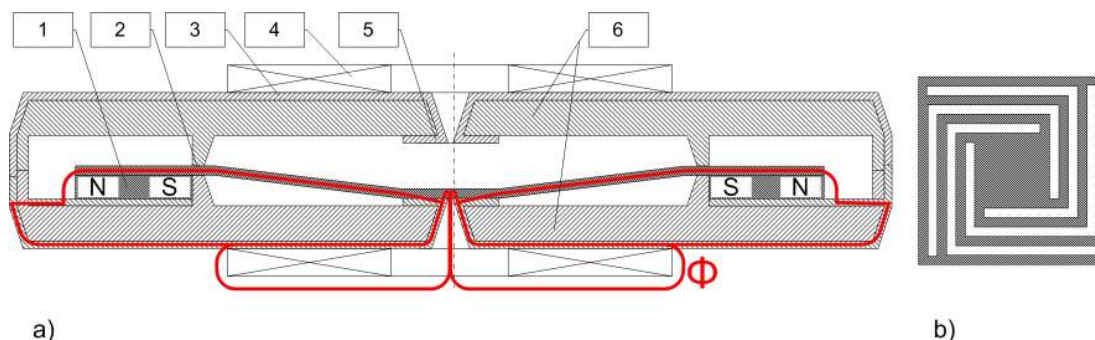


Abbildung 4.7: MEMS-Ventil

Elektromagnetischer Mikroaktor [SLA00]

Das in Abbildung 4.8 dargestellte Ventil besteht aus zwei Siliziumschichten (9), die auf einem Glassubstrat (8) aufgebracht sind. Dabei wird auf der oberen Siliziumschicht eine planare Spule (4) mittels Dickschichttechnologie aufgebracht. Mittels NiFe-Legierung gefüllte Vias (3) wird der magnetische Fluss auf die andere Seite des Wafers geführt. Die untere Siliziumschicht enthält eine ferromagnetische Schicht (6) auf der Membran (7) zum Schließen des Eisenkreises. Auf der Glasplatte sind Dichtringe (2) aufgebracht. Kontaktpads (1) ermöglichen eine Kontaktkierung der Spule zur technischen Peripherie. Das Ventil, ausgeführt in der Bauart „normal geschlossen“, ist für eine Fertigung im Batch hervorragend geeignet. Die einzelnen drei Schichten lassen sich mittels mikrosystemtechnischen Verfahren strukturieren und ermöglichen eine parallele Fertigung. Durch Bonden können die Schichten anschließend gefügt und mit Hilfe von angebrachten Perforationen vereinzelt werden.

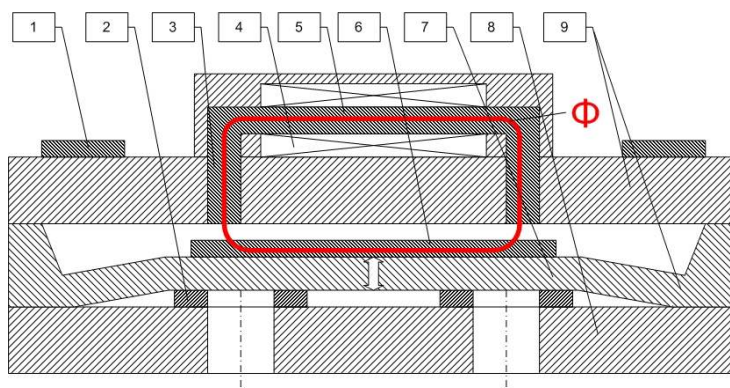


Abbildung 4.8: Elektromagnetisches Mikroventil nach [SLA00]

4.3 Zusammenfassung und Auswertung

Die Recherche nach Patenten und Publikationen von Ventilen zeigte eine Vielzahl interessanter Bauformen auf, von denen die Relevanten erläutert wurden. Wesentliche Auswahlkriterien waren eine relativ einfache Struktur gegenüber herkömmlichen Ventilbauformen, die Verwendung weniger Einzelteile und die Möglichkeit eines geschichteten ($2\frac{1}{2}D$) Aufbaus.

Kriterium	Punkte p				
	1	2	3	4	5
Batchkompatibilität	ungeeignet	mäßig	gut	sehr gut	hervorragend
Einzelteilanzahl	7-8	6	5	4	2-3
Kompaktheit	>2	1-2	0,5-1	0-0,5	0
Magnetkreis	60%	70%	80%	90%	99%
Funktionsintegration (x in y)	keine	2 in 1	3 in 1	4 in 2	6 in 3

Tabelle 4.1: Wertempfindungstabelle zur Bewertung der Patente und Publikationen

Erläuterungen zur Punktetabelle

Die Batchkompatibilität ist ein relatives Maß, das die Eignung des Prinzips in der vorgestellten Bauform in einem parallelen Fertigungsprozess darstellt. Die Einzelteilanzahl stellt die Anzahl zu fügender Teile dar. Die Kompaktheit beschreibt das Verhältnis von Tot- zum Nutzvolumen, wobei das Nutzvolumen den benötigte Hohlraum zum Fluidtransport und das Totvolumen alle anderen Hohlräume darstellt. Das Kriterium Magnetkreis beschreibt, wieviel Prozent des magnetischen Flusses sich in Weicheisenteilen befindet. Die Funktionsintegration zeigt auf, wieviele Funktionen x in wievielen Bauteilen y integriert sind. Die Wichtung stellt ein Maß der Relevanz eines Kriteriums dar. Auf einer Skala von 1 bis 5 wird 5 als sehr relevant betrachtet.

Die Auswertung

Aus Tabelle 4.2 ist zu entnehmen, dass das Prinzip aus der Offenlegungsschrift DT 23 35 460 A1 (Seite 17) und der Elektromagnetische Mikroaktor (Seite 24) am besten bewertet wurden.

Das Prinzip auf Seite 17 weist gute Eigenschaften bezüglich des Magnetkreises auf, da dieser nahezu vollständig geschlossen ist. Zudem ist es aus nur vier Einzelteilen Montierbar und weist eine hohe Funktionsintegration auf.

Das Prinzip auf Seite 24 eignet sich hervorragend für eine Fertigung im Batch, da auf mikro-systemtechnische Fertigungsverfahren zurückgegriffen werden kann und kann aus nur drei Einzelteilen gefertigt werden. Der Magnetkreis wird ebenfalls als hervorragend befunden.

Diese beiden Prinzipien werden im Kapitel 5 als Grundlage dreier Varianten dienen.

Tabelle 4.2: Auswertung der Recherche

Variante nach Abb.	i	4.1		4.2(b)		4.3(b)		4.4(a)		4.5		4.6(b)		4.7		4.8		
		s_i	p_i	$s_{2i} \cdot p_{2i}$	p_{2i}	$s_{3i} \cdot p_{3i}$	p_{3i}	$s_{4i} \cdot p_{4i}$	p_{4i}	$s_{5i} \cdot p_{5i}$	p_{5i}	$s_{6i} \cdot p_{6i}$	p_{6i}	$s_{7i} \cdot p_{7i}$	p_{7i}	$s_{8i} \cdot p_{8i}$	p_{8i}	
Batchkompabilität	1	5	4	20	2	10	3	15	5	25	2	10	3	15	5	25	5	25
Einzelteilanzahl	2	3	4	12	1	3	3	9	5	15	1	3	4	12	3	9	5	15
Kompaktheit	3	2	4	8	1	2	4	8	3	6	1	2	1	2	4	8	1	2
Magnetkreis	4	5	4	20	5	25	2	10	1	5	4	20	5	25	3	15	5	25
Funktionsintegration	5	4	4	16	1	4	4	16	4	16	2	8	3	12	4	16	3	12
Summe				76		44		58		67		43		68		63		79

5 Systementwurf

In diesem Kapitel werden vier Varianten, basierend auf der MIM-, der LTCC- und der Silizium-Technologie prinzipiell vorgestellt. Bei der Untersuchung dieser Varianten richtet sich der Fokus auf technologisch bedingte Schwierigkeiten und Möglichkeiten in der Formgestaltung. Die Funktionen des Ankers, der Führung und der Rückführung wurden in den Varianten 1 bis 3 in ein Bauteil integriert. Es wurde ausschließlich das Prinzip eines Sitzventils realisiert, was eine ähnliche Formgebung in allen vier Varianten zeigt. Dieses Prinzip erwies sich als vorteilhaft, da wenig Bauraum benötigt wird und relativ einfache Gestaltung möglich ist.

5.1 Funktionsstruktur

Bei der Entwicklung von Ventilen ist darauf zu achten, dass alle notwendigen Funktionselemente enthalten sind. Abbildung 5.1 stellt den Zusammenhang dieser Elemente dar. Die Funktion *Leistungsloses Halten* wird als optional betrachtet.

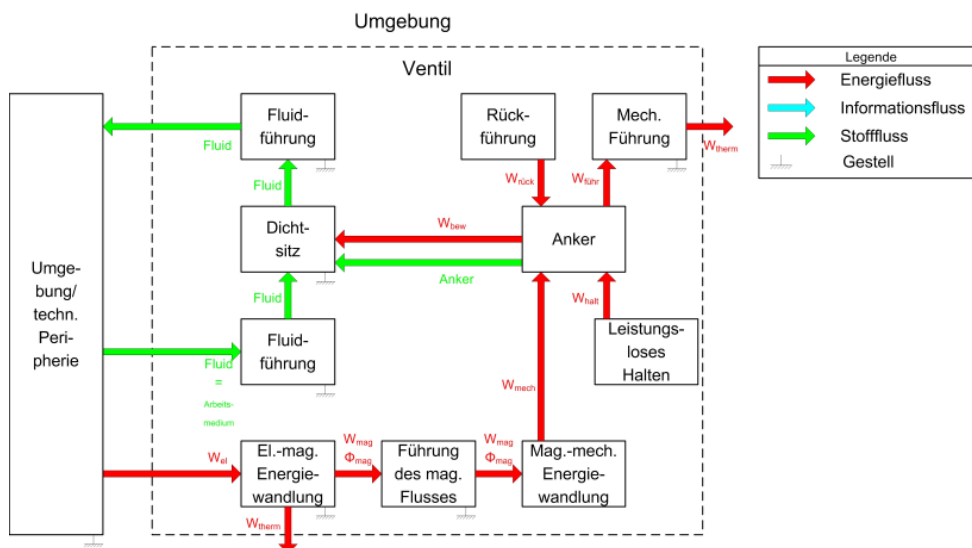


Abbildung 5.1: Funktionsstruktur eines Ventils

Die Aufgaben der Funktionselemente

Die elektromagnetische Energiewandlung findet in einer Spule statt. Die Führung des magnetischen Flusses wird durch den Eisenkreis realisiert. In diesem Eisenkreis dient ein Luftspalt der Wandlung von magnetischer in mechanische Energie und diese wirkt auf den Anker. Je nach Bauform wird der Anker im bestromten oder unbestromten Zustand ausgelenkt. Damit er sich auf einer gewünschten Bahn bewegt, ist eine mechanische Führung notwendig. Um in seine Ausgangslage zurück zu gelangen, ist eine Rückführung vorzusehen. Die Funktion des leistungslosen Haltens kann z. B. über einen Permanentmagnet oder einer Feder erfüllt werden, der/die den Anker in einer oder mehreren Endlagen hält. Der Anker bewegt den Dichtkörper an den Dichtsitz und bewirkt das Schließen des Fluidkanals. Somit wird ein weiteres Durchströmen des Mediums verhindert. Für den Fluidkanal gibt es zwei oder mehrere Schnittstellen (je nach Bauart des Ventils). Diese sind die Koppellemente des Ventils zu seiner Umgebung.

5.2 Erarbeitung möglicher Varianten auf Prinzipiebene

Die hier dargestellten Varianten 1 bis 3 basieren auf dem Prinzip nach Abbildung 4.1 und 4.8. Ein Entwurf, der mit einer Kugel als Ventilkörper und vollständig in LTCC-Technik entworfen wurde, wurde verworfen. Ebenso das gleiche Prinzip hergestellt in MIM-Technik. Diese zeigten erheblichen Mehraufwand in der Montage als die hier vorgestellten Varianten und ein keramischer Dichtsitz wurde aufgrund spröder Materialeigenschaften als ungeeignet befunden. Die Variante 2 berücksichtigt die Gestaltungsrichtlinien der MIM-Technik (siehe Abschnitt 2.2.1). Einzig die geforderte geringe Konizität der Bauteile wurde in den Zeichnungen nicht dargestellt. Variante 3 basiert auf Siliziumtechnologien.

5.2.1 Variante 1

Die Motivation in diesem Prinzip liegt darin, dass das gesamte Ventil aus einem LTCC-Gehäuse gefertigt ist und somit ein nahezu montagefreies Fertigen (mit Ausnahme des Aufkleben des Ankers) möglich ist. Abbildung 5.2 stellt eine Anordnung dar, die das in Abbildung 4.1 behandelte Prinzip aufgreift und modifiziert.

Der Aufbau

Grundsätzlich ist zu erwähnen, dass die Anzahl der hier dargestellten Schichten symbolischen Charakter besitzen und keine Rückschlüsse auf die tatsächlich benötigte Anzahl erlauben. Die Schichten A und B stellen die Schichten der Grundplatte (7) dar, die den unteren Teil des Eisenkreises und den Fluidkanal bilden. Sie führen die Kontakte der Spule über Vias (1) nach außen. Die Schicht C beinhaltet die Spulenwicklungen (5). Die Schichten D bis F dienen

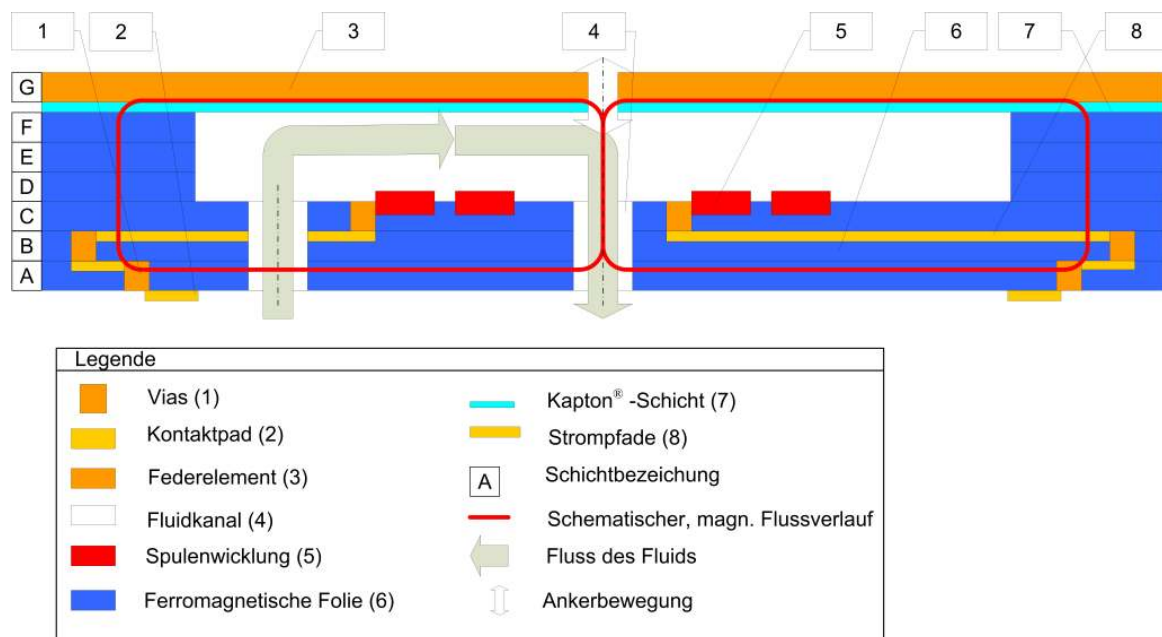


Abbildung 5.2: Prinzip Variante 1

als Abstandshalter zwischen Anker (3) und Grundplatte. Alle diese Schichten bestehen aus ferromagnetischen Folien um den magnetischen Widerstand zu verringern. Die dargestellte Ausführung leitet den magnetischen Fluss hauptsächlich in den ferromagnetischen Tapes und dem Anker. Eine Folie des Typs Kapton® (7) des Herstellers *DuPont* [DuP10] zwischen Schicht F und G verbessert die chemische Beständigkeit des Ankers, dient als Dichtsitz und fungiert als führende Feder. Somit lässt sich das Blech (3) als Mäanderfeder realisieren.

Ferromagnetische Folie

Die Firma *Heraeus* bietet zwar z.Z. zwei Sorten an, jedoch sind die jeweiligen Datenblätter noch unvollständig. Wesentliche Eigenschaften sind die nicht elektrische Leitfähigkeit, eine Permeabilität zwischen 100 und 150 und laterale Schrumpfungen zwischen 0,5 und 17,5% [Her10]. Diese Tapes können per Drucksintern mit nicht ferromagnetischen Tapes verbunden werden¹. Jedoch sind Materialwechselwirkungen derart zu erwarten, dass die magnetischen Eigenschaften erheblich beeinträchtigt werden. Da diese Beeinträchtigungen noch unbekannt sind, wird diese Variante ausschließlich mit ferromagnetischen Tapes aufgebaut.

Die Schnittstellen des Arbeitsmediums

Eine Lösung stellen die sogenannten Einpresspatronen dar. Die Firma *Camozzi GmbH Pneumatik* [Cam10] bietet das kleinste Modell, das in Abbildung 5.3 dargestellt ist. Eine solche Einpresspatrone sollte jedoch nicht in die spröde Keramik eingepresst, sondern eingeklebt werden.

¹Nach Aussagen von Frau Dipl.-Ing. Heike Bartsch de Torres aus dem Fachgebiet Elektroniktechnologie der Technischen Universität Ilmenau [Bar10]

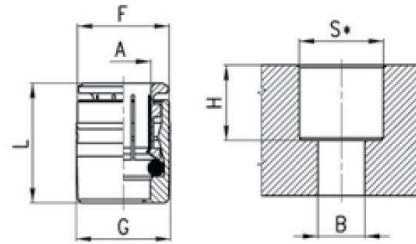


Abbildung 5.3: Einpresspatrone [Cam10]

Mit der Aussicht der Anwendung des Ventils in einer Ventilinsel kann in den Fluidkanal eine zylindrischer Kanal so eingeformt werden, dass eine auf der Ventilinsel aufgebraute Tülle mit O-Ring dort hinein ragt. Um die Dichtigkeit zu gewährleisten sollte eine Vorspannvorrichtung an der Ventilinsel angebracht sein.

Die Fertigung

Abbildung 5.4 stellt die wesentlichen Prozessschritte der Grundschichten A bis C dar: Im Schritt 1 werden die zugeschnittenen (bzw. perforierten) Tapes gestanzt. Diese Löcher werden im Schritt 2 gefüllt um die Durchkontaktierung zu ermöglichen. Durch Prägen (Schritt 3) der Tapes ist es möglich, die Leiterquerschnitte zu erhöhen. Im Schritt 4 werden die Strompfade mittels Siebdruckverfahren aufgedruckt. Nachdem die Tapes gestapelt und gepresst wurden, werden sie gesintert. Abschließend wird das Federstahlblech aufgeklebt. Wurde dieses vorher vereinzelt, können nun einzelne Ventile herausgebrochen werden.

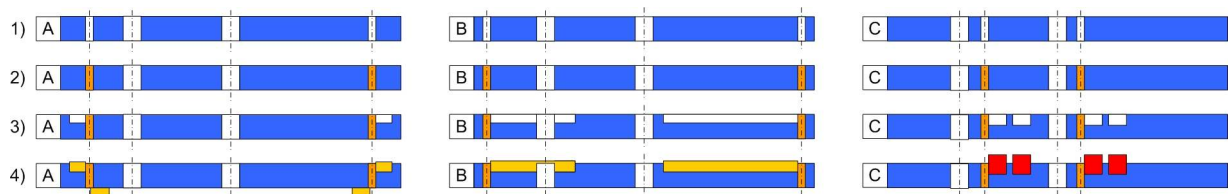


Abbildung 5.4: Wesentliche Prozessschritte

5.2.2 Variante 2

Das Gehäuse dieser Variante wird mit dem MIM-Verfahren hergestellt und der Anker wird als Klappanker ausgeführt. Abbildung 5.5 stellt diese Variante dar.

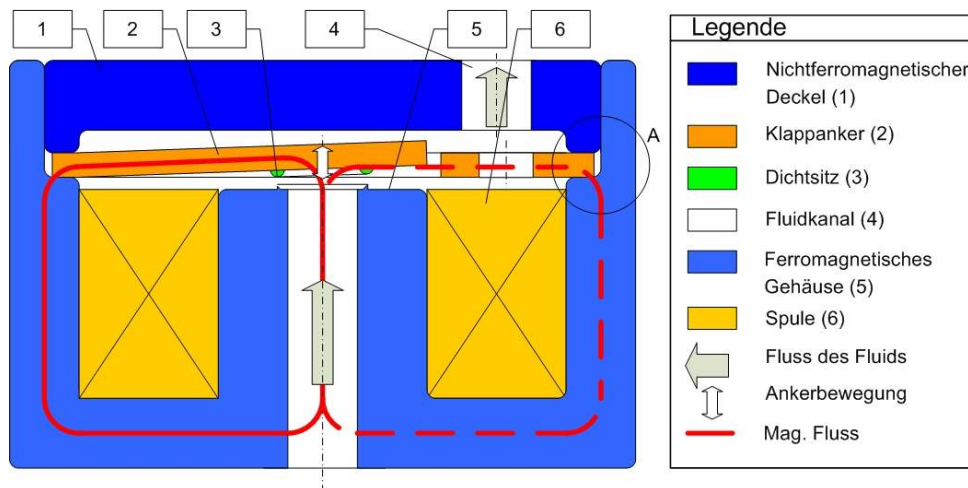


Abbildung 5.5: Prinzip Variante 2

Der Aufbau

Eingebettet in ein Gehäuse (5), das aus weichmagnetischem Material (z.B. (1.4542) der Firma *MIM-Technik GmbH* [MIM10]) im MIM-Verfahren hergestellt wurde, liegt die Spule (6) zur Erzeugung des magnetischen Flusses. Es kann eine herkömmlich gewickelte Spule eingesetzt werden, was einen hohen Kupferfüllfaktor und eine hohe Wicklungszahl ermöglicht. Eine mit dem *Falt-Flex-Verfahren* hergestellte Spule benötigt zusätzlichen Bauraum, da die Kontaktpads neben dem eigentlichen Spulenkörper angebracht sind. Eine Spule, hergestellt nach dem *LTCC-Verfahren*, benötigt eine Nachbearbeitung der unten liegenden Kanten, damit der Luftspalt zwischen Spulenkörper und Gehäuse möglichst klein gehalten werden kann. Die Kontaktpads können in der Ventilkammer angeordnet werden. *LTCC-Spulen* sind jedoch wesentlich teurer als herkömmliche, so dass in dieser Variante eine herkömmliche Spule bevorzugt wird. Zu beachten ist dabei, dass die Spule und die Anschlüsse gut isoliert sind, da sie Kontakt zum Arbeitsmedium haben.

Auf das Gehäuse wird der Klappanker (2) gelegt, der beim Aufbringen des Deckels (1) form- und kraftschlüssig fixiert wird. An den Anker wird ein Elastomer (3) einvulkanisiert, das als Dichtsitz fungiert. Zum Schluss wird der Deckel, der aus einem nichtferromagnetischen Material (z.B. (1.4404) der Firma *MIM-Technik GmbH*) im MIM-Prozess gefertigt ist, in das Gehäuse geklebt, gebondet oder geschweißt.

Detail A

Die Formgebung, wie sie im Detail A (siehe Abbildung 5.6(a)) zu sehen ist, hat den Vorteil, dass der Deckel bei der Montage seitlich nicht verschiebbar ist. Der Anker kann einfach in das Gehäuse gelegt werden und wird anschließend vom Deckel form- und kraftschlüssig gefügt. Gehäuse und Anker können von oben mittels Schweißen oder Kleben gefügt werden.

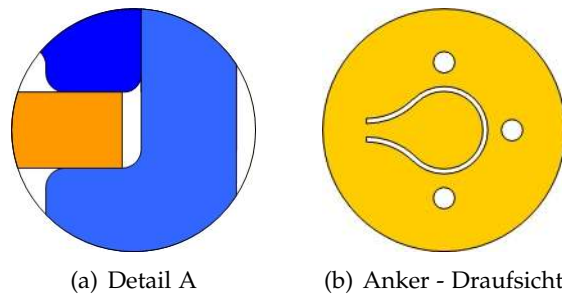


Abbildung 5.6: Details

Die Schnittstellen des Arbeitsmediums

Da Gewindebohrungen an MIM-Bauteilen nur nachträglich herstellbar sind, stellen RS-Schraubverbindungen eine ungünstige Art der Schnittstelle dar. Daher wird die Verwendung von Einpresspatronen bevorzugt.

Der Magnetkreis

Der magnetische Fluss muss durch den Federanker, der eine geringe Querschnittsfläche aufweist. Durch die Reduzierung des parasitären Luftspaltes auf eine in Abbildung 5.6(b) dargestellten Weise fungiert der tropfenförmige Ausschnitt auch als Arbeitsluftspalt in dem eine Reluktanzkraft erzeugt wird. Zusätzliche Löcher ermöglichen den Durchfluss des Arbeitsmediums. Somit kann der Luftspalt im Blech mittels Lasern, Stanzen oder Wasserstrahlschneiden so klein wie möglich gestaltet werden.

5.2.3 Variante 3

Diese Variante (Abbildung 5.7) ist auf Basis von Silizium aufgebaut und dem Prinzip des in Abbildung 4.8 dargestellten Ventils angelehnt.

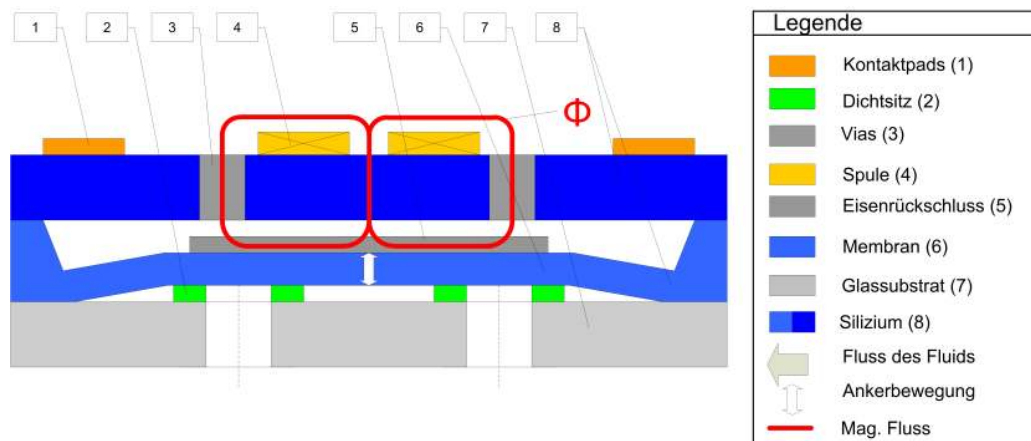


Abbildung 5.7: Prinzip Variante 3

Der Aufbau

Ein Glassubstrat (7) trägt die zwei darüber gestapelte und strukturierte Siliziumwafer (8). Auf dem Substrat befindet sich der Dichtsitz (2) des Ein- und Auslasses. Auf der Membran (6) ist eine ferromagnetische Schicht (5) aufgebracht. Auf der oberen Siliziumschicht ist eine planare Spule (4) und die entsprechenden Kontaktpads (1) zu sehen. Als optional zu betrachtende Elemente sind Vias (3) mit ferromagnetischen Material zur magnetischen Flussführung eingebracht.

Die Fertigung

Die Fluidkanäle im Glas können mittels anisotropen Ätzen gefertigt werden. Abdichtende O-Ringe können durch Abscheiden eines Polymers realisiert werden. Die Membran lässt sich mittels nasschemischen Ätzen ausformen und die darauf angebrachte ferromagnetische Schicht mittels LiGA-Verfahren schichten oder galvanisch abscheiden. Die obere Siliziumschicht kann mittels Dickschichttechnologien strukturiert werden. Vias lassen sich durch anisotropes Ätzen des Siliziums und anschließendes Füllen mit ferromagnetischen Pasten mit dem Siebdruckverfahren realisieren. Die Fertigbarkeit wurde in [SLA00] nachgewiesen.

5.3 Auswertung

Die Verwendung drei verschiedener Fertigungstechnologien für die drei aufgestellten Varianten fordert neben dem direkten Vergleich der Varianten den Vergleich der Technologien. Somit wurden Kriterien ausgewählt, die beides vergleichen.

Die Kriterien

- Ventilanzahl je Batch (max) (1)
- Formtoleranzen (min) (2)
- Montageaufwand (min) (3)
- Magnetkreis (max) (4)
- Kompaktheit (max) (5)

Zu (1) - Ventilanzahl je Batch

Während bei der LTCC-Technik das Strukturieren einzelner Schichten linear abläuft, kann im MIM-Prozess ein Array von Gehäuseteilen in einem Guss realisiert werden. Da ein MIM-Array Stege zwischen den einzelnen Gehäuseteilen benötigt um die Spritzgussmasse zu verteilen, kann es nach Aussagen der Firma *MIM – Technik GmbH* [MIM10] zu verfrühter Abkühlung der Masse in den Stegen kommen. Um dem entgegen zu wirken, kann es ab einer bestimmten Array-größe notwendig werden, die Stege aktiv zu heizen, was den Fertigungsaufwand erheblich steigert. Dem gegenüber steht die klassische Mikrosystemtechnik mit verschiedenen Verfahren zur Strukturierung von Silizium.

Um den Fertigungsaufwand einschätzen und quantifizieren zu können, wird die Anzahl an Ventilen, die in einem Batch hergestellt werden können als Kriterium herangezogen. Tabelle 5.1 fasst die folgenden Überlegungen zusammen.

1. Um das aktive Heizen von Stegen zu vermeiden wird ein Array von 5×5 Bauteilen angenommen. Da Variante 2 aus zwei MIM-Bauteilen besteht, müssen zwei Prozesse gefahren werden.
2. Das LTCC-Bauteil besteht aus einer unbekanntenen Anzahl an Schichten, die seriell gefertigt werden müssen. Die ferromagnetischen Tapes der Firma *Heraeus* [Her10] weisen Kantenlängen von 125 mm bis 140 mm auf. Mit der Annahme, ein Ventil hat eine Kantenlänge von 20 mm, können bis zu 49 Ventile parallel prozessiert werden.
3. Die Kantenlänge eines Mikroventils nach [SLA00] beträgt etwa 3 cm. Flächenmäßig passen so 30 Stück auf einen 4-Zoll-Wafer. Dieser Richtwert wird zur Bewertung zugrunde gelegt.

Zu (2) - Formtoleranzen

Die Toleranzen des MIM-Prozesses liegen bei Abmessungen von 14 mm bei $+/- 60\mu\text{m}$ [MIM10], bei der LTCC-Technik bei $+/- 50 - 100\mu\text{m}$ [DuP10] und bei der Silizium-Technik unter $10\mu\text{m}$ [MMP05].

Zu (3) - Montageaufwand

Als quantifiziertes Kriterium wurde die Anzahl an Einzelteilen herangezogen, die zur Endmontage benötigt werden.

Zu (4) - Magnetkreis

Die Qualität des Magnetkreises wird daran gemessen, wieviel Prozent des Weges des magnetischen Flusses von weichmagnetischen Materialien geführt wird.

Zu (5) - Kompaktheit

Die Kompaktheit stellt das Verhältnis von Tot- zu Nutzvolumen dar, wobei das Nutzvolumen das benötigte Hohlraumvolumen zur Fluidführung und das Totvolumen alle übrigen Hohlräume darstellt.

Kriterium	Punkte p				
	1	2	3	4	5
Ventilanzahl je Batch	10Stck	20Stck	30Stck	40Stck	50Stck
Formtoleranz	100 μ m	80 μ m	60 μ m	40 μ m	20 μ m
Einzelteile für Montage	5	4	3	2	1
Magnetkreis	50%	60%	70%	80%	90%
Kompaktheit	>2	1-2	0,5-1	0-0,5	0

Tabelle 5.1: Wertempfindungstabelle zur Bewertung der aufgestellten Varianten

Die Wichtung g

Die Wichtung stellt ein Maß der Relevanz eines Kriteriums dar. Auf einer Skala von 1 bis 5 wird 5 als sehr relevant betrachtet. Bei der Auswertung wird der Schwerpunkt auf den Magnetkreis gelegt.

Tabelle 5.2: Bewertungstabelle

Kriterium	i	g_i	Variante1		Variante2		Variante3	
			p_{1i}	$g_{1i} \cdot p_{1i}$	p_{2i}	$g_{2i} \cdot p_{2i}$	p_{3i}	$g_{3i} \cdot p_{3i}$
Ventilanzahl je Batch (max)	1	1	4	4	2	2	3	3
Formtoleranzen (min)	2	2	2	4	3	6	5	10
Montageaufwand (min)	3	4	4	16	2	8	3	12
Magnetkreis (max)	4	5	4	20	5	25	2	10
Kompaktheit (max)	5	3	1	3	3	9	2	6
$W = \sum_{i=1}^5 g_i \cdot p_i$				47		50		41

Der Tabelle ist zu entnehmen, dass Variante 2 am besten bewertet wurde. Es ist jedoch zu bemerken, dass alle drei Varianten relativ gleich bewertet wurden. Unterschiede sind in einzelnen Kriterien zu sehen, was zu spezifischen Anwendungen der einzelnen Varianten führen kann.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird das Ziel verfolgt, elektromagnetische Ventilbauformen mit verschiedenen Fertigungstechnologien für einen Fertigungsprozess im Batch zu erarbeiten. Im Mittelpunkt der Untersuchung steht eine Recherche nach geeigneten Ventilbauformen unter den Aspekten der Miniaturisierbarkeit und Fertigbarkeit mittels MIM-, LTCC- und Siliziumtechnologie. Weiterhin wurden Magnetkreise systematisiert und hinsichtlich ihrer Batchtauglichkeit bei Verwendung der o. g. Fertigungstechnologien untersucht.

Zu Beginn der Arbeit werden die Grundlagen der LTCC-Technik, der Falt-Flex-Technik und der MIM-Technik vermittelt. Dabei werden die Verfahren beschrieben, die Vor- und Nachteile aufgezählt und Restriktionen genannt.

Die im Kapitel 4 präsentierten Patente und Publikationen weisen bis auf die Siliziumventile keine Batchkompatibilität auf. Erst nach einer geometrischen Formänderung der Bauteile wird diese Kompatibilität ersichtlich. Vorschläge zu diesen Bauformen wurden in die entsprechenden Abschnitte eingefügt. Die Auswertung zeigte auf, dass der Flach-/Klappanker-Topfmagnet die geeignetste Bauform für miniaturisierte Ventile darstellt.

Es wurde die LTCC-Technik, die MIM-Technik sowie die Silizium-Technik als Basis der drei aufgestellten Varianten verwendet. Dabei wurden die jeweiligen Restriktionen berücksichtigt und weitestgehend in den Prinzipskizzen dargestellt.

Die auf der LTCC-Technik basierende Variante 1 weist eine hohe Funktionsintegration auf. Das Gehäuse führt den magnetischen Fluss und ist Träger der Spule und deren Kontaktierung und formt den Fluidkanal. In den Anker sind die Funktionen der Führung und Rückführung sowie der Dichtsitz und die Weiterführung des magnetischen Flusses integriert. Zu beachten ist, dass derzeitige ferromagnetische Tapes eine Permeabilität von 150 erreichen und noch nicht ausreichend hinsichtlich ihrer Materialeigenschaften untersucht wurden.

Die auf der MIM-Technik basierende Variante 2 erreicht aufgrund geeigneter Werkstoffe sehr hohe Permeabilitäten. Diese Technik ist auch für den Einsatz batch-orientierter Fertigung geeignet und hinsichtlich des Magnetkreises zu bevorzugen. Jedoch ist hier der Montageaufwand am höchsten.

Die auf Silizium-Technik basierende Variante 3 eignet sich hervorragend zur Miniaturisierung, da strukturierende Verfahren der Mikrosystemtechnik im Vergleich zu den anderen beiden Technologien wesentlich höhere Genauigkeiten erreicht. Da Silizium diamagnetisch ist, müssen für den Magnetkreis zusätzliche ferromagnetische Schichten angebracht werden.

Bei der Bewertung erzielten alle Varianten ein ähnliches Gesamtergebnis. Die Unterschiede sind in den einzelnen Kriterien zu finden. Dies deutet darauf hin, dass die spezielle Anwendung eine geeignete Wahl der zu verwendenden Technologie treffen soll. Da Variante 2 die besten Magnetkreiseigenschaften aufweist, ist sie besonders zum Steuern hoher Druckdifferenzen geeignet. Variante 1 eignet sich bei Verwendung von Säuren, Basen und Ölen, da die verwendeten Werkstoffe gute chemische Beständigkeiten aufweisen. Variante 3 eignet sich zur Integration in MEMS-Anwendungen zur Steuerung von Arbeitsmedien.

Das Tellersitzventil stellte sich als bestes Ventilprinzip heraus und wurde in allen drei Varianten verwendet.

6.2 Ausblick

Diese Arbeit zeigt auf, dass batchkompatible Fertigungsansätze für alle der hier verwendeten Fertigungstechnologien existieren.

Für die aufgestellte Variante 1 sollten die verwendeten ferromagnetischen Tapes auf chemische Beständigkeit und dielektrische Eigenschaften untersucht werden.

Zur Realisierung der in Variante 3 optional verwendeten ferromagnetischen Vias muss ein Fertigungsprozess erarbeitet werden.

Für alle Varianten ist eine Simulation des Magnetkreises und eine Dimensionierung des Ventils durchzuführen.

Anschließend sollten Prototypen auf ihre Funktionsweise untersucht werden.

Literaturverzeichnis

- [Bar10] BARTSCH DE TORRES, HEIKE: *Ferromagnetische LTCC-Tapes*. 2010. – Angaben per E-Mail am 08.03.2010 um 13:42 Uhr erhalten
- [Bat09] TECHNISCHE UNIVERSITÄT ILMENAU (Hrsg.): *BatchMags - Batch-gefertigte miniaturisierte Magnetventile*. Website. http://www.tu-ilmenau.de/batchmag/fileadmin/template/batchmags/pdf/Broschuere_A4.pdf. Version: 2009, Abruf: 01.03.2010
- [Bon06] BONITZ, Björn: *Konstruktion eines Mikroventils unter Nutzung der MIM-Technologie*, Technische Universität Ilmenau, Projektarbeit, 2006
- [Bür08] Schutzrecht DE 20 2008 015 303 U1 (19. November 2008). Bürkert Werke GmbH & Co.KG.
- [But08] BUTH, Christian: *Fertigungsgerechte Konstruktion eines neutralen Magnetventils in MIM-Technologie*, Technische Universität Ilmenau, Projektarbeit, 2008
- [Cam10] CAMOZZI GMBH PNEUMATIC (Hrsg.): *Steckverschraubungen Superrapid Micro Serie 6000*. Website. http://www.camozzi.de/de/documents/de/verbinden/1/DEU_4_1_05.pdf. Version: 2010, Abruf: 06.03.2010
- [DuP10] DUPONT (Hrsg.): *DuPont - The miracles of Science*. Website. http://www2.dupont.com/DuPont_Home/en_US/. Version: 2010, Abruf: 13.03.2010
- [Fal09] *Gefaltet, nicht gewickelt*. Website. <http://www.spule.net/2.html>. Version: 2009, Abruf: 24.02.2010
- [Fra02] FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT (Hrsg.): *Mikroventil (normal offen)*. Website. http://www.izm-m.fraunhofer.de/de/index/dieabteilungen3_n400001abteilungen_a/dieabteilungen3_n40055cabteilungen_a//dieabteilungen3_n400582abteilungen_a_2/dieabteilungen3_n40066babteilungen_a_2/dieabteilungen3_n40066babteilungen_a_2.html. Version: Mai 2002, Abruf: 01.03.2010
- [GPG07] GASPAR ; PIYASENA ; GOMEZ: Magnetically Controlled Valve for Polymeric Microfluidic Devices. In: *NSTI-Nanotech (2007)*
- [Her10] HERAEUS (Hrsg.): *LTCC Materials*. Website. http://www.heraeus-thickfilm.com/en/productsapplications/ltccmaterials/ltcc_materials_1.aspx. Version: März 2010, Abruf: 06.03.2010

- [KEQ⁺08] KALLENBACH, Eberhard ; EICK, Rüdiger ; QUENDT, Peer ; STRÖHLA, Tom ; FEINDT, Karsten ; KALLENBACH, Matthias: *Elektromagnete - Grundlagen, Berechnung, Entwurf und Anwendung*. 3. Aufl. Wiesbaden : Vieweg Teubner / GWV Fachverlage GmbH, 2008
- [LTC09] MICRO-HYBRID ELECTRONIC GMBH (Hrsg.): *Mikrosysteme*. Website. <http://www.micro-hybrid.de>. Version: 2009, Abruf: 23.2.2010
- [MEM09] *DESIGN OF A MEMS MAGNETIC BISTABLE VALVE*. D. Creyts and P. Hesketh and G. Frye-Mason, 2009 . – 7 S.
- [MIM09] OHNMACHT& BAUMGÄRTNER GMBH & Co. KG (Hrsg.): *MIM-Prozess*. Website. http://www.mimplus.de/d_technologie_1.html. Version: 2009, Abruf: 01.03.2010
- [MIM10] MIMTECHNIK GMBH (Hrsg.): *MIMTechnik GmbH - Deutschland/Thüringen*. Website. <http://www.mimtechnik.de>. Version: 2010, Abruf: 04.01.2010
- [MLF76] Schutzrecht DT 26 00 196 A1 (5. Januar 1976). MONPETIT ; LOUIS ; FONCQUEVILLERS (Erfinder); S.A.D.B.A. Clichy (Anmelder).
- [MMP05] MENZ, Wolfgang ; MOHR, Jürgen ; PAUL, Oliver: *Mikrosystemtechnik für Ingenieure*. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005
- [MST06] *MST Infobörse*. Website. <http://www.mstonline.de/publikationen/download/ib67.pdf>. Version: 2006, Abruf: 01.03.2010
- [Rar06] *LTCC-Technologie*. Website. http://www.radarauge-project.com/content/stuff/news/ITG_BMBF_10_Schwanke.pdf. Version: 25. Oktober 2006, Abruf: 01.03.2010
- [Ree09] REETZ, Kay: *Untersuchung von Ventilinselnkonzepten für ein magnetisches Mikroventil*, Technische Universität Ilmenau, Projektarbeit, 2009
- [RHE10] RHE MICROSYSTEMS GMBH (Hrsg.): *LTCC*. Website. <http://www.rhe.de/de/LTCC.html>. Version: 23. Jan. 2010
- [Rie04] RIETHMÜLLER, Jörg: *Eigenschaften polarisierter Elektromagnete und deren Dimensionierung anhand eines Entwurfsalgorithmus mit einem Optimierungsverfahren*. Ilmenau, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2004
- [SLA00] SADLER, Daniel ; LIAKOPOULOS, Trifon ; AHN, Chong: A Universal Electromagnetic Microactuator Using Magnetic Interconnection Concepts. In: *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS* (2000)
- [Ste10] STENZEL MIM TECHNIK (Hrsg.): *Überlegenheit der MIM Technik*. Website. <http://www.stenzel-mimtechnik.de/vorteile/vorteile.html>. Version: 2010, Abruf: 23.02.2010

- [TM99] Schutzrecht (15. April 1999). TIMOTHY, W. ; MICHAEL, M. (Erfinder); IEP GROUP INC. (Anmelder). Schutzrecht: WO 99/17749
- [VZ06] VÖLKLEIN, Friedemann ; ZETTERER, Thomas: *Praxiswissen Mikrosystemtechnik*. 2. Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2006
- [wik09a] WIKIPEDIA (Hrsg.): *Low Temperature Cofired Ceramics*. Website. http://de.wikipedia.org/wiki/Low_Temperature_Cofired_Ceramics. Version: 3. Juli 2009, Abruf: 02.02.2010
- [wik09b] WIKIPEDIA (Hrsg.): *Magnetischer Kreis*. Website. http://de.wikipedia.org/wiki/Magnetischer_Kreis. Version: 16. November 2009, Abruf: 29.03.2010
- [wik10] WIKIPEDIA (Hrsg.): *Mikroventil*. Website. <http://de.wikipedia.org/wiki/Mikroventil>. Version: 23. Januar 2010, Abruf: 01.03.2010
- [Wil75] Schutzrecht DT 23 35 460 A1 (30. Jan. 1975). WILL, Gerhard (Erfinder); Robert Bosch GmbH Stuttgart (Anmelder).

Anhang A – Ferromagnetisches Tape

LTCC Tape

AHT98-029

Low Temperature Co-firing Ceramic Tape

Description

Heratape® AHT98-029 is a Ferritic Low Temperature Co-firing Ceramic (LTCC) Tape supplied at following thicknesses and usable width:

	Thickness		Width	
AHT98-029		135 µm		125 mm

Other thicknesses are available on request. AHT98-029 can also be provided as single sheets.

AHT98-029 is recommended for free sintering. It can be used as a stand-alone system but is compatible with Heraeus base LTCC tape CT707. AHT98-029 contains < 0.05 wt.-% Pb.

Typical Properties of Green Tape

Color	Brown
Green Density	g/cm ³
Laminated Density	g/cm ³
Compressibility	%
Weight Loss	%

Note: All measurements were performed on 6-layer tape laminates (tape thickness: 150 µm) due to Heraeus' recommended process guidelines.

Recommended Process Guidelines

AHT98-029 can be processed with typical LTCC process parameters. Recommended process guidelines are:

Storage and Pre-treatment

Storage	Kept in sealed bags at 25 °C.
Pre-Treatment	Not necessary.

Lamination

Equipment	Isostatic press
Pressure	210 bar (21 N/mm ²)
Temperature	70 °C
Pre-heating	3 min
Total Time (incl. Pre-heating)	10 min

Tape must be kept in a sealed, evacuated bag during lamination in order to prevent moistening by isostatic press media.

Firing*

	Fe900_3_(kurz)
Ramp Rate (25 °C to 400 °C)	0.5 K/min
(400 °C to Peak Temp.)	5 K/min
Peak	120 min at 900 °C
Cooling	8 K/min
Total Time	12 hours
setter	alumina

*Firing profile: see also below

LTCC Tape AHT98-029

Low Temperature Co-firing Ceramic Tape

Properties

Typical Fired Physical and Chemical Properties

Color	Brown
Thermal Coefficient of Expansion (25 – 300 °C)	8.0*10 ⁻⁶ /K
(25 °C – T _g)	8.5*10 ⁻⁶ /K
Tape Shrinkage x,y	% ± 0.5
z (laminated to fired)	% ± 4.0
Fired Density*	4.56 g/cm ³
Flexural Strength 4 point bended	t.b.d.
Thermal Conductivity	t.b.d.
Pb	< 0.05 wt.-%
Chemical Stability	t.b.d.

Typical Fired Electrical and Magnetic Properties

Dielectric Constant (20 GHz)	t.b.d.
(100 GHz)	
Dissipation Factor (20 GHz)	t.b.d.
(100 GHz)	
Bulk Resistivity	t.b.d.
Break Down Voltage	t.b.d.
Permeability	150

Note: All electrical testing is performed on parts manufactured according to Heraeus' recommended process guidelines with silver-based conductor systems.

Note: Testing is performed on 20-layer tape substrate. All other physical testing is performed on 6-layer tape substrates (tape thickness: 150 µm) with no metallization, and processed according to Heraeus' recommended processing guidelines

Todo list