

Abschlussbericht der TU Ilmenau

Teil 1: Kurze Darstellung der Aufgabenstellung; der Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde; zum Ablauf und zur Planung des Projektes; zum wissenschaftlichen und technischen Stand, an den angeknüpft wurde; zur Zusammenarbeit, die für die Bewältigung der Arbeit mit anderen Stellen notwendig war.

I. Kurzdarstellung

Aufgabenstellung

Die Aufgabe der TU-Ilmenau im Rahmen des VERDIAN-Projektes bestand im Wesentlichen in der Weiterentwicklung der Entwurfsmethodik für mechatronische – insbesondere elektromagnetischer – Antriebssysteme, der Konzeption und Untersuchung neuer Antriebskonzepte für Ventile, Linearschrittantriebe und planare Positioniersysteme sowie in der Untersuchung der Miniaturisierbarkeit von magnetischen Direktantrieben und Sensoren sowie deren verfahrenstechnischer Umsetzung.

Im Einzelnen ergaben sich folgende wesentliche Arbeitsschwerpunkte:

Arbeitsschwerpunkt Entwurfsmethodik:

Im Rahmen des VERDIAN-Projektes war es das Ziel bestehende Entwurfswerkzeuge für elektromagnetische Antriebssysteme weiterzuentwickeln sowie die Methodik im Bereich der Entwicklung von mechatronischen Antriebssystemen zu erweitern. Schwerpunkt lag hierbei auf der Berücksichtigung von thermischen, Hysterese- und Wirbelstromeffekten bei der Auslegung von Magnetkreisen und dem Erarbeiten von Gestaltungsrichtlinien für Magnetaktoren. Hierzu sollten sowohl FEM Werkzeuge sowie das an der TU-Ilmenau entwickelte Entwurfswerkzeug SESAM weiterentwickelt und so angepasst werden, dass sie für frühe Entwurfsphasen sowie domänenübergreifend für den Entwurf von elektromagnetischen Antrieben nutzbar sind

Ein weiteres Ziel bestand in der Entwicklung eines Konzeptes für einen Funktion-Struktur-Speicher, der die Auswahl von verschiedenen (im Wesentlichen elektromagnetischen) Antriebssystemen in verschiedenen Entwurfsphasen anhand unterschiedlicher Ordnungskriterien ermöglicht.

Arbeitsschwerpunkt Mehrkoordinaten-Direktantriebssysteme:

Ziele dieses Arbeitspunktes waren die Entwicklung und Untersuchung neuartiger Konzepte und Strukturen für Positioniersysteme unter besonderer Beachtung der Koppelstellen und die Untersuchung alternativer Gestellwerkstoffe für Positioniersysteme.

Schwerpunkt der Untersuchungen zu den Gestellwerkstoffen war dabei die Suche nach Alternativen zu den aktuell verwendeten Granitbauteilen bei vergleichbaren mechanischen und thermischen Eigenschaften und Langzeitstabilität sowie Kosten.

Ziel der Untersuchungen zu alternativen Strukturen für Positioniersysteme war die Entwicklung von kinematischen Strukturen, die ein gutes Verhältnis zwischen Aufstellfläche und Verfahrbereich sowie wenn möglich eine Durchlichtbearbeitung bei, gegenüber heutigen Strukturen und Konzepten, gleichbleibenden dynamischen Eigenschaften erlauben.

Arbeitsschwerpunkt Linearschrittantrieb:

Die grundlegende Magnetkreisauslegung sowie der Magnetkreisoptimierung für einen angestrebten Demonstrator waren Kern dieses Arbeitsschwerpunktes. Ziel dieses Arbeitsschwerpunktes war die Validierung der theoretischen Untersuchungen anhand experimenteller Untersuchungen am geplanten Demonstrator (messtechnische Erfassung von Kraft-Weg-Kennlinien). Die Ableitung von Strategien für die Steuerung bzw. Regelung des Antriebes mittels Dynamiksimulationen sowie die Entwicklung eines Flachanker-Linearschrittmotors in Form integrierbarer flacher Baugruppen auf der Basis von Wechselempol-Schrittmotoren als Baukastensystem mit den wesentlichsten Parametern für die aktiven Elemente waren wesentliche Arbeitsschwerpunkte dieses Schwerpunktes.

Arbeitsschwerpunkte Schnellschaltventile und Mikroaktoren:

Ziel dieses Arbeitsschwerpunktes war die konsequente Verkleinerung von (Pneumatik-) Ventilen verbunden mit einer Steigerung des Quotient von Nennweite, Nenndruck, Magnetvolumen und Verlustleistung durch Anwendung neuartiger Antriebskonzepte und Bauformen. Die Entwicklung zielte darauf ab, Nennweite und Nenndruck bei Miniaturisierung möglichst beizubehalten, jedoch Volumen und Verlustleistung durch geeignete Maßnahmen deutlich zu verkleinern. Durch die Anwendung optimierter Funktionsprinzipien, durch die Materialoptimierung und durch Funktionenintegration sollte eine Miniaturisierung zu erreicht werden. Schwerpunkt war dabei die Entwicklung von funktionsoptimierten Materialien und funktionenintegrierenden Materialien, die einen essentiellen Beitrag zur Volumenreduzierung liefern sollten.

Außerdem war in enger Kooperation mit dem Projektpartner MiM-Technik die Integrationsmöglichkeit von geformten Sinterbauteilen (MIM) in mikrotechnisch hergestellten Bauteilen zu untersuchen. Insbesondere die technologischen Ergebnisse sollten über die Ventiltechnik hinaus Impulse für die Miniaturisierung von magnetischen Direktantrieben geben und damit für alle Partner im Wachstumskern relevant sein. Weiterhin wurden neue Fertigungskonzepte untersucht, die analog zur Elektronikfertigung eine Kostenreduzierung durch die parallele Herstellung eine Vielzahl von Bauelementen in einem Nutzen bzw. auf einem Substratträger ermöglichen.

Arbeitsschwerpunkt 3D-Magnetfeldsensorik:

In diesem Arbeitsschwerpunkt sollten die Potenziale mikrotechnischer Konzepte für Sensoren und Sensorkomponenten in Direktantrieben untersucht werden. Durch mikromechanisch unterstützte Integrationskonzepte unterschiedlicher kommerziell verfügbarer Sensorelemente sollten neuartige Vektorfeldmesszellen entwickelt werden, die eine orts aufgelöste dreidimensionale Erfassung der magnetischen Feldgestalt sowohl im Entwurfsprozess als auch während des Betriebs ermöglichen. Es wurden unterschiedliche Konzepte für Sensoren zum Einsatz in der Entwicklung (sehr präzise, klein aber hochpreisig) und Sensoren für den Applikationseinsatz (klein und preiswert) berücksichtigt.

In diesem Themenkomplex wurde das Potential von 3D- Mikroaufbautechniken in verschiedenen Bereichen der Sensorik untersucht. Die orts aufgelöste, räumliche Messung des magnetischen Feldes an den realen Funktionsstrukturen liefert ein essentielles Instrument für den Abgleich zwischen Entwurfsmodell und realem System und damit eine Verbesserung der Entwurfsmethodik.

Durch mikromechanisch unterstützte Integrationskonzepte (3D-Mikroaufbautechnik) kommerziell verfügbarer Sensorelemente sollten Vektorfeldmesszellen entwickelt werden, die die Defizite aktueller

Konzepte (im Wesentlichen große Baugröße, kleine Messbereiche und Beschränkungen bei der räumlichen Felderfassung) überwinden. Darüber hinaus wurden die Potentiale der mikromechanisch unterstützten Integration auch für die Weg- und Positionssensorik evaluiert.

Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde/ Zusammenarbeit mit Anderen

Am VERDIAN-Projekt beteiligt war die *TU Ilmenau* durch Fachgebiete (FG) *Entwurf Mechatronischer Antriebe* (EMA), *Feinwerktechnik* (FWT), *Mechatronik* (MTR) und *Micro-Mechanische Systeme* (MMS), *Elektrochemie und Galvanotechnik* (ECG) der *Fakultät für Maschinenbau*. Diese FG waren zu verschiedenen Anteilen an den Arbeitsgruppen:

- *Entwurfsmethodik* (im Wesentlichen FG EMA, FWT, MTR zusammen mit IMMS gGmbH)
- *Flachanker-Linearschrittmotor* (im Wesentlichen FG MTR zusammen mit MICROSTEP GmbH)
- *Schnellschaltventile und Mikroaktoren* (im Wesentlichen FG MMS, ECG, EMA zusammen mit KERN-Technik GmbH, LLT Applikation GmbH, MIMtechnik GmbH, Steinbeis Transferzentrum Mechatronik)
- *Mehrkoordinatendirektantriebe* (im Wesentlichen FG FWT zusammen mit IMMS gGmbH, TETRA GmbH und IDAM GmbH)

beteiligt.

Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Rahmen dieser Arbeitsgruppen wurden die im Projektplan enthaltenen Projektschwerpunkte bearbeitet. Dieser wurde sofern aufgrund sich im Projektverlauf ergebender, nicht vorab vorherseh- bzw. planbarer Änderungen angepasst. Die Änderungen wurden dem Projektträger mitgeteilt und begründet

Teil 2: Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse.

1 Schwerpunkt: Entwurfstools und Entwurfsmethodiken

Die Präzisierung der Aufgabenstellung (Pflichtenheft) ist der erste Schritt im konstruktiven Entwurfsprozess. Sie dient der Akkumulation aller Informationen und dem Erkennen von Informationslücken und somit der quantitativen Ergänzung der im Projekt geplanten Entwicklungsaufgaben.

Konkretes Ziel war die Erhebung der Anforderungen an die einzusetzenden Entwurfsmethoden um deren Akzeptanz sicherzustellen.

Ergebnis der Untersuchungen war eine Aufstellung verschiedener Entwurfsstrategien für elektromagnetische Antriebe und die Anforderungen, die sich daraus ergeben. Es wurden 5 verschiedene Strategien identifiziert:

Die *Statische Optimierung* dient der Ermittlung einer optimalen Geometrie bei gegebenen zu erreichenden Kräften, zu verrichtender Arbeit oder minimiertem Bauraum. Die bisher verfügbaren Tools und Methoden sind nicht in der Lage, effizient im Sinne einer Optimierung physikalische Effekte wie Sättigung, Hysterese oder auch komplizierte Streuflussverläufe zu berücksichtigen.

Ziel der *Dynamischen Optimierung* ist die Minimierung von Schaltzeiten oder benötigten Energiemengen während eines Schaltzyklus. Dabei müssen Effekte, die die Dynamik des Systems beeinflussen, wie Wirbelströme und Flussverdrängung und Hysterese, aber auch die Rückwirkung durch Bewegungsinduktion oder mechanisches Prellen, berücksichtigt und hinreichend genau modelliert werden.

Zum besseren Systemverständnis tragen *Parameterstudien* bei. Dabei können sowohl das statische als auch das dynamische Verhalten untersucht werden. Vorteilhaft ist hier vor allem das Berücksichtigen diskreter Stufungen bei einigen Größen (z. B. verfügbare Wickeldrahtdurchmesser).

Im Sinne eines robusten Entwurfs spielen die *Empfindlichkeitsanalyse* und die *Toleranzanalyse* eine große Rolle. Bei der Empfindlichkeitsanalyse erhält man für jeden Parameter einen Wert, der seinen Einfluss auf eine bestimmte Systemeigenschaft beschreibt. Auf diese Weise kann man besonders kritische Parameter ermitteln und in der Konstruktion entsprechend genau tolerieren. Die Toleranzanalyse gibt mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation Auskunft über den Einfluss von geometrischen, aber auch werkstofflichen Toleranzen und erlaubt so, die Streuung der Systemeigenschaften schon im Vorfeld zu berechnen und zu minimieren.

Anhand der so ermittelten Anforderungen erfolgte die Entwicklung/Weiterentwicklung der Entwurfsmethodik bzw. der Entwurfstools in den folgenden Arbeitspaketen.

1.1 Entwicklung von Verfahren für die Simulation und Optimierung von Magnetkreisen unter holistischen Gesichtspunkten

Ziel war die Entwicklung neuer oder die Anpassung bestehender Algorithmen zur dynamischen Optimierung. Transiente Effekte wie Induktivitäten, Wirbelströme und Bewegungsinduktion wirken sich stark auf

das dynamische Systemverhalten aus. Der hohe Rechenaufwand erlaubte bisher eine transiente Simulation von Schaltantrieben nur im Rahmen einer Nachrechnung, nicht im Sinne einer Optimierung.

Ein weiterer Punkt ist die Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Domänen. Ansteuerung/Elektronik, das mechanische Teilsystem und auch thermische Effekte beeinflussen den Magnetkreis moderner mechatronischer Komponenten. Es sollten gekoppelte Netzwerkmodelle mit Co-Simulation und Lagrange-Ansätze zur holistischen Modellierung untersucht werden.

SESAM als Plattform eignet sich besonders dafür, da hier schon ein leistungsfähiger Rechenkern für die Lösung nichtlinearer (Differenzial-)Algebraischer Gleichungssysteme vorhanden ist.

Zur Steigerung der Rechengeschwindigkeit wurde für die transiente Simulation eine adaptive Schrittweitensteuerung realisiert, die die Rechenzeiten verkürzen kann, ohne Genauigkeitseinbußen hinnehmen zu müssen. Dabei sind die Vorteile bei auf Integration beruhenden Lösungsverfahren für Differenzial-Algebraische Gleichungen größer als bei iterativen Verfahren.

Die Kopplung von Netzwerken aus verschiedenen Domänen mittels Vierpolen wurde untersucht, allerdings als zu aufwändig in der Umsetzung bewertet, da der SESAM-Rechenkern nicht kompatibel ist und komplett erneuert werden müsste. Dieser Arbeitsumfang ließ sich in der Projektlaufzeit nicht realisieren. Stattdessen wurde sich auf eine Verbesserung der vorhandenen Netzwerklöser bzw. ihres sinnvollen Einsatzes konzentriert. Die Ansteuerung und auch die Bewegungsdifferentialgleichung werden analytisch gegeben und numerisch mit integriert. Am Beispiel eines bistabilen Impulsmagneten wurde der Vorteil eines holistischen Systementwurfs gegenüber eines neutralen in Serie befindlichen Systems bei gleichen Schnittstellen nach außen nachgewiesen.

Ein physikalischer Effekt, der das Verhalten magnetischer Antriebe stark beeinflusst, aber bisher fast überhaupt nicht im Entwurfsprozess berücksichtigt werden konnte, ist elektromagnetische Hysterese. Neben der Nichtlinearität stellt hier die Nicht-Eindeutigkeit die große Herausforderung für die Berechnungsalgorithmen dar. Das Jiles-Atherton-Modell erlaubt im Gegensatz zu anderen bekannten Hysterese-Modellen (z.B. Preisach) eine deutlich kürzere Rechenzeit. Deshalb wurde das Modell als vielversprechend für die Implementation in SESAM und die Verwendung im systematischen Entwurf identifiziert. Mithilfe eines Entwurfsprozesses, der Hystereseeffekte berücksichtigt, lassen sich energetische Aussagen über die entstehenden Verluste bei Ummagnetisierungsvorgängen im Material treffen, aber auch remanente Haltekräfte berechnen, und somit Anti-Klebscheiben im Entwurf von vorneherein berücksichtigen. Auf diese Weise können energetisch günstigere oder auch kleinere Magnete entworfen werden.

Toleranz- und Empfindlichkeitsanalysen erlauben eine robuste Auslegung eines Systems, das dann auch bei großen Parameterstreuungen (z.B. schlechteres Material, Fertigungstoleranzen, etc.) ein Funktionieren sicherstellt (Abbildung 1).

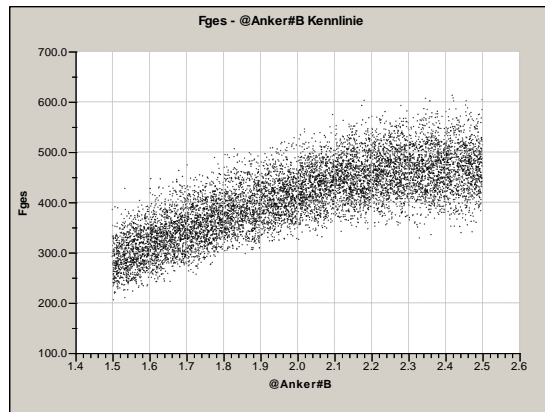
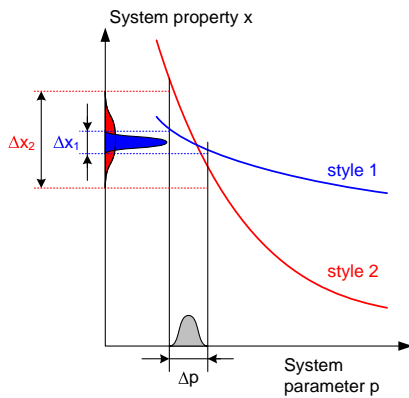


Abbildung 1: (links) Ergebnisse einer Empfindlichkeitsanalyse – style 1 ist gegenüber den Schwankungen des Parameters p weniger empfindlich als style 2 (rechts) Toleranzanalyse – Streuungen der Sättigungsinduktion des eingesetzten Ankerwerkstoffs führen zu Streuungen in der Kraft

1.2 Verfahren zur Optimierung des Magnetkreises

Für einen Motor ist es aus Gründen der besseren Bauraumausnutzung, verbunden mit einer Antriebskraftsteigerung, günstiger, die Eisenjochpole mit einer Mehrfachzahnung zu gestalten. Da die Gestaltungsrichtlinien für den Magnetkreis vorwiegend durch Simulationsuntersuchungen (Ermittlung und Auswertung statischer Kraft-Weg-Kennlinien) gewonnen wurden, waren umfangreiche Parameterstudien erforderlich. Zur Verringerung der Berechnungs-(zeit)-aufwandes sind deshalb die Untersuchungen zunächst an einem Modell mit Einfachzahnung je Statorhauptpol vorgenommen worden. Der qualitative Verlauf der Kraft-Weg-Kennlinien von Eisenkreisen mit Einfachzahnung und die daraus abgeleiteten Gestaltungsrichtlinien konnten auf Strukturen mit Mehrfachzahnung je Jochpol übertragen werden.

Die beiden Statorjoch des Flachankermotors sind magnetisch entkoppelt. Deshalb war es möglich, die Kraft-Weg-Kennlinien für *ein* Einzeljoch für *eine* geometrische Periode λ mit einer ausreichenden Stützstellenzahl zu berechnen und die Kennlinie des Gesamtantriebes unter Beachtung der $2p$ -Periodizität und dem Versatz beider Eisenjoch um $\lambda/4 = p/2$ durch Superposition zu ermitteln und periodisch fortzusetzen.

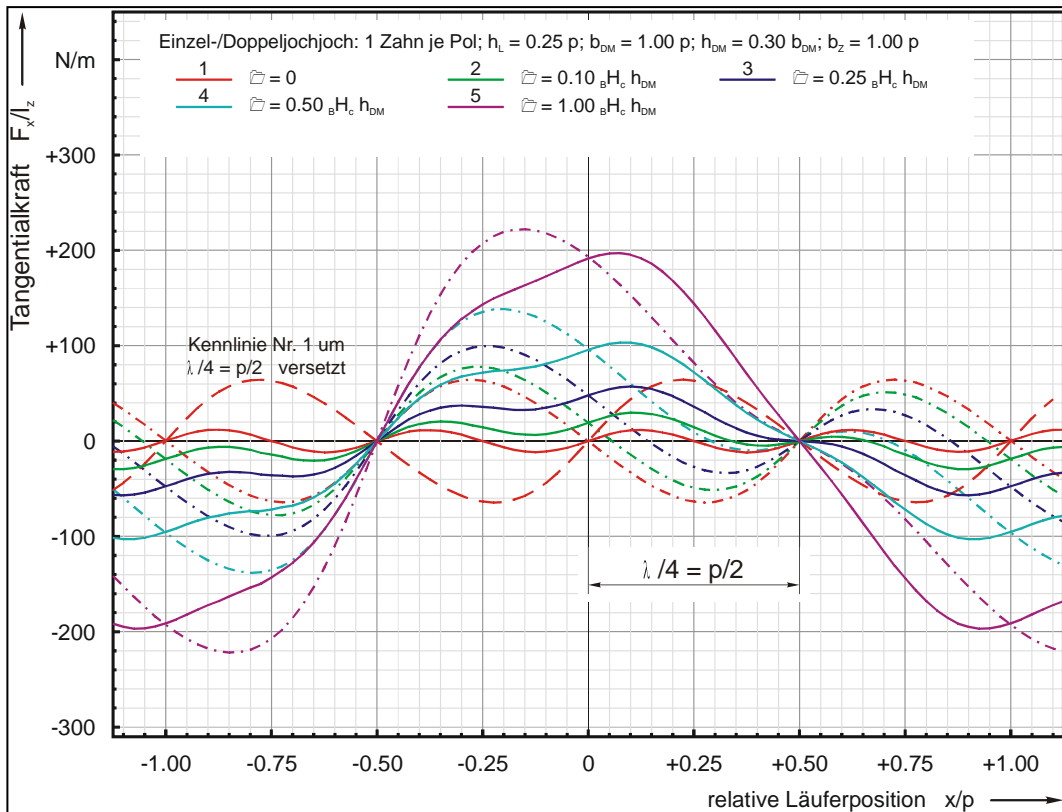


Abb. 1 Superposition der Kraft-Weg-Kennlinien beider Einzeljoch zur Kraft-Weg-Kennlinie des Motors

Für die Parameterstudien ist ein parametrisiertes Geometriemodell aufgestellt worden. Mit einem derartigen Geometriemodell kann die Magnetkreisoptimierung durch Anwendung von Simulationssoftware auf der Basis

- von Netzwerken magnetischer Ersatzelemente oder
- fein diskretisierter Modellräume (z.B. FEM, BEM , ...)

durchgeführt werden.

Unter Anwendung von Faktoren im Bereich 0 ... 100 % können einige der Geometrieparameter bei diesen Parameterstudien bezüglich ihrer Bezugsparameter variiert werden.

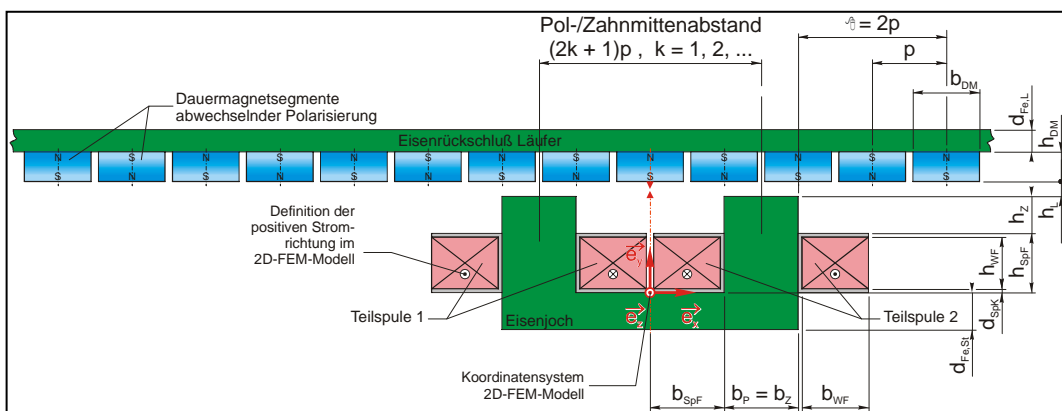


Abb. 2 parametrisiertes Geometriemodell des Flachankermotors; Einzeljoch mit Einfachzahnung

Tab. 1 Parameter zur Beschreibung der Magnetkreisgeometrie einer Zahnstruktur mit einem Zahn je Pol

| Parameter | Formelzeichen | Variationsfaktor | Bezugs-parameter |
|--|---------------|------------------|------------------|
| Statorpakettiefe | l_z | | |
| geometrische Teilung | p | | |
| Luftspalthöhe | h_L | k_{hL} | p |
| Dauermagnetbreite | b_{DM} | k_{bDM} | p |
| Dauermagnethöhe (in Magnetisierungsrichtung) | h_{DM} | k_{hDM} | b_{DM} |
| Dicke des Läuferückschlusses | $d_{Fe,L}$ | k_{dFeL} | d_{Fe} |
| Dicke des Statorückschlusses | $d_{Fe,St}$ | k_{dFeSt} | d_{Fe} |
| Statorzahnbreite = Breite des Statorpoles | b_Z | k_{bZ} | p |
| Statorzahnhöhe | h_Z | khZ | p |
| Breite des Spulenfensters | b_{SpF} | | |
| Höhe des Spulenfensters | h_{SpF} | | |
| Breite des Wickelfensters | b_{WF} | | |
| Höhe des Wickelfensters | h_{WF} | | |
| Spulenkörperwandstärke | d_{SpK} | | |

Eine durchgeführte Literaturstudie zur Anwendung der Netzwerkmethod bei gezahnten periodischen Magnetkreisstrukturen und teilweises Verifizieren der angegebenen Beispiele führte zur Einschätzung, dass die Ermittlung von Kennlinienfeldern *Kraft-Position-Strom* und *verketteter Fluß-Position-Strom* nur mit großem Aufwand und erheblich eingeschränkter Genauigkeit realisiert werden können. Es ist daraufhin ausschließlich die Methode der Finiten Elemente bei der Magnetkreisanalyse angewendet worden.

Die in der 2D-Skizze dargestellte Magnetkreisgeometrie ist in die dritte Dimension mit der Statorpaket-tiefe l_z skalierbar. Damit ist eine Skalierbarkeit der Antriebskraft gegeben. Grenzen dieser Skalierbarkeit ergeben sich vorwiegend aus technologischen Gründen: Bei gegebenen Wickelfensterquerschnitt sind z.B. Spulenstränge mit einem geordneten Wicklungslagenaufbau nicht beliebig lang herstellbar.

Für die Parameterstudien wurde die Skalierung mit der Statorpakettiefe l_z nicht berücksichtigt. Die Finite-Elemente-Analyse konnte somit als rechenzeitgünstigere 2D-Berechnung durchgeführt werden. Die er-mittelten Kraft-Weg-Kennlinien sind somit auf die Statorpakettiefe l_z normiert.

Bei den Parameterstudien wurde die Zielstellung verfolgt, einen Stellantrieb zu entwickeln, der die angefahrenen Rastpositionen möglichst stromlos halten soll (Maximierung der Kippkraft der stromlosen Kraft-Weg-Kennlinie).

1.3 Zusammenstellung von Gestaltungsrichtlinien für magnetische Aktoren

Aus den Erfahrungen und Ergebnissen der Simulationen sollten Gestaltungsrichtlinien für magnetische Aktoren unter Einsatz von magnetischen Werkstoffen dokumentiert werden.

Dabei spielen sowohl Richtlinien zur Bewertung von polarisierten Magnetkreisstrukturen als auch die Anwendung von Dauermagnetischen Pasten und Folien eine Rolle. Als vielversprechende neue Technologie sollten MIM-Werkstoffe auf ihre Eignung in der Aktorik untersucht werden und Richtlinien für eine werkstoffgerechte Konstruktion erarbeitet werden.

Polarisierte Dauermagnetkreise bieten in vielen Fällen energetische Vorteile gegenüber neutralen Magneten, da (mehrere) Endlagen leistunglos gehalten werden können.

Für diese Magnete wurde ein Konstruktionskatalog erarbeitet, der schon in einem sehr frühen Entwurfsstadium die Konstruktionsvielfalt deutlich einschränken soll und so dem Entwickler die Auswahl einer geeigneten Grundstruktur erleichtern soll (Abbildung 2).

| | Anker | | | | Bewegungscharakteristik | Art des Kreises |
|---|--------------------|-------------------------------|--------------|---|-------------------------|-----------------|
| | Tauchanker | Flachanker | Klappenanker | | | |
| Dynamik | ☉ | ☉ | ☉ | ☉ | | |
| Erwärmung | ☉ | ☉ | ☉ | ☉ | | |
| Wirbelströme | ☉ | ☉ | ☉ | ☉ | | |
| Führung des Ankers | ☉ | ☉ | ☉ | ☉ | | |
| | Reihenkreis | Parallelkreis | Brückenkreis | | | |
| Einfacher Aufbau | ☉ | ☉ | ☉ | ☉ | nein | ja |
| Erzeugung abstoßender Magnetkräfte | ☉ | ☉ | ☉ | ☉ | nein | ja |
| Variabilität/Entkopplung der Flüsse | ☉ | ☉ | ☉ | ☉ | ja | nein |
| Erforderliche Stabilität des PM-Materials | ☉ | ☉ | ☉ | ☉ | kontinuierlich | ja |
| Benützung des Permanentmagneten | ☉ | ☉ | ☉ | ☉ | impulsartig | ja |
| Kreisformen | remanentmagnetisch | dynamisch permanentmagnetisch | | | kontinuierlich | ja |
| | | | | | impulsartig | ja |
| | | | | | unipolar | ja |
| | | | | | bipolar | ja |

Abbildung 2: Konstruktionskatalog für polarisierte Magnetkreise (Auszug)

Vom Hermsdorfer Institut für technische Keramik erfolgten Untersuchungen zur Verwendung von Hochenergie-Dauermagnetwerkstoffen (NdFeB) als Dickschichten in Form von Pasten und Folien. Die Einbettung feinstgemahlener Pulver in eine Kunststoffmatrix ermöglicht die Verarbeitung mit standardisierten Fertigungstechnologien der Mikrotechnik, z.B. Siebdruck oder Foliengießen. Neben Untersuchungen zu den magnetischen Eigenschaften, Füllverhalten und Alterungsverhalten wurden Möglichkeiten der Passivierung der Oberfläche der hochreaktiven feingemahlener Pulver untersucht, um eine Stabilisierung der Applikationseigenschaften zu gewährleisten. Umfangreiche Untersuchungen haben ergeben, dass eine Beschichtung der Pulverpartikel mit verschiedenen Silanen positive Auswirkungen auf die Eigenschaften der Pasten oder Folien haben. Auf diese Weise lassen sich Gewinne in der Temperaturstabilität oder der Koerzitivfeldstärke bei gleichzeitiger Sicherstellung eines Korrosionsschutzes erzielen. Tabelle 1 zeigt beispielhaft einige der erzielten Ergebnisse:

Tabelle 1: Einfluss verschiedener Silane auf feinstgemalenes NdFeB-Pulver

| Silane | Eigenschaft | Pulver | | |
|---|----------------------|---------|---------|---------|
| | | H 4,5µm | O 3,0µm | T 3,5µm |
| (3-Glycidoxypropyl)-trimethoxysilane (S1) Epoxid | Temperaturstabilität | ++ | ++ | ++ |
| | Koerzitivfeldstärke | 0 | 0 | 0 |
| | magnet. Fluss | 100°C | -- | - |
| | 120°C | -- | - | - |
| 140°C | -- | - | - | |
| 3-Aminopropyl-triethoxysilan (S2) Amin | Temperaturstabilität | + | + | + |
| | Koerzitivfeldstärke | 0 | 0 | 0 |
| | magnet. Fluss | 100°C | - | -- |
| | 120°C | - | -- | - |
| 140°C | - | -- | 0 | |
| Tetraethoxysilan (S3) Alkan | Temperaturstabilität | 0 | + | + |
| | Koerzitivfeldstärke | 0 | 0 | + |
| | magnet. Fluss | 100°C | 0 | 0 |
| | 120°C | 0 | 0 | 0 |
| 140°C | - | + | 0 | |
| Dimethyldiethoxysilan (S4) Alkan | Temperaturstabilität | 0 | 0 | + |
| | Koerzitivfeldstärke | 0 | 0 | 0 |
| | magnet. Fluss | 100°C | - | 0 |
| | 120°C | - | 0 | 0 |
| 140°C | - | + | 0 | |

++= sehr positiv, += positiv, 0= neutral, -= negativ, -- = sehr negativ

Das MIM-Verfahren (Metall Injection Moulding – Metallpulverspritzguss) erlaubt eine große Formgebungs- und auch Werkstoffvielfalt, die auch für die Antriebstechnik von Interesse sind. Beim Design muss aber auf eine fertigungsgerechte Konstruktion geachtet werden. Richtlinien für deren Entwurf wurden zusammengestellt. Es entstanden interessante Ansätze für die Gestaltung möglicher Magnetaktoren (Abbildung 3).

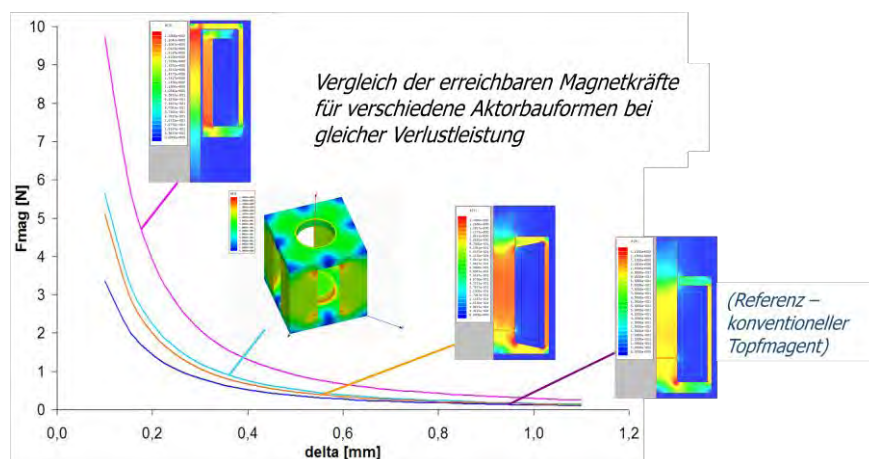


Abbildung 3: Bauformen für Magnete in MIM

Die MIM-Technik ist jedoch nicht uneingeschränkt für Magnetantriebe geeignet. Unser Technologiepartner im Wachstumskern konnte an einigen kritischen Stellen nicht die benötigten Fertigungsgenauigkeiten garantieren, so dass für MIM-Teile eine Toleranzanalyse im Entwurf dringend empfohlen wird.

1.4 Entwicklung von Methoden zur Nutzung von FEM-Tools für die Synthese in frühen Entwurfsphasen

FEM-Tools sind übliche kommerziell verfügbare Werkzeuge beim Entwurf elektromagnetischer Antriebe. Besonders geeignet sind sie für Anpassungskonstruktionen bereits bestehender Magnete, da eine gute Kopplung zu CAD-Systemen besteht. Für optimale Systemauslegungen im Sinne einer Neukonstruktion übersteigt der entstehende Rechenaufwand sehr schnell eine sinnvolle Grenze.

Dennoch ist auch in frühen Entwurfsphasen der Einsatz von FEM-Tools für einige Aufgaben sinnvoll. In erster Linie unterstützen sie den Entwickler bei der Erstellung von Netzwerkmodellen, insbesondere bei der Dimensionierung von Streufluss-Elementen. Hier ist für eine mittlere Geometrie ein Abgleich der Flüsse zwischen Netzwerk- und FE-Modell erforderlich, so dass eine adäquate Beschreibung des Systems auch mit dem Netzwerk gegeben ist. Besonders für komplexere Magnetkreisstrukturen (wie z.B. polarisierte Parallel- und Brückenkreise) lassen sich über FEM-Parameterstudien zunächst Einflüsse einzelner geometrischer Parameter beurteilen, um dann gezielt eine Dimensionierung vorzunehmen.

1.5 Entwicklung/Weiterentwicklung von Entwicklungswerkzeugen

Ziel war die Evaluation des Bedarfs an eigenen Entwicklungstools.

Die Recherche hat gezeigt, dass es keine kommerziell verfügbaren Tools gibt, die eine ganzheitliche Optimierung eines Antriebssystems mit vielen freien Parametern in vertretbarer Rechenzeit ermöglichen. Netzwerkmodelle sind für den ungeübten Anwender allerdings nicht leicht zu erstellen. Deswegen sollen weitere Anpassungen in der Benutzeroberfläche und die Erstellung von Assistenten zur Nutzerführung erfolgen, um die Akzeptanz und Ergonomie der Bedienung zu erhöhen.

Weiterhin wurde festgestellt, dass der Vergleich verschiedener Antriebs-/Aktorprinzipie bisher im Wesentlichen auf der Erfahrung des/der involvierten Entwickler und Ingenieure basiert und damit nur beschränkt möglich ist. Der Vergleich verschiedener Antriebe sollte im Rahmen eines Funktion-Struktur-Speichers untersucht werden.

1.6 Erweiterung der statischen, dynamischen, thermischen, magnetischen Analyse (FEM, Netzwerkmethod)

Ziel war die Implementierung und der Test der oben identifizierten Entwurfsmethoden in die Software SESAM und ein gezielter Einsatz von FEM zur Verbesserung der Modellierung und zur Verifikation.

Methoden zur transienten Optimierung für besonders energiearme Systeme wurden am Beispiel eines bistabilen Impulsmagneten getestet. Es konnten bei vollständiger Kompatibilität der fluidischen, mechanischen und elektrischen Schnittstellen deutlich geringere Leistungsaufnahmen für ein breites Einsatzspektrum erzielt werden (Abbildung 4).

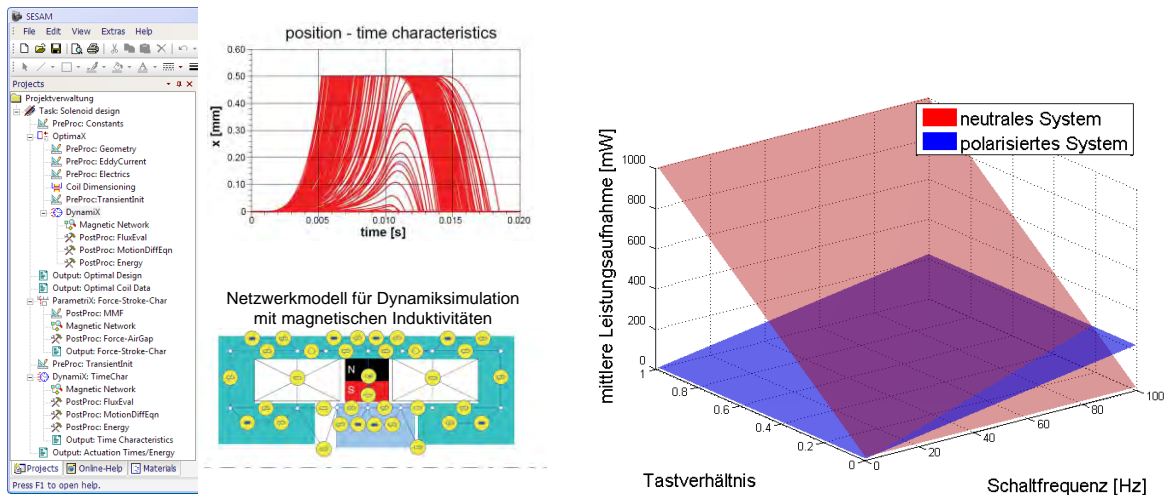


Abbildung 4: (links) Transiente Optimierung eines polarisierten Tauchanker-Topfmagneten (rechts) Mittlere Leistungsaufnahme des neutralen Standardventils und des optimierten polarisierten Systems in Abhängigkeit von Schaltfrequenz und Tastverhältnis t_{Ein}/T .

Das Jiles-Atherton-Modell für elektromagnetische Hysterese wurde zunächst in einer Experimentalumgebung getestet (Abbildung 5). Die Optimierung der Modellparameter aus Messdaten wurde mit verschiedenen Optimierungsverfahren getestet und implementiert. Mit dieser Experimentalumgebung steht außerdem ein Tool zur Verfügung, das aus gemessenen äußeren Hysterese-Schleifen modellbasiert Neukurven berechnen kann, die z.B. für FEM-Tools benötigt werden. Die gemessenen Kurven können direkt aus dem vom *STZ Mechatronik* produzierten Messgerät *MagHyst* eingelesen werden. Der Export kann direkt in Maxwell (weit verbreitete FEM-Software von Ansoft, LLC.) erfolgen. Damit sind sinnvolle Datenschnittstellen geschaffen, die die Arbeit deutlich erleichtern.

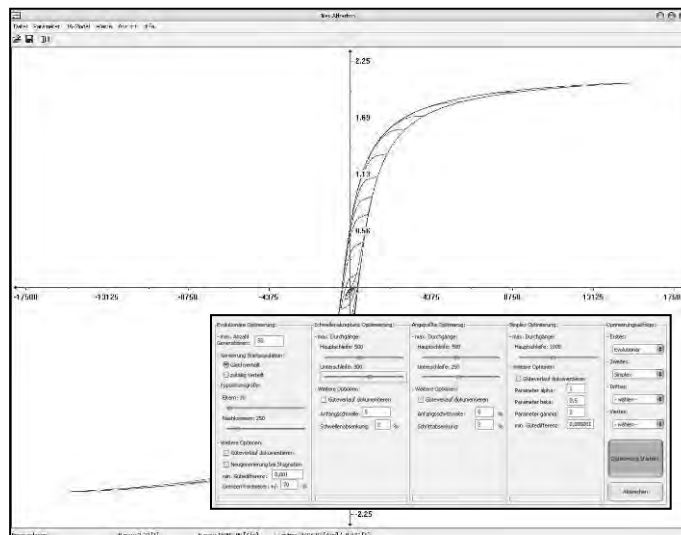


Abbildung 5: GUI der Experimentalumgebung mit Optimierungsdialog

Das Modell wurde anschließend in SESAM implementiert und nach anfänglichen Stabilitäts-Problemen im Rechenkern sind erste erfolgreiche Simulationen gelungen (Abbildung 6).

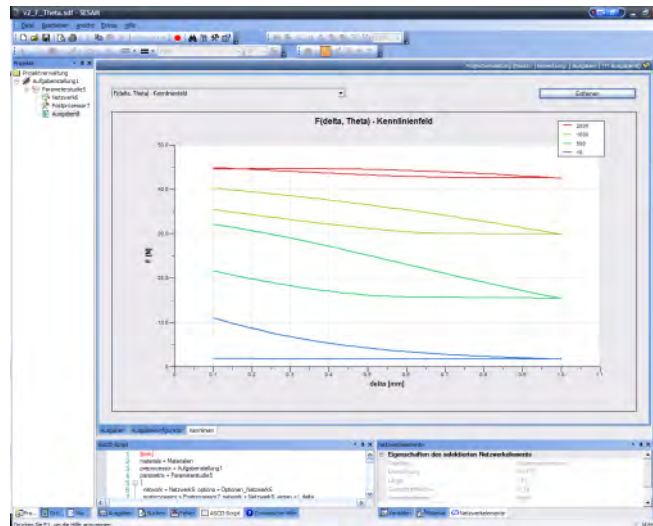


Abbildung 6: berechnetes $F(\delta, \Theta)$ -Kennlinienfeld in einem einfachen Netzwerk in SESAM

Die Toleranz- und Empfindlichkeitsanalyse wurde implementiert und ist funktionsfähig (Abbildung 1)

1.7 Entwicklung/Weiterentwicklung des Entwurfsassistenten SESAM 2, Modellbildung, Modellbibliotheken

Mit den Erfahrungen der Entwurfssoftware SESAM sollte ein flexibles aber auch intuitiv zu bedienendes Werkzeug entstehen, das die Aufgaben zukünftiger Entwicklungen lösen kann.

Zur Vereinfachung der Handhabung des Tools und der Verringerung des Entwurfsaufwandes waren Modellbibliotheken für mögliche Magnetkreisgrundformen zu erstellen und im Programm zu hinterlegen. Auf diese Weise wird der Modellerstellungsprozess deutlich beschleunigt.

Weitere Punkte waren eine Optimierung des Programmcodes und die Beseitigung von Fehlern sowie die Dokumentation der Software.

Die oben genannten Methoden und Algorithmen wurden in SESAM implementiert und auf einer grafischen Oberfläche ergonomisch durch den Nutzer bedienbar gemacht (Abbildung 7). (Hysterese, Toleranz- und Empfindlichkeitsanalyse, adaptive Schrittweitensteuerung für dynamische Simulationen).

Verschiedene Magnetkreisgrundformen liegen als Modelle vor und müssen durch den Nutzer nur noch angepasst werden.

Außerdem wurden Assistenten bei der Eingabe von Netzwerkelementen implementiert, die eine gezielte Nutzerführung unterstützen.

Die Materialparameter verschiedener MIM-Werkstoffe wurden vom Steinbeis Transferzentrum Mechatronik gemessen und konnten in die Materialdatenbank in SESAM eingepflegt werden.

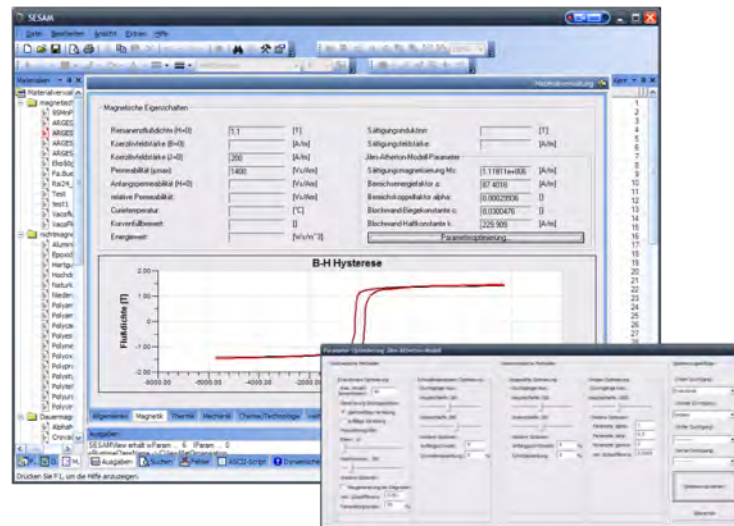


Abbildung 7: Hysterese-GUI in SESAM

1.8 Entwicklung des Funktion-Struktur-Speichers

Momentan basiert die Aktor- und Aktorprinzipauswahl auf der Erfahrung der damit betrauten Entwickler sowie Konstruktions- und Produktkatalogen von einzelnen Herstellern. Erfahrungen wie auch Kataloge beziehen sich meist auf bestimmte Aktorprinzipie, Leistungsbereiche oder gar nur Bauformen und sind damit begrenzt. Um den Vergleich verschiedener Aktorprinzipie zu ermöglichen wurde ein Auswahlkonzept basierend auf:

- einer Klassifikation anhand der Bewegungsform und des Bewegungsverlaufen verschiedener Aktoren
- ein Auswahlalgorithmus auf Basis des Skylinekonzeptes und
- ein Datenbankkonzept entwickelt

Die Auswahl der Aktoren und Aktorprinzipie ist dabei auf technischen Daten beschränkt. Kriterien wie (stückzahlabhängige) Kosten, Zuverlässigkeit der Produkte und Zulieferer und ähnliche nicht konsistent abbildbare Kriterien wurden nicht einbezogen.

Das entwickelte Auswahlkonzept auf Basis einer Aktorklassifikation anhand von:

- Bewegungsbegrenzung,
- Bewegungsrichtung,
- Freiheitsgrad,
- Art der Bewegung und
- das Vorhandensein eines Haltemomentes einer Haltekraft für das Halten der Position des Aktors ohne Leistungsaufnahme.

Ein weitere Auswahl ist für beliebige in der Datenbank zu den Aktoren enthaltenen Eigenschaften und Merkmalen mit dem Skylinealgorithmus möglich. Dieser ermöglicht es die Erfüllung der gesuchten Eigenschaften zu bewerten und ggf. einen „Abstand“ vom durch die Anforderungen definierten Punkt im Raum der Eigenschaften zu bestimmen.

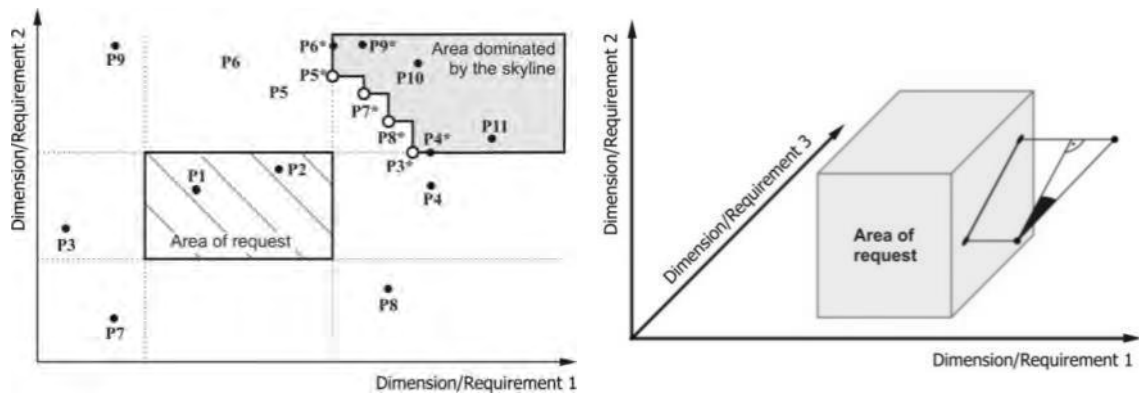


Abbildung 8: a) Darstellung einer Skyline, b) Visualisierung des Dominanzwinkels

Um einerseits mit wenigen Datensätzen insgesamt arbeiten zu können, jedoch bei der Ergebnisausgabe möglichst viele verschiedene Aktorprinzipie ausgeben zu können wurde das Konzept der dynamischen Skyline entwickelt. Dieses wählt durch Anwendung von Dominanzwinkeln nicht nur einen oder wenige dominierende Aktoren aus der Datenbank sondern nutzt Dominanzwinkel und bestimmt weiterhin ein Abstandsmaß.

Dieser Abstand wird anhand von Daten bestehender Aktoren bestimmt, die in einer Datenbank aufgelistet sind. Bei der Bestimmung des Abstandes dominiert der gewählte Skylinealgorithmus Datenbankeinträge gleicher Aktorprinzipie stärker als die anderer Aktorprinzipie durch Anwendung eines anderen Dominanzwinkels.

Um den Algorithmus erproben zu können wurde eine Aktordatenbank erstellt. Diese beinhaltet zum Zeitpunkt des Projektendes ca. 2500 Aktoren verschiedener Typen (siehe Tabelle 2)

Tabelle 2: In der Datenbank enthaltene Antriebsprinzipie

| Rotatorische Wirkprinzipie | Translatorische Wirkprinzipie |
|------------------------------|----------------------------------|
| 1. DC-Motoren | 1. Hubmagnete |
| 2. EC-Motoren | 2. Piezostapelantriebe |
| 3. Schrittmotoren | 3. Piezo-hybrid Antriebe |
| 4. Dreiphasensynchronmotoren | 4. Piezoschrittmotoren |
| 5. Bürstenlose Servomotoren | 5. Ultraschallpiezomotoren |
| 6. Pneumatische Drehantriebe | 6. Pneumaticzylinder |
| 7. Hydraulische Drehantriebe | 7. Synchronlinearmotoren |
| 8. Torque Motoren | 8. Voice coil Antriebe |
| 9. Drehmagneten | 9. Magnetostrictive Antrieb |
| 10. Piezodrehantriebe | 10. Magnetorheologische Antriebe |
| 11. Reluktanzmotoren | 11. Hydraulikzylinder |
| | 12. SMA |

Ziel der Datenbank war es die Vergleichbarkeit der verschiedenen Aktorprinzipie zu untersuchen und Möglichkeiten zur Visualisierung der Ergebnisse des Auswahlkonzeptes zu erproben. Es wurden daher Angaben verschiedener Hersteller und Größenklassen genutzt.

Die verfügbaren Daten ermöglichen eine erste Abschätzung der Arbeitsbereiche verschiedener Aktorprinzipie und damit deren Vergleich (vgl. Abb. Abbildung 9)

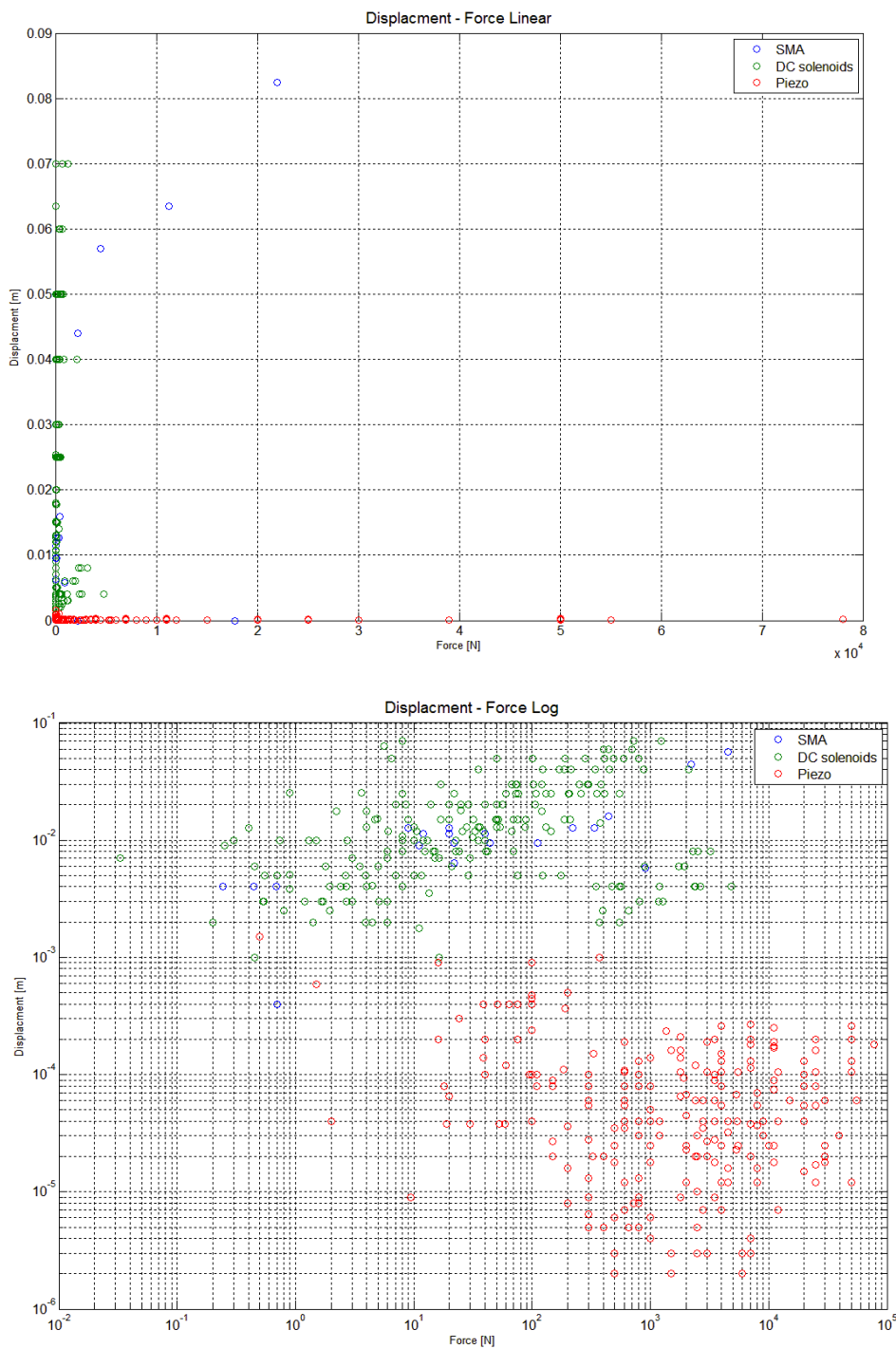


Abbildung 9: Darstellung der Kraft-Verschiebung-Parameter einer Auswahl von translatorischen Antrieben einmal in linearer und einmal in doppellogarithmischer Darstellung

Im Rahmen des Projektes wurden weiterhin erste Untersuchungen zur Darstellung der Ergebnisse und zur Leitung der Suche/Auswahl von Aktoren durchgeführt.

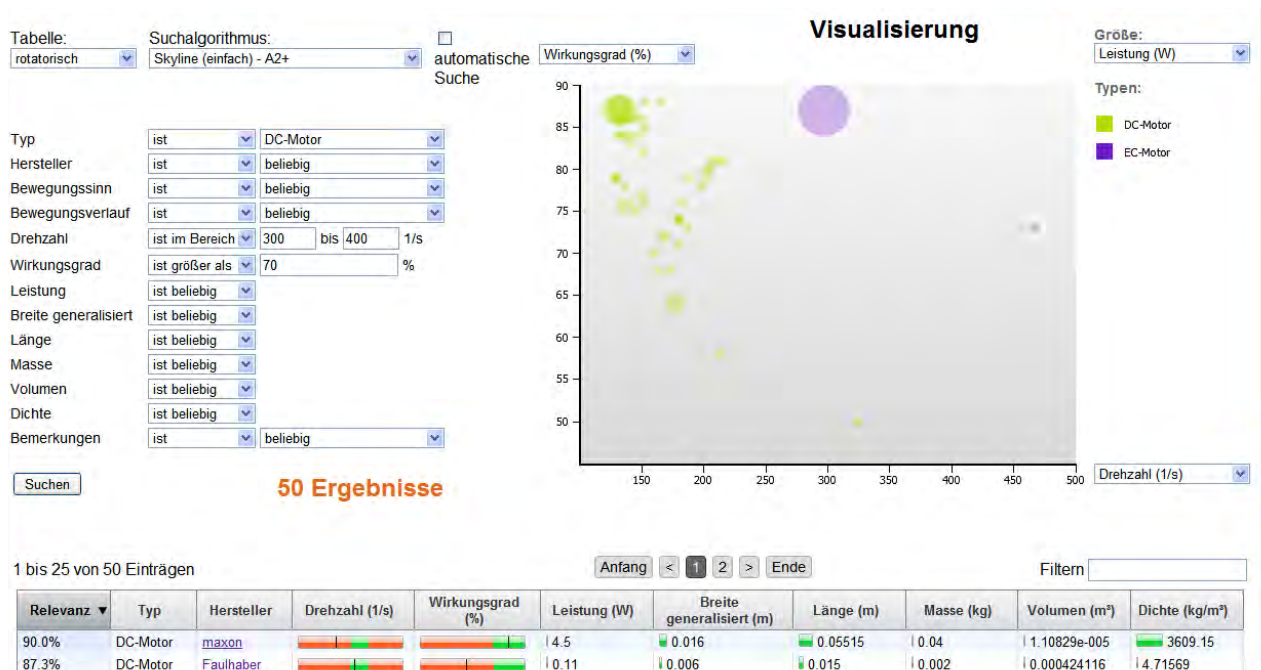


Abbildung 10: Erste Version der graphischen Benutzeroberfläche mit Eingabemaske für die Parameter, Visualisierung dreier Parameter über Achsen und Treffergröße und tabellarischer Ergebnisdarstellung (gekürzt unten)

Hierbei entstand ein Prototyp einer graphischen Benutzeroberfläche die neben einer graphischen Ausgabe auch eine tabellarische Ergebnisdarstellung erlaubt.

2 Funktionsstrukturen, Wirk und Verfahrensprinzipien

2.1 Detaillierung der Aufgabenstellung für die Funktionsstrukturen sowie Wirk- und Verfahrensprinzipie für Positioniersysteme

Die Arbeiten zu den Positioniersystemen verfolgten zwei wesentliche Ziele:

- Prinzipfindung und Entwicklung eines Flachanker-Linearmotors (in Zusammenarbeit mit der Microstep GmbH Sömmerda)
- Prinzipfindung und Untersuchung geeigneter planarer Positionierstrukturen (in Zusammenarbeit mit Tetra GmbH und IMMS gGmbH)

2.2 Prinzipfindung Modularer Flachanker-Linearmotor

Die Spezifikationen des zu entwickelnden modularen Flachanker-Linearmotors sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Tab. 2 Spezifikation der Antriebsaufgabe

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">- einachsige Linearbewegung, Bewegungsbereich einige Millimeter (bis max. ca. 100 Millimeter)- Antriebskraft ca. 1 ... 3 N- modular- skalierbar- Bauhöhe < 30 mm; angestrebt: 10 ... 15 mm- zeitlich ausgeprägte Rastphasen- energieeffizient- Positionierauflösung nicht spezifiziert- Positionserfassung ohne Meßsystem- dynamische Anforderungen nicht spezifiziert- verschleißarm- geringe Anforderungen an Fertigungstoleranzen |
|--|

Ziel der Entwicklung war es, einen neuartigen linearen Positionierantriebe zu entwickeln, der aus den beiden Hauptelementen Statormodul und Läufermodul ("Rotor") besteht, die mechanisch unabhängig voneinander in der Arbeitsmaschine angeordnet werden können.

Für eine einachsige Linearbewegung können prinzipiell die in der folgende Tabelle aufgeführte Aktoren als Direktantriebe angewendet werden:

Tab. 3 Auswahlmatrix

| Kriterium | neutraler Elektromagnet | polarisierter | Reluktanz- | Wechselpol- Schrittmotor | Hybrid- | Gleichstrom- linearmotor | piezoelektrischer Inchwormantrieb |
|--|----------------------------|---------------------------------|------------|-----------------------------|---------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Bewegungsbereich einige Millimeter (bis max. ca. 100 Millimeter) | -- | -- | ++ | ++ | ++ | ++ | + |
| zeitlich ausgeprägte Rastphasen | + | ++ | + | ++ | ++ | - | ++ |
| energieeffizient | - | ++ | - | ++ | ++ | - | ++ |
| modular | 0 | 0 | ++ | ++ | ++ | ++ | + |
| skalierbar | 0 | 0 | ++ | ++ | ++ | ++ | + |
| Positionserfassung ohne Meßsystem | -- | -- | ++ | ++ | ++ | -- | -- |
| geringe Anforderungen an Fertigungstoleranzen | - | - | - | ++ | - | + | -- |
| ++ hervorragend geeignet | | - ungünstig/unwirtschaftlich | | | | | |
| + günstig/möglich | | -- nicht geeignet/nicht möglich | | | | | |
| 0 indifferent/unkritisch/Aussage nicht möglich | | | | | | | |

Bei der Auswertung der Tabelle ergab sich als günstige Lösung der Schrittmotor, wobei hierbei noch die Untervariante des Wechselpol-Schrittmotors favorisiert worden ist.

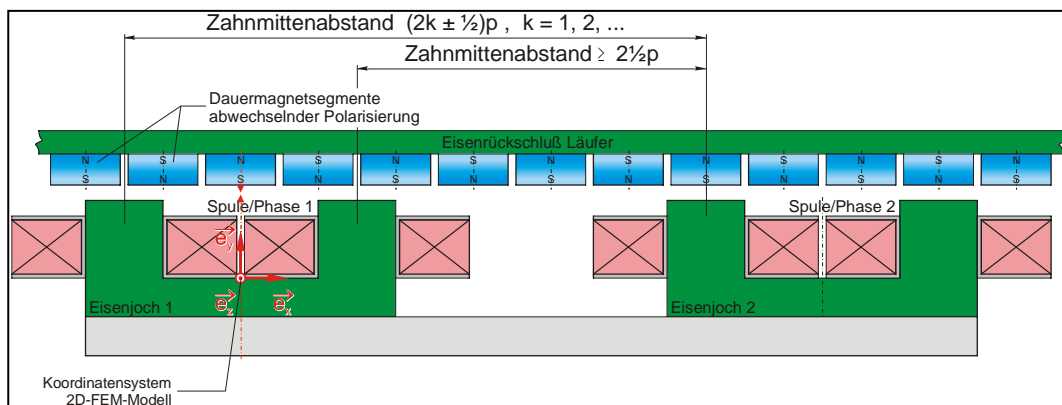


Abb. 3 Verkopplung zweier Jochstrukturen zum Flachankermotor (2-Phasen Wechselpol-Schrittmotor); Eisenjoch mit Einfachzahnung

Weiteres Ziel der Arbeiten war es zusammen mit den Projektpartnern Tetra GmbH und IMMS gGmbH die Grenzen bestehender Systeme zu ermitteln und alternative Lösungsansätze und Strukturen für planare Positioniersysteme zu untersuchen.

Im Rahmen des VERDIAN wurden unter anderem Positionier- und Bahngenaugigkeiten im Submikrometerbereich sowie hohe Beschleunigungen und Bahngeschwindigkeiten als Kriterien für die Bewertung der Lösungskonzepte angesehen. Um diese Forderungen erfüllen zu können, ist die Verringerung oder besser

Vermeidung gegenseitige Störbeeinflussung erforderlich und neben der Gestalt und Anordnung der Bauteile und Koppelstellen auch die Zahl der Koppelstellen zu optimieren

2.3 Erarbeitung von Lösungsräumen von Funktionsstrukturen für Positioniersysteme

Um bereits beim Entwurf von Positioniersystemen einer Vielzahl unterschiedlicher und zum Teil gegenläufiger Anforderungen – z. B. hohe Bahngenauigkeit und hohe Dynamik - Rechnung zu tragen, wurden mit dem Ziel bei der Konzeption des Systems, die gegenseitige Störbeeinflussung von Subsystemen zu vermeiden oder zumindest zu verringern zunächst die Funktionstopologie als allgemeinste Form der Funktionsstruktur betrachtet und anschließend kinematische Konzepte entwickelt.

Unter der Funktionstopologie wird die aus den grundlegenden Subsystemen und ihren Kopplungen bestehende Beschreibung des Gesamtsystems verstanden; sie bildet damit die erste Präzisierung der Gesamtfunktion. Aufgrund der, einem heterogenen System eigenen, verschiedenen Unterfunktionen lässt sich die Gesamtfunktion i. d. R. leicht in der beschriebenen Weise präzisieren. Jedes technische System besteht aus Elementen und Relationen dieser Elemente zueinander. Die Relationen können in Anordnungen und Kopplungen unterschieden werden (vgl. Abbildung 11). Für die Funktionsstruktur sind dies Funktionselemente und funktionelle Anordnungen bzw. Kopplungen. Bei der Gestalt des Systems spricht man von Bauelementen bzw. Baugruppen und Koppelstellen.

Die Betrachtung der Funktionstopologie ermöglicht eine Optimierung der Zahl und Anordnung der funktionellen Kopplungen der verschiedenen Unterfunktionen eines heterogenen Systems in der Funktionsstruktur. Da jede funktionelle Kopplung mindestens einer Koppelstelle im technischen System entspricht, sind damit eine untere Abschätzung der Zahl der Koppelstellen/inneren Schnittstellen zwischen den Subsystemen und somit eine Optimierung möglich.

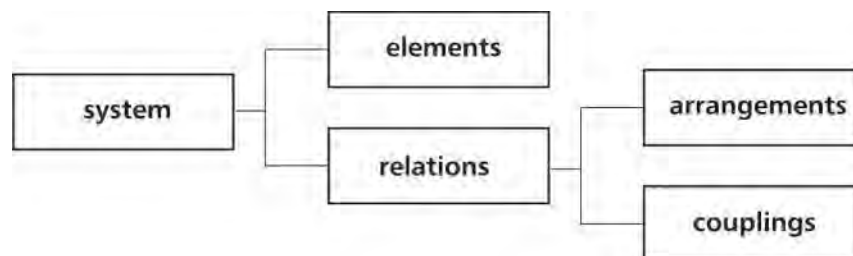


Abbildung 11: Grundbestandteile einer technischen Struktur

Im Rahmen des VERDIAN-Projektes wurde ein Algorithmus für die Bestimmung der Kopplungen zwischen Antriebs- und Messsystemen erarbeitet.

Grundsätzlich ist eine Vielzahl verschiedener Antriebs- und Messsystemanordnungen denkbar (vgl. Abbildung 12). Die Variation der Anordnungen der Funktionselemente ist durch die Abhängigkeiten der Subsysteme voneinander beschränkt. Solche Abhängigkeiten bestehen zwischen Systemen gleicher Art bzw. zwischen heterogenen Subsystemen. Im Falle der Positioniersysteme bedeutet das u. a., dass Mess- und Antriebsachse – auf der Abstraktionsebene der Funktionstopologie – übereinstimmen müssen. Damit werden die Anordnungsvarianten der Messsysteme durch die zugehörige Antriebsanordnung begrenzt und umgekehrt.

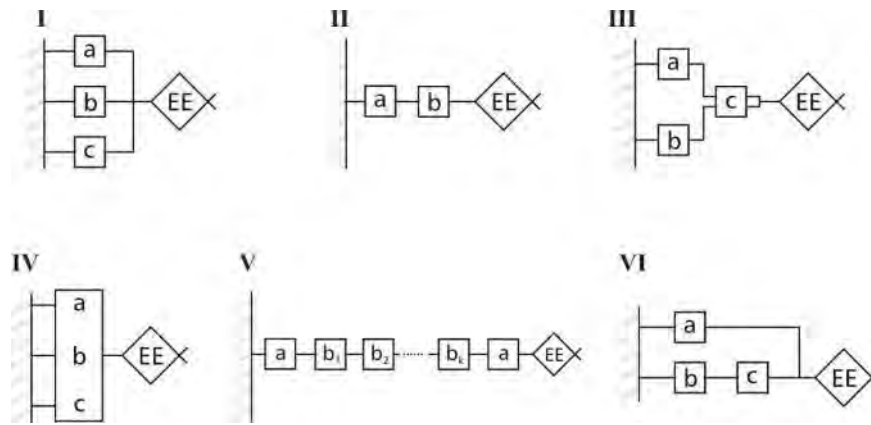


Abbildung 12: Mögliche Elementtopologien (EE ... Endeffektor)

- I) Parallele Anordnung von Antriebssystemen**
- II) Serielle Anordnung**
- III) Parallele Anordnung auf der ersten Ebene mit Einzelantrieb auf der zweiten**
- IV) Vereinigung von Antrieben**
- V) Serielle Anordnung mit zwei gleichnamigen Linearantrieben**
- VI) Bypass**

Für ein beispielhaftes Positionierproblem (X-, Y-, Z-translatorische Bewegung) konnten mit diesem 610 verschiedene Anordnungsmöglichkeiten und die Anzahl aller Koppelstellen zwischen zwei beliebigen Elementen für jede mögliche Anordnung ermittelt werden.

Die Betrachtung der Funktionstopologie ermöglicht eine systematische Suche nach Funktionsstrukturen mit der Möglichkeit der Bewertung der gegenseitigen Beeinflussung der Unterfunktionen über die Systemkoppelstellen. Der Algorithmus ermöglicht das Aufstellen geeigneter Strukturen durch Auswahl der gemäß den Anforderungen optimalen Koppelstellenanordnung auf der Ebene der Funktionsstruktur unter Berücksichtigung aller möglichen Anordnungen der gewählten Subsysteme und fand bei der Konzeption des VERDIAN-Demonstrators Verwendung.

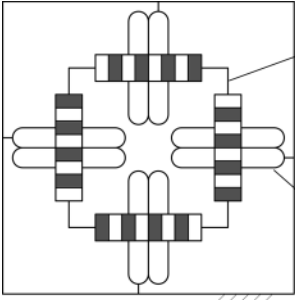
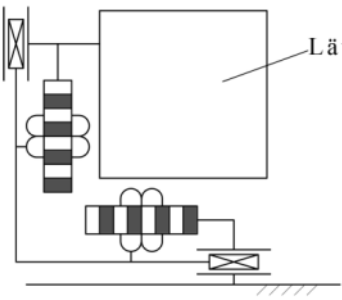
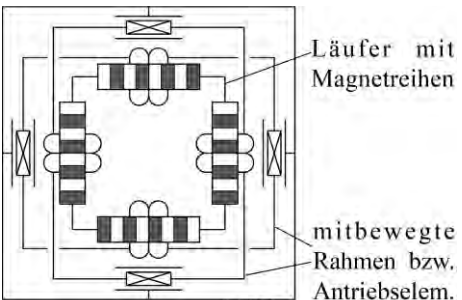
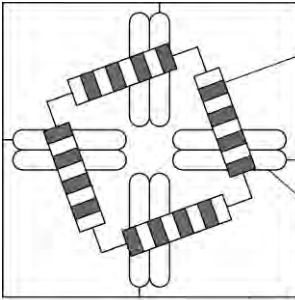
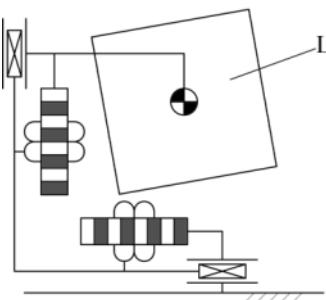
Eine weitere Bewertung des Konzeptes heterogener Systeme erfordert die Kenntnis von Charakteristika, die von den Eigenschaften der speziellen Gestaltung abhängen.

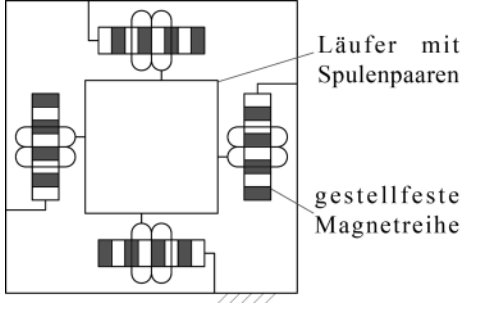
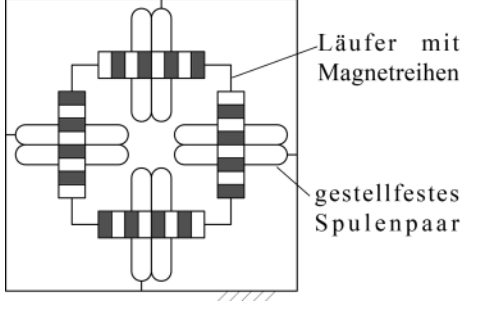
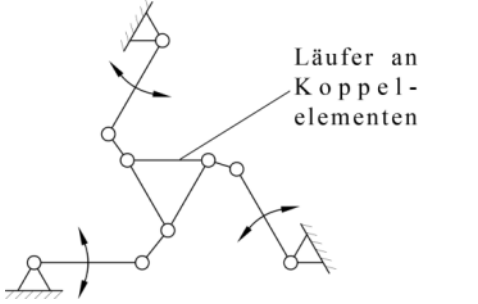
Die Algorithmen können grundsätzlich auch auf Systeme angewendet werden, die andere heterogene Subsysteme enthalten, welche Restriktionen hierfür gelten und wo die Grenzen der Übertragbarkeit liegen wurde im Rahmen des Projektes jedoch nicht näher untersucht.

2.4 Erarbeitung von Lösungsräumen von planaren Positionierstrukturen

Auf Grundlage bestehender Positioniersysteme und der Betrachtung der Funktionstopologie wurden kinematische Strukturen für planare Positioniersysteme entwickelt. Tabelle 3 zeigt eine Übersicht möglicher Positionierstrukturen einschließlich der aktuell verwendeten Anordnung.

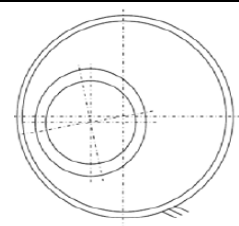
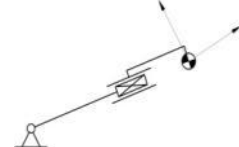
Tabelle 3: Auswahl geeigneter kinematischer Strukturen für planare Positioniersysteme

| Ordnungskriterium | Varianten | Prinzipbeispiel |
|-------------------------------|---|---|
| Anordnung der Antriebe | parallel (entsprechend bisherigen PPS) |  <p>Läufer mit Magnetreihen gestellfestes Spulenpaar</p> |
| | seriell (aufeinander aufbauend) |  <p>Läufer</p> |
| | hybrid (mitgeführte Antriebselemente) |  <p>Läufer mit Magnetreihen mitbewegte Rahmen bzw. Antriebselem.</p> |
| Realisierung der Drehung um z | parallel (durch x-/y-Antrieb) |  <p>Läufer mit Magnetreihen gestellfestes Spulenpaar</p> |
| | seriell („aufgesetzte“ Drehung) |  <p>Läufer</p> |

| | | |
|---------------------------------------|--------------------------|--|
| Relativlage der Antriebs- elemente | Spulen am Läufer |  <p>Läufer mit Spulenpaaren gestellfeste Magnetreihe</p> |
| | Magnete am Läufer |  <p>Läufer mit Magnetreihen gestellfestes Spulenpaar</p> |
| | keine Elemente am Läufer |  <p>Läufer an Koppel- elementen</p> |

Von diesen Strukturen wurde die hybride Antriebsanordnung im Rahmen des VERDIAN-Demonstrators umgesetzt.

Tabelle 4: Übersicht möglicher serieller planare Positionierstrukturen

| Antriebs- konzept | Antriebs- anordnung | Anordnung der Z-Achse | Prinzip | Variante | Abbildung |
|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|------------------------|---|
| rotatorisch | $\varphi_x - \varphi_y$ - seriell | φ_z - seriell | - 100% Über- deckung mög- lich | - Spulen am Läufer |  |
| | | | | - Magnete am Läufer | |
| rotatorisch - linear | $\varphi_x - Y$ - seriell | φ_z - seriell | | - Spulen am Läufer |  |
| | | | | - Magnete am Läufer | |

Weiterhin wurden Konzepte für serielle Antriebsanordnungen entwickelt und untersucht. Die in Tabelle 4 dargestellten Prinzipien haben sich dabei als besonders vielversprechend herausgestellt und sind Ausgangspunkt zukünftiger weiterführender Untersuchungen.

Für die weiterführend betrachteten Konzepte wurden die Lösungsräume für Messsysteme, Antriebssysteme und Führungs- bzw. Lagerungsprinzipien erstellt und bewertet.

Tabelle 6 stellt den Lösungsraum für Antriebe und Antriebssysteme für die genannten Positionierkonzepte mit Bewertung dar.

Tabelle 5: Übersicht und Vor- und Nachteile verschiedener Direktantriebe für Positionierkinematiken

| Einteilung | Vorteile | Nachteile |
|--|---|--|
| Magnetaktor | | - prinzipiell ungeeignet |
| Vibromotor | | - prinzipiell ungeeignet |
| Schrittmotor | - mit offener Steuerkette Lagebestimmung ohne Messsystem möglich | - begrenzte Dynamik - geringe Stellkräfte/-momente - aufwendige Ansteuerung - Schrittfehlergefahr - selbsterregte Schwingungen |
| Torquemotor | - hohe Stellmomente - kurze kompakte Bauform (einfache Integrierbarkeit) - günstiges Regelverhalten - hohe Dynamik | - i.d.R. aktive Kühlung erforderlich |
| Linear-Servomotor (eisenbehaftet) | - hohe Stellkräfte bzw. Kraftdichte - können auch am Umfang angeordnet werden | - Kräfte quer zur Bewegungsrichtung abhängig von Bauform - große bewegte Massen - begrenzte Dynamik - Kraftwelligkeit (Cogging) |
| Linear-Servomotor (eisenfrei) | - können auch am Umfang angeordnet werden - hohe Dynamik - guter Gleichlauf - keine Kräfte quer zur Bewegungsrichtung - geringe Kraftwelligkeit | - gegenüber eisenbehafteten Motoren geringere Stellkräfte - für hohe Dauerleistungen i.d.R. aktive Kühlung erforderlich |
| Linear-Servomotor (Eigenentwicklung) | - spezifisch an Antriebsaufgabe anpassbar | - hoher Entwicklungsaufwand |
| Solenoid-Linearmotor (zylindrischer Linear-Servomotor) | - höherer Wirkungsgrad als konventionelle Linear-Servomotoren - keine Kräfte quer zur Bewegungsrichtung - hohe Stellkräfte bzw. Kraftdichte | - große bewegte Massen - begrenzte Dynamik - Kraftwelligkeit - aufwendige Fertigung - hohe Kosten |

Tabelle 7 stellt den Lösungsraum für Führungslösungen für die genannten Positionierkonzepte mit Bewertung dar.

Tabelle 6: Übersicht und Vor- und Nachteile verschiedener Führungsprinzipie für Positionierkinematiken

| Einteilung | Vorteile | Nachteile |
|----------------------------------|---|---|
| Gleitführungen | <ul style="list-style-type: none"> - einfacher Aufbau - hohe Tragfähigkeit - geringe Kosten | <ul style="list-style-type: none"> - hohe Reibung (Mischreibung) - Stick-Slip¹-Effekte - ungeeignet für oszillierende oder schleichende Bewegungen - i.d.R. spielbehaftet - Verschleiß - Wartung erforderlich |
| Wälzführungen | <ul style="list-style-type: none"> - geringe Reibung (Wälzreibung) - kaum Stick-Slip-Effekte - große Auswahl an Normteilen | <ul style="list-style-type: none"> - Wandern der Wälzkörper - selbsterregte Schwingungen - geräuschvoller Lauf - stoßempfindlich - Verschleiß - Wartung erforderlich - i.d.R. spielbehaftet (spielfreie Vorspannung aufwendig) |
| Strömungsführungen hydrostatisch | <ul style="list-style-type: none"> - quasi reibungsfrei (Fluidreibung) - keine Stick-Slip-Effekte - spielfrei - verschleiß- und wartungsfrei | <ul style="list-style-type: none"> - Pumpen, Filter, etc. erforderlich - Austreten des Fluids im Betrieb - hohe Kosten |
| Strömungsführungen aerostatisch | <ul style="list-style-type: none"> - quasi reibungsfrei (Fluidreibung) - keine Stick-Slip-Effekte - spielfrei - verschleiß- und wartungsfrei - keine Verschmutzung - Laufgenauigkeit besser als bei besten Wälzlagern - Druckluftluft steht i.d.R. zur Verfügung | <ul style="list-style-type: none"> - Aufbereitung d. Luft erforderlich - selbsterregte Schwingungen - schlechte Notlaufeigenschaften - hohe Kosten |
| Federführungen | <ul style="list-style-type: none"> - quasi reibungsfrei (innere Reibung) - keine Stick-Slip-Effekte - spiel- verschleiß- und wartungsfrei | <ul style="list-style-type: none"> - bei Auslenkung Rückstellkräfte - Bewegungsbereiche begrenzt |
| Magnetführungen | <ul style="list-style-type: none"> - aktiv regelbar - keine Stick-Slip-Effekte - hohe Laufgenauigkeit - spielfrei - verschleiß- und wartungsfrei | <ul style="list-style-type: none"> - Regelung aufwendig - Wärmeeintrag durch Spulen - ggf. Kühlung erforderlich - keine Notlaufeigenschaften bzw. Fanglager erforderlich - Bewegungswiderstand durch Wirbelströme bzw. Ummagnetisierungsarbeit |

Tabelle 8 stellt den Lösungsraum für Messprinzipie für die genannten Positionierkonzepte mit Bewertung dar.

¹ von engl. stick „haften“ und slip „gleiten“; Ruckgleiten von gegeneinander bewegten Festkörpern; führt zu unstetigen Bewegungsabläufen, Schwingungen und Geräuschen

Tabelle 7: Übersicht und Vor- und Nachteile verschiedener Messprinzipie für Positionierkinematiken

| Einteilung | Vorteile | Nachteile |
|---------------------------------------|---|---|
| kapazitiv | | - für primäre Messaufgabe ungeeignet (Messbereich) |
| induktiv | | - für primäre Messaufgabe ungeeignet (Messbereich) |
| laserinterferometrisch | <ul style="list-style-type: none"> - prinzipiell hohe Messgenauigkeit möglich - prinzipiell große Messbereiche möglich - parallele Messung d. Position am Abtrieb möglich - verschleißfreies Längennormal | <ul style="list-style-type: none"> - Genauigkeit stark von Umgebungseinflüssen abhängig - mit der Länge der Messstrecke nehmen Einflüsse zu - Messung der 360°-Drehung am Abtrieb problematisch - Aufwendige Auswertelektronik - großer Bauraumbedarf - hohe Kosten |
| optisch-inkrementell Raster | <ul style="list-style-type: none"> - hinreichende Messgenauigkeit (vgl. bestehende PPS) - parallele Messung der Position am Abtrieb möglich | <ul style="list-style-type: none"> - mit Rastergröße exponentiell wachsende Kosten - Messung der 360°-Drehung am Abtrieb nicht möglich - Richtungserkennung erforderlich - Bauraumbedarf des Rasters |
| optisch-inkrementell Teilkreisscheibe | <ul style="list-style-type: none"> - einfacher Aufbau - geringe Kosten - Messung der 360° Drehung am Abtrieb problemlos möglich - geringer Bauraumbedarf | <ul style="list-style-type: none"> - nur für Winkelmessungen geeignet - nur serielle Anordnung der Messsysteme möglich - Richtungserkennung erforderlich |
| optisch-inkrementell Linearmaßstab | <ul style="list-style-type: none"> - einfacher Aufbau - geringe Kosten - Weg- und Winkelmessung (bei Montage am Umfang) möglich - geringer Bauraumbedarf | <ul style="list-style-type: none"> - nur serielle Anordnung der Messsysteme möglich - Richtungserkennung erforderlich |
| optisch-absolut Codeaufnehmer | <ul style="list-style-type: none"> - kein Anfahren von Referenzpunkten erforderlich - keine Richtungserkennung erforderlich - unempfindlich gegenüber zählfehlerverursachten Störimpulsen | <ul style="list-style-type: none"> - eingeschränkte Auflösung wegen komplexer Struktur des Maßstabs bzw. der Codescheibe - hoher Abtastaufwand - keine Interpolation möglich - höhere Kosten im Vergleich zu inkrementellen Messsystemen |

Nach Auswahl geeigneter Systeme wurden für die in Tabelle 5 dargestellten Positionierstrukturen die in Abbildung 14 und Abbildung 15 dargestellten, konkretisierten Funktionsstrukturen erstellt.

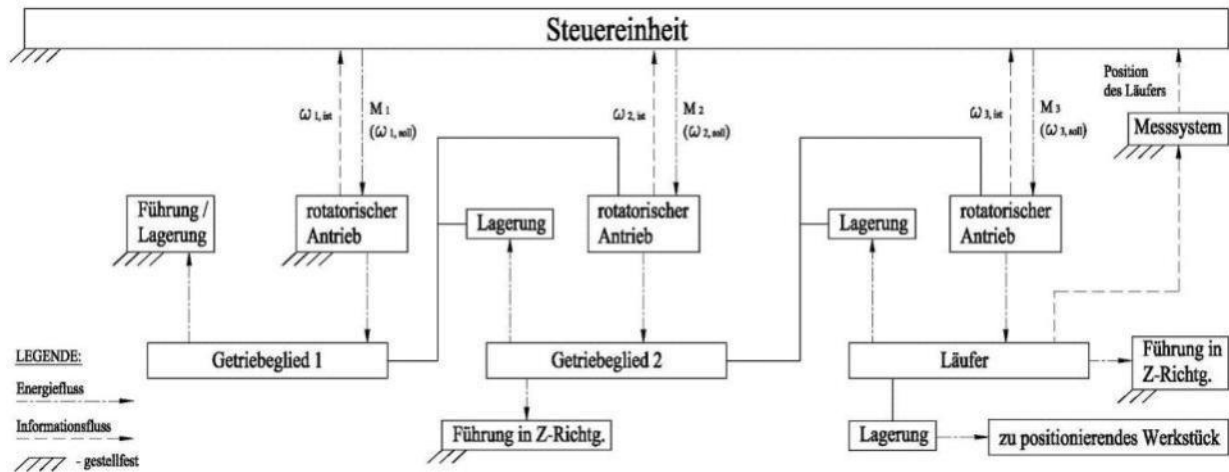


Abbildung 13: Funktionsstruktur für ein serielles, rotatorisch angetriebenes Positioniersystem mit dem Freiheitsgrad 3 in der Ebene

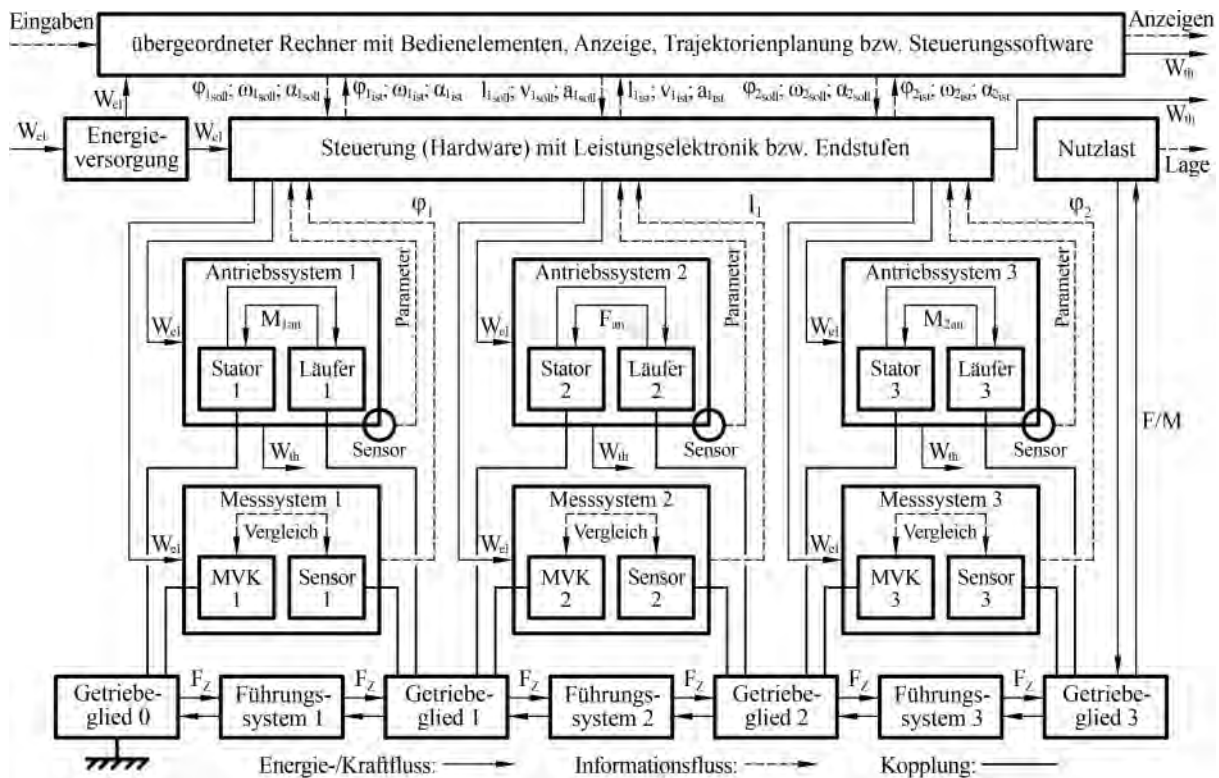


Abbildung 14: Funktionsstruktur für ein serielles, rotatorisch-translatorisch-rotatorisch angetriebenes Positioniersystem mit dem Freiheitsgrad 3 in der Ebene

2.5 Gehäuse-, Gestellsysteme und Schnittstellen nach außen

Die Forderungen, die an heutige Fertigungs- sowie Messverfahren gestellt werden sind, dass diese:

- schneller,
- kostengünstiger,
- präziser,
- zuverlässiger

durchgeführt werden. Diese Forderungen gelten sowohl für Werkzeugmaschinen (WZM), wie auch für die Mess- und Positioniergeräte, wenn auch mit unterschiedlicher Gewichtung. Kommt es bei Mess- und Positioniergeräten maßgeblich auf die möglichst präzise Positionsmessung an, so spielt die Forderung nach einer schnellen, zuverlässigen und somit kostengünstigen Teilefertigung bei der Entwicklung einer WZM die tragende Rolle.

Ziel der Untersuchungen im VERDIAN-Projekt war es, mögliche Alternativen zu den heute existierenden Lösungen zu suchen und zu bewerten. Die wesentlichen Gestellwerkstoffe für Mess- und Positioniergeräte sind in Tabelle 9 zusammen- und in Abbildung 16 und Abbildung 17 gegenübergestellt.

Tabelle 8: Ausgewählter physikalische Eigenschaften gebräuchlicher Gestellwerkstoffe

| Eigenschaft | E-Modul | Dichte ρ | therm. Ausdehn. koef. α | spez. Wärmekap. C | Wärmeleitfähigkeit λ | Festigkeit σ | Werkstoffdämpf. | rel. Materialkosten, (verarbeitet) |
|-------------|-----------------------|-----------------|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------|-----------------|------------------------------------|
| Einheit | 10^3 N/mm^2 | g/cm^3 | $10^{-6}/\text{K}$ | $\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})$ | $\text{W}/(\text{K}\cdot\text{m})$ | N/mm^2 | | |
| Stahl | 210 | 7,85 | 11,1 | 0,45 | 14...58 | 400...1300 | 0,0023 | 1 |
| GG | 80...140 | 7,1...7,25 | 9 | 0,46 | 45...50 | 150...400 | 0,0045 | 0,8 |
| GGG | 160...185 | 7,1...7,3 | 9,5 | 0,63 | 31...36 | 400...800 | - | 0,9 |
| AL | 67...76 | 2,6...2,8 | 21...24 | 0,88...0,92 | 117...211 | 90...530 | - | 2,5...4 |
| RHB | 40 | 2,3 | 10...20 | 0,9...1,1 | 1,5 | 10...15 | 0,02 | 0,9...2 |
| CFK | 48...360 | 1,5...1,8 | -1...0 | 1 | 1...50 | 400...2000 | - | 30...50 |
| Granit | 60...80 | 2,8...2,9 | 5...7,5 | 0,845 | 3,0 | 160...240 | - | >1 |
| Normalbeton | 30...45 | 2,0...2,8 | 6...14 | 0,9...1,0 | 2,1 | 8...115 | - | <1 |

GG Gusseisen mit Lamellengraphit, GGG Gusseisen mit Kugelgraphit, AL Aluminiumlegierungen, RHB Reaktionsharzbeton, CFK kohlefaserverstärkter Kunststoff
 Werte entnommen aus:
 Lohmeyer, Gottfried: *Handbuch Betontechnik*, Beton – Verlag, 1997
 Weck, M., Brecher, Ch.: *Werkzeugmaschinen, Konstruktion und Berechnung*, 8. Auflage, Springer-Verlag, 2006

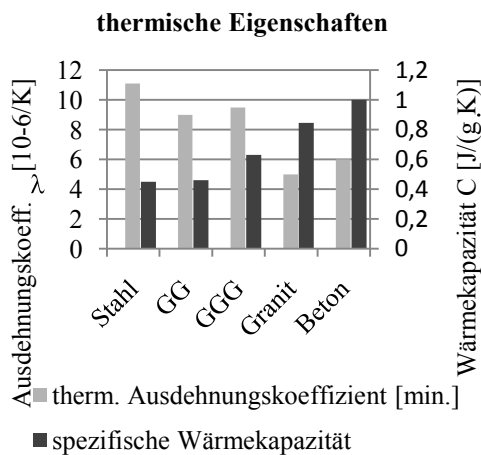


Abbildung 15: Thermische Eigenschaften verschiedener Werkstoffe im Vergleich

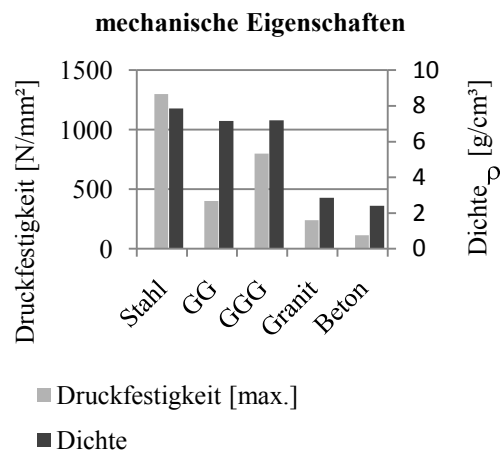


Abbildung 16: Mechanische Eigenschaften verschiedener Werkstoffe im Vergleich

Neben den Werkstoffeigenschaften sind bei der Auswahl des Gestellwerkstoffes außerdem die wirtschaftlichen und fertigungstechnischen Anforderungen an Gestelle zu berücksichtigen. Hier zu nennen sind die Forderungen nach

- geringen Materialkosten,
- wirtschaftlicher Herstellung,
- Schweiß- bzw. Gießfähigkeit sowie
- guter Bearbeitbarkeit.

Aus wirtschaftlicher Sicht sollte ein Gestell so preisgünstig wie möglich sein, bei gleichzeitiger Erfüllung sämtlicher technischer Anforderungen. Ein idealer Gestellwerkstoff wäre:

- preisgünstig,
- im Gießverfahren herstellbar (bzw. frei formbar),
- mit preisgünstigen, einfach herzustellenden Formen,
- einfach und preisgünstig zu bearbeiten,
- mechanisch, thermisch und chemisch langzeitstabil

Im Rahmen des VERDIAN-Projektes wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Tetra GmbH und IMMS gGmbH die Eignung von Mineralguss und hydraulisch gebundener Beton als Gestellwerkstoff untersucht. Wesentliches Ziel war hierbei zu prüfen, ob diese Werkstoffe Naturhartgestein (Granit) als Gestellwerkstoff ersetzen können. Hierzu ist insbesondere eine hohe Langzeitstabilität, hohe Oberflächengüte, die den Einsatz von aerostatischen Führungselementen erlaubt und geringere Kosten gefordert.

Beide Werkstoffe sind aufgrund des Urformverfahrens frei formbar weisen akzeptable und mit Naturhartgestein vergleichbare Eigenschaften auf und versprechen aufgrund der verglichen mit Stahl- oder Eisenguss geringen Verarbeitungstemperaturen, geringe Formkosten.

Die Verwendung von Mineralguss erwies sich schon nach einer Recherche zum Stand der Technik als sehr aufwändig im Hinblick auf die Vorbereitung der Füllstoffe und stark risikobehaftet aufgrund des schwer oder nicht vorhersagbaren Kriechens unter Last. Letzteres ist insbesondere durch die rapide Abnahme der Festigkeit (und damit Erhöhung der Kriechgefahr und -neigung) bei Temperaturzunahme (bei 80°C sind nur noch ca. 50% der Festigkeit des Werkstoffes bei 20°C zu erwarten) als Ausschlusskriterium zu betrachten.

Für die Untersuchungen zum hydraulisch gebundenen Beton wurde ein selbstverdichtender Beton (SVB) gewählt. Dieser zeichnet sich durch geringe Porenbildung und selbstständige Verdichtung ohne externe Energiezufuhr aus.

Zur Untersuchung der Verarbeitbarkeit wurden Probekörper hergestellt, vgl. Abbildung 18 bis Abbildung 22.

Die Oberfläche der SVB Proben wiesen eine geringe Rauigkeit auf, so dass sie sogar leicht spiegelt. Sie wiesen keinerlei mit dem Auge sichtbaren Risse auf. Die am besten abgeformte Oberfläche ist die der SVB-Mischung ohne Pigmentbeimischung (siehe Abbildung 18f). Die Oberfläche hat kaum und nur sehr kleine Luftporen ($\varnothing < 1 \text{ mm}$). Jedoch weist die Oberfläche deutliche Verfärbungen auf (dunklere Stellen). Dies liegt daran, dass die Schalung nach Erstarrungsbeginn angestoßen wurde, worauf sich der Beton an einigen Stellen von der Schalung abgelöst hat. Dieser Zwischenraum hat sich im weiteren Verlauf mit Wasser gefüllt. Die Verfärbung entsteht aufgrund der unterschiedlichen Erstarrungsbedingungen während der Hydratation. Diese Verfärbung hat jedoch keine mechanische, chemische, oder thermische Beeinträchtigung des Betons zur Folge.

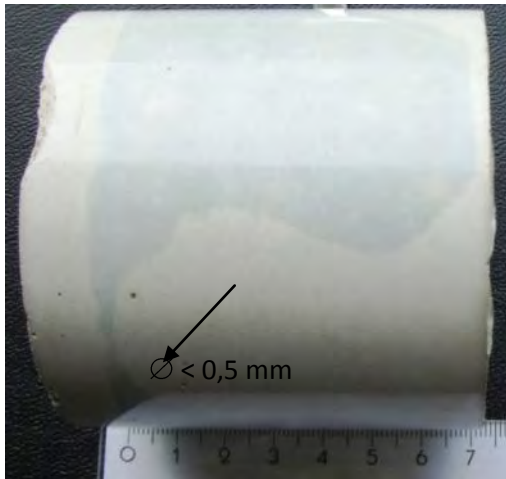


Abbildung 17: SVB Gussprobe ohne Pigment mit 0,5 mm Lufteinschluss und Verfärbung

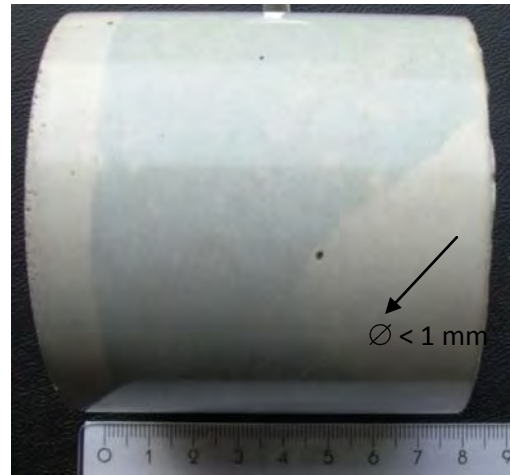


Abbildung 18: SVB Gussprobe ohne Pigment mit 1 mm Lufteinschluss und Verfärbung

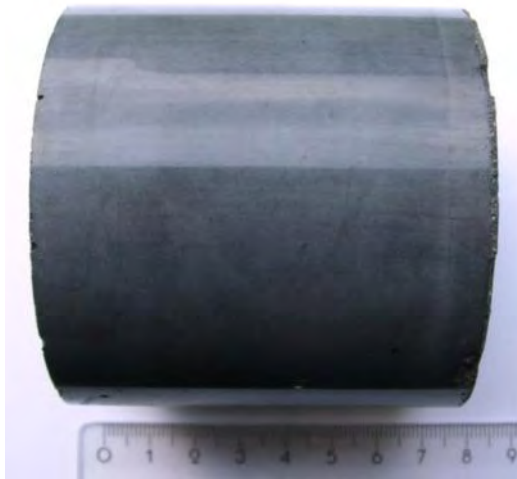


Abbildung 19: Kurze SVB Gussprobe mit Schwarzpigment ohne Lufteinschlüsse



Abbildung 20: Kurze SVB Gussprobe mit Schwarzpigment und 5x7 mm² Lufteinschluss

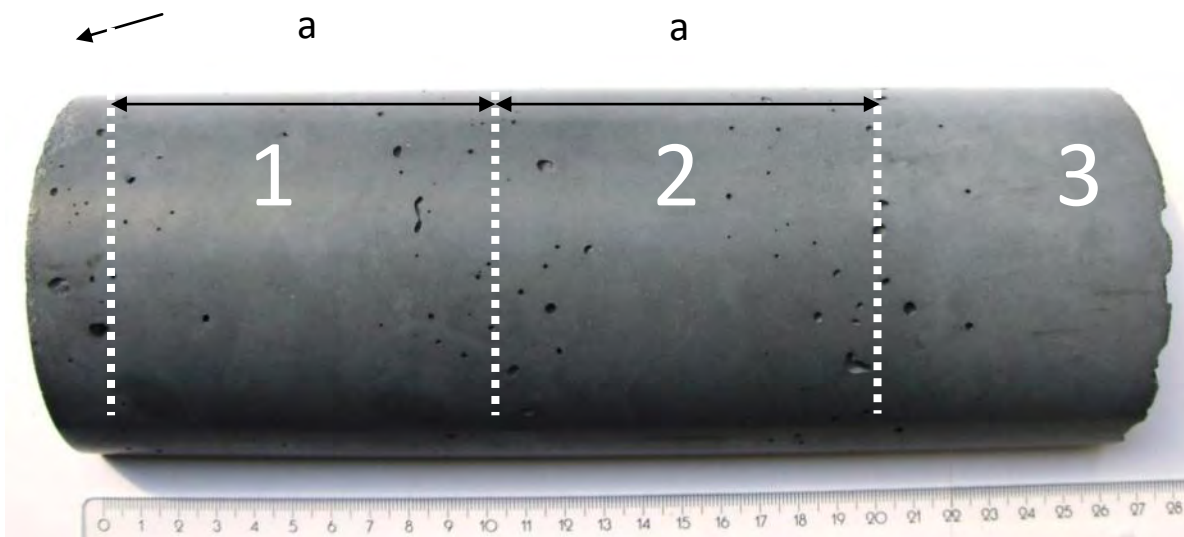


Abbildung 21: Lange SVB Gussprobe mit Schwarzpigment und Lufteinschlüssen in drei Regionen, Acrylzylinder wurde in drei Schritten befüllt (weiße Nummern = Befüllungsschritte)

Die Oberfläche der dunklen SVB Probe mit Schwarzpigment wurde ähnlich gut abgeformt (siehe Abbildung 20f). Es gibt jedoch ein paar Lufteinschlüsse mehr mit Durchmessern kleiner 1 mm, sowie einen großen Lufteinschluss ($\varnothing \sim 6$ mm) (siehe Abbildung 7-11). Diese etwas schlechtere Oberflächenqualität ist darauf zurückzuführen, dass der Mischung ca. 5 % Schwarzpigment (bezogen auf die Zementmasse) zugegeben wurde, woraufhin die SVB-Mischung deutlich steifer wurde. Der Mischung wurde daraufhin zusätzlich Wasser und Fließmittel nach Gefühl beigegeben, um die Viskosität zu verringern. SVB reagiert sehr sensibel auf Schwankungen der Ausgangsstoffe, sowie der Betonzusammensetzung.

Selbiges gilt auch für die längere SVB Probe. Bei dieser Probe sind außerdem deutlich drei Bereiche zu erkennen, in denen sich besonders viele Lufteinschlüsse angesammelt haben (siehe Abbildung 22, gestrichelte weiße Linien). Dies ist auf den Befüllungsvorgang zurückzuführen.

Der große Zylinder der dunklen SVB-Mischung wurde mittig längs aufgeschnitten, um die Verteilung der Gesteinskörnung über die Höhe zu ermitteln. Wie in Abbildung 18 zu sehen, ist die Gesteinskörnung gleichmäßig über die Höhe verteilt. Es ist keine Entmischung zu erkennen. Auch im oberen Bereich (schwarze Kreise) befindet sich noch große Gesteinskörnung.



Abbildung 22: Schnitt der langen SVB Gussprobe mit Schwarzpigment zur Darstellung der Lufteinschlüsse in drei Regionen im Längsschnitt, keine Entmischung der Gesteinskörnung

Durch das Gießen der SVB Proben konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die helle SVB-Mischung (ohne Schwarzpigment) erfüllt die hohen Anforderungen an die Qualität der Oberfläche. D. h. eine feste, glatte, ebene Oberfläche, die nahezu frei von Lufteinschlüssen ist.
- Die dunkle SVB-Mischung (mit ca. 5% Schwarzpigment, bezogen auf die Zementmasse) erreicht diese Oberflächengüte nicht. Sie muss dahingehend noch optimiert werden. Die Verteilung der Gesteinskörnung über die Höhe ist allerdings optimal. Auch im oberen Bereich befindet sich noch große Gesteinskörnung. Es sind keinerlei Entmischungserscheinungen zu beobachten.
- Die bei den Versuchen verwendeten PMMS Formen erwiesen sich als sehr gut geeignet. Bei der Verwendung von SVB sind senkrechte Formwände aus unbeschichtetem PMMA bezüglich des Anhaftens von Luftblasen problemlos möglich. Das PMMA wird vom Beton weder angegriffen, noch bei

vorsichtigem Entformen beschädigt. Ob dies auch für andere Schalungswerkstoffe gilt ist in weiteren Versuchen zu klären.

- Wird die Schalung nach Erstarrungsbeginn und vor Erstarrungsende der SVB-Mischung angestoßen, so kann sich der SVB von der Schalungswand trennen. In den so entstandenen Hohlraum fließt Wasser und es entstehen dunkle Verfärbungen auf der Betonoberfläche. Diese beeinträchtigen jedoch weder die mechanischen, thermischen oder chemischen Eigenschaften des Betons.
- Beim Befüllen der Schalung ist darauf zu achten, dass die Schalung möglichst in einem Arbeitsgang und gleichmäßig aus geringer Höhe befüllt wird. Die Entstehung von Luftblasen wird dadurch deutlich minimiert.

Die gegossenen SVB Proben weisen keine Merkmale auf, die als K.O. Kriterium für die Verwendung von SVB als Gestellwerkstoff gelten können. Kleine Poren ($\varnothing < 1 \text{ mm}$) erlauben die Verwendung von aerostatischen Luftlagerelementen ebenso wie die beim Urformen von SVB erzielten Rauheitswerte (vgl.).

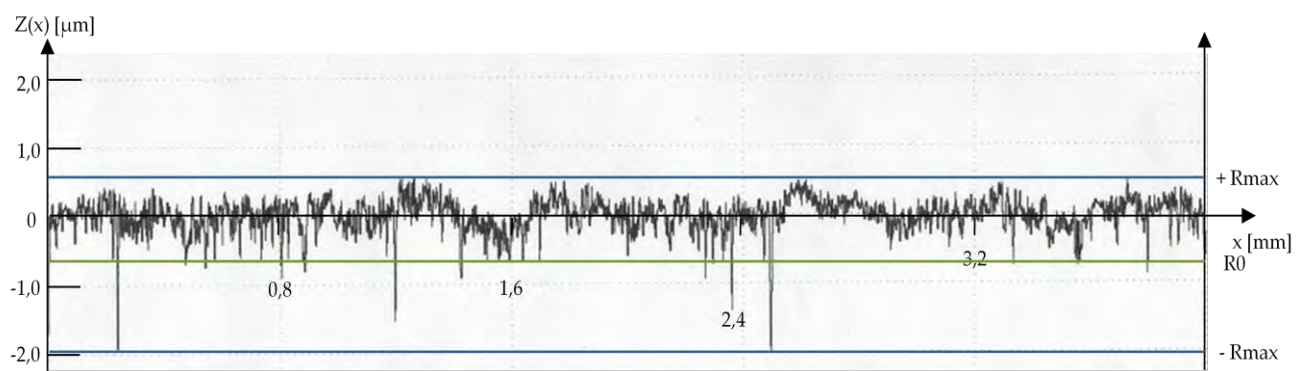


Abbildung 23: Rauheitsprofil eines SVB Probe, gemessen mit Perthometer M1 der Firma Mahr GmbH

Die Eignung des Werkstoffes SVB für Gestelle für Mess- und Positioniergeräte konnte aufgezeigt werden. Eine Kostenabschätzung ist nur auf Grundlage des Werkstoffes nicht möglich, sie hängt wesentlich von Komplexität, Genauigkeitsanspruch und Größe der Form ab die für die Urfomung eine Struktur benötigt wird und von der Anzahl und Komplexität der Einlege und Anbauteile ab.

3 Demonstrator Flachankermotor

3.1 Feldberechnung verschiedener Magnetkreisfigurationen, Optimierung der Magnetkreise

Bei der Auslegung der Magnetkreisgeometrie des Demonstrators ist von der sonst bei Antrieben üblichen Herangehensweise mit dem Ausgangspunkt der zu erbringenden Antriebskraft abgewichen: Es wurden vorrangig Gesichtspunkte der Realisierbarkeit eines einfachen Experimentalaufbaus mit handelsüblichen Dauermagnetsegmenten beachtet. Hochenergie-Dauermagnete sind spröde und werden deshalb kaum in geometrischen Dimensionen unter einem Millimeter Dicke angeboten. Die kleinere Querabmessung b_{DM} (Abmessung *quer* zur Magnetisierungsrichtung) beträgt bei den kleinsten handelsüblichen quaderförmigen Magneten ca. 2 ... 4 mm. Die Restriktion einer flachen Bauhöhe des Antriebes und die zulässige thermischen Belastung der Spule bei Bestromung blieben für erste Parameterstudien zunächst unberücksichtigt.

Legt man die geometrische Teilung mit $p = 2$ mm fest, so ergibt sich eine geometrische Periode von $\lambda = 4$ mm, innerhalb derer vier stabile Arbeitspunkte des 2-Phasen-Wechselpolschrittmotors liegen. Die Schrittweite bei Vollschrittbetrieb beträgt demnach $x_0 = 1$ mm.

Es sind umfangreiche Studien zu Kraft-Weg-Kennlinien mit Variation einiger Geometrieparameter des Magnetkreises vorgenommen worden.

Der Parameter Pol-/Zahnbreite b_Z hat einen entscheidenden Einfluss auf die Lage labiler und stabiler Arbeitspunkte der Kraft-Weg-Kennlinien für unbestromten bzw. bestromten Fall (eine Phase bestromt). Dargestellt sind die normierten Anstiege der Kraft-Weg-Kennlinien an der Läuferposition des Nulldurchganges der Kennlinie (Tangentialkomponente) $x/p = 0.50$ in Abhängigkeit der Pol-/Zahnbreite b_Z . Ist der Anstieg negativ, so handelt es sich um einen stabilen Arbeitspunkt, ist er positiv, so ist es ein labiler Arbeitspunkt. Zwischen $b_Z \approx 0.70 p$ und $b_Z = 0.80 p$ wechselt der Anstieg der Kraft-Weg-Kennlinie für den unbestromten Fall an der Stelle $x/p = 0.50 p$ (Nulldurchgang) das Vorzeichen. Das Maximum der Kippkraft der Doppeljochanordnung im unbestromten Fall stellt sich etwa für $b_Z \approx 0.50 p$ ein:

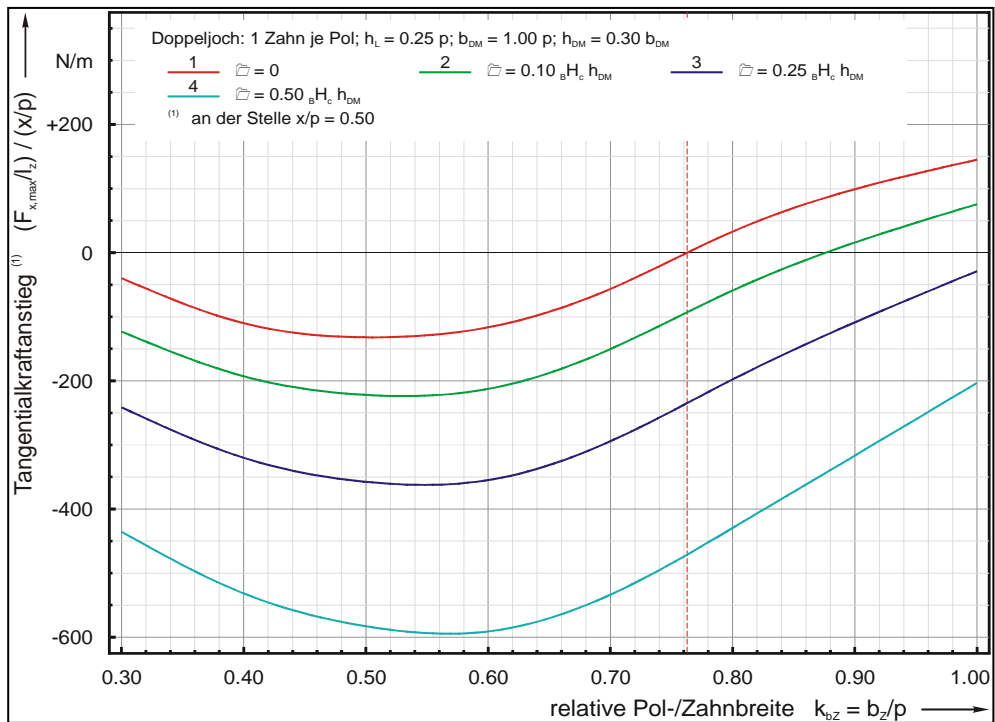


Abb. 5 normierter Anstieg der Kraft-Weg-Kennlinien (Tangentalkomponente) $(\Delta F_x/l_z) / (\Delta x/p)$ an der Stelle der relativen Läuferposition $x/p = 0.50 p$ in Abhängigkeit der Pol-/Zahnbreite b_z

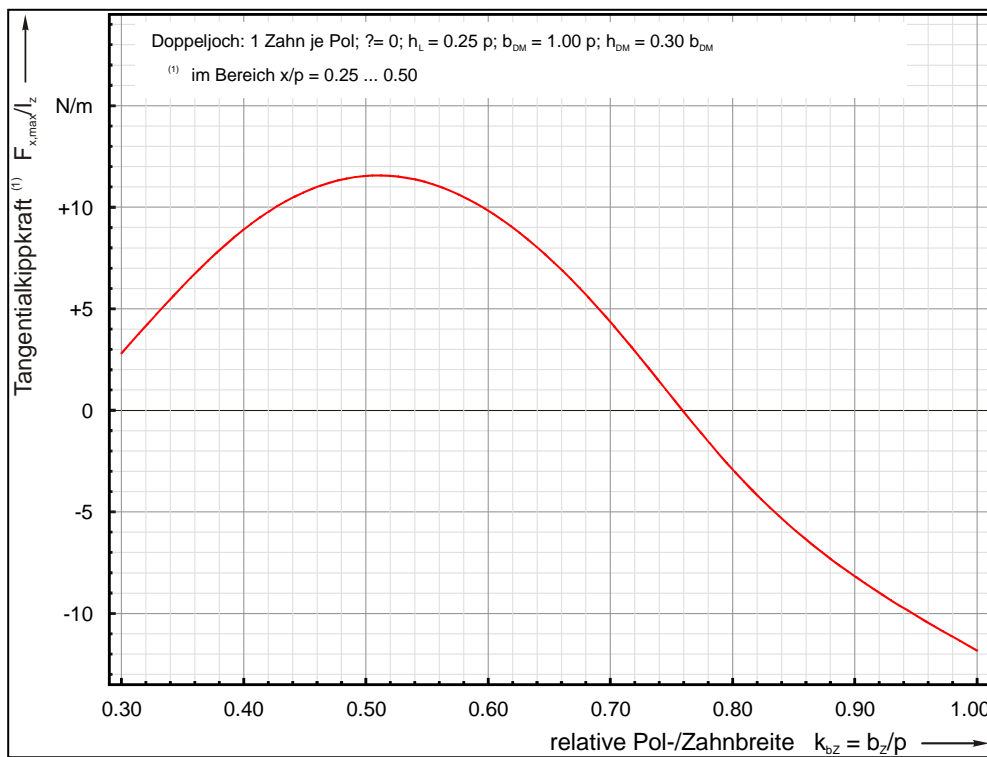


Abb. 4 Abhängigkeit der normierten Kippkraft¹⁾ von der Zahn-/Polbreite b_z

¹⁾ Scheitelwert der Kraft-Weg-Kennlinie im Bereich $x/p = 0.25 \dots 0.50$

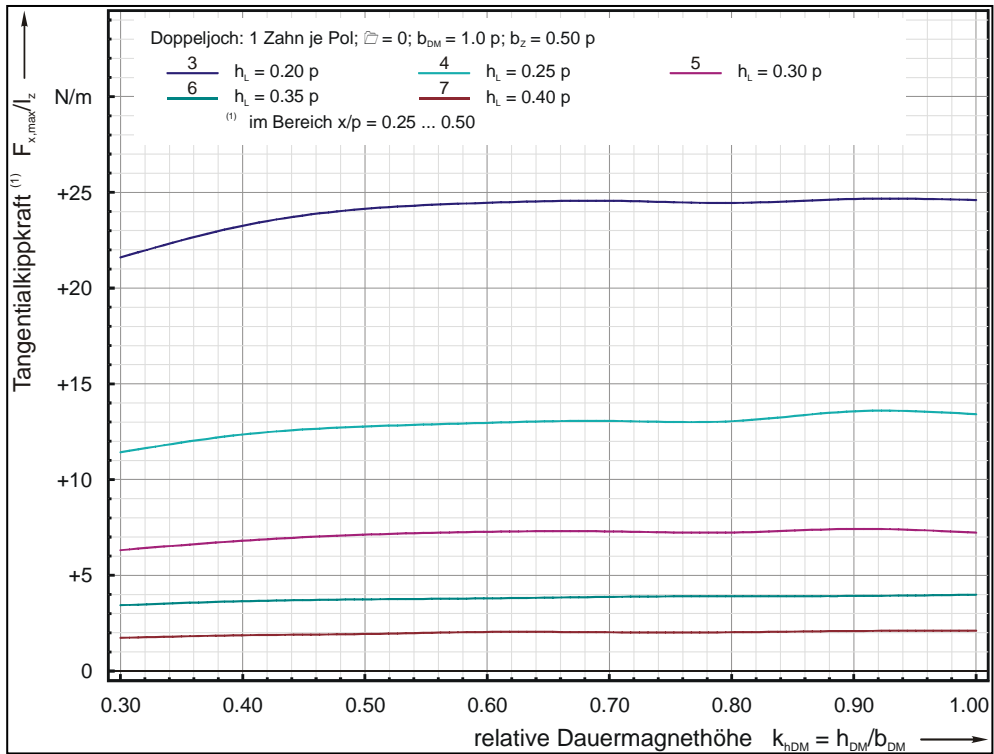


Abb. 7 Abhängigkeit der normierten Kippkraft¹⁾ von der Dauermagnethöhe h_{DM}

¹⁾ Scheitelwert der Kraft-Weg-Kennlinie im Bereich $x/p = 0.25 \dots 0.50$

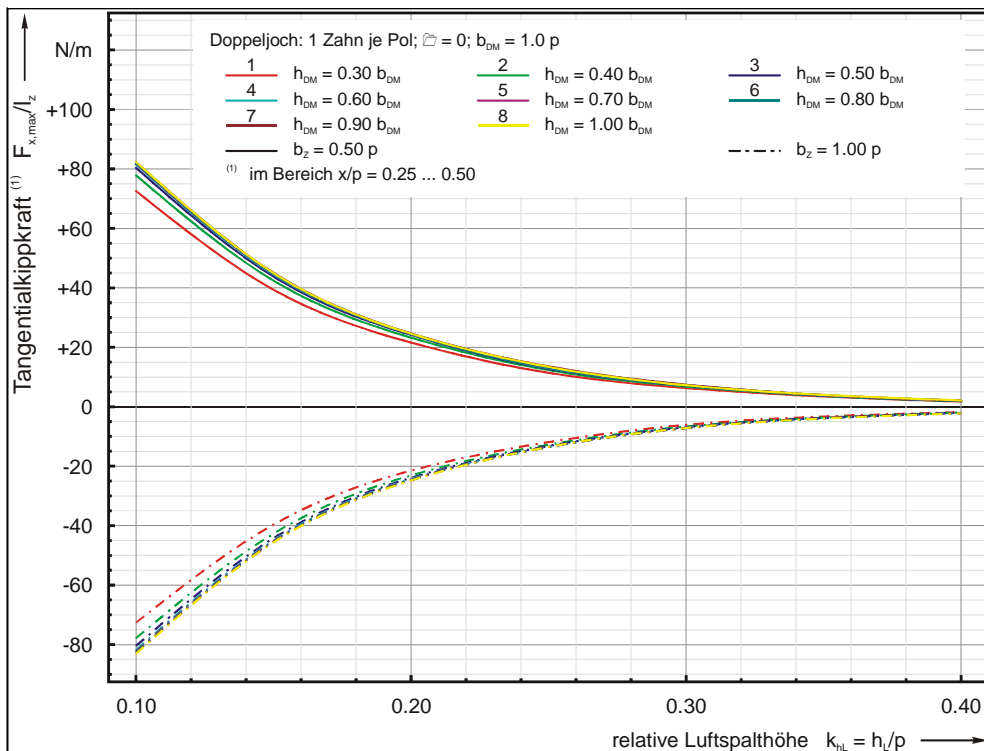


Abb. 6 Abhängigkeit der normierten Kippkraft¹⁾ von der Luftspalthöhe h_L

¹⁾ Scheitelwert der Kraft-Weg-Kennlinie im Bereich $x/p = 0.25 \dots 0.50$
 Wert positiv/negativ: rechts neben Scheitelwert liegender Nulldurchgang der Kennlinie ist stabiler/labiler Arbeitspunkt

Bei einer Zahnbreite $b_Z = 0.50 p$ wirkt sich ab einer Dauermagnethöhe h_{DM} von ca. 60 ... 70 % der Dauermagnetbreite b_{DM} eine weitere Vergrößerung der Höhe nicht mehr auf eine Zunahme der Kippkraft im stromlosen Fall aus. Dieser Sachverhalt entsteht aber vermutlich auch durch Sättigungserscheinungen in den Jochpolen. Bei Mehrfachzahnung je Jochpol mit ausreichend großem Querschnitt des Jochs im Spulenkernbereich konnte diese Abhängigkeit nicht so deutlich nachgewiesen werden. Bezüglich der Lage der stabilen Arbeitspunkte der Kraft-Weg-Kennlinien der Doppeljochanordnung für unbestromten Fall kann man die Aussage treffen, dass sie sowohl für die Parameterkombination Zahnbreite $b_Z = 0.50 p$ und Dauermagnetbreite $b_{DM} = 1.00 p$, als auch für die Kombination Zahnbreite $b_Z = 1.00 p$ und Dauermagnetbreite $b_{DM} = 0.50 p$ an der Stelle der relativen Läuferposition $x/p \approx 0.50$ liegen. Die Kippkraft ist jedoch für den ersten Fall größer, da im zweiten Fall mit $b_{DM} = 0.50 p$ die Dauermagnethöhe mit der Abhängigkeit von der Dauermagnetbreite $h_{DM} = 0.75 b_{DM}$ kleiner ausfällt.

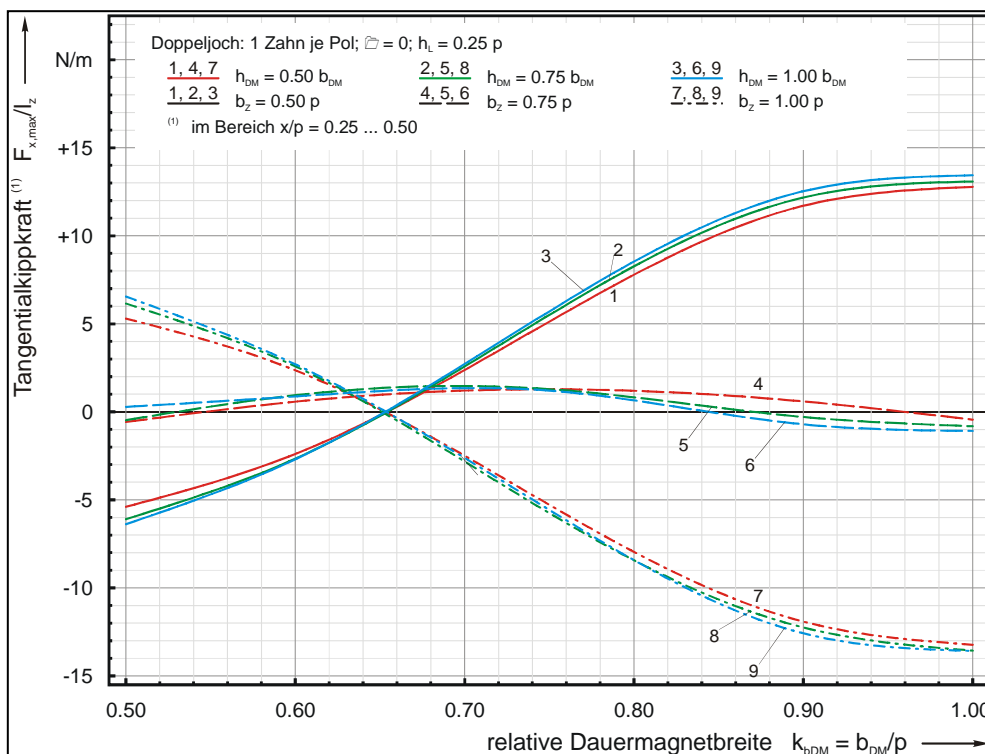


Abb. 8 Abhängigkeit der normierten Kippkraft¹⁾ von der Dauermagnetbreite b_{DM}
Parameter: Dauermagnethöhe h_{DM} ; Zahn-/Polbreite b_Z
¹⁾ Scheitelwert der Kraft-Weg-Kennlinie im Bereich $x/p = 0.25 \dots 0.50$
 Wert positiv/negativ: rechts neben Scheitelwert liegender Nulldurchgang der Kennlinie ist stabiler/labiler Arbeitspunkt

Dass die Kippkraft der Kraft-Weg-Kennlinien für den unbestromten Fall nach einer Hyperbelfunktion mit zunehmender Luftspalthöhe h_L abnimmt, ist allgemein bekannt. Interessanter war allerdings die Fragestellung nach dem Einfluss der Luftspalthöhe h_L auf die Anzahl und Lage der Nulldurchgänge der Kraft-Weg-Kennlinie bei Spulenbestromung.

Die Periodizität im **bestromten Fall** beträgt $\lambda = 2 p$, die Periodizität im **unbestromten Fall** dagegen nur $p/2!$ Es entsteht als Gesamtkennlinie eine Überlagerung zweier sinusähnlicher Kennlinien unterschiedlicher Periodizität. In der Parameterstudie wurde eine Variation der Luftspalthöhe h_L bei gleichzeitiger Variation der Spulendurchflutung ϑ durchgeführt und die jeweilige Kraft-Weg-Kennlinie ermittelt. In Bezug auf vorange-

gangene Kapitel ist die Zahnbreite $b_Z = 0.5 p$, die Dauermagnetbreite $b_{DM} = 1.00 p$ und die Dauermagnethöhe $h_{DM} = 0.50 b_{DM}$ gewählt worden.

Bei kleinem Luftspalt h_L und kleiner Spulendurchflutung Θ treten bei der Kraft-Weg-Kennlinie des Gesamtantriebes innerhalb einer Periode $x/p = -1 \dots +1$ mehr als ein Nulldurchgang mit negativem Anstieg auf. In einem solchen Fall führt der Schrittmotor also den Schritt nicht mit der Sollschrittweite von $\lambda/4$ aus! Es ist also eine Mindestdurchflutung notwendig, damit ein korrekter Schrittbetrieb realisiert werden kann.

Dieser Sachverhalt ist auch bei zweiphasiger Bestromung (Halbschrittbetrieb) bzw. Mikroschrittbetrieb zu beachten, wie die Diagramme auf den folgenden Seiten zeigen. Auch wenn eine gewählte Durchflutung bei einphasiger Bestromung zu korrekten Kraft-Weg-Kennlinien führt, kann bei zweiphasiger Bestromung die Kraft-Weg-Kennlinie einen deutlich kleineren Kennlinienanstieg im stabilen Arbeitspunkt aufweisen, so dass der Motor ein "weiches" Verhalten gegenüber Störkräften aufweist.

Abbildungen auf den Folgeseiten

Λ Λ

Diagramme normierter Kraft-Weg-Kennlinien der Tangentialkomponente F_x/l_z in Abhängigkeit der relativen Läuferposition x/p für Doppeljoch bei zweiphasiger Bestromung bzw. Mikroschrittbetrieb

Parameterstudie zur Untersuchungen des Einflusses der Luftspalthöhe h_L

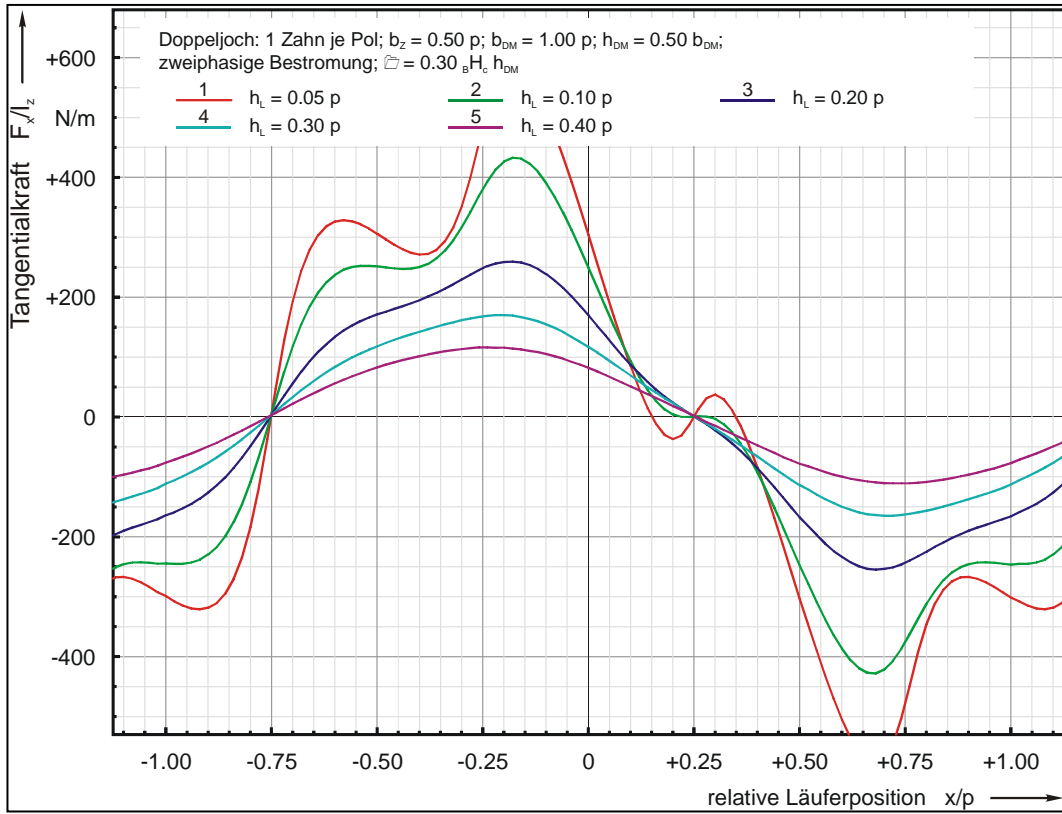


Abb. 9

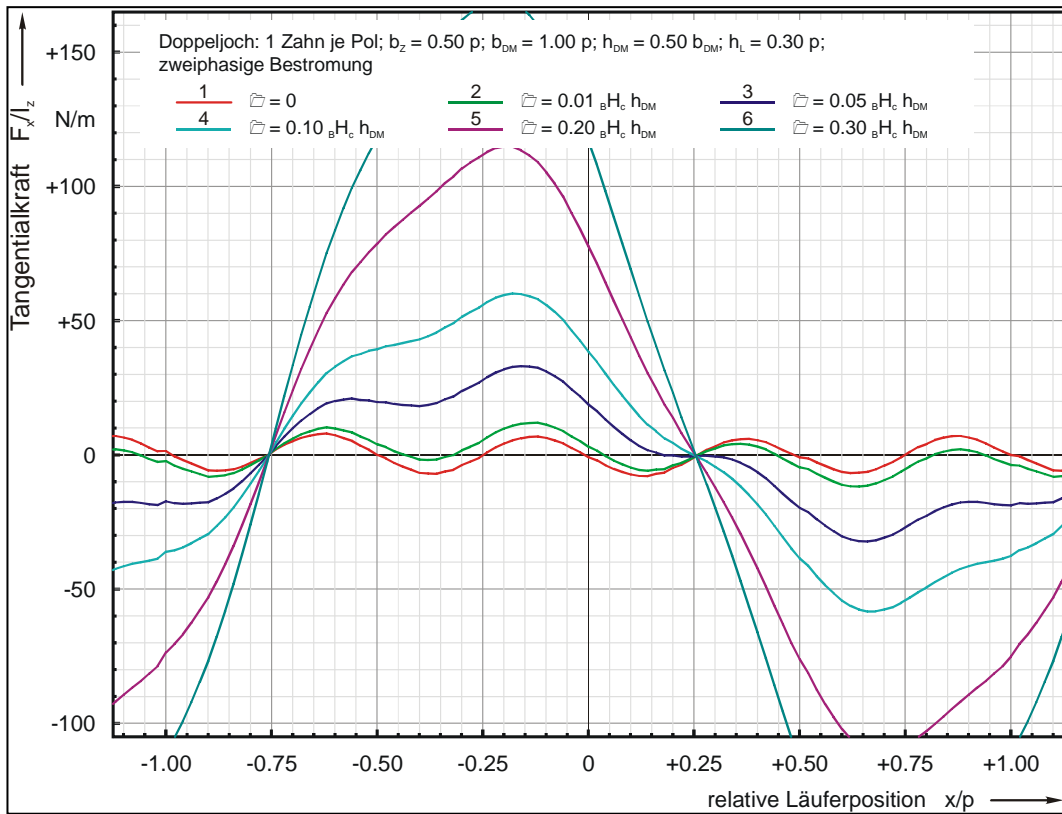


Abb. 10

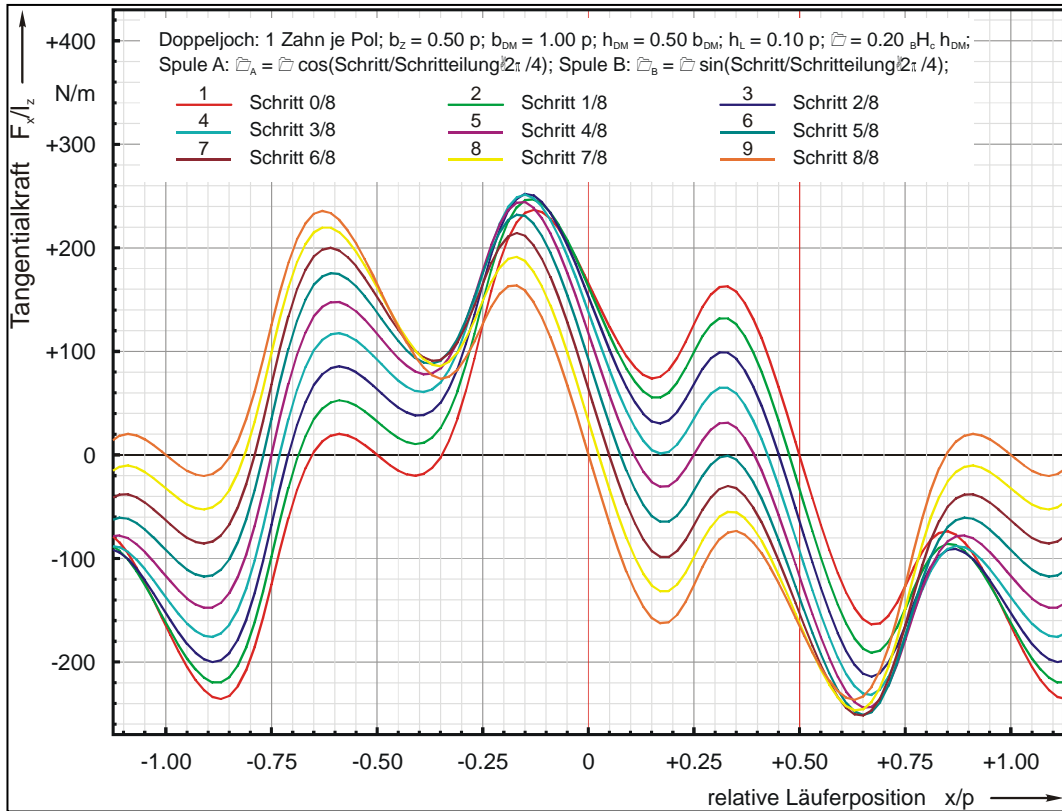


Abb. 11

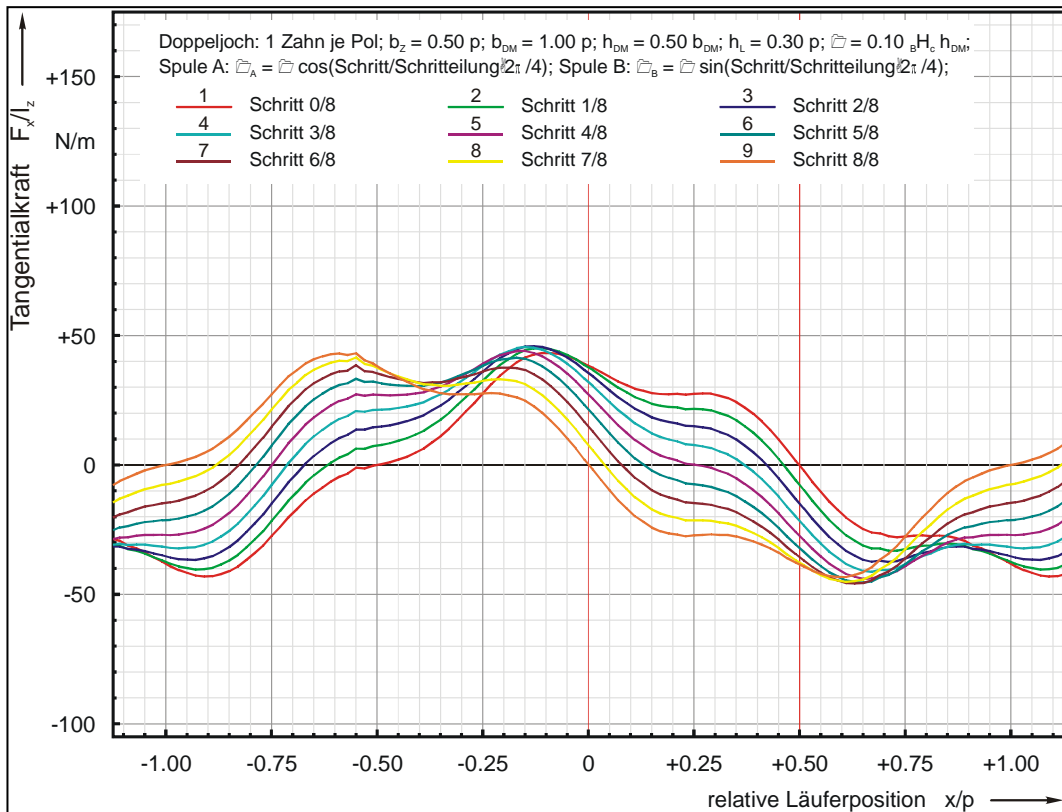


Abb. 12

Für eine bessere Bauraumausnutzung, verbunden mit einer Antriebskraftsteigerung, ist es günstiger, die Eisenjochpole mit einer Mehrfachzahnung zu gestalten. In weiteren Untersuchungen ist deshalb eine Statorjochgeometrie mit Dreifachzahnung je Statorpol angewendet worden, wobei ein weiterer Variationsparameter hinzukommt: die Höhe eines Eisenzahnes h_Z . Als Ergebnis dieser Studie sind verfeinerte optimale Werte der kennlinienbeeinflussenden Geometrieparameter bzw. Aussagen über einzuhaltende Geometrietoleranzen bei der Fertigung der Statorjochbleche eines Demonstratorantriebes gewonnen worden.

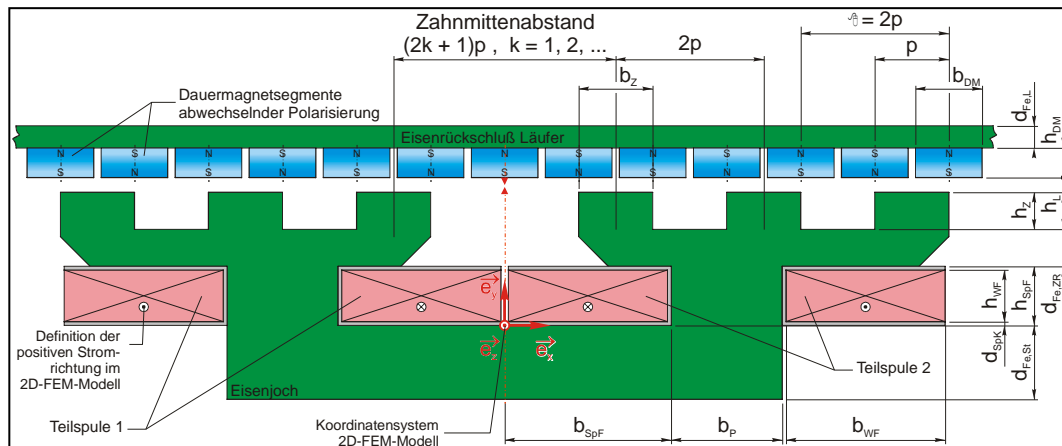


Abb. 13 Lage der geometrischen Parameter zur Beschreibung des Magnetkreises eines Motors mit Dreifachzahnung je Pol (nur ein Eisenjoch dargestellt)

Zusammenfassend sollten folgende Werte der Geometrieparameter der Statorzahnstruktur zum Erzielen einer möglichst großen Kippkraft im unbestromten Zustand eingehalten werden:

- Zahnbreite $b_Z \approx 0.50 p$
- Zahnhöhe $h_Z = (0.50 \pm 0.10) p = (0.40 \dots 0.60) p$

Die Dauermagnethöhe h_{DM} hat für den o.g. Wertebereich der Zahngeometrieparameter ab einem Wert von $h_{DM} = 0.60 b_{DM}$ bei kleinen Luftspalten h_L kaum einen nennenswerten positiven Einfluss auf eine Kippkraftmaximierung. Ein Wert von $h_{DM} > 0.80 b_{DM}$ ist nicht mehr sinnvoll. Dieser Sachverhalt sollte bei der Gesamtbauhöhe des Motors Beachtung finden. Bei größeren Luftspalten ($h_L \geq 0.30 p$) sind Dauermagnethöhen von $h_{DM} \approx 1.00 b_{DM}$ durchaus angebracht.

3.2 Realisierung eines Demonstrators, Experimente und Tests zur Validierung der Simulationsmodelle

Anhand der gewonnenen Simulationsergebnisse wurde durch den Projektpartner *MICROSTEP GmbH*, Sömmerda, ein Demonstrator des Flachankermotors konzipiert und gefertigt.

Weiterhin wurde ein 2D-FE-Modell zur Validierung von Simulationsergebnissen und experimentellen Untersuchungen erstellt. Damit sind statische Kennlinienfelder für die Tangential- und Normalkraft sowie den verketteten magnetischen Fluß Ψ in Abhängigkeit der Läuferposition x , des Luftspaltabstandes h_L sowie des Spulenstrang-/Phasenstromes I ermittelt worden.

Obwohl in der Vergangenheit bereits diverse Elektromagnete messtechnisch untersucht worden sind, konnte wegen der Spezifik des Flachanker-Linearmotors nicht auf vorhandene Versuchsaufbauten zurückgegriffen. Es ist ein komplett neuer Versuchsstand konzipiert und realisiert worden.

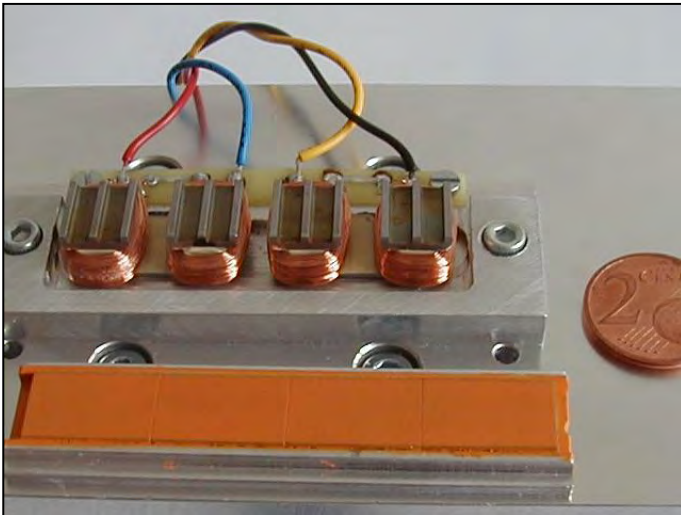


Abb. 14 Demonstrator des Flachankermotors
Konzipierung und Realisierung: *MICROSTEP GmbH, Sömmerda*

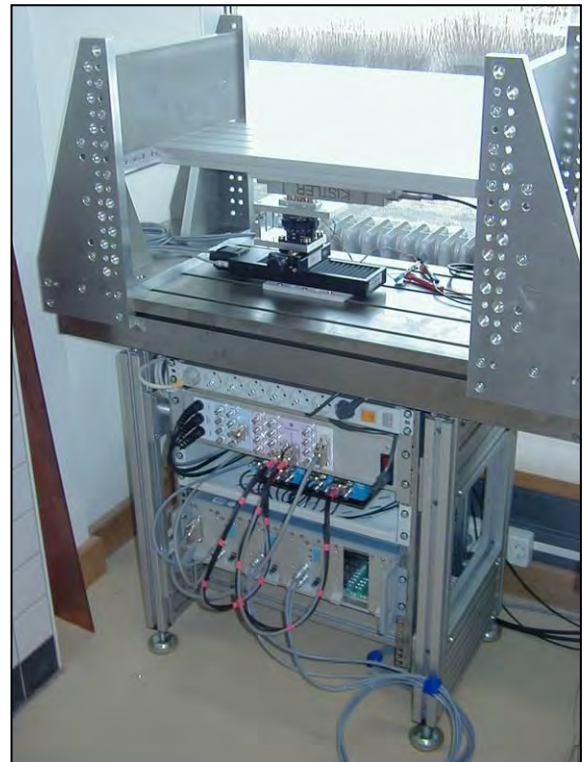


Abb. 15 Versuchsstand

Für die Kraftmessung sind dabei folgende Gesichtspunkte beachtet worden:

- Möglichkeit der Erfassung der tangentialen Antriebskraft F_x und der Normalkraft F_y
- Geringe Eigenverformung des Kraftsensors.

Es wurde sich für die Verwendung einer sog. Dynamometer-Messplattform auf Basis von Piezosensoren (*KISTLER 9254*) entschieden. Dynamometer enthalten mehrere räumlich verteilte Sensoren zwischen Grundplatte und Messebene. Durch eine geeignete Signalauswertung können die drei Kraftkomponenten F_x , F_y und F_z sowie die drei Momentkomponenten M_x , M_y und M_z abgeleitet.

Sensoren, die den piezoelektrischen Effekt ausnutzen, haben eine extrem hohe Eigensteifigkeit und somit unter allen bekannten Prinzipien der Meßsignalgewinnung die kleinste Eigenverformung. Allerdings weisen Piezosensoren ein Driftverhalten auf. Der Driftfehler kann unter der idealisierten Annahme der Zeitlinearität allerdings nachträglich rechentechnisch korrigiert werden.

Die Relativbewegung zwischen Stator und Läufer zur Aufnahme der Kraft-Weg-Kennlinien ist mit einer schrittmotorisch verstellbaren Linearführung (*OWIS*) realisiert worden. Die Ansteuerung dieser und die Messwerverfassung wurden mit einem DSPACE-System umgesetzt.

Die folgenden Diagramme beinhalten den Vergleich von Simulations- und Messergebnissen der Kraft-Weg-Kennlinien der Tangentialkomponente F_x und der Normalkraft F_y in Abhängigkeit der relativen Läuferposi-

tion $x/$ für ein- und zweiphasige Bestromung (Hinweis: in den Diagrammen mit Bestromung wurde nur eine der vier möglichen phasenversetzten Kennlinien der Simulation dargestellt).

Bei den tangentialen Antriebskräften werden die Simulationsdaten durch die Messergebnisse bestätigt. Die gemessenen Normalkräfte sind dagegen im Mittel ca. 25 % kleiner als die Simulationswerte.

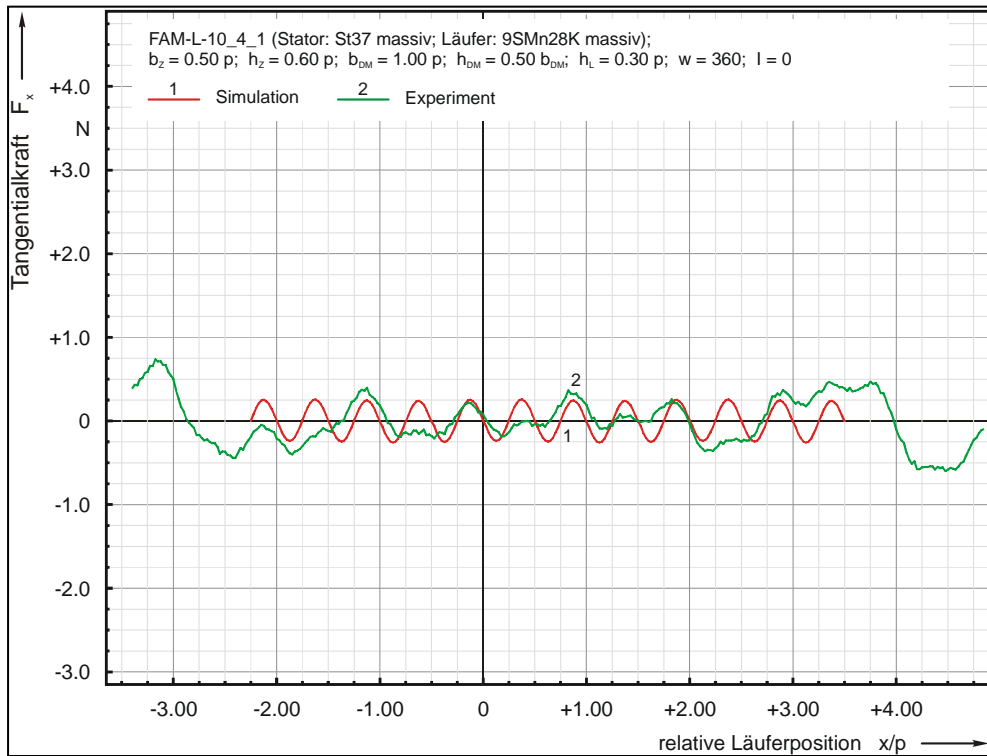


Abb. 16

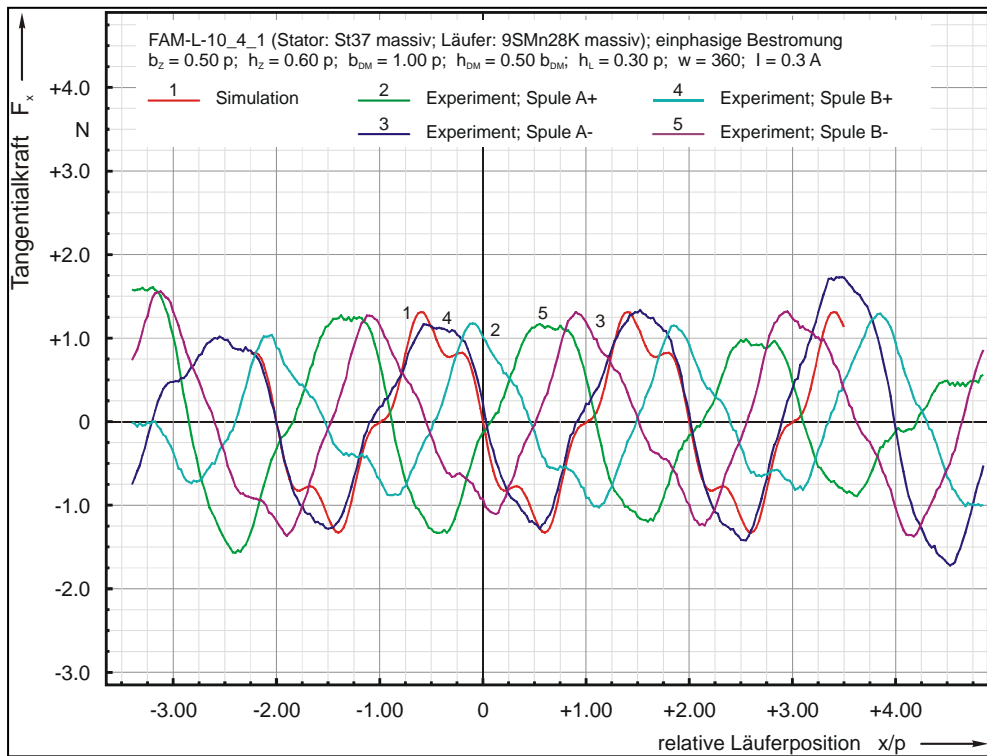


Abb. 17

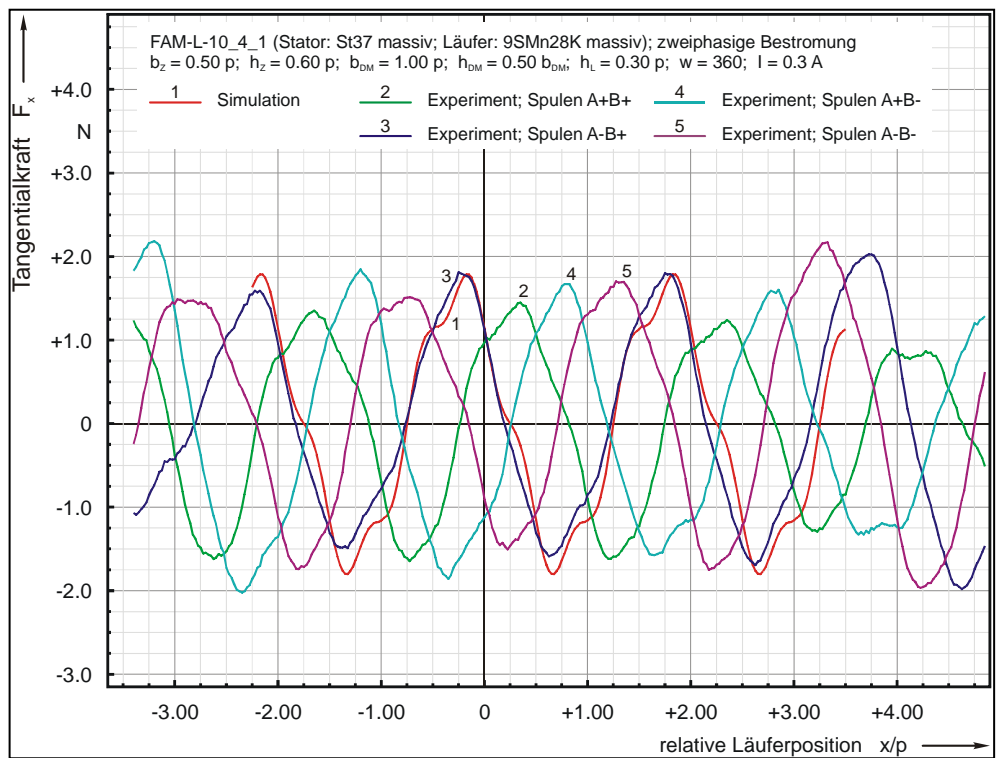


Abb. 19

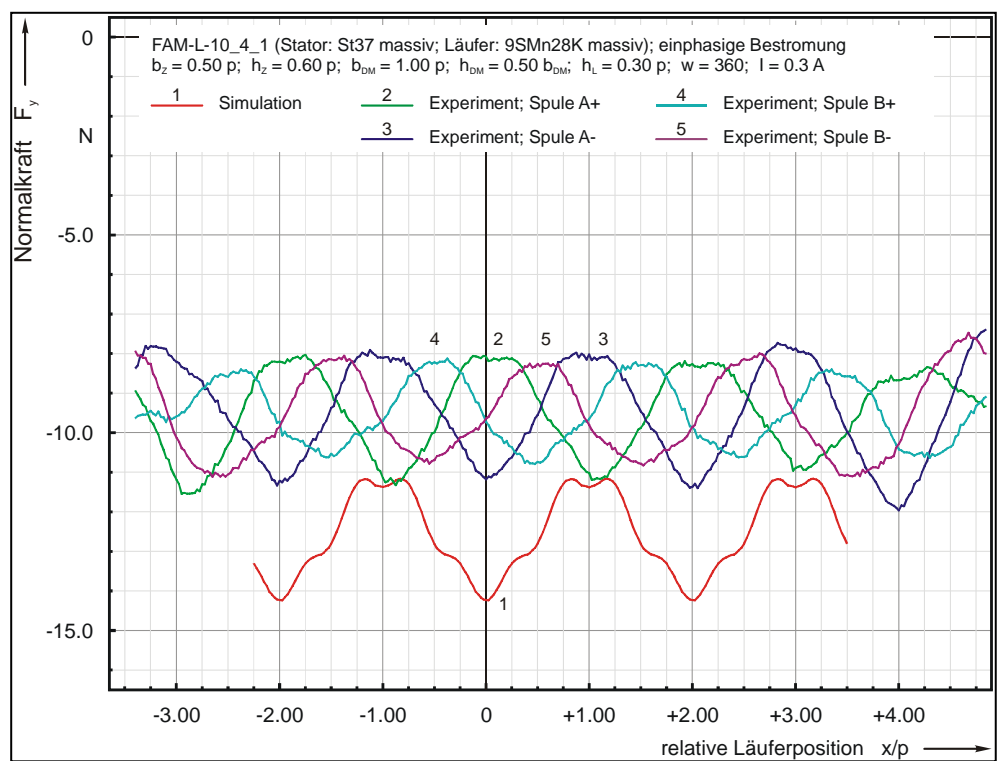


Abb. 18

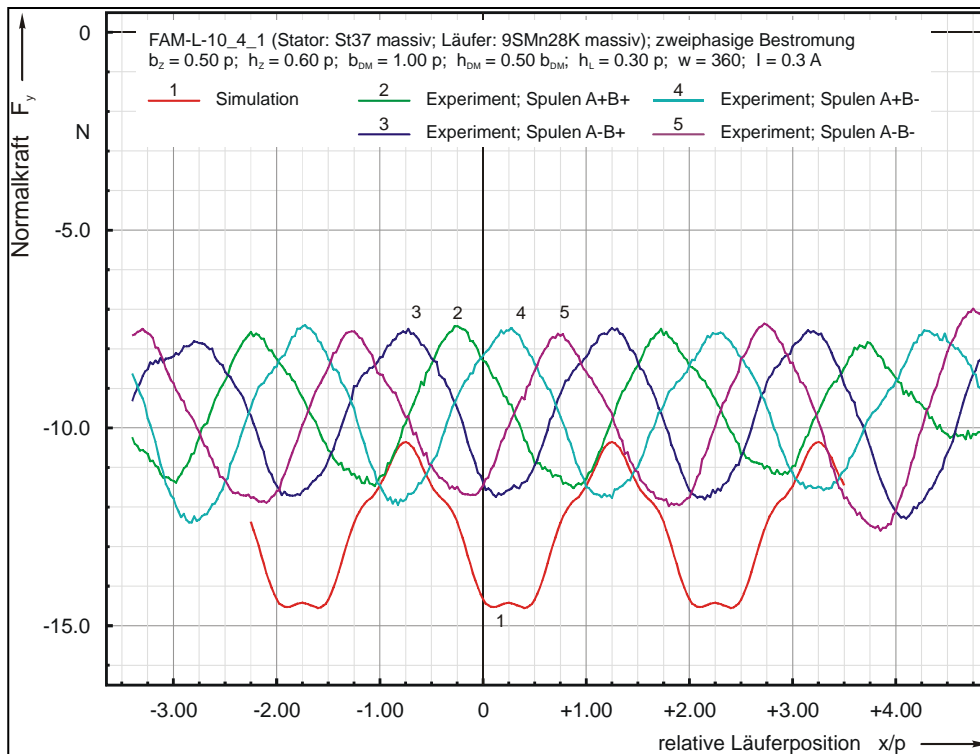


Abb. 20

3.3 Wirbelstrommodell und Dynamiksimulationen

In der Literatur wird für die Berücksichtigung von Wirbelströmen das Modell der sog. komplexen Induktivität angegeben (Kellermann, Helmut: Modellbildung und feldorientierte Lageregelung eines Schraubengewindereluktanzmotors; VDI-Fortschrittberichte, Reihe 8, Nr. 432; ISBN 3-18-343208-0; VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1994).

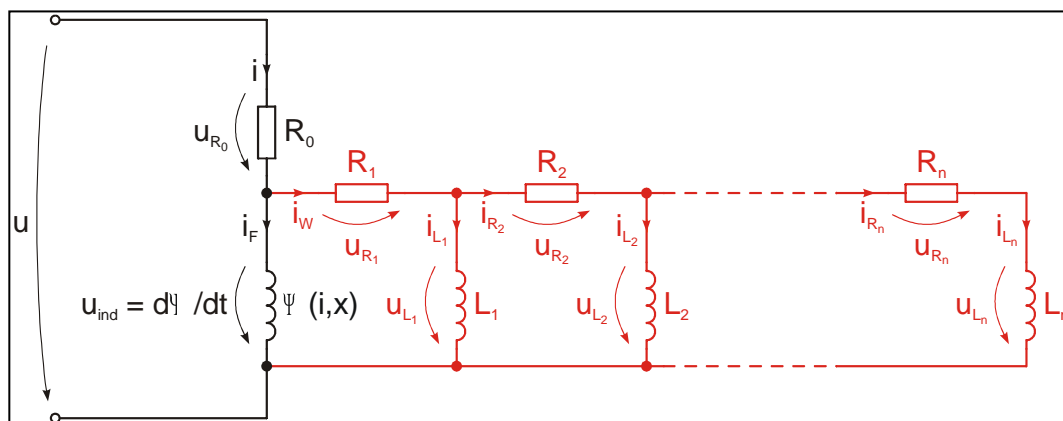


Abb. 21 elektrisches Ersatzschaltbild der komplexen Induktivität / frequenzabhängigen Impedanz

Hintergrund dieses Modells ist die an den Klemmen einer Spule mit elektrisch leitfähigem Kern messbare frequenzabhängige Impedanz $Z(\omega) = R(\omega) + j\omega L(\omega)$ bei harmonischer Erregung.

Durch den Einfluss der Wirbelströme im elektrisch leitfähigen Kern nimmt die (messbare) Induktivität mit steigender Frequenz ab und der (ohmsche) Widerstand zu. Als Grenzwert für die Frequenz $\omega \rightarrow 0$ ergibt sich der Wicklungswiderstand R_0 der Spule und die sog. Gleichstrominduktivität L_0 .

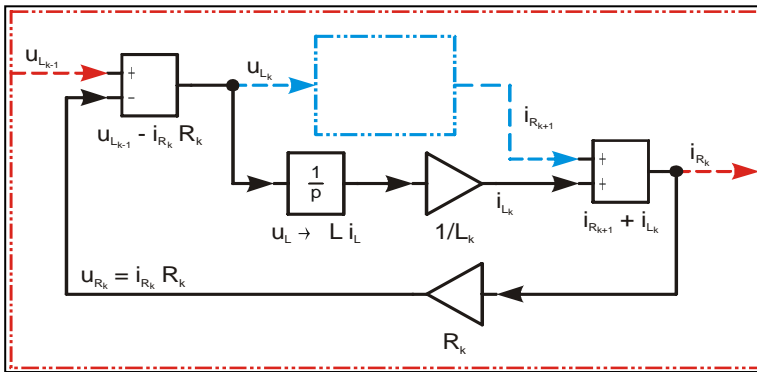


Abb. 22 17-Strukturausschnitt des Wirbelstrommodells mit Gliedern einfacher Übertragungsfunktionen

Beim Modell der komplexen Induktivität werden der Gleichstrominduktivität L_0 (bzw. dem Element, welches die induzierte Spannung $\frac{d\Psi}{dt}$ repräsentiert) weitere L-R-Kombinationen der Anzahl n parallel geschaltet, deren Parameter so bestimmt werden müssen, dass das frequenzabhängige Verhalten, zumindest in dem interessierenden Frequenzbereich, hinreichend genau nachgebildet wird.

Im Simulationsmodell kann die komplexe Induktivität durch Übertragungsfunktionen einfacher Glieder, wie z.B. Summen- bzw. Differenz-, Integrier- und Proportionalglied modelliert werden. Für eine beliebige Anzahl n von L-R-Kombinationen ist diese Struktur n -mal ineinander verschachtelt zu berücksichtigen. Dieses Subsystem ist im Modell des elektrischen Teilsystems integriert worden:

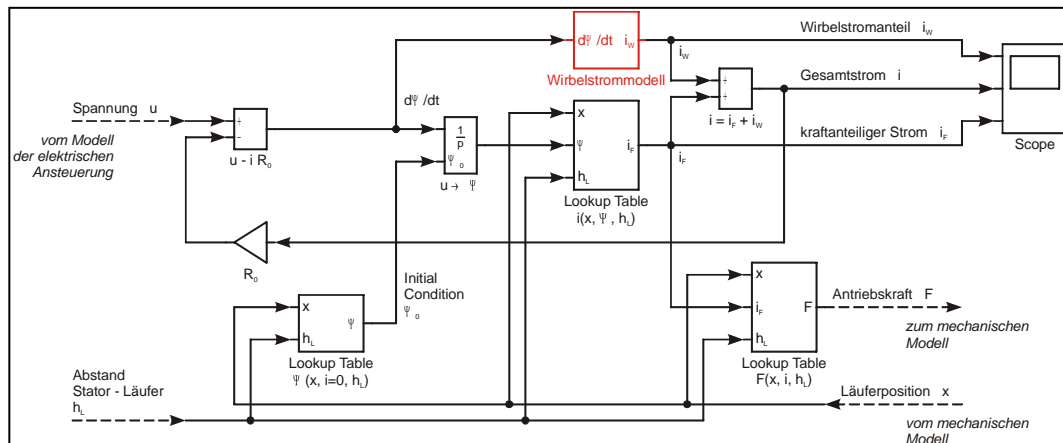


Abb. 23 Ausschnitt aus dem Simulationsmodell eines elektromechanischen Antriebssystems mit Berücksichtigung von Wirbelströmen

Die Ermittlung der Frequenzabhängigkeit $Z(\omega) = R(\omega) + j\omega L(\omega)$ kann u. a. durch folgende Verfahren erfolgen:

- messtechnisch mit frequenzdurchstimmbaren R-L-C-Messbrücken. (Nachteile: Kleinsignalverhalten; Prüfling muss gegenständlich vorliegen; in frühen Phasen des konstruktiven Entwurfsprozesses daher nicht anwendbar).
- analytisch: auf wenigen geometrische Anordnungen mit vertretbarem Aufwand anwendbar (z.B. rotations-symmetrische unendlich lange massive (ungeblechte) Anordnung geschichteter Materialien unterschiedlicher Permeabilität und elektrischer Leitfähigkeit)

- numerisch (FEM o.ä.): erheblicher Rechenaufwand; meist nur mit linearen Materialeigenschaften.

Für den Flachankermotor wurde aufgrund der Zahnstrukturen des Stators eingeschätzt, dass der Rechenaufwand für die Ermittlung der frequenzabhängigen Impedanz $Z(\omega)$ mit der Methode der finiten Elemente erheblich ist. Stattdessen wurde auf die messtechnische Ermittlung zurückgegriffen.

Als Ergebnis ergab sich eine Stützstellenreihe $Z(\omega)$ für eine Menge an Stützstellen $\omega_k = 0 \dots (+\infty)$. Diese wurde durch das oben beschriebene Modell mit der Schachtelungstiefe $n = 1, 2, 3$ nachgebildet.

Wenn $R = R(\omega)$ und $L = L(\omega)$ gilt, dann gilt für die elektrische Zeitkonstante $\tau_{el} = \frac{L(\omega)}{R(\omega)} = \tau_{el}(\omega)$ ebenfalls die Frequenzabhängigkeit. Dieser Parameter kann als Gütekriterium für die Nachbildung der komplexen Indukti-

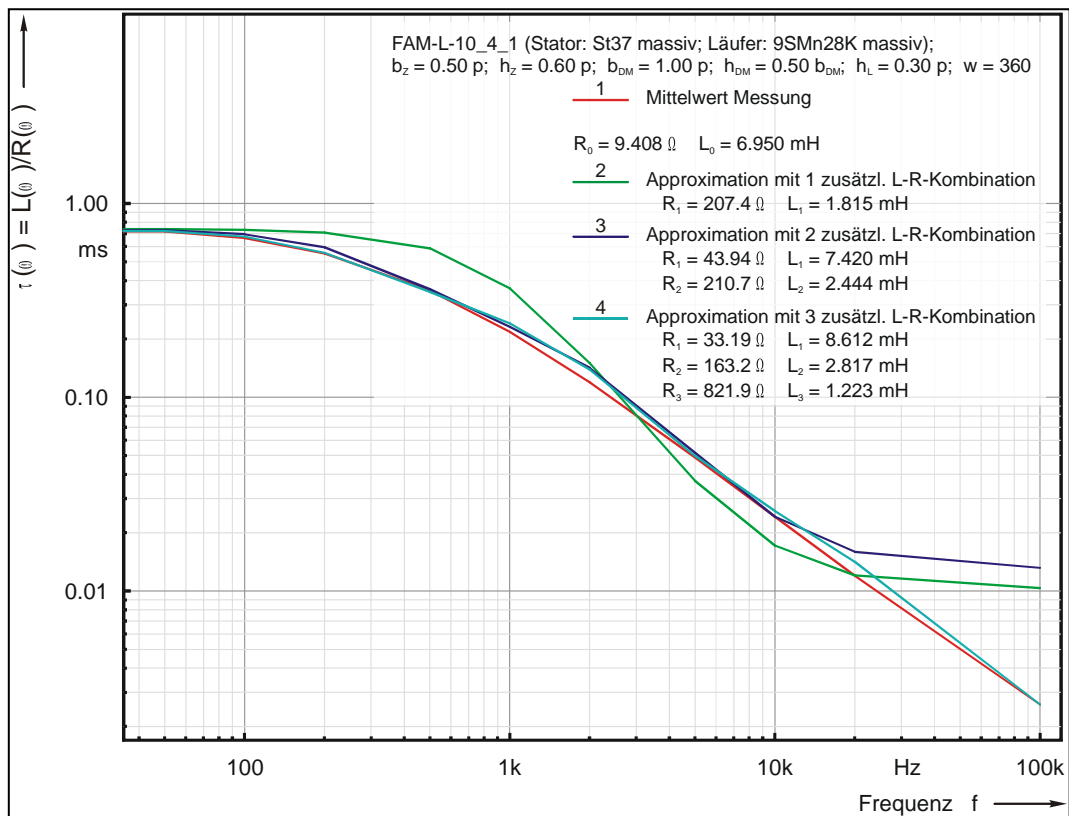


Abb. 24 7frequenzabhängige Impedanz (elektrische Zeitkonstante) des Flachanker-Linear motors

Vergleich von Meßergebnissen und Nachbildung des frequenzabhängigen Verhaltens mit dem Modell der komplexen Induktivität

vität durch eine praktikable Anzahl n herangezogen werden.

Als Möglichkeit der Verifizierung des Wirbelstrommodells bietet sich die Sprungantwort des Spulenstromes $i(t)$ eines Spulenstranges des Flachanker-Linear motors bei ortsfestem Läufer bei Spannungseinprägung im Vergleich zu einer Messung an. Messtechnisch kann allerdings nur der Gesamtstrom, nicht aber der Wirbelstromanteil erfasst werden.

3.4 Netzwerkmodelle des Flachankermotors

Wie bereits oben erwähnt, erfordert die Anwendung von Netzwerkmodellen für die Analyse von Magnetkreisen periodischer Strukturen einen hohen Modellierungsaufwand. Insbesondere verlangt die Abstimmung des Modells mit dem realen Objekt umfangreiche Erfahrungen des Anwenders und gestaltet sich zudem recht zeitaufwändig. Anhand eines Literaturstudiums und der versuchten Nachvollziehbarkeit der angegebenen Beispiele hat sich herausgestellt, dass der Modellierungsaufwand bei der Netzwerkmethode in Bezug auf die erzielbare Genauigkeit der Ergebnisse, insbesondere bei den interessierenden Kraft-Weg-Kennlinien, für praktische Anwendungen in keinem vertretbaren Verhältnis steht. Daher wurde diese Teilarbeitspaket nicht weiter verfolgt. Die im Vorhaben geplante Bearbeitungszeit wurde auf umfangreichere FEM-Simulationen bzw. die (gegenüber der Planung wesentlich umfangreicher ausfallende) Konzipierung und Realisierung des Versuchstandes (siehe PSP 3.3.1.2.5) aufgeteilt.

4 Magnetventile

Zu Beginn des Projektes wurde die Arbeitsgruppe *Schnellschaltventile und Mikroaktoren* (SVMA) gegründet. Diese bestand aus den Projektpartnern:

- Kern Technik GmbH & Co. KG, Schleusingen
- LLT Applikation GmbH, Ilmenau
- MIMtechnik GmbH, Schmalkalden
- Steinbeis Transferzentrum Mechatronik (STZ), Ilmenau
- Technische Universität Ilmenau (TU), Ilmenau
 - Fachgebiet Entwurf Mechatronischer Antrieb (EMA)
 - Fachgebiet Mikromechanische Systeme (MMS)
 - Fachgebiet Elektrochemie und Galvanotechnik (ECG)

Diese Arbeitsgruppe bearbeitete sämtliche Themen mit Bezug zur Miniaturventiltechnik. Ziel der Arbeitsgruppe war der Nachweis der effizienten Nutzbarkeit von Magnetaktoren in miniaturisierten (Pneumatik)Ventilen. Der Schwerpunkt lag dabei nicht auf dem Ausbau der bekannten Vorteile von Direktantrieben wie z. B. hohe Genauigkeit, Dynamik, Zuverlässigkeit, einfachem Aufbau und Effizienz, sondern vielmehr in der Erschließung neuer Anwendungsfelder, innovativer Technologien bzw. Technologieabläufe sowie dem Aufzeigen von Entwicklungspotenzialen.

Zu Projektbeginn wurde zu diesem Zweck eine Vision mit dem Titel *Das Ventil(system) der Zukunft* erarbeitet, die über die Projektlaufzeit die Agenda der Arbeitsgruppe darstellte. Ihre Inhalte werden im Folgenden stichpunktartig vorgestellt:

- Kleinste Aufreihmaße, Fortschreitende Miniaturisierung
 - Stand der Technik: Aufreihmaße größer als 5 bis 10 mm
 - Zielstellung: Aufreihmaß 2,5 mm bei größtmöglicher Nennweite und Energieeffizienz
- Steigerung der System**integration**
 - Reduzierung der Montagekosten durch geringe Bauteilanzahl
- Eignung nicht nur für Gase (Pneumatik), sondern auch für Flüssigkeiten (Hydraulik)
 - Einsatzmöglichkeit in der Mikroreaktionstechnik, z. B. zur Steuerung vieler paralleler Mikroaktoren
- Effizienz der Fertigung
 - Zunehmende **Parallelisierung**, z. B. Fertigung von Ventilmatrizen
 - Reduzierung serieller Fertigungsschritte auf ein Mindestmaß
- Zusammenfassung zu Ventilinseln bzw. **Funktionsblöcken**
 - Integration zusätzlicher Funktionen, z. B. Mischer, Verteiler usw.

Begriffe wie Effizienz, Miniaturisierung, Integration, Parallelisierung und Funktionsblöcke machen eine wichtige Parallele zur Mikroelektronik deutlich: Während der Projektlaufzeit wurden zahlreiche Ansätze verfolgt, die die Erfolgsstrategie der Mikroelektronik auf Ventilanwendungen zu übertragen versuchen. In Abbildung 24 wird dieser Trend für Ventilanwendungen mithilfe des Performance-Faktors nachgewiesen, zu dessen Ermittlung die Leistungsparameter Nennweite (N_W), Betriebsdruck (N_D), Aktorvolumen (V) und Verlustleistung (P_V) von markterhältlichen Ventilen verrechnet wurden.

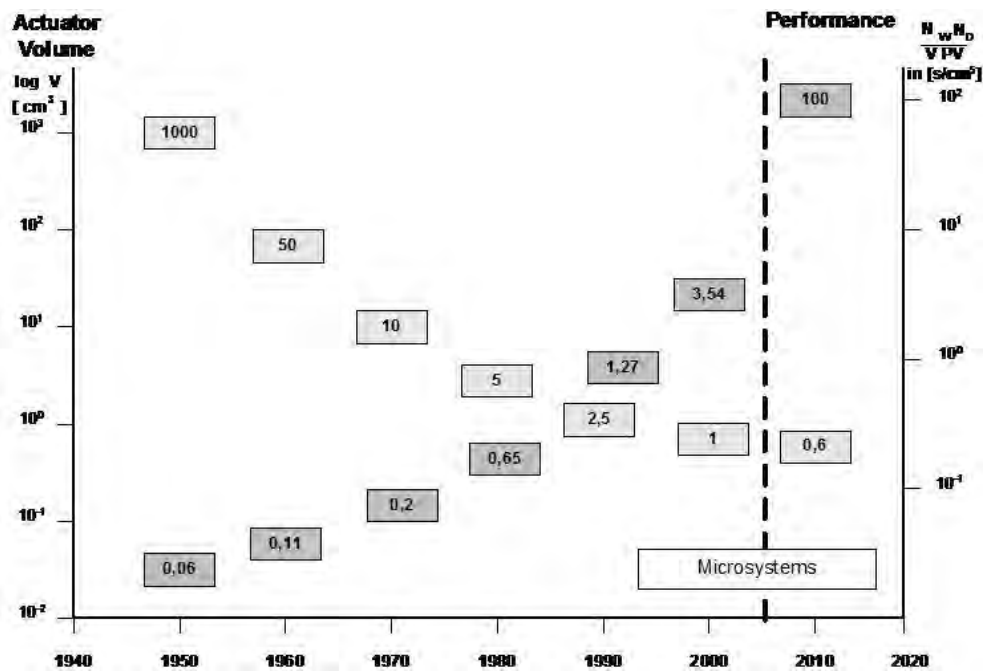


Abbildung 24: Zeitleiste – Aktorvolumen und Performance-Faktor,

N_w -Nennweite, N_D -Betriebsdruck, V -Aktorvolumen, P_V -Verlustleistung

Ansatz 1: Effizienz

Geringer Energieverbrauch und hohe Schaltfrequenzen sind wichtige Zielstellungen bei der Entwicklung neuer Pneumatikventile. Die Aktoren derartiger Ventile basieren häufig auf dem Reluktanzprinzip, für dessen Umsetzung in jedem Fall eine Rückstellbewegung realisiert werden muss, da sich nur anziehende Kräfte schalten lassen. Die rückstellende Kraft wird typischerweise durch eine Feder erzeugt, kann aber auch durch einen zweiten Magnetkreis generiert werden.

Bei Ventilen mit neutralem Magnetkreis muss für mindestens einen der zwei oder mehr Schaltzustände (z. B. „geöffnet“ oder „geschlossen“) die Spule durchgängig bestromt werden, um die Rückstellkraft der Feder auf den Anker sowie den Betriebsdruck des strömenden Mediums auf die Dichtsitzfläche zu kompensieren. Werden hingegen *polarisierte* Magnetkreise verwendet (d. h. integriert man Dauermagneten), so kann der Anker in *beiden* Endlagen gehalten werden, ohne dass dazu die Spule bestromt werden müsste. Die Spule muss in diesem Falle lediglich bipolar betrieben werden. Dies ermöglicht einerseits die Senkung der Betriebsspannung, andererseits wird die Leistungsaufnahme gegenüber konventionellen Systemen deutlich reduziert.

Integriert man eine Feder in den Aufbau aus zwei polarisierten Magnetkreisen, so nennt man den entstandenen Antrieb *Resonanzaktor* (Abbildung 25). Durch die Integration der Permanentmagneten gelingt es, die ursprünglich resonant schwingende Bewegung des Ankers (bestimmt durch dessen Massen und die Federkonstante) in eine Hin- und Herbewegung des Ankers mit definierten (und frei einstellbaren) Haltezeiten zu überführen. Der Anker wird dabei in beiden Endlagen von den Permanentmagneten gehalten. Die Bewegungseigenschaften werden durch die Ankermasse und die Federkonstante bestimmt.

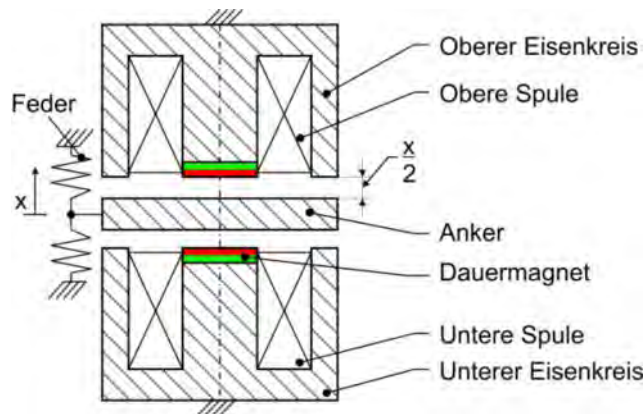
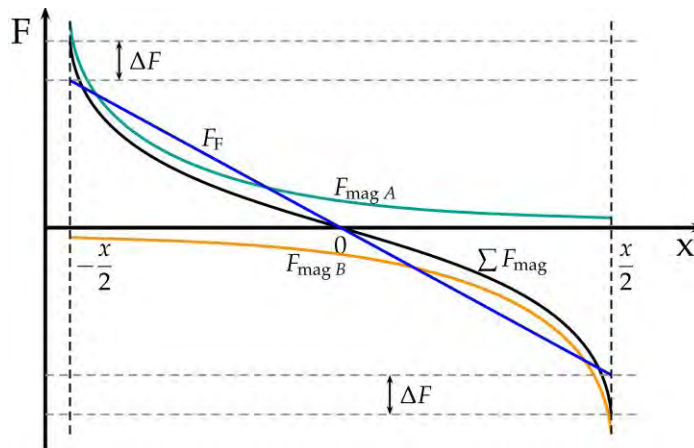


Abbildung 25: Schematische Darstellung eines magnetischen Resonanzaktors

Nach dem Zusammenbau eines Resonanzaktors muss das Feder-Anker-System einmal im Rahmen einer Initialisierungsroutine in eine der Endlagen gebracht werden, wo der Anker von einem der beiden Permanentmagneten gehalten wird. Während eines jeden Bewegungszyklus wird die potenzielle Energie der gespannten Feder in kinetische Energie des Ankers umgewandelt. Die adäquat bestromten Spulen schwächen lediglich das Feld desjenigen Dauermagneten, welcher momentan den Anker hält, und verstärken das Feld des jeweils gegenüberliegenden Dauermagneten. Dadurch bewegt sich der Anker federgetrieben bis zur neutralen Mittellage, schwingt aufgrund seiner Trägheit über diese hinaus und gerät so in den Wirkungsbereich des gegenüberliegenden Permanentmagneten, von welchem er anschließend in die zweite Endlage angezogen wird. Abbildung 26 zeigt die Auslenkungs-Kraft-Kennlinien im magnetischen Resonanzaktor.

Idealisiert betrachtet, müssen bei diesem Prinzip lediglich die magnetischen Verluste innerhalb des Magnetkreises sowie die mechanischen Verluste während der Ankerbewegung (z. B. Fluidreibung und Dämpfung) aus einer externen Energiequelle über die Spulen wieder in das System eingespeist werden. Darin begründet sich die besondere Energieeffizienz von Resonanzaktoren.



**Abbildung 26: Auslenkungs-Kraft-Kennlinien im magnetischen Resonanzaktor;
 F_F -Federkraft, F_{mag} -Magnetkraft, ΣF_{mag} -Summenkennlinie, ΔF -Haltekräfte, 0-Mittellage, x-Hub**

Die pneumatische Ventiltechnik war zum Zeitpunkt der Literaturrecherche fast ausschließlich beschränkt auf die Verwendung neutraler Magnetkreise, lediglich in einem kleinen Prozentsatz wurden einfach polarisierte Magnetkreise verwendet. Das Resonanzprinzip fand bis dato keine Anwendung in pneumatischen (Makro-) Ventilen auf dem Markt.

Durch die extrem geringe Leistungsaufnahme ist das Resonanzprinzip prädestiniert für den Einsatz in energieeffizienten Ventilen, die später miniaturisiert werden sollen. Obwohl zwei identische Magnetkreise zum Einsatz kommen, ist der Aufbau sehr gut für die Miniaturisierung geeignet, wie die folgenden Abschnitte zeigen werden. Ein weiterer Vorteil dieses Aktorprinzips ist, dass die dynamischen Eigenschaften des Ventils unabhängig von der Anzugsverzugs- und Abfallverzugszeit des Magnetantriebes sind. Gleichzeitig ermöglicht der resonante Aufbau die Realisierung wesentlich größerer Arbeitsluftspalte (und damit in Ventilanwendungen größerer Nennweiten) als konventionelle Magnetkreise.

Zum Nachweis der Leistungsfähigkeit wurde ein resonantes Miniaturventil (RMV) in einer ersten Version entworfen, optimiert und gefertigt. Abbildung 27 zeigt die Konstruktion des Ventils RMV1 in einer Explosionsdarstellung und im Vollschnitt. Das Ventil wurde als 3/2-Wegeventil entworfen, d. h. es besitzt drei Anschlüsse und zwei Schaltstellungen (stabile Ankerendlagen). Entsprechend dem Resonanzprinzip besteht das Ventil aus zwei identischen Magnetkreisen, die spiegelsymmetrisch angeordnet sind. Jeder Magnetkreis besteht aus einer Spule, einem Permanentmagneten und einem Eisenkreis. Der Anker bewegt sich zwischen den beiden Magnetkreisen und wird von zwei Federn geführt, die auf beiden Seiten des Ankers angeordnet sind (s. a. Abbildung 28).

Zu Demonstrationszwecken wurde der Magnetaktor in ein Messinggehäuse montiert, für die die pneumatischen Anschlüsse wurden marktübliche Standardkonnectoren verwendet.

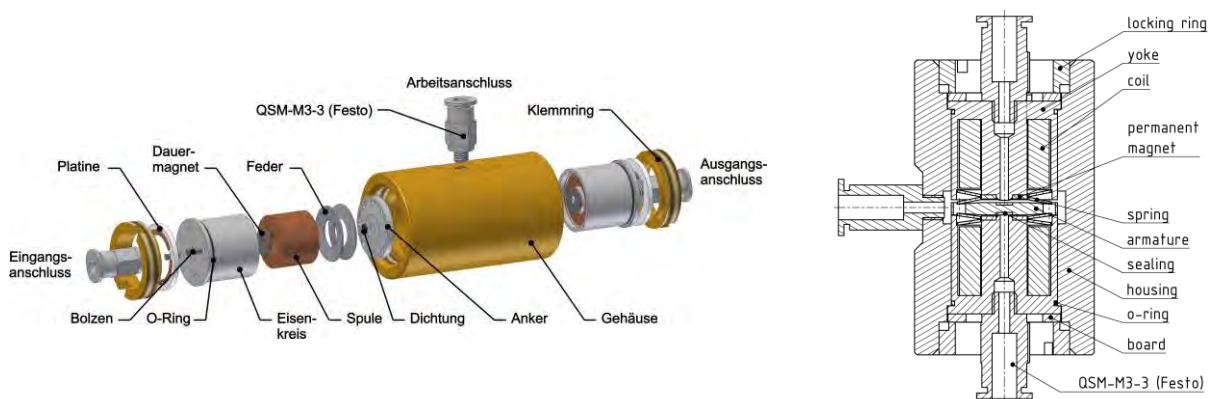


Abbildung 27: Explosionszeichnung (links) und Vollschnitt (rechts) des Funktionsmodells RMV1

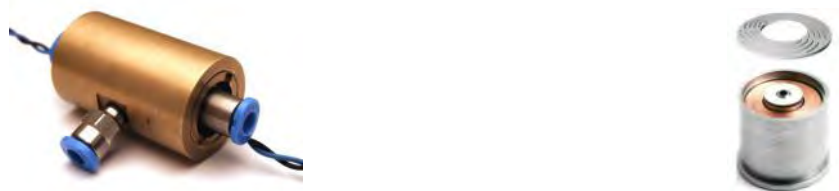


Abbildung 28: Ansicht des realisierten Funktionsmodells (links) und Teilansicht eines Magnetkreises mit Spule, Dauermagnet und Feder (rechts)

In Tabelle 9 wurden die Leistungsparameter des aufgebauten Funktionsmodells zusammengetragen, Abbildung 29 zeigt die herausragenden Eigenschaften des realisierten Ventilprototyps im Vergleich.

Tabelle 9: Leistungsparameter des Funktionsmusters RMV1

| | |
|------------------------|---------------------------------|
| Ventiltyp | 3/2-Wegeventil |
| Aktorzvolumen | Durchmesser 13 mm Höhe 24 mm |
| Betriebsdruck | <10 bar |
| Nennweite | 1 mm |
| Schaltfrequenz | <200 Hz |
| Verlustleistung | 1,05 mW/Hz |
| Lebensdauer | >10 ⁹ Schaltzyklen |

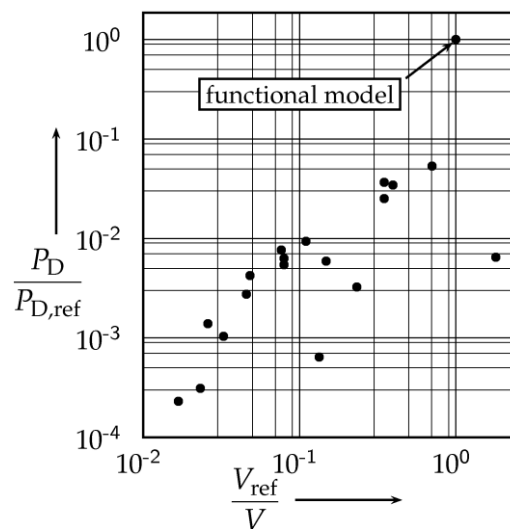


Abbildung 29: Vergleich des Performance-Faktors des Funktionsmusters RMV1 mit dem Performancefaktor marktverhältlicher Ventile

Die Erkenntnisse aus weiterführenden Simulationen und Berechnungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Resonanzaktoren haben ein begrenztes effektives Arbeitsvermögen (Energie) innerhalb eines gegebenen Aktorzvolumen.
- Mit zunehmender Nennweite wird ein zunehmender Anteil dieser Energie für das Auslösen eines Schaltvorgangs aufgewendet, was in einer nicht unbegrenzt vergrößerbaren Nennweite resultiert.
- Der Anker eines Ventils mit kleiner Nennweite besitzt weniger kinetische Energie am Ende eines Bewegungszyklusses.
- Ventile mit größerer Nennweite (und demzufolge größeren Hüben) verwenden einen größeren Anteil der extern eingespeisten Energie für einen Bewegungszyklus.
- Die magnetische Effizienz ist unabhängig von der Nennweite des resonanten Ventils.
- Bei der Optimierung der Effizienz eines Resonanzaktors zahlt sich die Verwendung leistungsfähigerer Magnetkreismaterialien (z. B. Vacoflux 50) insbesondere für große Nennweiten und hohe Schaltfrequenzen aus.
- Im Prinzip der realisierten Bauform des Resonanzaktors liegt Potenzial, das Schaltfrequenzen bis zu 800 Hz und Nennweiten bis zu 4 mm ermöglicht.

Mit dem RMV1 ist eine völlig neue Ventilgeneration mit herausragenden Leistungsparametern entstanden, die derzeit in einem Folgeprojekt in Serienreife überführt werden soll.

Weiterführungen von Ansatz 1: RMV2 und RMV3

Nach Rücksprache mit den Industriepartnern wurde festgelegt, den Effizienz-Ansatz weiter zu verfolgen, indem einerseits nachgewiesen wird, dass das Resonanzprinzip für die Realisierung noch größerer Nennweiten geeignet ist, und andererseits untersucht wird, inwiefern sich mit dem entworfenen Aktor auch Flüssigkeitsströme steuern lassen. Insbesondere für die Steuerung von Flüssigkeitsströmen konnten die durch das Fluid in das System eingebrachte Dämpfung sowie die auf den Anker wirkenden Strömungskräfte nicht länger vernachlässigt werden, was bei pneumatischen Anwendungen in guter Näherung noch möglich war.

Abbildung 30 zeigt eine Explosionsdarstellung sowie eine Schnittansicht des Funktionsmusters RMV2, mit welchem die Eignung des Resonanzprinzips für eine Nennweite von 2 mm nachgewiesen wurde, Tabelle 10 enthält die zugehörigen Leistungsparameter.

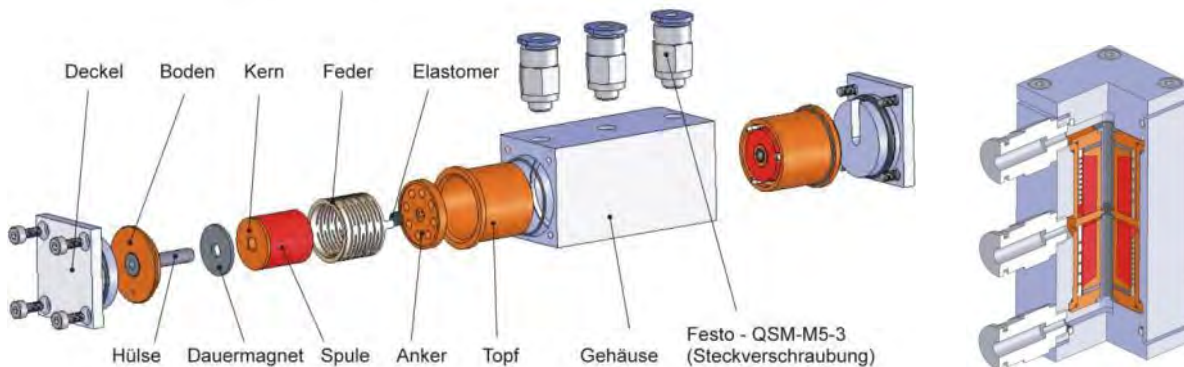


Abbildung 30: Explosionszeichnung (links) und Vollschnitt (rechts) des Funktionsmusters RMV2

Eine wesentliche Verbesserung gegenüber dem RMV1 stellt die Rohrfeder dar, die im RMV2 die ursprünglichen beiden Tellerfedern ersetzt. Sie wird aus einem Rohling (CuSn8) mittels Laserschneiden gefertigt, in einem anschließenden nasschemischen Ätzprozess können optional Grate und Schlacke entfernt werden. Im Rahmen der Arbeiten am RMV2 wurde eine Patentanmeldung zu einem adaptiven Federelement verfasst, welche sich momentan zur Bearbeitung beim Deutschen Patent- und Markenamt befindet. Abbildung 31 zeigt exemplarisch eine solche Rohrfeder, Abbildung 32 zeigt einen teilweise montierten Aktor sowie das Gehäuse des RMV2.



Abbildung 31: Rohrfeder aus CuSn8

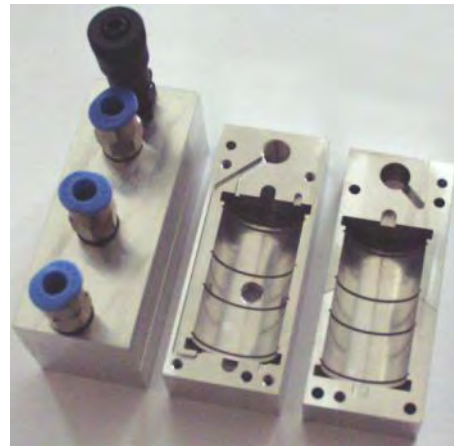


Abbildung 32: RMV2; links: Ansicht eines Aktors - Magnetkreis, Rohrfeder, Spule und Dichtsitz sowie mit Anker; rechts: Ansicht des Gehäuses bzw. der beiden Gehäuseschalen

Tabelle 10: Leistungsparameter des Funktionsmusters RMV2

| | |
|------------------------|---------------------------------|
| Ventiltyp | 3/2-Wegeventil |
| Aktorvolumen | Durchmesser 16 mm Höhe 34 mm |
| Betriebsdruck | <10 bar |
| Nennweite | 2 mm |
| Schaltfrequenz | <220 Hz (berechnet) |
| Verlustleistung | 4,13 mW/Hz (berechnet) |

Eine zweite wesentliche Änderung gegenüber dem RMV1 ist der Rückgriff auf den magnetischen Hochleistungsstahl *Vacoflux 50* (FeCo50) für alle flussleitenden Bauteile inklusive dem Magnetkreisanker. Im Rahmen einer Versuchsreihe konnte nachgewiesen werden, dass die Sättigungsflussdichte des Materials auf ca. 2,3 T

gesteigert werden kann, wenn es nach der spanenden Bearbeitung schlussgeglüht wird. Wird für die Herstellung der Bauteile kein schmelzmetallurgisch erzeugter Rohling verwendet, sondern das Metallpulverspritzgießen (vgl. Abbildung 39), lässt sich auf einfache Weise die Materialzusammensetzung variieren. Abbildung 33 zeigt exemplarisch, wie durch die Beimengung von 2% Vanadium die Materialeigenschaften von ursprünglich weichmagnetisch deutlich in Richtung hartmagnetisch verschoben werden können.

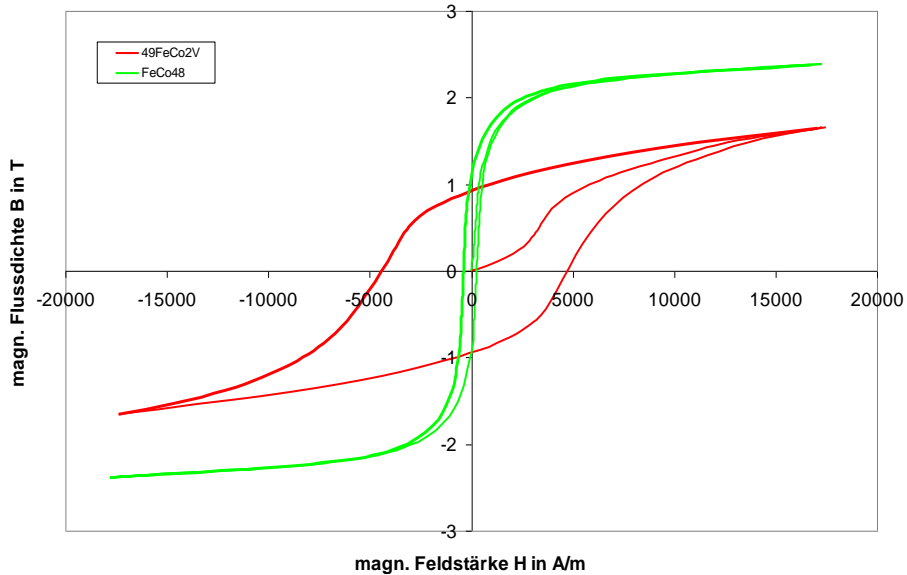


Abbildung 33: Einfluss von 2% Vanadium auf die Hystereseurve des magnetischen Spezialstahls FeCo48

Mit einem dritten Aufbau wurde die Eignung des resonanten Aktorprinzips für die Steuerung von Flüssigkeitsströmen untersucht. Abbildung 34 zeigt den Aufbau des RMV3 in einer Explosionsansicht, Tabelle 11 enthält die zugehörigen Leistungsparameter.



Abbildung 34: Explosionszeichnung des Funktionsmoders RMV3

Tabelle 11: : Leistungsparameter des Funktionsmusters RMV3

| | |
|------------------------|---------------------------------|
| Ventiltyp | 3/2-Wegeventil |
| Aktorvolumen | Durchmesser 20 mm Höhe 36 mm |
| Betriebsdruck | <3 bar |
| Nennweite | 2 mm |
| Schaltfrequenz | <260 Hz (berechnet) |
| Verlustleistung | 0,9 mW/Hz (berechnet) |

Ansatz 2: Miniaturisierung

Nachdem eine Lösung zur Realisierung besonders energieeffizienter Magnetventile gefunden worden war, wurde in einem zweiten Schritt das Miniaturisierungspotenzial des Aktorprinzips untersucht. Verändert man den vorgestellten Resonanzaktor derart, dass man die beiden bislang voneinander separierten Eisenkreise zu einem gemeinsamen Magnetkreis zusammenführt, kommt der Aufbau auch mit nur einer bipolar bestromten Spule aus. Abbildung 35 zeigt den modifizierten Resonanzaktor. Der Anker bewegt sich weiterhin federgeleitet zwischen den Endlagen an den beiden Dauermagneten.

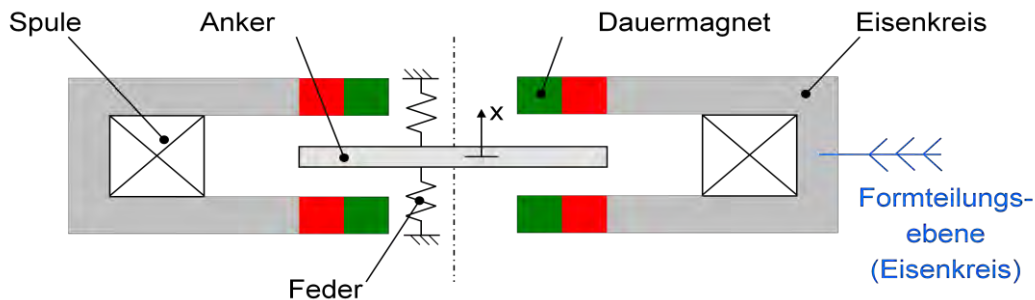


Abbildung 35: Modifizierter Resonanzaktor für ein Miniventil

Anhand der schematischen Darstellung wird bereits deutlich, dass die Miniaturisierung stets verbunden ist mit dem Übergang zu *planaren* Strukturen. Eine denkbare Formteilungs-ebene für die Montage der innerhalb des Eisenkreises liegenden Komponenten ist in Abbildung 35 bereits angegeben.

Ansatz 3: Integration

Abbildung 36 zeigt die Explosionsdarstellung einer Studie für ein Miniventil basierend auf einem stark miniaturisierten magnetischen Resonanzaktor. Neben der Tatsache, dass die Gestalt der einzelnen Komponenten sich deutlich zu flächigen Strukturen hin verändert hat, zeigt sich im Vergleich zu Abbildung 27 auch eine deutliche reduzierte Anzahl von Bauteilen. Dies reduziert die Anzahl notwendiger Füge- bzw. Montageschritte und trägt damit wesentlich zur Einsparung von Herstellungskosten bei.

Der Integrationsaspekt bei der Miniaturisierung soll am zentralen Bauteil *heterogener Federanker* deutlich gemacht werden. In diesem Bauteil wurden folgende Funktionen integriert:

- Anker (bewegtes Element im Reluktanzaktor)
- Feder (Führungsfunktion und Erzeugung der rückstellenden Kraft bei Auslenkung aus der Mittellage)
- Dichtsitz des Ventils
- Einspannring (Montage)

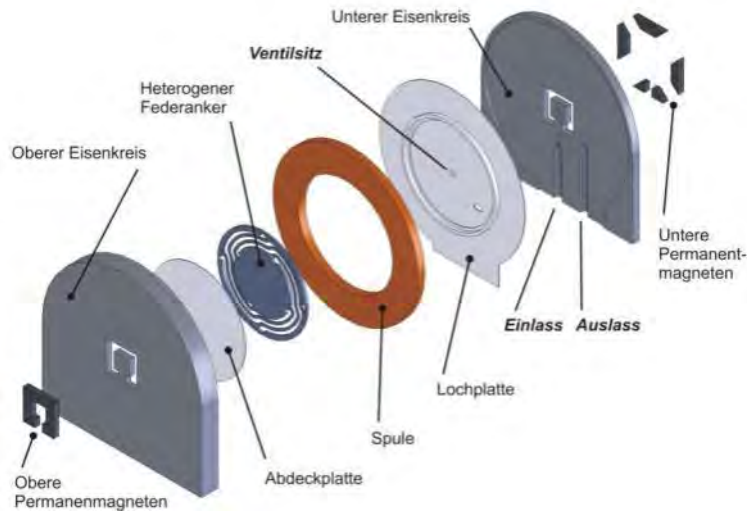


Abbildung 36: Explosionsdarstellung einer Studie für ein magnetisches Miniventil basierend auf dem Prinzip des Resonanzaktors

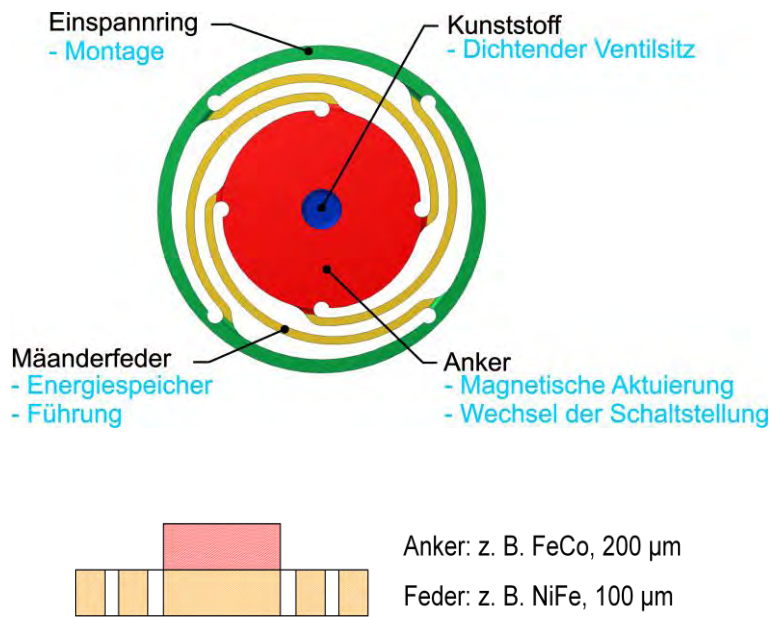


Abbildung 37: Funktionenintegration – Heterogener Federanker

Die einzelnen Funktionen sind in Abbildung 37 illustriert. Der Federanker der Ventilstudie besitzt einen Durchmesser von 12 mm.

Idealerweise werden für die einzelnen Funktionen des Federankers die für die jeweilige Aufgabe innerhalb des Ventils optimalen Werkstoffe verwendet. Für das Beispiel des Federankers bedeutet dies, dass der federnde Teil aus einem aus mechanischer Sicht (E-Modul, Dauerschwingfestigkeit) günstigen Werkstoff gefertigt ist, während der Ankerteil aus einem magnetisch günstigen Werkstoff (hohe Sättigungsflussdichte, geringe Remanenzflussdichte) hergestellt sein muss und der Dichtsitz idealerweise aus einem gummielastischen Polymer besteht (s. Abbildung 37).

Diese Forderung ist mit konventionellen Fertigungsverfahren der Feinwerktechnik nicht mehr realisierbar, weswegen an dieser Stelle der Übergang zu Fertigungsverfahren der Mikrotechnik (und damit der Mikroelektronik) unvermeidlich ist.

Ansatz 4: Parallelisierung

Mit dem Übergang zur mikrotechnischen Fertigung feinwerktechnischer Ventilkomponenten besteht die Möglichkeit, ursprünglich streng serielle Prozesse (z. B. Drehen, Fräsen, Bohren usw.) zunehmend durch parallele und damit Batch-kompatible Fertigungsverfahren zu ersetzen.

Batch-Prozesse (engl. *Batch* – Stapel, auch „Chargenprozess“) sind Prozesse, deren Teilschritte in fester Reihenfolge ausgeführt werden müssen. Typisches Merkmal ist, dass während eines Prozesses zahlreiche gleichartige Systeme entstehen.

Durch die Verwendung batch-kompatibler Fertigungsprozesse lässt sich die Forderung der funktionspezifischen Materialwahl auch innerhalb ein und desselben Bauteils realisieren. Abbildung 38 zeigt die parallelisierte Fertigung von feinwerktechnischen Ventilkomponenten unter der Nutzung batch-kompatibler Fertigungsverfahren der Mikrotechnik.

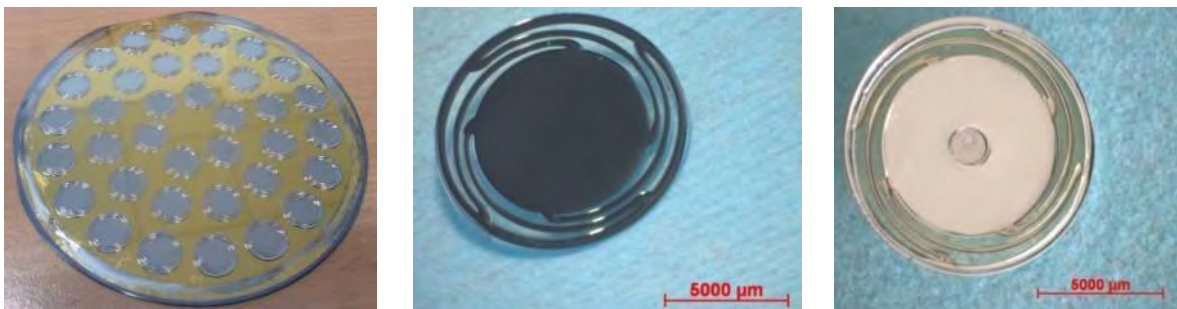


Abbildung 38: Batchfertigung von 36 gleichartigen Federankern auf einem 4-Zoll-Wafer (links); Vereinzelter Federanker nach Prozessierung von Lage 1 aus NiFe_x (Mitte); Heterogener Federanker, Lage 1 aus NiFe_x, Lage 2 aus NiFe_y

Die gezeigten Federanker wurden im Multilayer-Direkt-UV-LiGA-Verfahren gefertigt. Ausgangspunkt dieses Verfahrens ist ein Tragwafer, der mit einer galvanischen Startschicht (z. B. Gold) beschichtet wird. Über einen Lithografieschritt werden galvanische Vorformen in einem fotostrukturierbaren Polymer erzeugt, in welche anschließend galvanische Schichten aufgewachsen werden. Abbildung 38 zeigt zwei auf diese Weise erzeugte Bauteile nach der Entformung. Dieses Verfahren hat gegenüber den feinwerktechnischen Fertigungsmöglichkeiten neben dem Parallelisierungsaspekt den Vorteil, dass über eine einfache Veränderung der Prozessparameter des Galvanikprozesses die Legierungszusammensetzung und damit die Materialeigenschaften der erzeugten Schicht geändert werden kann (s. a. Abbildung 47).

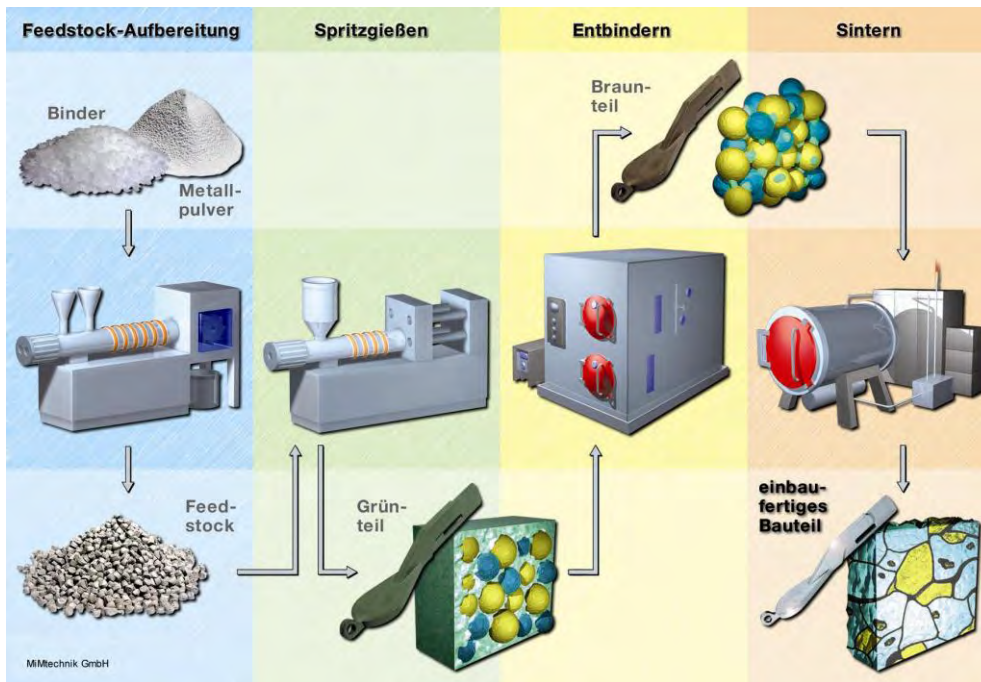


Abbildung 39: Metallpulverspritzguss – Prozessablauf [Quelle: MiMTechnik GmbH, Schmalkalden]

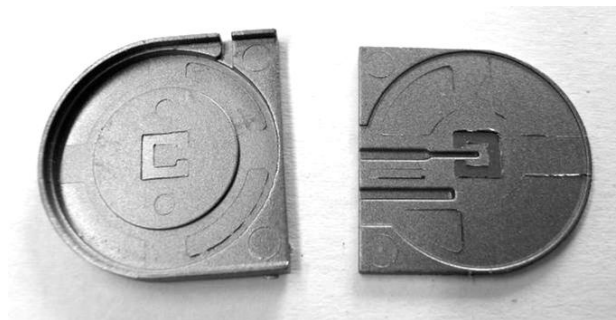


Abbildung 40: MIM-Gehäuseteile (Durchmesser ca. 12 mm) aus einer Eisen-Cobalt-Legierung

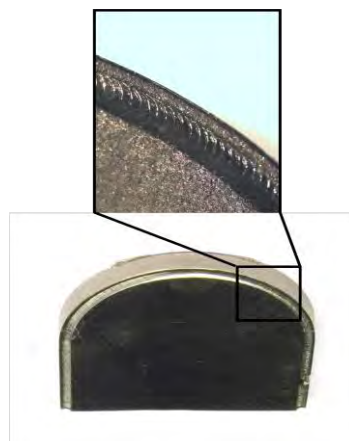


Abbildung 41: Laserschweißen von MIM-Gehäusebauteilen aus FeCo48

Mit einem Fertigungsansatz für die Gehäuseteile der Ventilstudie wird ein zweites Beispiel für die batch-kompatible, parallelisierte Fertigung vorgestellt. Die Gehäuseteile werden mittels Metallpulverspritzguss

(engl. *Metal Injection Moulding*, MIM) hergestellt. Dieses Verfahren wird in Abbildung 39 erläutert. Gegenüber den bekannten Verfahren der Mikrotechnik besitzt dieses Verfahren eine erweiterte Formgebungsmöglichkeit in der dritten Dimension sowie eine große Flexibilität, was die Zusammensetzung der Metalllegierungen angeht.

Abbildung 40 zeigt im MIM-Prozess gefertigte Gehäuseteile für die Miniventilstudie aus einer Eisen-Cobalt-Legierung. Mit Abbildung 41 konnte die exzellente Fügbarkeit der Gehäuseteile durch Laserschweißen nachgewiesen werden, womit für die Montage des Ventils eine Verbindungstechnologie gefunden wurde, die nicht nur den mechanischen Verbund sicherstellt, sondern auch eine Fügstelle realisiert, die den magnetischen Fluss leitet.

Ansatz 5: Funktionsblöcke

Die parallelisierte Fertigung von Ventilen bietet die Möglichkeit, lediglich durch Änderung eines lithografischen Maskensatzes eine unterschiedliche Verschaltung von den gefertigten Komponenten zu realisieren. Abbildung 42 zeigt dies beispielhaft für ein 2/2-Wegeventil als Grundelement. Je nach Wahl des Verschaltungstyps entsteht können zwei einfache 2/2-Wegeventile auch zur einem Fluidmischer oder einem 3/2-Wegeventil verschaltet werden.

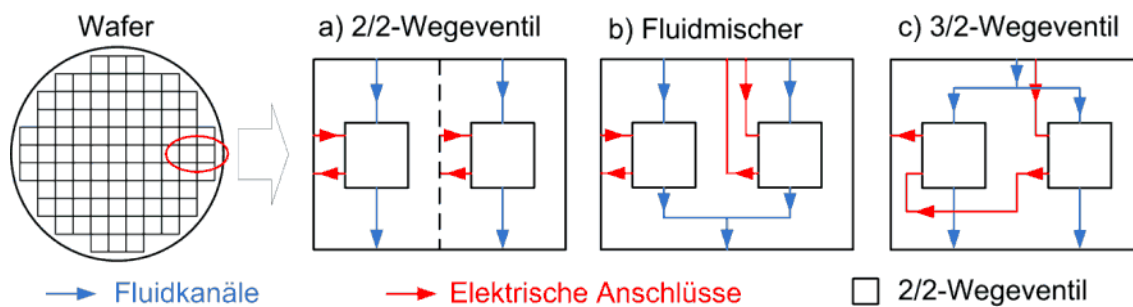


Abbildung 42: Realisierung unterschiedlicher Funktionen durch Änderung der Verschaltung der Einzelsysteme

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Studien für Ventilinselkonzepte durchgeführt. Zwei mögliche Szenarios sind in Abbildung 43 dargestellt. Für die Verschaltung von magnetischen Ventilen muss die wechselseitige Beeinflussung von deren Magnetkreisen berücksichtigt werden, insbesondere wenn wie im Falle des Miniventils das Gehäuse gleichzeitig flussleitendes Bauteil ist.

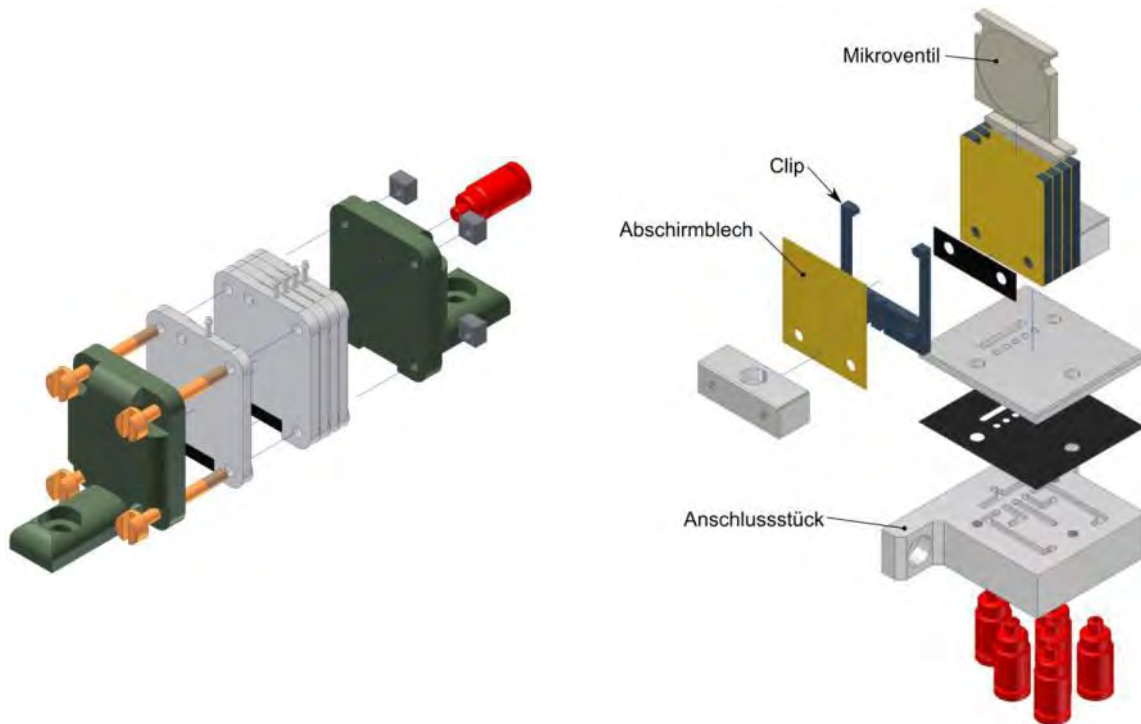


Abbildung 43: Studien über Ventilinselkonzepte für miniaturisierte Magnetventile

Zusammenfassung

Die Möglichkeit, miniaturisierte Magnetaktoren effizient in miniaturisierten Ventilen einzusetzen, wurde nachgewiesen. Dafür sind neuartige Systemkonzepte (Resonanzaktoren) notwendig. Die Miniaturisierung von Magnetaktoren ist nur unter Funktionenintegration in Ventilkomponenten möglich, womit die Forderung einhergeht, für eine bestimmte Funktion den jeweils optimalen Werkstoff verwenden zu können.

Der Einsatz und die Ausnutzung der Vorteile batch-tauglicher Fertigungsverfahren der Mikroelektronik für Ventilkomponenten in feinwerktechnischen Größenordnungen bietet ein großes Potenzial für eine parallelisierte Fertigung, die essenziell für eine weitere Reduzierung des Montageaufwandes und damit der Herstellungskosten ist. Die parallelisierte Fertigung ist nur unter dem Einsatz neuer Technologien (z. B. MIM, Laserschweißen) sinnvoll möglich.

Die Anwendung der Erfolgsstrategie der Mikroelektronik (Miniaturisierung, Integration, Parallelisierung, Funktionsblöcke) auf feinwerktechnische Systeme und Systemkomponenten birgt ein großes Potenzial für zukünftige Ventilgenerationen, sowohl was die gezielte Materialwahl anbelangt, aber auch im Hinblick auf die Herstellungskosten.

Weitere Ergebnisse

Im Rahmen einer Studie wurde untersucht, welche technischen Umsetzungen von Aspekten wie Explosionsschutz und Medientrennung in marktüblichen Ventilen bereits existieren. Weiterhin wurde geprüft, welche der Prinzipien sich auf die Funktionsmuster bzw. Aktorprinzipie übertragen lassen.

Um die zahlreichen quermagnetisierten Stabmagneten im Miniventil auf *einen* Permanentmagneten pro Gehäusehälfte reduzieren zu können, benötigt man radial magnetisierte Kreisringmagneten, die allerdings in der

erforderlichen Größenordnung nicht mehr kommerziell verfügbar sind. Aus diesem Grund wurden aus einem geeigneten Plattenmaterial Kreislringe durch Laserschneiden ausgeschnitten. Eine Vorrichtung zur radialen Magnetisierung dieser Kreisringmagneten wurde berechnet, simuliert und in LTCC-Technologie aufgebaut. Abbildung 44 und Abbildung 45 zeigen schematisch diese Magnetisierungsvorrichtung, eine gefertigte Spule ist in Abbildung 46 zu sehen.

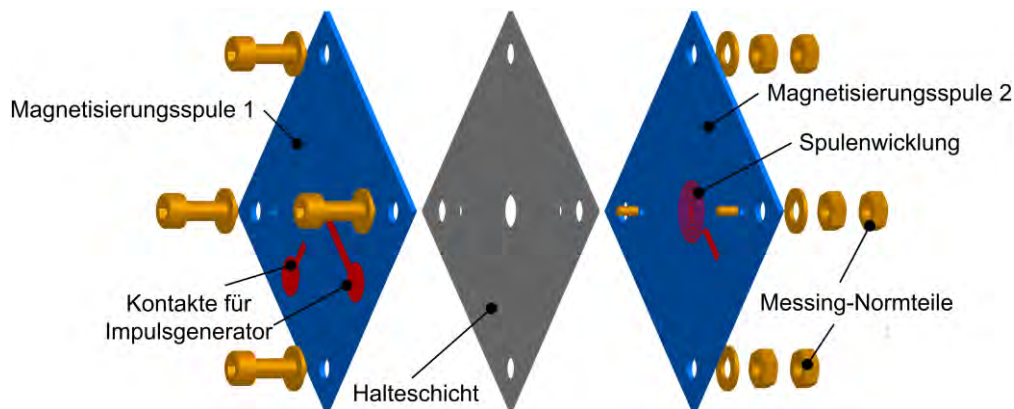


Abbildung 44: Explosionsdarstellung der Magnetisierungsvorrichtung

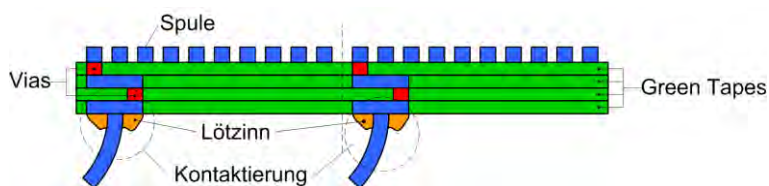


Abbildung 45: Querschnitt durch eine LTCC-Spule der Magnetisierungsvorrichtung



Abbildung 46: Gefertigte LTCC-Magnetisierungsspule (links), Detailansicht (rechts)

Arbeitsschwerpunkte Schnellschaltventile und Mikroaktoren

Grundlagenuntersuchungen zu funktionalisierten Galvanowerkstoffen, Galvanowerkstoffentwicklung für optimierte magnetische Eigenschaften

Nach einer umfassenden Literaturrecherche fiel die Wahl auf einen Nickel-Eisen-Legierungselektrolyt auf Sulfamatbasis (Tabelle 12).

Tabelle 12: Zusammensetzung und Prozessparameter für den Nickel-Sulfamat-Elektrolyten

| Bestandteil | Gehalt |
|--------------------------------|-------------|
| Nickelgehalt im Nickelsulfamat | 117 g/l |
| Eisengehalt | 0 bis 3 g/l |
| Borsäure | 20 g/l |
| Netzmittel | 6 ml/l |
| Temperatur | 55°C |
| pH-Wert | 3,0 bis 3,5 |

Dieses System bietet mehrere Vorteile (z. B. kürzere Expositionszeiten und höhere Prozessstabilität) gegenüber dem zurzeit in der Industrie eingesetzten Standardsystem auf Sulfatbasis. Begonnen wurde mit der Elektrolytentwicklung, Kennwertbestimmung, Optimierung der Prozessparameter. Es folgten erste Werkstoffcharakterisierungen an den abgeschiedenen Legierungen.

Die Legierungsabscheidungen erfolgten auf jeweils sowohl auf einer rotierenden Scheibenelektrode sowie auf planare Substrate (Hullzellenblech).

Bei den ersten Versuchen wurden der Einfluss der Hydrodynamik und der Stromdichte auf die Nickel-Eisen-Legierungszusammensetzung an der rotierenden Scheibenelektrode untersucht. Als Elektrolyt kam der Nickelsulfamatelektrolyt (s. Tabelle 12) mit den Eisenkonzentrationen 1,5 und 3,0 g/l, zum Einsatz.

Abbildung 47 zeigt den Einfluss der Rotation auf die Legierungszusammensetzung, wenn Schichten aus verschiedenen Elektrolyten an der Scheibenelektrode abgeschieden werden.

Wie erwartet wächst der Eisengehalt in der Legierung mit steigendem Eisengehalt im Elektrolyten, eine Drehzahlsteigerung erhöht den Eisenanteil in der Schicht. Ab etwa 300 U/min und 1,5 g/l Eisen im Elektrolyt nimmt der Eisenanteil in der Legierung nur gering zu. Ab 3,0 g/l Eisen im Elektrolyt ist ein stetiger Anstieg der Eisenkonzentration in der Legierungsschicht zu verzeichnen. Somit können Schichten einer Permalloy-ähnlichen Zusammensetzung (d. h. 80% Nickel, 20% Eisen) erzeugt werden. Die aufgetragenen Punkte für die Legierungen bei 7,5 A/dm² und 10 A/dm² zeigen nur bei dem Elektrolyt mit 3,0 g/l Eisen einen signifikanten Unterschied.

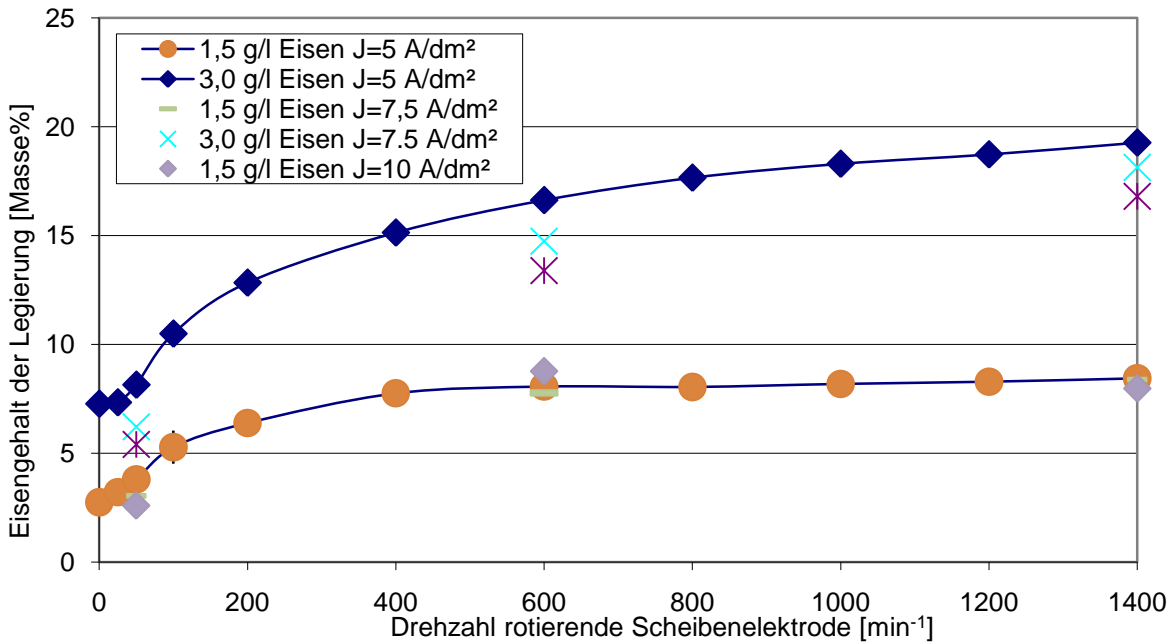


Abbildung 47: Abhängigkeit der Legierungszusammensetzung von Drehzahl und Stromdichte an einer rotierenden Scheibenelektrode bei 1,5 und 3,0 g/l Eisen

Funktionsintegrierte Galvanowerkstoffe (Kombination magnetischer und mechanischer Funktionselemente), Untersuchungen zum Verhalten von MIM-Inlays in galvanischen Bauelementen

Zielstellung war die Optimierung der Feldverteilung durch Simulationen mit *Maxwell*, *FemLab* und *MatLab* an den galvanisch herzustellenden Verbunden aus MiM-Bauteilen und funktionsintegrierten Galvanowerkstoffen.

Nach umfangreichen Tests der genannten Software musste festgestellt werden, dass diese den Anforderungen für die Simulation bzw. Abschätzung elektrochemischer Vorgänge nur unzureichend nutzbar sind.

Eine passende Softwarelösung ist die Spezialsoftware *Cell-Design* für die Elektrochemie. Dies wurde durch eine Firmenpräsentation an der TU Ilmenau bestätigt. Durch Mittelumwidmung konnte diese Spezialsoftware im Rahmen von VERDIAN beschafft werden. Durch Simulationen wurde eine Verbesserung der Homogenität der Legierungszusammensetzung über die gesamte Waferfläche und somit der über den Wafer angeordneten Strukturen möglich (Abbildung 48, Abbildung 49).

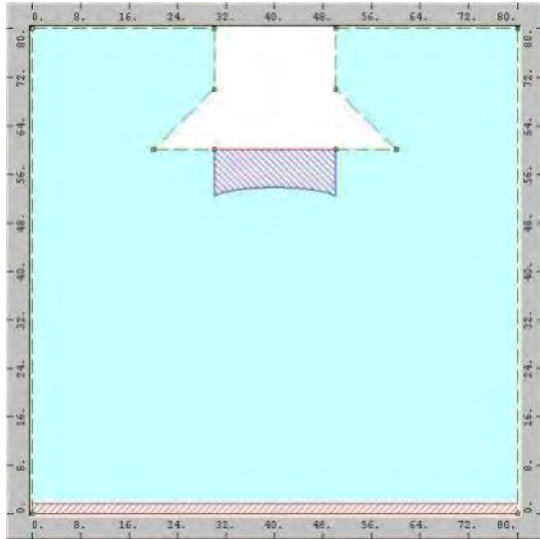


Abbildung 48: Simulation der kathodischen Feldverteilung (blau) mit „Cell-Design“ und daraus resultierende Schichtdickenverteilung (rot)

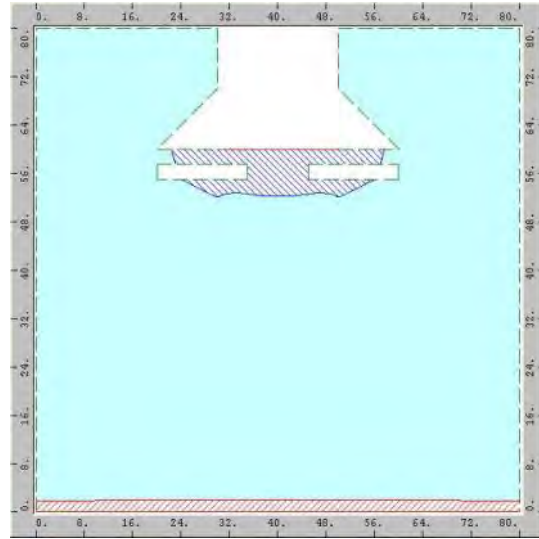


Abbildung 49: Simulation der Feldverteilung (blau) mit vorgesetzter Blende Software „Cell-Design“ und daraus verbesserte Schichtdickenverteilung (rot)

Konzipierung einer der Galvanoformung-gerechten Anlage, Herstellung der mikrotechnischen Baugruppen, Aufbau, Inbetriebnahme

Die mikrotechnischen Bauelemente werden unter Nutzung der vorhandenen und der im Projekt entwickelten Mikrostrukturierungstechnologien (Galvanoformung in Kombination mit MiM-Technologie) hergestellt. Der Aufbau und die Inbetriebnahme der Experimentalsysteme erfolgt gemeinsam mit dem Projektpartner Kern Technik GmbH, der für die mechanische Fertigung und Montage verantwortlich zeichnet.

Die Arbeiten umfassen den Aufbau, die Anpassung und die Inbetriebnahme eines Experimentalsystems zur Mikrogalvanoformung. Die modifizierte 3-Spindel-Anlage ist in Abbildung 50 und Abbildung 51 dargestellt.

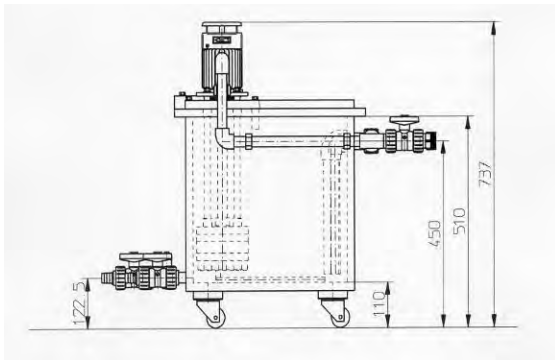


Abbildung 50: Modifiziertes Experimentalsystem (3-Spindel-Anlage)

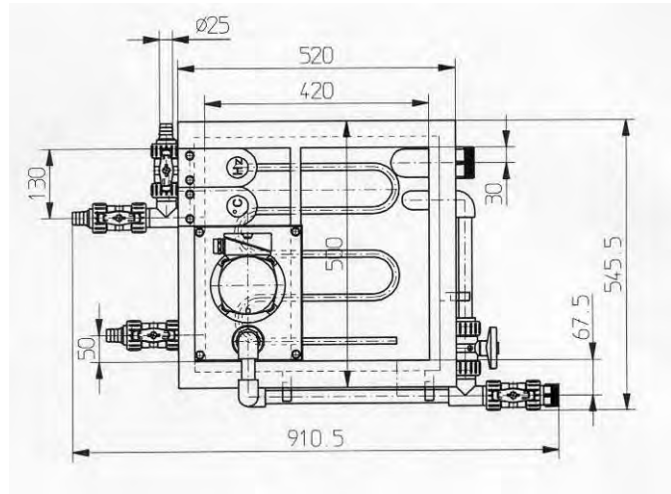


Abbildung 51: Konzipierte Elektrolyt Vorratsbehälter mit Filtereinrichtung

Die Konstruktion des Vorratsbehälters zeigen Abbildung 52 und Abbildung 53.



**Abbildung 52: Elektrolyt-Vorratsbehälter
(Seitenansicht)**



**Abbildung 53: Elektrolyt-Vorratsbehälter
(Draufsicht)**

An diesem Experimentalsystem erfolgten zunächst umfangreiche Arbeiten zum Einfluss der Hydrodynamik auf die Legierungszusammensetzung.

Die untersuchte Nickel-Eisen-Legierungsabscheidung als ein anomales Legierungssystem wird auch von den hydrodynamischen Bedingungen durch die unterschiedlichen Grenzstromdichten der jeweiligen Metallionenart beeinflusst. Durch eine definierte Strömung kann die Diffusionsschichtdicke und somit die anwendbare Arbeitsstromdichte variiert werden. Dadurch lässt sich die Legierungszusammensetzung der Schichten je nach Elektrolytzusammensetzung zwischen 2,5% und 65% Eisen in der Legierung steuern. Aus diesem Grund wurden Untersuchungen an der Drei-Spindel-Anlage zur Bestimmung der Strömungsverhältnisse vor der Strukturoberfläche und in einigen speziellen Fällen in der Tiefe der Mikrostrukturen mit unterschiedlichen Aspektverhältnissen durchgeführt, um Aussagen über eine optimale Abscheidetechnologie für konstante Legierungszusammensetzungen über die gesamten Strukturhöhe zu erhalten.

Die Charakterisierung der Hydrodynamik an der Waferoberfläche kann in einem Redoxelektrolyten durch die Aufnahme von potenziodynamischen Stromdichte-Potenzial-Kurven (SPK) bis zur deutlichen Ausbildung eines kathodischen Diffusionsgrenzstromes erfolgen. Nach Berechnung der Diffusionsgrenzstromdichte lässt sich die Stoffübergangszahl k_1 (auch als k_f -Wert bezeichnet) angeben. Als Redoxelektrolyt eignet sich z. B. ein schwefelsaurer Ammoniumsulfatelektrolyt mit dem Redoxpaar $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$.

In einer Drei-Spindel-Anlage (Abbildung 54, Abbildung 55) wurden die hydrodynamischen Verhältnisse an einem in Kreisringe unterteilten Wafer untersucht, wobei während der Aufnahme von SPK der Wafer rotierte und gleichzeitig einer Elektrolytströmung durch eine Düsenanströmung ausgesetzt war.²

² Für nähere Angaben zur Messung des Diffusionsgrenzstromes und des daraus berechneten k_1 -Wertes s. a.:
Fritz, M.; Kutzschbach, P.; Jakob, C.: „Nickelschichten im Durchzugsverfahren“, Metalloberfläche 63(2009)4, S. 37-39



Abbildung 54: 3-Spindel-Anlage

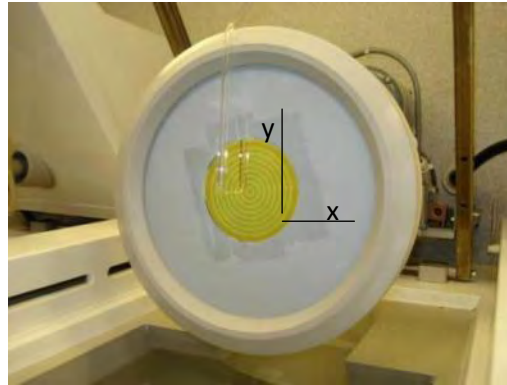


Abbildung 55: Detailansicht mit Wafer und Kapillare zur Untersuchung der k_f -Werte

Der Wafer rotiert mit 100 U/min (ähnlich wie bei der rotierenden Scheibe, aber mit wesentlich größerem Radius) und wird durch Prallströmung (senkrecht auf den Wafer gerichtet) von 9 bis 60 m/min überlagert. Diese Strömungsüberlagerung kann möglicherweise zu Turbulenzen vor der Waferoberfläche führen und somit die Schichteigenschaften während der Metallabscheidung beeinflussen. Die Ermittlung des Diffusionsgrenzstromes erfolgte in horizontaler Richtung (x-Richtung) auf dem in Kreisringe von je 2,5 mm Breite unterteilten, goldbeschichteten Wafer.

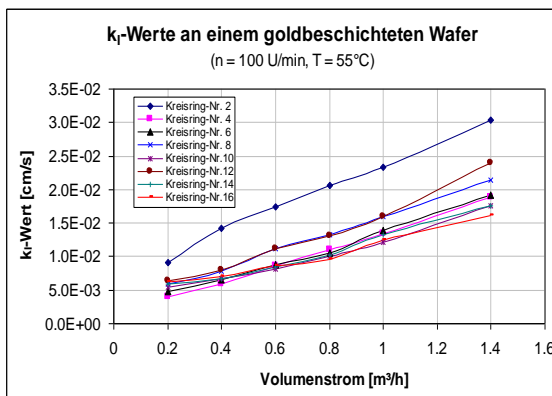


Abbildung 56: Abhängigkeit der k_f -Werte vom Volumenstrom, der Messstelle und der Fläche an einem rotierenden goldbeschichteten Wafer bei 55°C

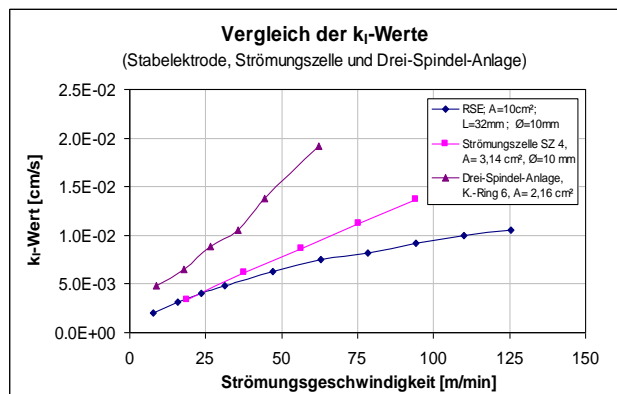


Abbildung 57: Vergleich der k_f -Werte der Drei-Spindel-Anlage mit denen der Strömungszelle und der rotierenden Stabelektrode in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit bei verschiedenen Arbeitsflächen ($T = 55^\circ\text{C}$, Fe^{3+} -Redoxelektrolyt)

Die k_f -Werte in Abbildung 57 zeigen, dass bei veränderlicher Prallströmung, aber konstanter Waferrotation ein nahezu lineares Verhalten vorliegt. Ab der Messstelle 4 (d. h. mehr als 8 mm von der Mitte des Wafers entfernt) treten nur noch geringe Stoffübergangunterschiede trotz der Überlagerung von Elektrolytströmung und Waferrotation auf.

Für die Praxis bedeutet das, dass im Zentrum des Wafers andere Abscheidungsbedingungen vorliegen dürften als an den übrigen Stellen. Deshalb sollten in dieser Zone möglichst *keine* zu beschichtenden Mikrostrukturen vorgesehen werden.

In mehreren Untersuchungen^{3,4,5} wurden unter verschiedenen Strömungsbedingungen und Versuchsanordnungen Stoffübergangszahlen ermittelt. Ein Vergleich dieser k_f -Werte in Abhängigkeit von der Strömungs- bzw.

³ Li, Y.: „Einfluss der Hydrodynamik auf die galvanische Abscheidung von Metallschichten“, Diplomarbeit TU Ilmenau (2009), Nr. 300–2008–206/289

Umfangsgeschwindigkeit wird in Abbildung 57 vorgestellt. In der 3-Spindel-Anlage, wo sich Rotation und Prallströmung überlagern, führt diese Strömungsüberlagerung zu einer deutlichen Zunahme des Stoffüberganges, wodurch höhere Arbeitsstromdichten bei der Metallabscheidung möglich sind.

Diese Ergebnisse können zur Charakterisierung des Stofftransportes, der Strömungsverhältnisse vor der jeweiligen Elektrode und zur Abschätzung von maximal möglichen Arbeitsstromdichten unter den jeweiligen hydrodynamischen Bedingungen von Metallabscheidungselektrolyten genutzt werden.

Zur Abscheidung von Nickel- und Nickel-Eisen-Legierungsschichten von etwa 300 µm Dicke auf einem titanbeschichteten Wafer in einem Nickelsulfamatelektrolyten (Tabelle 12) sind Ergebnisse in Abbildung 47 dargestellt. Die zugehörigen Prozessparameter zeigt



Abbildung 58: Abscheidung von Nickelschichten auf einem titanbeschichteten Wafer (Durchmesser 80 mm) unter Variation der Stromdichte

Tabelle 13: Prozessparameter zu Abbildung 47

| DSA1 | DAS2 | DSA3 | DSA4 | DSA5 |
|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1 min, 5 A/dm ² | 25 s, 1 A/dm ² | 1 min, 2 A/dm ² | 1 min, 5 A/dm ² | 293 min, 5 A/dm ² |
| 1 min, 10 A/dm ² | 1 min, 2 A/dm ² | 5 min, 4 A/dm ² | 1 min, 10 A/dm ² | |
| 1 min, 15 A/dm ² | 5 min, 4 A/dm ² | 2,5 min, 9 A/dm ² | 1 min, 15 A/dm ² | |
| 86 min, 20 A/dm ² | 2,5 min, 9 A/dm ² | 117 min, 12 A/dm ² | 1 min, 20 A/dm ² | |
| | 117 min, 12 A/dm ² | | 56 min, 25 A/dm ² | |

Die Ergebnisse zeigen, dass je nach angewandter Stromdichte brauchbare Schichten entstehen, wobei die Randüberhöhungen unterschiedlich ausgeprägt sind. In einer nächsten Stufe sind in dieser Anlage unter Einfluss verschiedener Parameter Nickel-Eisen-Legierungsbauteile für Mikroventile abgeschieden worden.

⁴Kutzschbach, P.: „Ausgewählte Methoden zur Charakterisierung der hydrodynamischen Bedingungen bei der elektrolytischen Metallabscheidung“, Galvanotechnik (Saulgau/Württ.), 96(2005)3, S. 560 – 570

⁵ Fritz, M.; Kutzschbach, P.; Jakob, C.: „Nickelschichten im Durchzugsverfahren“, Metalloberfläche 63(2009)4, S. 37-39

Evaluierung erster Prozessanforderungen und fortlaufende Ermittlung von Anforderungen begleitend zu den Untersuchungen zu den Galvanoformverfahren sind weitere Ergebnisse zu diesem Arbeitspunkt.

Grenzflächenuntersuchungen an MiM-Bauelemente mit galvanischen Beschichtungen

Es wurden grundlegende Untersuchungen zum Bekeimungs- und Haftverhalten von galvanischen Beschichtungen (Nickel, Nickel-Eisen, Kupfer) auf MiM-Bauelementen durchgeführt. Dabei wurde eine Direktbeschichtung sowie die Bekeimung über Zwischenschichtsysteme z.B. aus Kupfer erprobt. Die Oberflächenkennwertbestimmungen an Musterbauteilen der MIMtechnik GmbH zeigen eine sehr hohe Ausgangsrauigkeit von $R_{\max} > 13 \mu\text{m}$ der Bauteiloberfläche. Diese Kennwerte verhinderten im Rahmen des Projektes die technologisch sinnvolle Abscheidung von Schichten aus Galvanowerkstoffen auf den MIM-Proben.

Galvanoformung für funktionalisierte Galvanowerkstoffe

Es wurden sehr umfangreiche Untersuchungen zur Optimierung von Technologien zur Herstellung funktionaler Grundelemente (Flussleitelemente, Bewegungselemente) für Mikroventile durchgeführt.

Über das Multilayer-Direkt-UV-LIGA Verfahren konnte mithilfe der im Bericht beschriebenen Erkenntnisse über eine Batch-taugliche Fertigung die für solch ein Ventil notwendigen Bauteile gefertigt werden, die funktionsoptimierte und funktionsintegrierende Eigenschaften aufweisen (Abbildung 59, Abbildung 60, Abbildung 61).

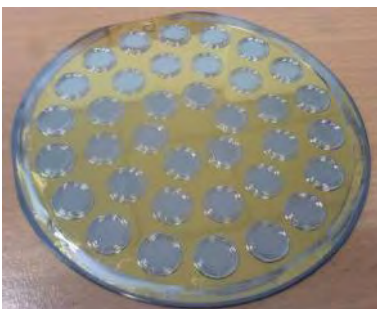


Abbildung 59: Batch-Fertigung von 36 gleichartigen Ventilbauteilen pro 4-Zoll-Wafer

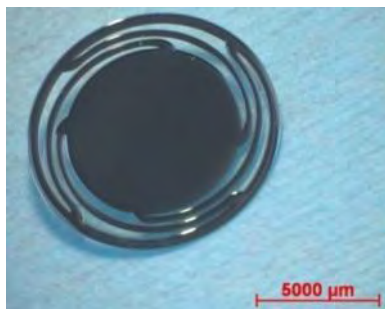
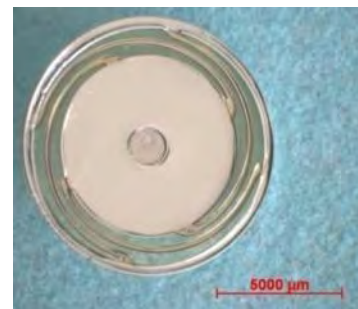


Abbildung 60: Einzelter Federanker, Lage 1 aus NiFe_x



**Abbildung 61: Federanker
Lage 1 aus NiFe_x
Lage 2 aus NiFe_y**

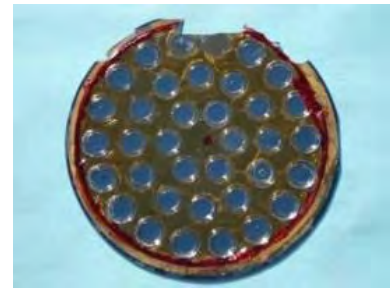
In der 3-Spindel-Anlage wurden verschiedene galvanische Startschichten (Titan, Gold, galvanisch verstärktes Gold) erprobt (Abbildung 62).



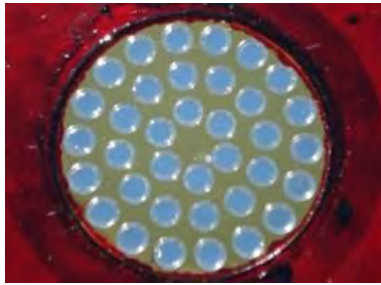
Gold bedampft



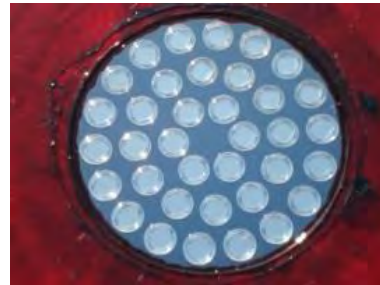
Titan bedampft



**Galvanisch Gold als Zwischen-
schicht nach Layer 2**



Galvanisch Vorgold



Dotiertes Silicium

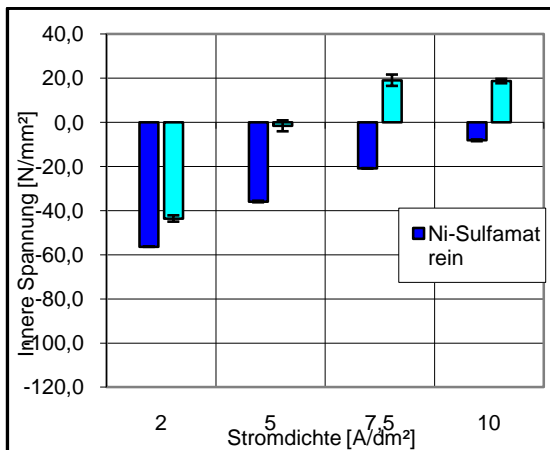
Abbildung 62: Erprobung galvanischer Startschichten (Gold, Titan, Gold, galvanisch verstärktes Gold, dotiertes Silizium) im Experimentalsystem 3-Spindel-Anlage

Die Ergebnisse zeigen, dass auf allen verwendeten Startschichten brauchbare galvanische Schichten abgeschieden werden können, wobei die Haftfestigkeiten unterschiedlich ausgeprägt sind: Diejenigen Baugruppen, die auf Titan erzeugt wurden, wiesen dabei die geringste Haftfestigkeit bedingt durch die natürliche Titanoxidschicht auf.

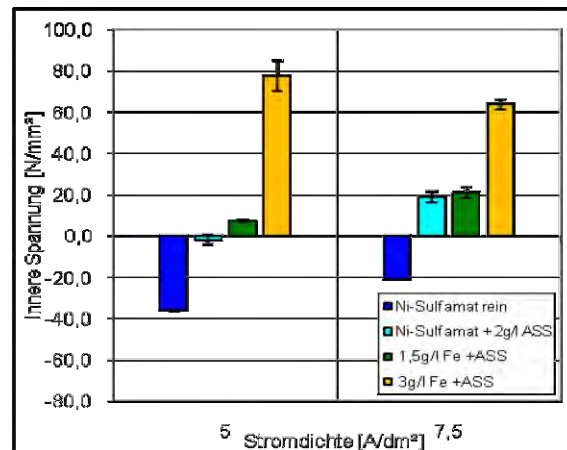
Untersuchungen zur Eigenschaftsmodifizierung an Baugruppen durch Dispersionsabscheidung, Auswahl geeigneter Zusatzstoffe, Bewertung des Einbetteffektes, Charakterisierung des Einflusses auf funktionsrelevante Eigenschaften (Reibverhalten, Verschleiß, Duktilität, Elastizität)

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus der Eigenschaftsmodifizierung der abgeschiedenen Schichten, bzw. Baugruppen durch die Auswahl geeigneter Zusatzstoffe im Bezug auf die inneren mechanischen Spannungen, Mikrohärte, Duktilität bzw. Elastizität beschrieben.

In den Schichten aus dem Nickelsulfamatelektrolyt ohne Eisen bilden sich Druckspannungen aus, die mit Zunahme der Stromdichte von -60 N/mm^2 auf etwa -10 N/mm^2 abnehmen. Die Zugabe von 2 g/l Ascorbinsäure bewirkt eine Verringerung der Druckspannungen, die bei Stromdichten größer als 5 A/dm^2 in Zugspannungen übergehen (Abbildung 63a). Der Ascorbinsäure-Zusatz soll bei Anwesenheit von Eisen die Bildung von dreiwertigem Eisen im Elektrolyten zurückdrängen.



a) Ohne Eisen



b) Eisenzusatz von 1,5 und 3,0 g/l

Abbildung 63: Abhängigkeit der inneren Spannungen von Stromdichte und Ascorbinsäurezusatz (ASS) von 2 g/l im Nickel- Sulfamatelektrolyten

Abbildung 63b zeigt die Abhängigkeit der inneren Spannungen nach Zugabe von Eisen bei Stromdichten von 5 und 7,5 A/dm².

Durch diese Zugabe wird Eisen in die Schicht mit eingebaut, wodurch es zur Verspannung des Kristallgitters kommt. Dadurch tritt eine Verschiebung der inneren Spannungen in Richtung Zugspannungen ein. Da es sich hierbei um eine anormale Legierungsabscheidung handelt, ist der Anteil des abgeschiedenen Eisens in der Schicht stark abhängig vom Anteil des zudosierten Eisens, von der Stromdichte und von den hydrodynamischen Bedingungen vor der Elektrode. Mit zunehmender Stromdichte wird weniger Eisen in die Legierungsschicht eingebaut, somit kommt es zum Absinken der Zugspannungen. Abbildung 63b zeigt, dass bei Zugabe von 1,5 g/l Eisen der Einfluss der Stromdichte auf die inneren Spannungen größer wird als die Spannungserhöhung durch den Einbau des Eisens in die Schicht.

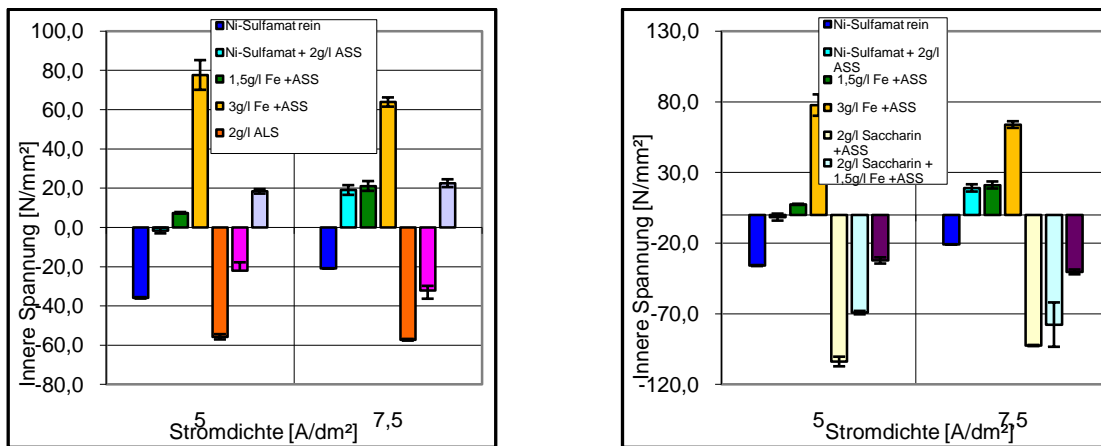
Ein Vergleich der Wirkung von Saccharin und Alylsulfonsäure (ALS) auf die inneren Spannungen der abgeschiedenen Nickelschichten wird nachfolgend durchgeführt. Beide Substanzen wurden dem Grundelektrolyten (Tabelle 12) zugegeben.

Es zeigt sich in Abbildung 63a, dass durch die Zugabe von Alylsulfonsäure (ALS) die auftretenden Druckspannungen reiner Nickelschichten weiter erhöht werden. Auch die Schichten, abgeschieden im Elektrolyten mit 1,5 g/l Eisen, weisen bei 5 und 7,5 A/dm² Druckspannungen auf. Die Legierungsschichten mit 3 g/l Eisen im Elektrolyt besitzen geringe Zugspannungen von etwa 20 N/mm².

Der Einfluss der Stromdichte und der sich damit einstellende Eisengehalt der Legierungsschicht auf die inneren Spannungen sind nachweisbar.

Durch die Zugabe von Alylsulfonsäure geht der Eisengehalt in der Legierungsschicht etwas zurück. Die Messungen zeigen außerdem den Einfluss der Stromdichte auf den Eisengehalt in der Legierungsschicht, der bei höheren Stromdichten generell niedriger ausfällt. Dabei scheint das Saccharin den Einbau von Eisen in die Legierungsschicht stärker zu inhibieren als die Alylsulfonsäure. Eine Zugabe von Saccharin zum Elektrolyt verschiebt sowohl im reinen Nickel als auch in der Nickel-Eisen-Legierung (Abbildung 64b) die inneren Spannungen in Richtung Druckspannungen.

Der Einfluss des Saccharins auf die inneren Spannungen fällt stärker aus als der von Alylsulfonsäure. Alle Schichten mit Zugabe von Saccharin weisen Druckspannungen auf, die für die Erzeugung spannungsarmer Legierungsabscheidungen für die Mikrosystemtechnik günstig sind.



a) 2,0 g/l Alylsulfonsäure (ALS)

b) 2,0 g/l Saccharin

Abbildung 64: Abhängigkeit der inneren Spannung von der Arbeitsstromdichte unter Zusatz von 2,0 g/l Ascorbinsäure (ASS) bei 0 g/l, 1,5 g/l bzw. 3,0 g/l Eisen im Nickelsulfamatelektrolyt

Einfluss der Zusätze auf die Martens-Härte (Duktilität, Elastizität)

Die Härte der Schicht wird von Gitterverspannungen, Verunreinigungen, Texturen, Korngrößenunterschieden, Diffusionsprozessen (zeit- und temperaturabhängig) maßgebend beeinflusst. Zwischen den makroskopischen inneren Spannungen (1. Art) und der Härte muss nicht in jedem Fall ein zwingender Zusammenhang bestehen.

Erste Untersuchungen zeigten, dass die Martenshärte reiner Nickelschichten mit zunehmender Stromdichte von 1200 MPa bei 5 A/dm² auf 1550 MPa bei 10 A/dm² ansteigt.

Da es sich bei der Messung der Martenshärte um ein dynamisches Messverfahren handelt, lassen sich während der Messungen auch die Energieanteile (Verformungsarbeit) für die plastische bzw. elastische Verformung bestimmen und auswerten.

Es zeigt sich, dass die zur Verformung aufgewendeten Arbeitsanteile (plastisch bzw. elastisch) nur gering von der Arbeitsstromdichte abhängig sind. Mit Erhöhung der Stromdichte nimmt der Anteil der elastischen Arbeit ab, womit sich die Steigerung der Härte erklären lässt.

Durch Zugabe von 2 g/l Ascorbinsäure ist eine Steigerung der Härte ab 2 A/dm² festzustellen. Dies kann mit dem verstärkten Einbau des Zusatzes in die Schicht und damit verbundene Veränderung der Gefügestruktur erklärt werden.

Die Ascorbinsäure verändert auch die Anteile für die plastische und elastische Verformungsarbeit dahin gehend, dass bei Stromdichten von 2 A/dm² der elastische Anteil zunimmt und bei weiterer Stromdichteerhöhung abnimmt. Diese Veränderungen korrelieren gut mit den Härtemessungen.

In Abbildung 54 ist die Abhängigkeit der Martens-Härte von der Arbeitsstromdichte unter Zusatz von Eisen dargestellt. Die höchsten Härtewerte werden bei einem Eisenanteil von 1,5 g/l im Elektrolyten und bei einer Stromdichte von 5 A/dm² erzielt.

Bei einer Stromdichte von 7,5 A/dm² wird der Einfluss der Ascorbinsäure auf die Härte und auf den plastischen bzw. elastischen Verformungsanteil durch die Zugabe von Eisen kompensiert. Die Energieanteile aus der Bestimmung der Martens-Härte in Abhängigkeit der Stromdichte mit den Zusätzen Ascorbinsäure (2,0 g/l) und Eisen in den Anteilen 1,5 g/l bzw. 3,0 g/l zeigen, dass durch Zugabe von Eisen der Anteil für die elastische Verformung auf etwa 40 % ansteigt.

Mit Zugabe von 2,0 g/l Alylsulfonsäure ist ein starkes Absinken der Härte bei einer Stromdichte von 5 A/dm² erkennbar (s. Abbildung 54), die mit Zugabe von Eisen wieder ansteigt. Hingegen ist bei einer Stromdichte von 7,5 A/dm² ein generelles Anwachsen der Härte zu verzeichnen. Die höchsten Werte stellten sich bei einem Eisengehalt von 3,0 g/l im Elektrolyten ein.

Die niedrigen Härtewerte spiegeln sich auch in Abbildung 55 wieder, wo die Energieanteile für die plastischen bzw. elastischen Verformungen bei Anwesenheit der Zusätze Alylsulfonsäure (ALS) und Saccharin dargestellt sind. Nach Zugabe der Alylsulfonsäure (ALS) und einer Stromdichte von 5 A/dm² steigt der elastische Energieanteil auf über 70% an. Bei 7,5 A/dm² werden immer noch etwa 60% erreicht.

Nach Zugabe von 1,5 g/l bzw. 3,0 g/l Eisen in den Elektrolyt verringern sich die Anteile der elastischen Verformung unabhängig davon, ob Alylsulfonsäure oder Saccharin im Elektrolyten enthalten ist. Sie liegen dennoch bei 5 A/dm² und 1,5 g/l Eisen mit 70% sehr hoch. Mit der Zugabe von 3,0 g/l Eisen und 2,0 g/l Alylsulfonsäure bzw. 2,0 g/l Saccharin stellt sich in beiden Fällen ein Energieanteil plastisch/elastisch von ca. 50/50 ein.

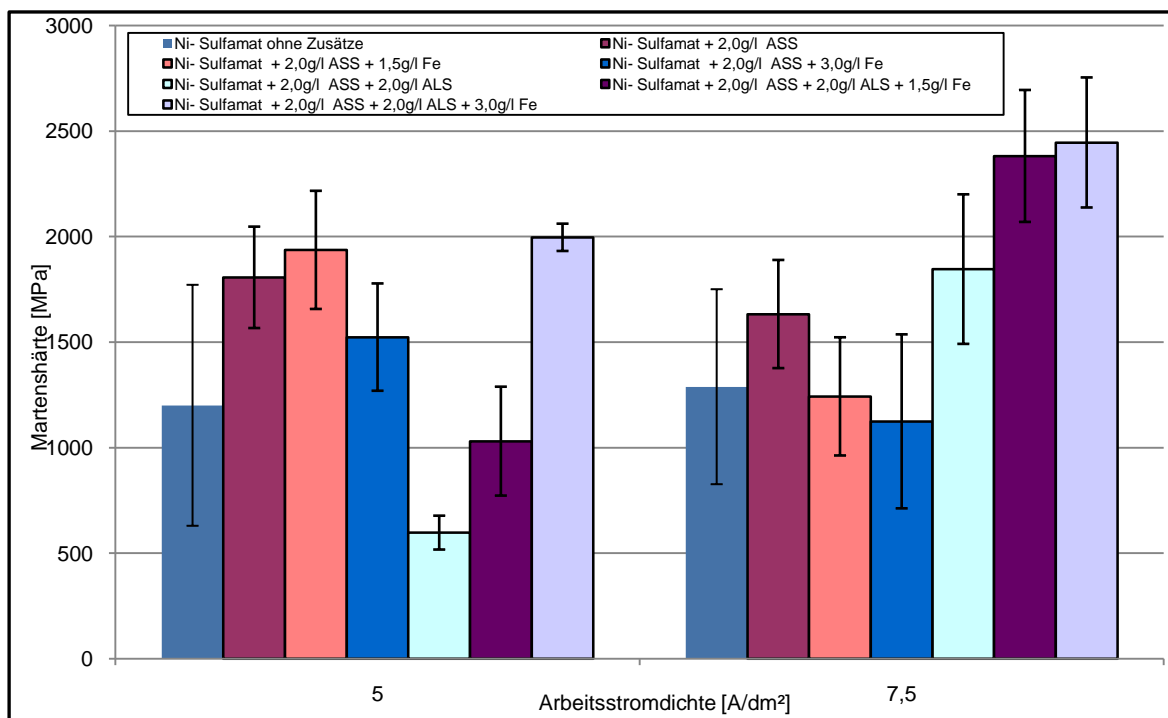
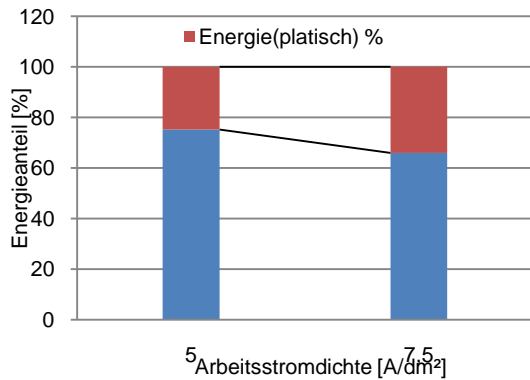
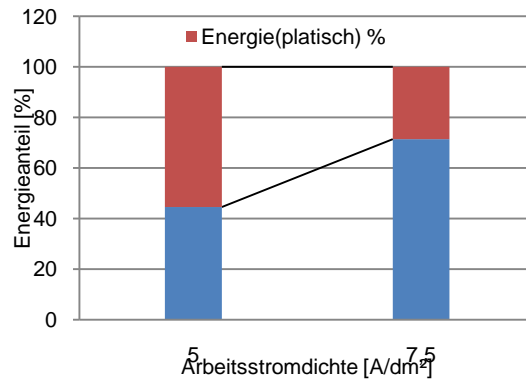


Abbildung 65: Abhängigkeit der Martens-Härte von der Arbeitsstromdichte und den Zusätzen Ascorbinsäure (ASS), Alylsulfonsäure (ALS) und Eisen im Nickelsulfamatelektrolyten

Die niedrigen Härten nach Zugabe von Saccharin bei der Stromdichte von 7,5 A/dm² korrelieren nach Abbildung 55b sehr gut mit den Energieanteilen für die plastische/elastische Verformung. Wie schon bei der Alylsulfonsäure werden ebenfalls elastische Anteile von über 70 % erreicht.



a) Zusatz 2,0 g/l Alylsulfonsäure (ALS)



b) Zusatz 2,0 g/l Saccharin

Abbildung 66: Energieanteil bei der plastischen/elastischen Verformung (bestimmt mit der Martens-Härte) in Abhängigkeit der Arbeitsstromdichte im Nickelsulfamatelektrolyt

Gegenüber der Alylsulfonsäure ist der Einfluss von Saccharin auf die Härte sehr unterschiedlich. Es zeigt sich nach Abbildung 56, dass durch die Zugabe von Saccharin eine Stromdichteabhängigkeit vorliegt. Sie erzeugt bei Stromdichten von 7,5 A/dm² Schichten mit geringerer Härte, die niedriger liegt als bei Schichten, die aus einem reinen Nickelsulfamatelektrolyten abgeschieden wurden. Dagegen zeigen Legierungen mit 1,5 g/l Saccharin im Elektrolyten bei 5 A/dm² vergleichbare Härten zu reinen Nickelschichten. Dennoch kommt es mit Steigerung der Stromdichte und Erhöhung des Eisenanteils zu einer Härtezunahme. Die höchsten Härtewerte der untersuchten Schichten wurden bei Anwesenheit von Saccharin und einem Eisenanteil im Elektrolyten von 3,0 g/l ermittelt.

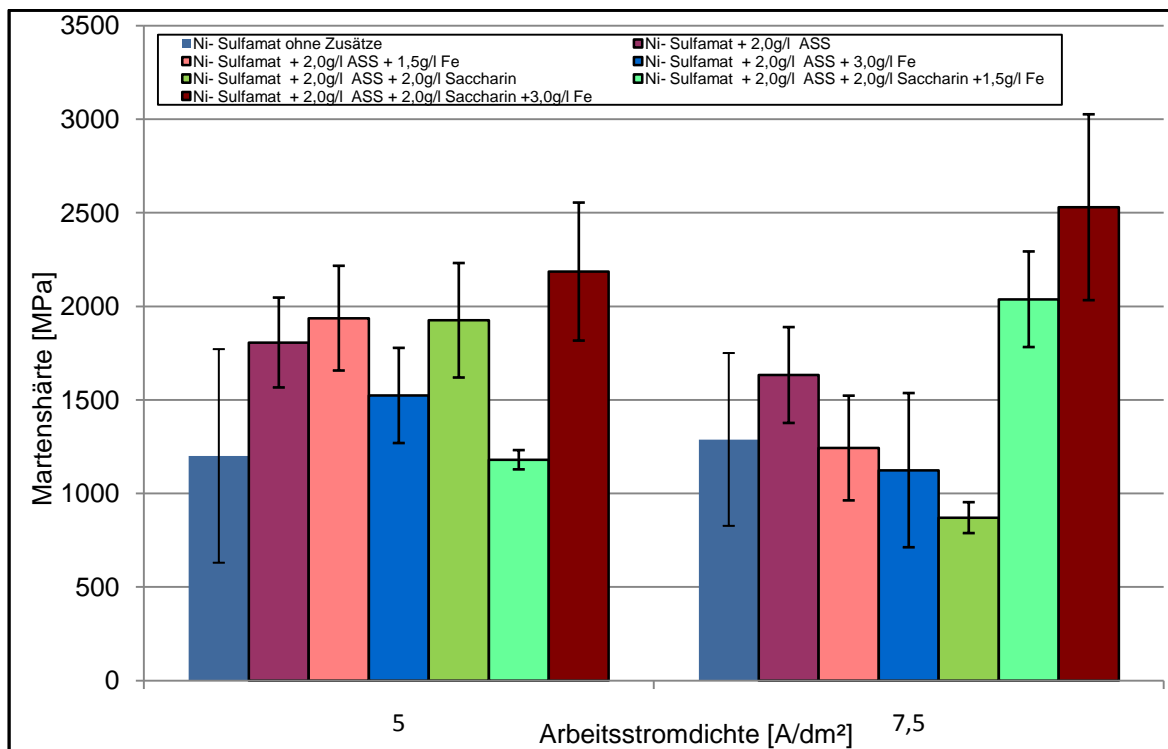


Abbildung 67: Abhängigkeit der Martens-Härte von der Arbeitsstromdichte und den Zusätzen Saccharin, Ascorbinsäure (ASS) und Eisen im Nickelsulfamatelektrolyten

Die Einflüsse der Zusätze Ascorbinsäure, Alylsulfonsäure, Saccharin und Eisen auf die inneren Spannungen, Härten und Verformungsanteilen plastisch/elastisch zeigen das große Potenzial steuerbarer Werkstoffeigenschaften für den Einsatz in der Mikrosystemtechnik.

Dabei ist der Einsatz von Saccharin als Spannungsminderer für die zu fertigenden Bauteilgruppen eines Mikrodirektantriebes besonders geeignet. Mit der Kombination Nickel/Eisen lassen sich sehr harte und somit verschleißfeste Bauteile herstellen. Diese weisen niedrige innere Spannungen auf, wodurch hohe Formstabilität der Bauteile für den späteren Einsatz erreicht werden kann.

Arbeitsschwerpunkt 3D-Magnetfeldsensorik

Die Herstellungstechnologien der Mikrotechnik sind typischerweise *planare* Technologien, sie basieren i. d. R. auf Substraten in der Form flacher Scheiben (Wafer). Für die Herstellung von Mikrosystemen gibt es zwei grundlegende Herangehensweisen: *Additive* Techniken beginnen auf einem Substrat und kreieren die Mikrostrukturen ausgehend von einer freien Oberfläche des Substrates durch das schrittweise Hinzufügen unterschiedlicher Schichten (sog. Oberflächenmikromechanik). *Subtraktive* Techniken beginnen ebenfalls auf einer freien Oberfläche des Ausgangsmaterials, erzeugen die Mikrostrukturen allerdings durch das Entfernen (Ätzen) von Material (sog. Volumenmikromechanik). Grundsätzlich erlaubt diese von der Herstellung elektronischer Schaltkreise abgeleitete Herangehensweise die Herstellung miniaturisierter Komponenten für die Mikromechanik, Mikrofluidik und weitere Disziplinen in großer Anzahl zu geringen Kosten.

Zahlreiche Mikrosysteme entstehen unter Nutzung lithografischer Strukturierungsmethoden, die aus der elektronischen Halbleiterfertigung übernommen wurden. Die Kombination von Lithografie mit den Methoden der Dünnschichttechnik resultiert i. d. R. in Strukturen, die als Extrusion einer zweidimensionalen Geometrie entlang

eines einfachen Pfades in die dritte Dimension angesehen werden können. Demzufolge sind funktionelle Schichten in Mikrosystemen fast ausschließlich parallel zur freien Oberfläche des Substrates angeordnet, weswegen die freie Gestaltung in Mikrosystemen auf zwei Dimensionen beschränkt ist.

Für Anwendungen wie Magnetfeldsensoren, die eine Detektion des Magnetfeldvektors erlauben, d. h. die drei kartesischen Komponenten des Magnetfeldes erfassen (s. Abbildung 57), ist eine monolithische Integration (sog. Wafer-Level-Integration) aufgrund der beschriebenen Restriktionen nahezu unmöglich.

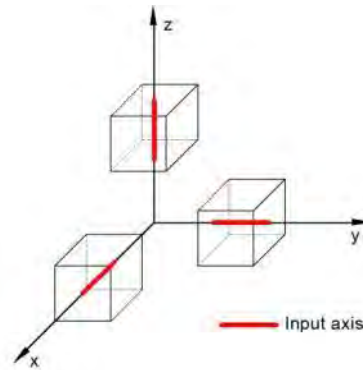


Abbildung 68: Schematische Darstellung einer Vektormesszelle basierend auf drei einzelnen Sensorchips

Eine alternative Strategie ist die Auftrennung des Mikrosystems in Teilsysteme, die einzeln hergestellt und anschließend in einem Montageschritt zu einem kompakten System kombiniert werden. Damit gehen hohe Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik einher, während gleichzeitig eine geeignete Kalibrierung der so erzeugten Systeme sichergestellt werden muss.

Für eine Vektormesszelle für Magnetfelder bedeutet dies, dass Sensorchips mit jeweils einer sensitiven Achse pro Chip mit Standardprozessen der Mikrotechnik hergestellt werden. Diese Chips werden anschließend vereinzelt und in einer Dreiergruppe auf einem gemeinsamen Substrat dergestalt angeordnet (hybride Integration), dass jeder Chip den Betrag und die Richtung der magnetischen Feldstärke für eine kartesische Raumrichtung erfasst.

Die hybride Integration umfasst dabei die mechanische, elektrische und thermische Ankopplung der Sensorchips an das gemeinsame Substrat, über welches die Verbindung zur technischen Peripherie hergestellt wird. Für diese Aufgabe existieren verschiedene Technologien wie z. B. Bondverfahren, Flip-Chip-Montage, Ball-Grid-Arrays (BGA) und Löttechniken. Diese Technologien haben die gemeinsame Eigenschaft, dass sie für die (elektrische) Verbindung von Kontaktflächen entwickelt wurden, die *parallel* zueinander sind (i. d. R. parallel zur Waferoberfläche). Für eine magnetische Vektormesszelle hat dies zur Folge, dass die Kontaktierungsflächen mindestens eines Sensorchips orthogonal zur Oberfläche des gemeinsamen Substrates liegen.

Verallgemeinert last sich festhalten, dass die Verbindungstechniken kaum Lösungen für die Verbindung von funktionellen Flächen innerhalb von Mikrosystemen bieten, die *nicht parallel* (sondern z. B. orthogonal) zueinander liegen. Dies betrifft sowohl elektrische Kontaktflächen, aber auch Flächen für die Abführung von Wärmeenergie sowie leitfähige Pfade für die elektrische Signalübertragung und die Stromversorgung. In der Fachliteratur bleibt diese Herausforderung weitgehend ungelöst.

Im Rahmen des Projektes VERDIAN konnten zahlreiche innovative Verbindungstechnologien gefunden werden, die die genannte Problemstellung lösen. Dabei können die Ergebnisse, die für die Vektormesszelle für magnetische Felder gefunden wurden, direkt auf andere Mikrosysteme und Anwendungen übertragen werden.

Vektormesszelle für magnetische Felder

Der Chip *KMG301* ist ein kommerziell verfügbarer Sensorchip für die magnetische Feldstärke und wird von der Firma *HL Planartechnik GmbH* in Dortmund hergestellt. Seine Funktion basiert auf dem GMR-Effekt (Giant Magneto-Resistance). Der Chip wird in Siliziumtechnologie hergestellt und besitzt eine sensitive Achse. Die Änderung des elektrischen Widerstandes unter dem Einfluss eines externen magnetischen Feldes wird mittels einer integrierten Wheatstone-Messbrücke ausgelesen, weswegen jeder Sensorchip vier Kontaktflächen aus Gold besitzt. Eine besondere Baureihe des Chips wurde bereits mit einer Lötkegel auf jeder Kontaktfläche versehen. Ein Chip besitzt eine Breite von $1030\ \mu\text{m}$ und eine Tiefe von $400\ \mu\text{m}$. Für seine Höhe können Werte zwischen 430 und $730\ \mu\text{m}$ gewählt werden. Die thermische Stabilität wird bis 280°C garantiert, die maximal detektierbare Feldstärke beträgt $40\ \text{kA/m}$ und bewegt sich damit in der Größenordnung des Erdmagnetfeldes.

Um den magnetischen Feldvektor zu detektieren (d. h. sowohl der Betrag als auch die Richtung der magnetischen Feldstärke werden ausgelesen), müssen drei Sensorchips auf einem gemeinsamen Substrat angeordnet werden, sodass deren sensitive Achsen ein Rechtssystem bilden (Abbildung 58).

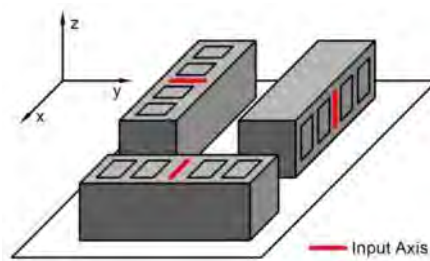


Abbildung 69: Kartesische Anordnung dreier Sensorchips auf einem gemeinsamen Substrat

Für die Herstellung eines gemeinsamen Substrates als Grundlage für die hybride Integration wurden drei Ansätze verfolgt:

1. Niedertemperatur-Einbrand-Keramiken (LTCC – Low Temperature Co-Fired Ceramics)
2. Faltbare Leiterplatten (FF-PCB – Folded Flexible Printed Circuit Boards)
3. Standard-Silizium-Mikrotechnik

In allen Fällen muss das gemeinsame Substrat die folgenden Funktionen erfüllen:

- Positionierung der drei Sensorchips auf dem Substrat, sodass die sensitiven Achsen ein Rechtssystem bilden
- Mechanische Fixierung der Chips auf dem Substrat
- Elektrische Verbindung zwischen Chip und Substrat
- Elektrische Schnittstelle zur technischen Peripherie

Damit die einzelnen Chips bequem auf dem Substrat ausgerichtet werden können, werden Kavitäten bevorzugt, in die jeweils ein Chip versenkt werden kann, während gleichzeitig die kartesische Ausrichtung sichergestellt wird. Um die mechanische Fixierung zu gewährleisten, kann auf Standardverfahren wie Kleben oder Bonden zurückgegriffen werden. In einigen Fällen wird die mechanische Fixierung gleichzeitig durch die elektrische Verbindung realisiert, z. B. wenn Löttechniken verwendet werden. Alternativ kann das Gesamtsystem nach allen Aufbau- und Verbindungsschritten mit einem Gießharz verkapselt werden, wobei der Einfluss der Vergussmasse auf die Messung der magnetischen Feldstärke berücksichtigt werden muss.

Das gemeinsame Substrat muss die Signalübertragung mittels elektrischer Leiterzüge zwischen jedem Sensorchip und der technischen Peripherie (z. B. einer Auswerteeinheit) gewährleisten, demzufolge enthält das gemeinsame Substrat 12 Leiterzüge. Diese werden sinnvollerweise so ausgelegt, dass sie als Stecker innerhalb eines FFC-Systems (Flat Flexible Cable) fungieren können, was folgende Vorteile bietet:

- Der Sensorkopf kann bei Fehlfunktionen ohne großen Aufwand ersetzt werden.
- Durch die Kontaktierung des Sensorkopfes an lediglich einer Seite kann der Sensorkopf selbst im Design der jeweiligen Messaufgabe angepasst werden.
- FFC-Systeme ermöglichen sehr kleine Rastermaße (bis zu 0,2 mm) der benachbarten Leiterzüge.
- Zwischen Sensorkopf und technischer Peripherie kann optional ein geeignetes Kabel (FFC) zwischengeschaltet werden, sodass ein deutlich flexiblerer Sensorkopf entsteht.

Für den Demonstrator wurde das FFC-System *FPC-ZIF-0,50-0440VTT-B-012U* der Firma *MPE-Garry GmbH* in Füssen verwendet. Stecker und Buchse sind als Nullkraftverbindung (ZIF – Zero Insertion Force) ausgeführt. Der Stecker wird dabei in die Buchse eingeführt und in seiner Endlage durch einen Klemmbügel fixiert. Das Rastermaß beträgt 0,5 mm. Eine Alternative mit dem Rastermaß 0,3 mm stellt das FFC-System *FH26-13S-0.3SHW(05)* der Firma *Hirose Electric Co.* in Tokyo, Japan, dar. Beide Systeme sind in Abbildung 59 dargestellt.

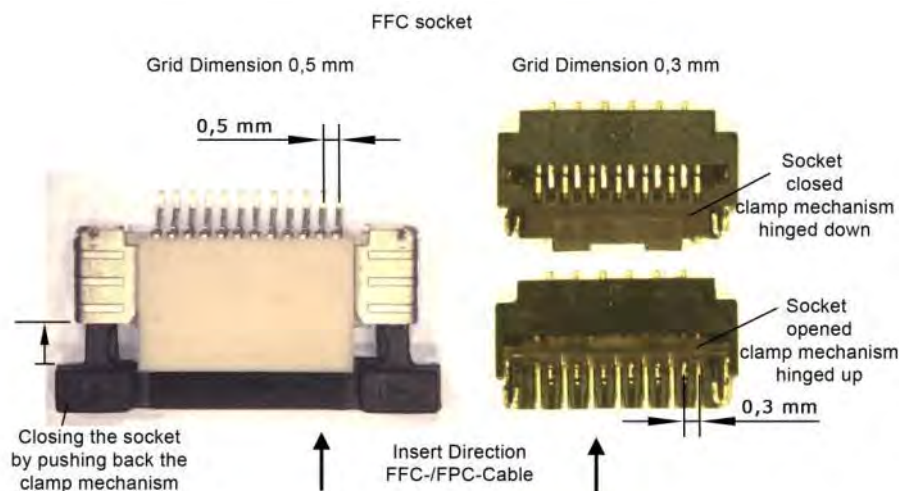


Abbildung 70: Links: FFC-Buchse 0,5 mm, *FPC-ZIF-0,50-0440VTT-B-012U*, MPE Garry GmbH; Rechts: FFC-Buchse 0.3 mm, *FH26-13S-0.3SHW(05)*, Hirose Electric Co., Ltd., Tokyo, Japan

Verbindungstechniken - Konzepte

Innerhalb der Messzelle können zwei der drei Sensorchips (x und y) entweder auf Substratebene integriert werden – in diesem Falle fungiert z. B. der Siliciumwafer gleichzeitig als Substrat für die hybride Integration. Für mindestens einen Sensorchip (z) muss das Konzept der hybriden Integration verfolgt werden. Die folgenden Abschnitte stellen mögliche Verbindungstechniken für die einzelnen Sensoren vor.

Verbindung der x- und y-Sensoren

Für die Kontaktierung der x- und y-Sensoren wurden die folgenden Technologien untersucht:

- Anisotrop leitfähig Kleber
- Anisotrop leitfähige Klebstofffilme (Abbildung 60)
- Anisotrop leitfähige Polymerfolien (Abbildung 61)
- Ball Grid Array (BGA)

Außerdem sind Standardlösungen wie z. B. Drahtbonden möglich.

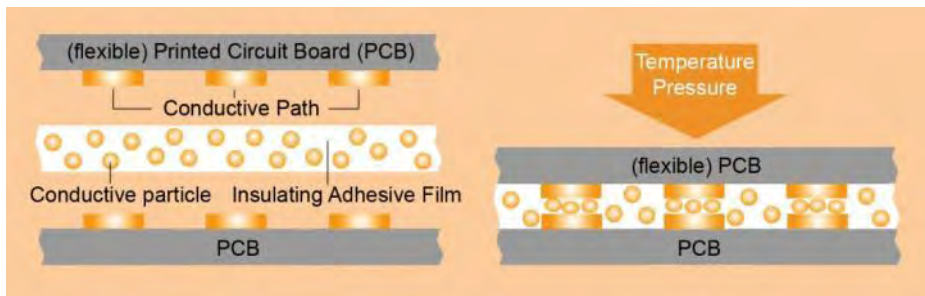


Abbildung 71: Funktionsweise anisotrop leitfähiger Klebstofffilme

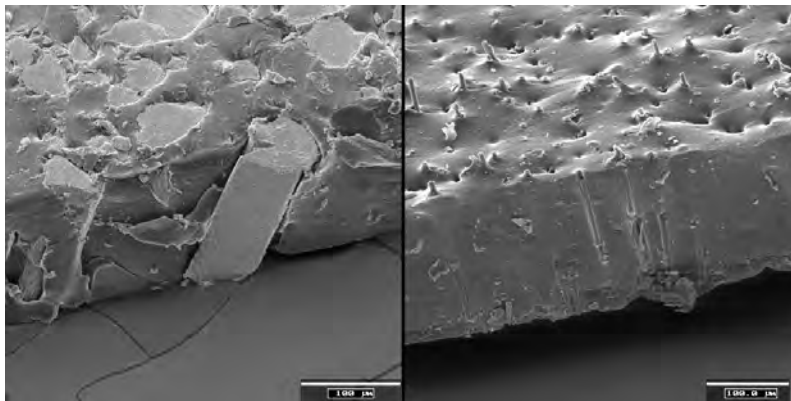


Abbildung 72: REM-Aufnahmen von anisotrop leitfähigen Polymerfolien, Hersteller Shin-Etsu; links: Typ MAF, rechts: Typ AF

Verbindung des z-Sensors

Auf der elektrischen Kontaktierung des dritten Sensorchips lag der Schwerpunkt der Untersuchungen im Rahmen des Projekts VERDIAN, weil dessen Kontaktflächen rechtwinklig zur Oberfläche des gemeinsamen Substrats liegen. Zu Beginn der Arbeiten existierten folgende Ideen bzgl. der notwendigen L-förmigen Verbindung „über Eck“:

- Isotropes Kleben
- Ball Grid Array (BGA)
- Bonden und Drehen
- Anisotrop leitfähige Polymerfolien
- Schneiden/Lasern durch Vias
- Galvanik
- FaltFlex™

In den folgenden Abschnitten werden die genannten Ansätze näher vorgestellt.

Isotropes Kleben: Der z-Sensorchip wird durch vier Klebepunkte mit elektrisch leitfähigem Kleber kontaktiert und mechanisch fixiert. Um ein laterales Verfließen des Klebers zu verhindern, werden die Klebepunkte voneinander durch Zwischenkavitäten getrennt (Abbildung 62). Für diese Aufgabe sind hochviskose Klebstoffe zu bevorzugen. Im gemeinsamen Substrat ist eine Stufe enthalten, vor die der Sensorchip vor dem Kleben positioniert wird.

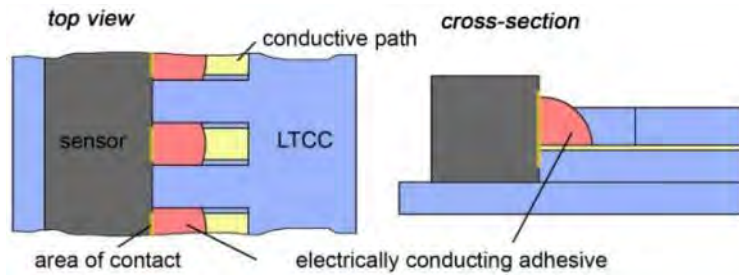


Abbildung 73: Verbindung des z-Sensorchips durch isotrop leitfähigen Kleber

Ball Grid Array (BGA): In ähnlicher Weise wie beim Kleben mit isotrop leitfähigen Klebstoffen kann ein BGA für die Realisierung der elektrischen und mechanische Verbindung verwendet werden (Abbildung 63).

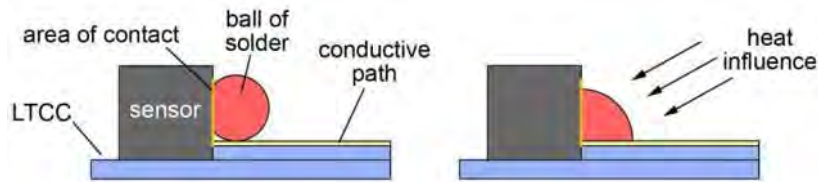


Abbildung 74: Ball Grid Array (BGA) für den elektrischen Kontakt zwischen Sensorchip und Substrat

Die Besonderheit bei diesem Prozess ist die Notwendigkeit, dass die Lötkekeln auf den Kontaktflächen des Sensorchips angebracht werden müssen, *bevor* die Positionierung auf dem Substrat stattfindet. Anschließend wird der Chip zu den Leiterzügen auf dem Substrat ausgerichtet. Durch das Aufschmelzen des Lotes werden die Kontaktstellen miteinander verbunden. Das laterale Verfließen des Lotes und dadurch entstehende etwaige Kurzschlüsse können durch Zwischenkavitäten oder spezielle Lotstoppschichten unterbunden werden.

Anisotrop leitfähige Polymerfolie: Die kommerziell verfügbaren Polymerfolien (vgl. Abbildung 61) können möglicherweise auch für die Kontaktierung des z-Sensorchips verwendet werden: Wird ein V-Graben aus der Folie ausgeschnitten und der Sensorchip gemäß Abbildung 64 im V-Graben positioniert, kann der Sensor mittels der Golddrähte in der Polymerfolie kontaktiert werden. Die fertigungstechnische Herausforderung liegt in der Erzeugung der V-Gräben unter Einhaltung eines definierten Flankenwinkels. Außerdem ist ein gewisser Anpressdruck notwendig, um die Verbindung zwischen Sensorchip und Polymerfolie herzustellen, weswegen die mechanische Verbindung zusätzlich sichergestellt werden muss. Der wesentliche Nachteil liegt in der Tatsache, dass die sensitive Achse des z-Sensors in diesem Falle nicht auf einer Achse des Rechtssystems liegen würde, wodurch die Sensitivität des z-Sensors gegenüber den anderen Raumkoordinaten sinkt.

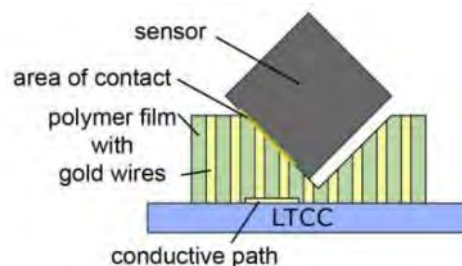


Abbildung 75: Strukturierung einer anisotrop leitfähigen Polymerfolie zur Kontaktierung des z-Sensorchips

Schneiden/Lasern durch Vias: Zur Erzeugung einer Kontaktfläche senkrecht zur Substratebene kann eine vorab gefertigte Durchkontaktierung (sog. Via) durchtrennt werden, beispielsweise durch schneidende oder

sägende Verfahren. Dafür muss sichergestellt werden, dass das Füllmaterial des Vias während des Schneidprozesses im Via verbleibt und nicht herausgerissen wird. Dieser Ansatz wird in Abbildung 65 illustriert. Für die eigentliche Verbindung zwischen den Kontaktflächen des z-Sensorchips und dem durchtrennten Via können isotrop oder anisotrop leitfähige Klebstoffe, anisotrop leitfähige Polymerfolien oder ein BGA verwendet werden.

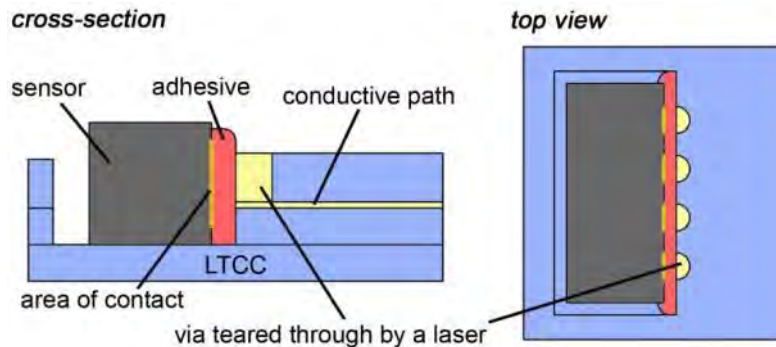


Abbildung 76: Schnitt durch ein Via zur Erzeugung senkrechter Kontaktierungsflächen

Galvanik: Die elektrische Kontaktierung wird durch galvanische Abscheidung einer Metallschicht erzeugt. Dazu wird der z-Sensorchip gegen eine im Substrat enthaltene Kante positioniert und fixiert, sodass seine Kontaktflächen sich mit den Kanten der zugehörigen Leiterzüge berühren (Abbildung 66). Auf den metallischen Flächen (galvanische Startschicht) wird nun eine galvanische Metallschicht abgeschieden, die die Trennstelle zwischen den Kontaktflächen überbrückt.

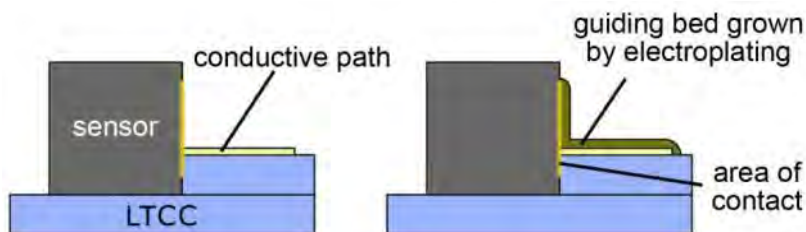


Abbildung 77: Kontaktierung des Sensorchips durch Galvanik

FaltFlex™: Ein völlig neuer Ansatz wird mit diesem Konzept verfolgt: Die sog. *Faltflex™ Technologie* wurde ursprünglich von der Firma *Würth Elektronik GmbH* in Niedernhall für die Herstellung miniaturisierter Spulen entwickelt. Dabei wird ein flexibles Substrat aus Polyimid (PI) einer Dicke von 50 µm beidseitig mit einer 17 µm starken Kupferschicht bedeckt. Das Kupfer wird in lithografischen Verfahren beidseitig strukturiert (Leiterzüge, Durchkontaktierungen usw.), wonach das Substrat entlang definierter Linien perforiert wird. Falls die Kupferdicke für eine bestimmte Anwendung nicht ausreichend ist, kann sie galvanisch verstärkt werden. Abschließend wird das Substrat entlang der Perforationen gefaltet, wodurch ein dreidimensionales Mehrlagensystem entsteht. Es bestehen folgende Designrichtlinien:

- Kleinste Breite der Leiterzüge: 150 µm
- Geringster Abstand zweier Leiterzüge: 100 µm
- Viadurchmesser: 100 µm (Bohrung)
- Viakontaktierungsring: 100 µm (Ringbreite um die Bohrung herum)
- Perforation durch Laserbohren: 100 µm Lochdurchmesser, 200 µm Zentrumsabstand der Löcher
- Leiterzüge dürfen nur über die Innenseite einer Knickstelle geführt werden.
- Das Falten unter definierten Winkeln ist möglich.

- Mit zunehmender Dicke der Leiterzüge muss auch deren Abstand erhöht werden.
- Eine Veredlung durch galvanisch Gold ist möglich, dafür ist eine Haftvermittlerschicht aus Nickel erforderlich.
- Es können strukturierte Lötstoppschichten erzeugt werden.

Diese Technologie kann auch dazu verwendet werden, um eine Messzelle aus drei Sensorchips herzustellen. Wie in Abbildung 67 gezeigt, werden alle Sensoren zuerst mittels Standard-Aufbau- und Verbindungstechniken mit dem gemeinsamen Substrat verbunden. Anschließend wird das Substrat entlang der vorbereiteten Perforation gefaltet und in der gefalteten Position fixiert (z. B. durch Kleben oder Lötten). Der große Vorteil dieser Methode liegt in der Möglichkeit, für alle drei Sensoren Standard-Verbindungstechnologien nutzen zu können.

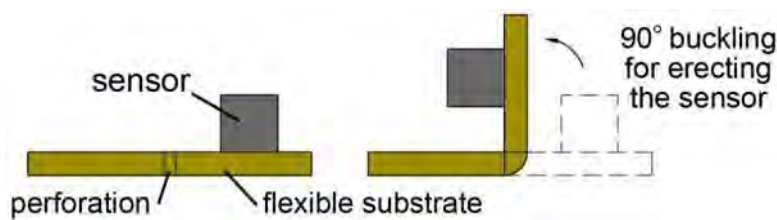


Abbildung 78: Erzeugung einer dreidimensionalen Messzelle mittels Faltflex™-Technologie

Verbindungstechnologien - Experimente

Das Konzept der hybriden Integration wird am Beispiel eines gemeinsamen Substrates verfolgt, welches in LTCC-Technologie hergestellt wurde.

LTCC-Substrat: Das LTCC-Substrat soll als Stecke innerhalb eines FFC-Systems mit 0,5 mm Rastermaß dienen. Ein zweites Layout basiert auf einem Rastermaß von 0,3 mm. Beide Layouts wurden in einem gemeinsamen Batchprozess hergestellt. Die Dicke des Steckers ist durch die FFC-Buchse auf 0,3 mm limitiert. Einige der vorgestellten Verbindungstechnologien benötigen eine Stufe, an die der z-Sensorchip angelegt und gegenüber den Leiterzügen des gemeinsamen Substrates ausgerichtet werden kann, bevor er kontaktiert wird. Außerdem wurden alle Sensorchips für eine bequeme Ausrichtung in Kavitäten versenkt. Diese Kavitäten wurden in den ungesinterten LTCC-Folien durch Laserschneiden erzeugt. Als keramisches Material wurden die kommerziell verfügbaren Tapes *P2* und *PZ* verwendet, die von der Firma *dupont* angeboten werden. Ihre Dicke beträgt nach dem Sintern 140 µm bzw. 250 µm.

Abbildung 68 zeigt das Layout der vier LTCC-Lagen, die gestapelt das gemeinsame Substrat bilden, sowie deren Strukturierung. Die gefertigten Substrate sind in Abbildung 69 zu sehen. Die Leiterzüge werden durch Siebdruck hergestellt, wobei eine lötbare Leiterpaste verwendet werden muss, wenn die Kontaktierung z. B. durch ein BGA erzeugt werden soll. Die Abmessungen der Substrate betragen $L \times B \times H = 6,5 \times 6,5 \times 0,56 \text{ mm}^3$ (0,5 mm Rastermaß) bzw. $6,5 \times 3,9 \times 0,56 \text{ mm}^3$ (0,3 mm Rastermaß). Dies entspricht den Abmessungen der Vektormesszelle, allerdings ohne montierte Sensorchips.

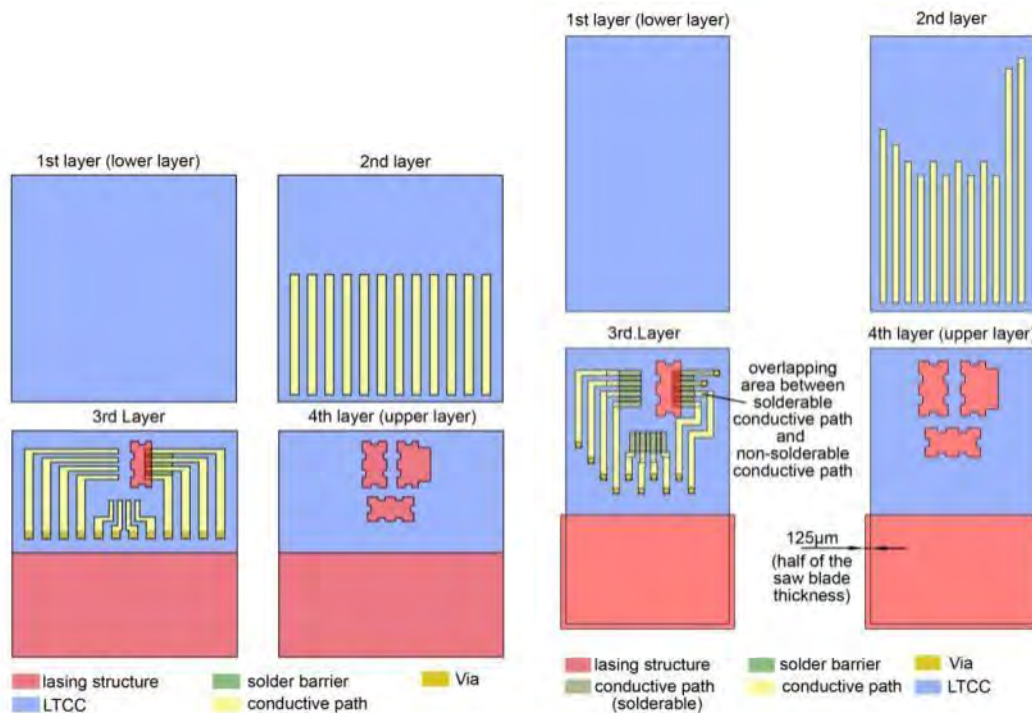


Abbildung 79: Vier LTCC-Lagen für das gemeinsame Substrat und ihre Strukturierung; links: Rastermaß 0,5 mm, rechts: Rastermaß 0,3 mm

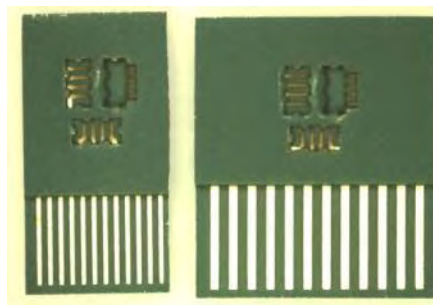


Abbildung 80: Gefertigte LTCC-Substrate

Im Folgenden werden die Experimente beschrieben, die zur Kontaktierung der Sensorchips auf dem LTCC-Substrat durchgeführt wurden. Die Verbindung gilt als realisiert, wenn die Messbrücke auf dem entsprechenden KMG301-Sensorchip erfolgreich ausgelesen werden konnte.

Anisotrop leitfähige Klebstoffe: Für die Kontaktierung des x- und y-Sensorchips wurde der Klebstoff *Monopox AC 265* der Firma *DELO Industrieklebstoffe GmbH & Co. KGaA* in Windach verwendet und mit einem halbautomatischen Dispenser dosiert. Der Klebstoff muss unter Druck aushärten, wofür industriell eine spezielle Thermode verwendet wird. In den Experimenten wurde ein SMD-LötKolben bei einer Temperatur zwischen 150°C und 210°C über 6 bis 19s in Kombination mit Sensorchips ohne BGA verwendet. Die Kavitäten wurden mit dem Klebstoff gefüllt, der gemäß den Herstellervorgaben weiterprozessiert wurde. Im Anschluss zeigte sich keinerlei adhäsive Wirkung zwischen dem Sensorchip und der Keramik. Eine Variation der Temperatur oder Vorreinigungsschritte konnten das Ergebnis nicht verbessern. Vermutlich würde die Verwendung einer geeigneten Thermode bessere Ergebnisse generieren.

Anisotrop leitfähige Klebstofffilme: Es wurde der Klebstofffilm *5552R* der Firma *3M Deutschland GmbH* verwendet. Diese Filme müssen unter erhöhter Temperatur und unter Druckbeaufschlagung gehärtet werden.

Zuerst wurde der Film zugeschnitten. Für die Verbindung zum Substrat empfiehlt der Hersteller eine Temperatur im Bereich zwischen 80°C und 100°C bei einem Druck zwischen 1 bar und 15 bar über 3 bis 5 s. Nach dem Entfernen der Schutzschicht wurde der Sensorchip auf den Film aufgelegt. Bei einer Temperatur zwischen 170°C und 190°C und einem Druck zwischen 20 bar und 40 bar über 20 bis 30 s soll sich laut Hersteller eine feste Verbindung zwischen Klebstofffilm und Sensorchip ausbilden. Erneut wurde anstelle der Thermode ein SMD-Lötkolben verwendet.

Trotz Einhaltung der Prozessierungsempfehlungen zeigte der Klebstofffilm keinerlei adhäsive Eigenschaften, weder zur Keramik, noch zum Sensorchip. Veränderungen der Temperatur und des Drucks zeigten keine Verbesserung.

Anisotrop leitfähige Polymerfolien: Die innerhalb dieses Abschnittes beschriebenen Ergebnisse gelten auch für den z-Sensor. Nach dem Zuschneiden der Folie wurde der Sensor auf der Folie platziert. Mehrere Aufbauten bestätigten, dass die Anwendung der Folie nur unter Verwendung eines Mechanismus wirkungsvoll ist, der den Sensorchip auf der Folie klemmt. Da dieser Mechanismus den Bauraum der Messzelle wesentlich vergrößern würde, wurde dieser Ansatz nicht weiter verfolgt.

BGA: Die Kavitäten wurden zuerst mit einem Flussmittel für Lote benetzt. Anschließend wurden die x- und y-Sensorchips in die Kavitäten eingesetzt, wobei die BGA auf den Chips nach unten in Richtung der Leiterzüge wiesen. Die Applikation eines Lötkolbens bei 250°C bei leichtem manuellem Druck führte zu einer elektrischen Verbindung zwischen den Kontaktflächen des Sensorchips und den Leiterzügen auf der Keramik. Dieser Versuch konnte mehrmals erfolgreich wiederholt werden, wobei jedesmal der typische elektrische Widerstand der Messbrücke zwischen 1,8 und 2,8 kΩ gemessen werden konnte.

Alle folgenden Experimente beschreiben die Kontaktierung des z-Sensorchips.

Isotropes Kleben: Das isotrope Kleben zur Herstellung einer elektrisch leitfähigen Verbindung “über Eck” erfordert die mengen- und ortsgenaue Dosierung des Klebstoffs. An diesen besteht zusätzlich die Anforderung, dass er nach dem Dosieren bis zur Aushärtung nicht breitfließen darf, damit keine Kurzschlüsse zwischen den Leiterzügen generiert werden. Mittels einer Dosierstation ist die präzise Positionierung einer Düse auf dem Substrat möglich. Nach ihrer Ausrichtung wird der Klebstoff gemäß Abbildung 70 dosiert.

Bei den Sensoren ohne BGA auf den Kontaktflächen resultierte das Kleben entweder in einem Kurzschluss zwischen benachbarten Kontaktflächen, oder der Kleber erreichte die Kontaktflächen des Sensorchips gar nicht, weil der Durchmesser der Dosiernadel zu groß war.

Abbildung 71 zeigt die erfolgreiche Kontaktierung eines z-Sensorchips mit BGA durch den isotrop leitfähigen Klebstoff *Loctite 3880* der Firma *Henkel AG* in Düsseldorf. Für den Versuch wurde eine Dosiernadel mit einem Durchmesser von 0,06 mm in Kombination mit einem Druck von 4 bar über 1 s verwendet. Der Klebstoff wurde bei 150°C für 5 min gehärtet.

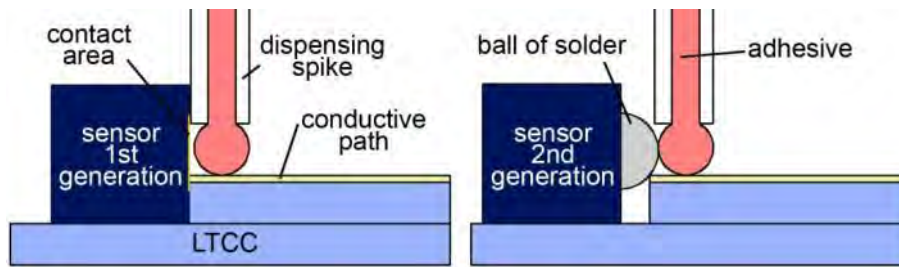


Abbildung 81: Prinzip des Kontaktierens durch isotrop leitfähige Klebstoffe; links: Sensor ohne BGA auf den Kontaktflächen, rechts: Sensor mit BGA

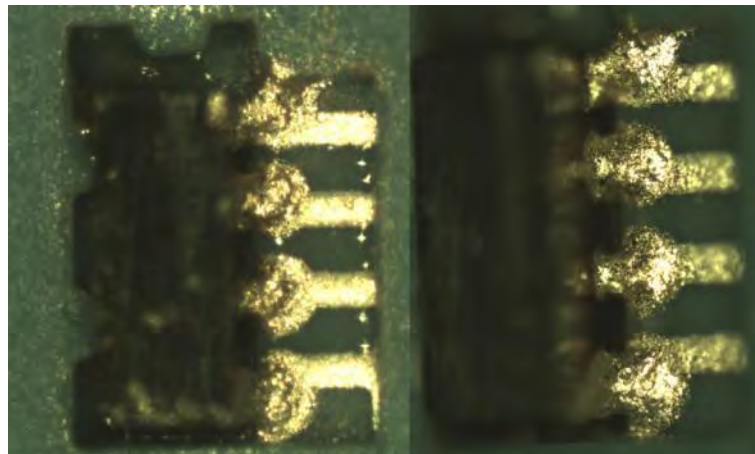


Abbildung 82: Blick auf die Kontaktierung durch einen isotrop leitfähigen Klebstoff; links: Blick von oben, rechts: Blick unter einem Winkel von 30°

BGA: Nachdem die Sensorchips mit BGA in ihren Kavitäten platziert wurden, musste unter einem Mikroskop noch sichergestellt werden, dass die Lotkugeln sich direkt vor den richtigen Leiterzügen des Substrates befanden. Das Lot schmilzt bei ca. 230°C, die Curietemperatur der Sensorchips liegt bei 260°C. Demzufolge wurde eine Temperatur von 250°C verwendet. Aus unbekanntem Gründen schmolz das Lot nicht, auch nicht unter der Zugabe diverser Flussmittel.

Schneiden/Lasern durch Vias: In einem ersten Experiment wurde durch ein Via im Grünzustand der Keramik gelasert. Die Herausforderung lag im Finden geeigneter Laserparameter. Abbildung 72 zeigt einen sauberen Schnitt durch eine Reihe von vier Durchkontaktierungen. Damit konnte der Beweis erbracht werden, dass Kontaktflächen senkrecht zur Substratebene auf diese Weise erzeugt werden können.

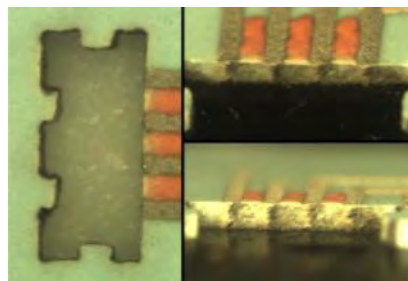
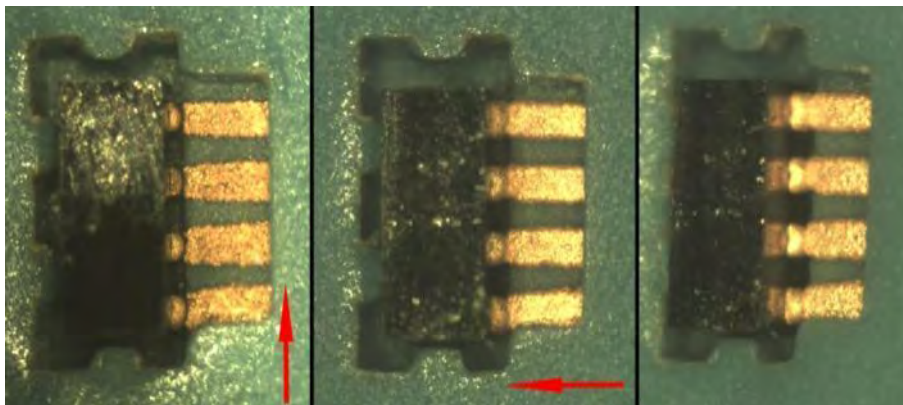


Abbildung 83: Sauberer Schnitt durch ein Via; links: Draufsicht, rechts: Seitenansichten

Galvanik: Der Sensorchip soll mittels einer galvanisch abgeschiedenen Metallschicht mit den Leiterzügen des gemeinsamen Substrates verbunden werden. Zu diesem Zweck wurde ein Goldelektrolyt der Firma *Degussa*

Galvanotechnik GmbH in Essen verwendet. Der Hersteller empfiehlt eine Stromdichte von 0.25 A/dm^2 bei einer Spannung von 10 V. Der Elektrolyt wurde bei 50°C kontinuierlich gerührt. Vor dem Galvanikschritt wurde der z-Sensorchip in seine Kavität geklebt. Die Kavitäten für den x- und y-Sensorchip wurden mit einem Schutzlack bedeckt, der nach dem Galvanikschritt wieder entfernt wurde. Die Leiterzüge, die zur z-Kavität führen, wurden mit einem Kupferdraht kontaktiert, da sie als galvanische Startschicht fungieren. Die Herausforderung besteht in der Überbrückung des Spaltes zwischen den Leiterzügen und den Kontaktflächen, die die Kontaktflächen des z-Sensorchips anfänglich nicht kontaktiert sind und demzufolge auch keine Goldabscheidung auf ihnen stattfindet. Es stellte sich heraus, dass diese Herausforderung durch eine gezielte Anströmung des Sensorchips senkrecht zu seinen Kontaktflächen gemeistert werden kann. Die roten Pfeile in Abbildung 73 kennzeichnen die Strömungsrichtung des Elektrolyten im Galvanikprozess. Die Abscheidung von Gold erfolgte bei einem Strom von $75 \mu\text{A}$ über 1,5 h.



**Abbildung 84: Elektrisch leitfähige Verbindung „über Eck“ durch Galvanik;
links: keine Kontaktierung bei koplanarer Flussrichtung des Elektrolyten;**

Mitte und rechts: Draufsicht auf den kontaktierten Sensor unter rechtwinkliger Anströmung des Sensors

FaltFlex™: Es wurden unterschiedliche Designs gefertigt, um den neuen Ansatz verfolgen zu können. Am Beispiel der in Abbildung 74 gezeigten Designs soll die Technologie erläutert werden. Auf einem planaren FaltFlex™-Substrat werden drei Sensorchips mittels etablierter AVT-Verfahren (z. B. BGA) befestigt und elektrisch kontaktiert. Die „Flügel“ dienen als Stütze für den später gefalteten Teil des Substrats. Sie werden mittels Kleben oder Lötten befestigt. Abbildung 75 zeigt die von der *Würth Elektronik GmbH* gefertigten Substrate.

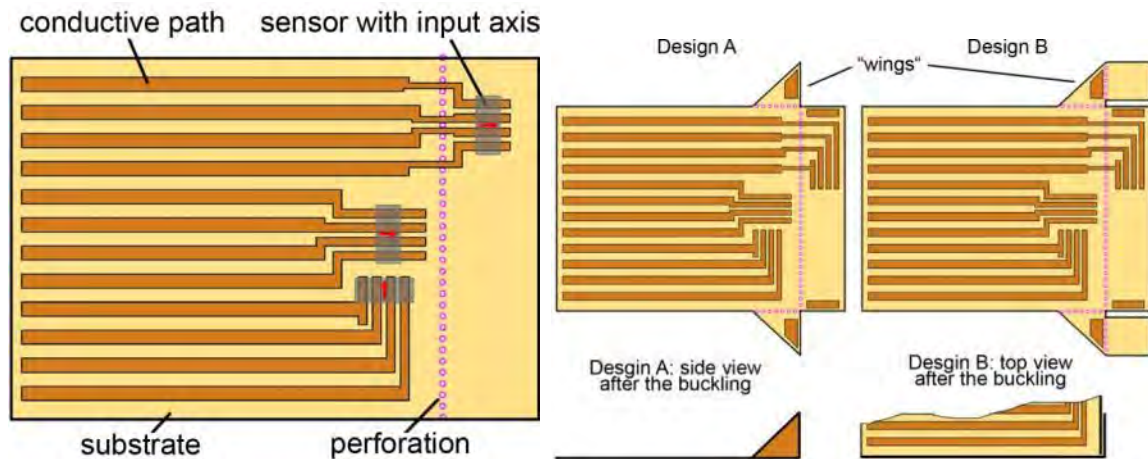


Abbildung 85: FaltFlex™ Design – Erzeugung einer dreidimensionalen Messzelle durch Faltechniken; links: Prinzip, rechts: zwei beispielhafte Designs

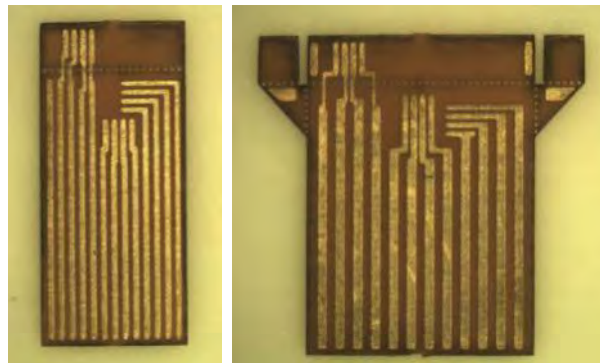


Abbildung 86: Hergestellte FaltFlex™-Substrate (Designs in Abbildung 74)

Zusammenfassung: Mittels LTCC-Technologie wurde ein gemeinsames Substrat für die hybride Integration dreier GMR-Sensorchips gefertigt. Für die x- und y-Ebene kann zur Kontaktierung das vorbereitete BGA auf den Kontaktflächen der Chips verwendet werden. Für Kontaktierung des z-Sensorchips „über Eck“ erwiesen sich die Verfahren isotropes Kleben und Galvanik als geeignet. Insbesondere die galvanische Abscheidung von Gold führte zu sehr definierten und ausfallsicheren Kontaktstellen mit einem vergleichsweise geringen Kontaktwiderstand.

Die weitere Miniaturisierung der Substrate wird durch die technologischen Restriktionen der LTCC-Technologie begrenzt.

Die FaltFlex™-Technologie konnte als günstige Alternative zu den LTCC-Substraten für die hybride Integration etabliert werden. Der große Vorteil liegt in der Möglichkeit, Standard-AVT-Verfahren für die Kontaktierung aller drei Sensorchips verwenden zu können. Die Dreidimensionalität wird erst in einem letzten Prozessschritt erzeugt.

Abbildung 76 zeigt eine fertig aufgebaute Vektormesszelle für magnetische Felder mit einem Rastermaß der Anschlüsse von 0,3 mm.

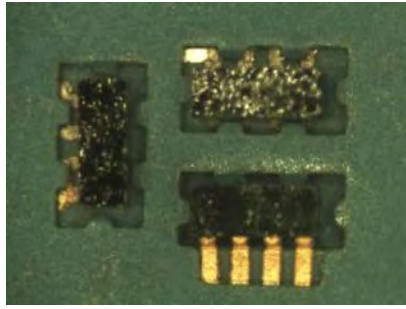


Abbildung 87: Vollständige hybride Integration – Vektormesszelle für magnetische Felder

Weitere Ergebnisse

Eine weitere Variante der Messzelle wurde in Siliziumtechnologie aufgebaut. Damit wird eine weitere Verringerung der Abmessungen erreicht. Abbildung 77 zeigt das Layout, in Abbildung 78 sind Beispiele für gefertigte Substrate zu sehen.

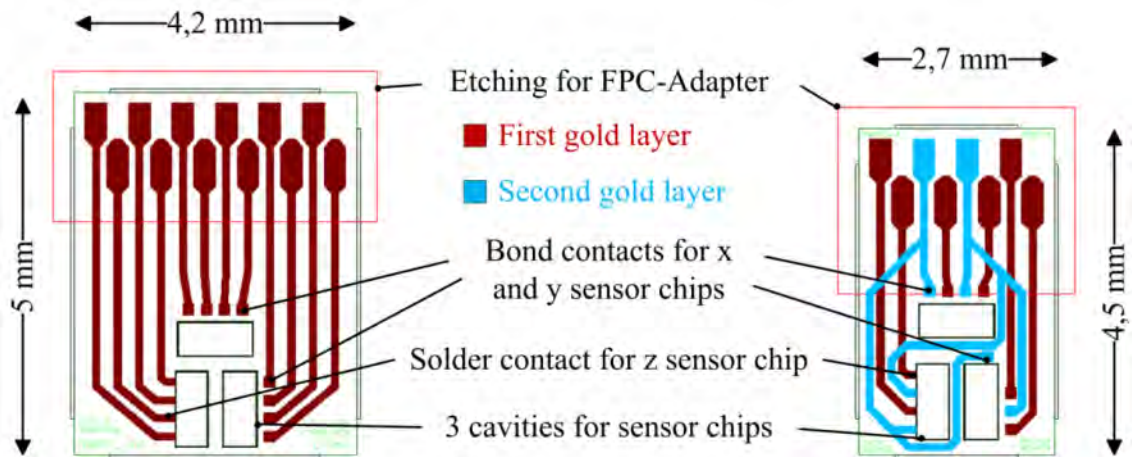


Abbildung 88: Layout des gemeinsamen Substrats in Silicium-Technologie

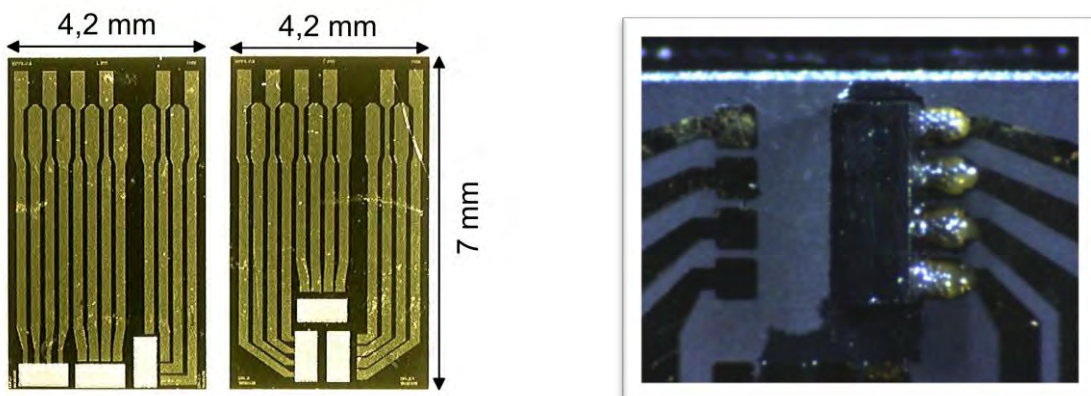


Abbildung 89: Gefertigtes Substrat in zwei Designs (links) und durch Lötten kontaktierter Sensorchip (rechts)

Um die hergestellten Messzellen kalibrieren zu können, wurde ein Messtand entworfen und aufgebaut. In ihm werden in Betrag und Richtung variable Magnetfelder durch die Überlagerung der Felder dreier Helmholtz-Spulenpaare erzeugt (Abbildung 79).



Abbildung 90: Prüfvorrichtung zur Vermessung dreiachsiger Magnetfeldsensoren

Aktoren mechanische Komponenten - Demonstrator Elektromagnete und Experimentalaufbauten

Ziel war der modellbasierte Entwurf des Aktorelements und der aktornahen Fluidik. Der Entwurf ist eingebettet in den Entwurf des Gesamtsystems „Mikroventil“ (Kern, STZ). Im Entwurfsprozess erfolgten Optimierungen hinsichtlich spezifischer Systemanforderungen unter Berücksichtigung der fertigungstechnischen Realisierung.

Im Rahmen der Arbeiten entstanden mehrere Ventilentwürfe.

Das schnellschaltende neutrale Magnetventil (Abbildung 80), welches speziell für die Integration in einen Fluid-Muscle-Aktor konzipiert wurde, wurde modellbasiert mit SESAM entworfen, mit FEM verifiziert und mit herkömmlichen (feinwerktechnischen) Methoden gefertigt, aufgebaut und charakterisiert. Es handelt sich dabei um zwei neutrale Magnetresonanzaktoren, die eine sehr hohe Dynamik erzielen und somit eine 4/3-Wegefunktion erfüllen können. Desweiteren ist eine Druckmessensorik zur Messung des Innendrucks des Fluid-Muscle-Aktors integriert.

Es können Schaltzeiten unter 1,7 ms bei einem Nenndurchfluss von 175 l/min und einem Betriebsdruck bis zu 6 bar erzielt werden.

Durch diesen hohen Integrationsgrad werden große Fortschritte im Verkabelungs- und Verschlauchungsaufwand erzielt, die zu einer deutlichen Vergrößerung der Zuverlässigkeit führen. Außerdem wird kein Bauraum für größere Ventilinseln benötigt.

Durch die Sensorintegration, die hohe Dynamik des Ventilaktors und eine Ansteuerung mit Mikroprozessor lassen sich auch höhere Ventilfunktionen, wie z.B. eine Regelung des Muscle-Innendrucks durch pneumatische Pulsweitenmodulation, erzielen, für die sonst kostenintensive Proportionalventile eingesetzt werden müssen.

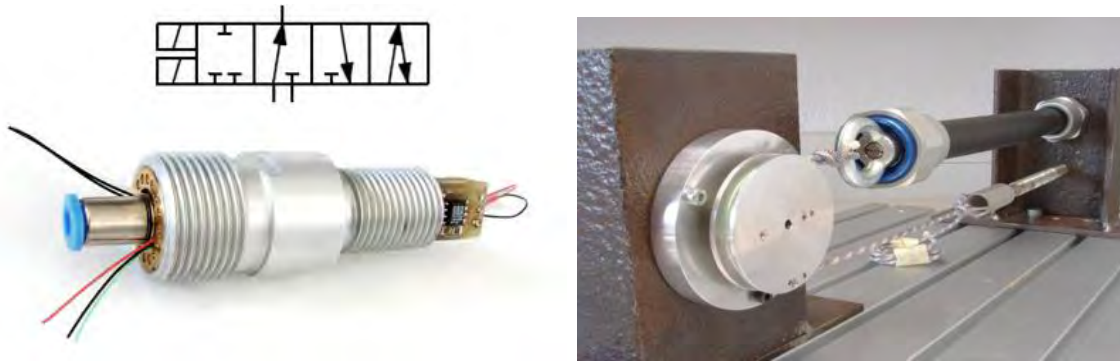


Abbildung 91: Schnellschaltendes neutrales resonantes Miniventil und Versuchsstand zu dessen Charakterisierung

Desweiteren wurden Festigkeitsuntersuchungen von Schweißnähten (LLT) auf verschiedenen MIM-Werkstoffen durchgeführt. Dabei riss zuerst das aufgeschweißte Blechmaterial, nicht die Naht selbst.

Querschliffaufnahmen (Abbildung 81) zeigen eine sehr hohe Güte der Schweißnaht, so dass von einer ausreichenden Festigkeit für alle denkbaren Applikationen ausgegangen werden kann.



Lichtmikroskopische Querschliffaufnahme
Laserschweißnaht Durchschweißung Probe 43 c

Lichtmikroskopische Querschliffaufnahme
Laserschweißnaht Durchschweißung Probe 48 b

Abbildung 92: Querschliffaufnahmen von Schweißversuchen - Federstahl auf FeSi3 und FeNi50

5 VERDIAN-Demonstrationssystem (PSP 8)

Im Rahmen des VERDIAN-Projektes wurden seitens der TU Ilmenau verschiedene Konzepte für planare Positioniersysteme erstellt (vgl. Abschnitt 2 des Teils 2 des Berichtes) und evaluiert.

Als besonders vielversprechend im Hinblick auf die Verbesserung des Verhältnisses zwischen Aufstellfläche und Positionierbereich erwiesen sich die „RLR-Kinematik“, die „RRR-Kinematik“ als Vertreter der seriellen Antriebskinematiken und die „Rahmenparallelkinematik“ (vgl. hierzu Tabelle 3).

Für alle drei Konzepte wurden erste CAD-Modelle erstellt (vgl.: und bewertet.

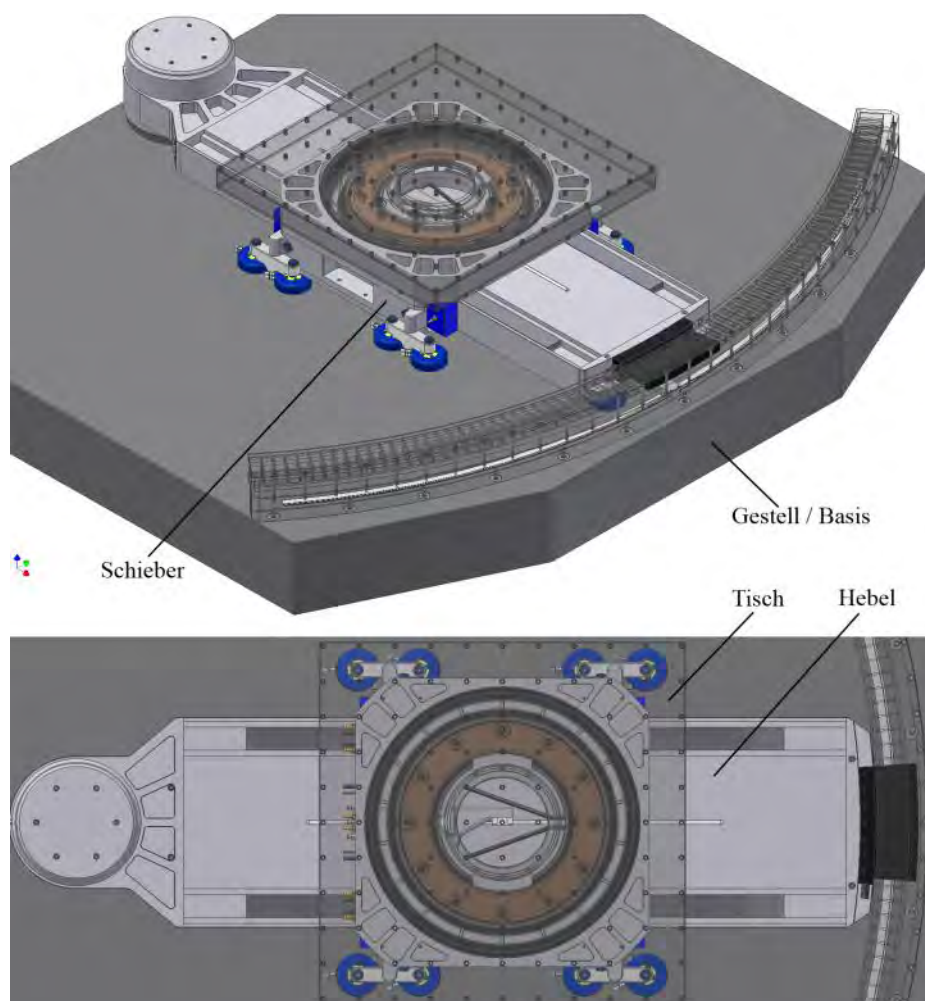


Abbildung 93: Darstellung des CAD-Modells der RLR-Positionierkinematik

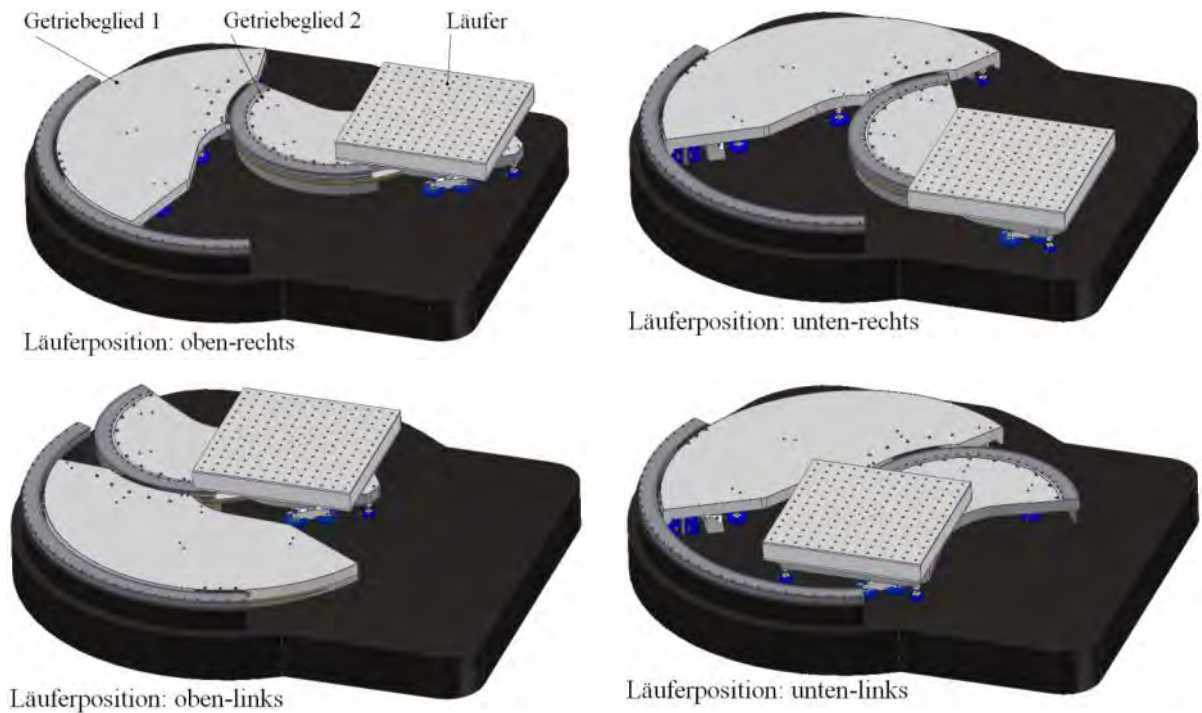


Abbildung 94: Darstellung des CAD-Modells der RRR-Positionierkinematik (zur Verdeutlichung des Arbeitsprinzips dargestellt in vier verschiedenen Getriebelegungen)

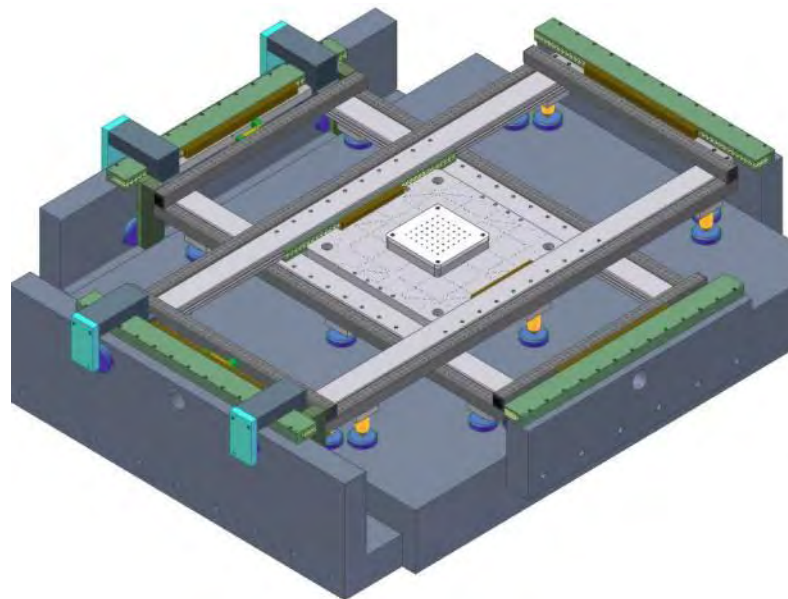


Abbildung 95: Darstellung des CAD-Modells der Rahmenparallelkinematik

Die verschiedenen Lösungen wurden in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Tetra GmbH und IMMS gGmbH analysiert und bewertet. Für die Umsetzung im Rahmen des VERDIAN-Demonstratorsystems wurde die Rahmenparallelkinematik gewählt.

Die Optimierung des Entwurfs einschließlich der finalen Ausgestaltung und Zeichnungserstellung erfolgt für dieses bei der IMMS gGmbH.

Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Im Rahmen des Vorhabens *VERDIAN* wurden die durch die TU Ilmenau folgende Arbeiten veröffentlicht:

2007:

Kallenbach, M., Dittrich, L., Hoffmann, M.: *Aktorik für Miniatur- und Mikroventile*, Ingenieur-Nachrichten Ausgabe 4/2007

Kallenbach, E., Radler, O., Rosenbaum, S.: *Development Trends of Electromagnetic Actuators*, Workshop zum 15. Firmenjubiläum der Saia-Burgess Dresden GmbH

Baumbach, J., Zöppig, V., Kallenbach, E., Radler, O., Volkert, R., Glet, U., Ströhla, T.: *Verbesserung des Regelungsverhaltens von Gleichstrommagneten durch messtechnische Bestimmung des Psi-I-Kennlinienfeldes*, GMM-Fachbericht 54 - Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik. Berlin; Offenbach: VDE-Verlag, 57-62.

Rosenbaum, S., Baumbach, J., Belyaev, N., Beyer, F., Otto, R., Kallenbach, E., Kallenbach, M., Elsäßer, A., Dingelstadt, R.: *Verbesserung der dynamischen Parameter von Magnetventilen durch Optimierung des Energiemanagements des heterogenen Gesamtsystems*, Mechatronik 2007, Innovative Produktentwicklung. Tagung Wiesloch 23./24.05.2007. VDI-Berichte 1971. Düsseldorf: VDI-Verlag, 85-102

Rosenbaum, S., Radler, O., Volkert, R., Glet, U., Ströhla, T., Baumbach, J., Kallenbach, E.: *Improving the Controllability of Electromagnets by Measurement of Psi-I-delta-Characteristics*, 6th Polish-German Workshop on Mechatronics 2007 "System Integration". Ilmenau

Ströhla, T., Birli, O., Rosenbaum, S., Beier, M.: *Present Issues in the Design of Solenoids using Circuit Models*, 6th Polish-German Workshop on Mechatronics 2007 "System Integration". Ilmenau

Theska, R., Erbe, T., Król, J., Ströhla, T., Rosenbaum, S., Brauer, N., Räumschüssel, E., Keilig, R.: *Entwurfsmethodiken und Entwurfstools*, öffentliches Projektstatusseminar VERDIAN 2007

Zöppig, V., Kallenbach, M.: *Miniaturventiltechnik*, öffentliches Projektstatusseminar VERDIAN 2007

2008:

Dittrich, L., Kallenbach, M., Hoffmann, M.: *MiniMags - Microtechnical Challenges Miniaturizing Electromagnetic Valves*, Smart Systems Integration 2008, Barcelona, Spanien, April 2008

Hoffmann, M., Kallenbach, M., Neumann, K., Herrig, M., Zöppig, V., Dittrich, L.: *Resonant Ultra Low-power Valve with High Nominal Width*, Actuator 2008, Bremen, Germany, Juni 2008

Dittrich, L., Kallenbach, M., Bonitz, B., Mache, T., Hoffmann, M.: *Heterogeneous Actuator Integration for Miniaturized Low-Power Magnetic Valves*, Actuator 2008, Bremen, Germany, Juni 2008

Erbe, T., Król, J., Ströhla, T., Theska, R.: *Selection of precision actuators by novel function-structure-correspondences*, ASPE 2008, Portland USA 2008

- Erbe, T., Król, J., Theska, R.: *Mineral casting as material for machine base frames of precision machines*, ASPE 2008, Portland USA 2008
- Erbe, T., Theska, R., Król, J.: *Design Guidelines for Mineral Casting as a Material for Base-Frames of Precision-Machines*, IWK 2008, Ilmenau 2008
- Erbe, T., Król, J., Ströhla, T., Theska, R.: *Function-Structure-Database for Selection of Gearless Drives*, IWK 2008, Ilmenau 2008
- Ströhla, T., Rosenbaum, S., Radler, O., Beier, M.: *Progress in the Design of Low Power and Fast Acting Solenoids*, Actuator 2008, Bremen, Germany, Juni 2008
- Radler, O., S. Rosenbaum, T. Ströhla, E. Kallenbach, A. Gadyuchko, U. Kucera, J. Baumbach, V. Zöppig, T. Rausch, K.-H. Wittig: *Influence of Magnetic Materials on the Function of Electromagnetic Actuators*, Actuator 2008, Bremen, Germany, Juni 2008
- Ströhla, T., Rosenbaum, S., Beier, M., Hüfner, T.: *Anwendung von Netzwerkmodellen im Entwurf elektromagnetischer Antriebe*, Internationales Mechatronik-Kolloquium "Mechatronik 2008", Novotscherkassk/Russland, 18.-20.06.2008.
- Rosenbaum, S., Kallenbach, E.: *Resonanzaktoren - Schnellwirkende Magnetantriebe - Möglichkeiten und Grenzen*, 1. Ilmenauer Magnettag, Ilmenau, Juni 2008
- Ströhla, T.: *Verhaltensoptimierung von Magnetsystemen mit Empfindlichkeitsbetrachtungen*, 1. Ilmenauer Magnettag, Ilmenau, Juni 2008
- Rosenbaum, S., Radler, O., Hüfner, T., Ströhla, T.: *Issues in the Design of Electromagnetic Actuators Using Circuit Models and Hysteresis Simulation*, 2008 ASME International Design Engineering Technical Conferences (IDETC) and Computers and Information in Engineering Conference (CIE), 03.-06.08.2008, Brooklyn, NY, USA
- Kallenbach, E., Baumbach, J., Zöppig, V., Neumann, K., Rosenbaum, S., Kallenbach, M.: *Magnetische Resonanzaktoren - Aufbau, Wirkungsweise, Alleinstellungsmerkmale, Anwendungsfelder*, Steinbeis tag 2008, Stuttgart, September 2008
- Hüfner, T., Ströhla, T.: *Automated Identification of the Jiles-Atherton-Modell Parameters*, IWK 2008, Ilmenau 2008
- Lars Dittrich, Martin Hoffmann für AG SVMA: *Aktuelle Entwicklung auf dem Gebiet der Schnellschalt- und Mikroventile*, öffentliches Projektstatusseminar VERDIAN 2008
- L. Dittrich, M. Kallenbach, T. Mache, M. Hoffmann: *Minimags – Miniaturized Electromagnetic Valves*, ZMN-Jahresbericht 2007, Ilmenau 2008
- Mache, T., Dittrich, L., Kallenbach, M., Jakob, Chr.: *Herstellung von Mikroventilbauteilen für magnetische Mikrodirektantriebe*, ZVO Oberflächentage Würzburg 2008
- Dittrich, L., Kallenbach, M., Bonitz, B., Mache, T., Hoffmann, M.: *Batch-Capable Fabrication Approach for a Highly Efficient Miniaturized Magnetic Valve*, IWK 2008, Ilmenau 2008

Erbe, T., Król, J., Hüfner, T., Rosenbaum, S., Ströhla, T.,

Theska, R.: *Weiterentwicklung von Entwurfsmethodiken für mechatronische Systeme*, öffentliches Projektstatusseminar VERDIAN 2008

Räumschüssel, E.: *Model-Based Control Design of a Flat Modular Linear Stepping Motor*, IWK 2008, Ilmenau 2008

Keilig, R.: *Design of a linear permanent magnet motor*, IWK 2008, Ilmenau 2008

2009:

Mache, Th., Jakob, Chr., Dittrich, L., Hoffmann, M.: *Herstellung von funktionsintegrierenden Galvanowerkstoffen mit maßgeschneiderten Eigenschaften für Mikrodirektantriebe*, MST Kongress Berlin 2009

Dittrich, L., Mache, Th., Hoffmann, M.: *Batch-taugliche Fertigungsansätze für feinwerktechnische Systemkomponenten*, Chemnitzer Fachtagung Mikrosystemtechnik 2009

Th. Mache, M. Fritz, L. Dittrich, Chr. Jakob, P. Kutzschbach: *Herstellung von funktionsintegrierenden Galvanowerkstoffen mit maßgeschneiderten Eigenschaften für Mikrodirektantriebe*, ZVO Oberflächentage Bremen 2009

Erbe, T.; Rosenbaum, S.; Krol, J., Ströhla, T.; Theska, R.: *Ergebnisse der Arbeitsgruppe Entwurfsmethodik für mechatronische Systeme*, öffentliches Projektstatusseminar VERDIAN 2009

Erbe, T., Frank, A., Spiller, F., Theska, R.: *Strukturauswahl von Positioniersystemen durch Betrachtung der Funktionstopologie*, Mechatronik 2009, Komplexität beherrschen. Tagung Wiesloch 12./13.05.2009. Tagungsbericht. Düsseldorf: VDI-Wissensforum GmbH

Rosenbaum, S., O. Radler, T. Hüfner, T. Ströhla, H. Haase, B. Kärcher: *Mechatronischer Entwurf energieeffizienter Ventiltriebe*, Mechatronik 2009, Komplexität beherrschen. Tagung Wiesloch 12./13.05.2009. Tagungsbericht. Düsseldorf: VDI-Wissensforum GmbH, 11-19

Werner, M., T. Ströhla: *Aspekte beim Entwurf hochdynamischer Elektromagnete*, Internationales Mechatronik-Kolloquium "Mechatronik 2009". Süd-Russische Staatliche Technische Universität Novotscherkassk, 10./11.06.2009

L. Dittrich für AG SVMA: *Aktuelle Entwicklung auf dem Gebiet der Schnellschalt- und Mikroventile*, öffentliches Projektstatusseminar VERDIAN 2009

L. Dittrich: *VERDIAN - Vorarbeiten zum Projekt BatchMag*, BatchMag - 1. Workshop, Ilmenau 2010

B. Goj, L. Dittrich, S. Rosenbaum, T. Erbe, M. Hoffmann: *High Precision Test Device for Calibration of Miniaturized Three-Dimensional Magnetic Sensors*, Mechanika 2010, Kaunas, Litauen, 2010

B. Goj, L. Dittrich, T. Erbe, S. Rosenbaum, I. Koch, K.-H. Drüe, T. Ströhla, M. Hoffmann: *Radially Magnetized Permanent Magnets for Miniaturized Low-Power Magnetic Valves*, Actuator 2010, Bremen (zum Zeitpunkt der Berichterstellung eingereicht und angenommen aber noch nicht veröffentlicht)

T. Erbe, S. A. Emam, T. Ströhla, Chr. Weber: *Actuator selection during the design process*, Mechanika 2010, Kaunas, Litauen, 2010