Forschungsverbundprojekt
„Entwurf und Modellierung von Antriebssystemen für die Mikrosystemtechnik“
MODAN
www.modan.org

Abschlußbericht des Teilprojektes
„Entwicklung von neuartigen Mikroantrieben unter Ausnutzung weiterentwickelter Entwurfsmethoden und Tools, Unterstützung der Erarbeitung verbesserter Modelle und Programmmodule“
des STZ Mechatronik Ilmenau

Verbund-Nr.:	V2285
Fördermittelgeber:	BMBF
Projektträger:	VDI/VDE-IT Teltow
Betreuer:	Dipl. - Ing. Chr. Breckenfelder / Dipl. - Ing. S. Krüger

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzdarstellungen ... 3
1.1 Aufgabenstellung ... 3
1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens ... 3
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens ... 3
1.4 Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand ... 4
1.4.1 Für das Vorhabens genutzte bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte ... 4
1.4.2 Verwendete Fachliteratur, genutzte Informations- und Dokumentationsdienste ... 4
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen ... 5
2 Eingehende Darstellungen ... 6
2.1 Projektziel ... 6
2.2 Projektdurchführung ... 6
2.3 Erzielte Ergebnisse ... 12
2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen ... 13
2.5 Bekanntgewordene Fortschritte bei anderen Stellen ... 13
2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse ... 13
3 Fortschreibung des Verwertungsplans ... 13

Anlage 1: Übersicht der berechneten Magnetformen

1 Kurzdarstellungen

Die Entwickler und Produzenten elektromagnetischer Antriebe, insbesondere kleine und mittlere Unternehmen erwarten die Schaffung anwendungsfreundlicher und damit leicht nutzbarer rechnergestützter Modellierungs-, Simulations- und Entwurfstechniken für die Entwicklung von Antrieben, Antriebskomponenten und Fertigungseinrichtungen, die nach dem magnetischen Wirkprinzip arbeiten. Mit dem Projekt soll demonstriert werden, dass die Durchgängigkeit des rechnergestützten Systementwurfes über alle Entwurfsebenen für diesen Bereich möglich ist. Damit sind die Vorteile des effizienten Einsatzes produktgruppenspezifisch aufbereiteter Tools anhand des Entwurfes konkreter Zielprodukte aus dem Bereich Antriebstechnik/ Aktuatorik nachgewiesen.

1.1 Aufgabenstellung

Ziel ist es, neuartige Antriebe unter Ausnutzung weiterentwickelter Entwurfsmethoden und Tools zu entwickeln. Daraus ergeben sich folgende Teilaufgaben:

- Erarbeitung neuer Antriebsprinzipien
- Entwurf ausgewählter Antriebsstrukturen mit vorhandenen Entwicklungswerkzeugen
- Auswahl geeigneter Antriebsstrukturen (Grob- und Feindimensionierung)
- Bewertung der eingesetzten Entwicklungswerkzeuge und Ableitung von Überarbeitungsanforderungen
- Simulation des gewählten Antriebes als Gesamtsystem
- Berechnung und Konstruktion eines Demonstrators und der für seine Funktion erforderlichen Komponenten (Leistungsstellglied, Steuer- und Regeleinheit)
- Bau eines kompletten Labormusters zum Funktionsnachweis und zur Evaluation der Simulationsergebnisse

1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

Voraussetzung für die Durchführung der Arbeiten im STZ sind die bei MAHLE durchgeführten Arbeiten zum Lufttaktventil. Die Kenntnis von Funktion und Parametern des Lufttaktventils sind wichtige Bestandteile der präzisierten Aufgabenstellung für das STZ. Das Entwicklungstool SESAM wurde durch die TU Ilmenau als Betaversion zur Verfügung gestellt und im Verlauf des Projektes weiterentwickelt.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

In Absprachen mit MAHLE wurden die Arbeiten in drei Arbeitspakete eingeteilt:

1. Konzeptauswahl des Aktorprinzips, Grob- und Feindimensionierung des Antriebes
2. Aufbau eines ersten Prototyps mit entsprechender Elektronik und Ansteuerungssoftware für den Motorbetrieb

   Verifikation der Parameter, Anpassung an Motorbedingungen
3. Berechnung und Aufbau eines zweiten Prototyps (optimierte Variante von Prototyp I) mit entsprechender Elektronik und Ansteuerungssoftware

1.4 Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand

1.4.1 Für das Vorhabens genutzte bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte

Als Basis für die Entwicklung dienten die Patente zum Lufttaktventil von Dr. Schatz (z.B. Patent DE 37 37 828 (1987) und Patent 43 08 931 (1993). Die Firma MAHLE hat mit dem Erfinder einen Exklusiv-Nutzungsvertrag abgeschlossen. Konstruktive Vorlagen oder angewandte Verfahren gab es auf Grund der Innovation der Produktidee nicht.

1.4.2 Verwendete Fachliteratur, genutzte Informations- und Dokumentationsdienste

[1] Schatz O.: Patent DE 4308931 (1993) „Lufttaktventil“

[2] Schatz O.: Patent DE 3737828 (1987) „Gesteuertes Rückschlagventil“

[3] Elsäßer A., et al.: Impulsaufladung und Laststeuerung von Hubkolbenmotoren durch ein Lufttaktventil. MTZ 2001, Nr. 12

[4] Schneider, E., Scholten, L., Wallrafen, W., Zentgraf, M.: Ein integriertes Saugmodul zur Anwendung der Impulsaufladung in der Großserie. Tagung 12. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2003

[5] Findeisen, H., Linhart, J., Wild, S.: Development of an Actuator for a Fast Moving Flap for Impulse Charging. SAE-Paper 2003-01-0402, 2003

[6] Elsäßer, A., Schilling, W.; Schmidt, J.; Kallenbach, E.; Beyer, F.: Schnelle magnetische Aktoren für die Impulsaufladung von Hubkolbenmotoren. 47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau, 2002

[7] Klüting, M., et al.: Drosselfreie Laststeuerung mit vollvariablen Ventiltrieben. MTZ 1999, Nr. 7/8

[8] Kallenbach, E.; Kucera, U.: Mechatronische Ventilantriebe für Gaswechselventile. Mechatronik workshop Düsseldorf 2004

[9] Kallenbach, E.; Beljajev, N.; Kallenbach, M.; Saffert, E.: Fast Acting Magnetic Drives For Automotive Applications. Proceedings ACTUATOR Bremen 2004

[10] Kallenbach, M.; Beyer, F.; Baumbach, J.; Keilig, R.; Kallenbach, E.: Grenzen der Schnellwirkung von Antriebssystemen mit stark nichtlinearen Magnetaktoren. Probleme der Mechatronik 2003 Novocerkassk, Russland

[11] Pischinger, S.: Variable Ventilsteuerung II. Expertverlag Renningen 2004

[12] Patent: DE 103 32 489 A1, „Verfahren zum Anschwingen einer elektromagnetischen Stelleinrichtung“

[13] VDI: VDI 2206 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, 2004

[14] Patentanmeldung: Aktenzeichen 10 2005 011 227.7 „Verfahren und Vorrichtung zum Ermitteln von magnetischen Kenngrößen“

[15] Baumbach, J., Glet, U.: Poster MagHyst, Kleinmaschinenkolloquium, TU Ilmenau, 10./11. März 2005

[16] Baumbach, J.: Poster MagHyst, Automobilkongress mit begleitender Fachausstellung, 26. Mai 2005, Messe Erfurt

[17] Dingelstadt, R.; Elsäßer, A.; Schilling, W.; Schmidt, J.; Kallenbach, E.; Beyer, F.; Baumbach, J.; Otto, R.; Kucera, U.: Modellbasierte Optimierung von

Magnetantrieben für Lufttaktventile. VDI-/VDE-Mechatroniktagung, Wiesloch, 1./2. Juni 2005

[18] Kallenbach, E.: Der Gleichstrommagnet. Verlag Geest & Portig KG Leipzig 1969

[19] Kallenbach. E.; Bögelsack, G.: Gerätetechnische Antriebe. Carl Hanser Verlag München Wien 1991

[20] Kallenbach, E., Eick, P., Quendt, P.: Elektromagnete, B.G. Teubner Verlag Wiesbaden 2003

[21] Boll, R.: Weichmagnetische Werkstoffe, Vacuumschmelze GmbH, Hanau 1990

[22] SESAM, Dokumentation, Technischer Universität Ilmenau 2003

[23] Bertram, T., J. Gausemeier, C. Germer, C. Jung, E. Kallenbach, F. Kallmeyer, S. Möhringer, O. Oberschelp, U. Oldendorf, D. Reiners, J. Seuss, J. Wulf und F. Zohm. Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI-Richtlinie 2206. Düsseldorf: VDI.

[24] Elsäßer, A.; Schilling, W.; Schmidt, J.; Dingelstadt, R.; Kallenbach, E.; Beyer, F. Baumbach, J.: Entwurf schnellwirkender magnetischer Aktoren für Lufttaktventile, Statusseminar MODAN, 06.10.2004, Fulda

Für die Patentrecherche wurde die Internetseite des deutschen Patent- und Markenamtes genutzt (http://www.depatisnet.de).

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Arbeiten wurden in enger Zusammenarbeit mit MAHLE International und der TU Ilmenau durchgeführt.

2 Eingehende Darstellungen

2.1 Projektziel

In stark wachsendem Umfang werden für die Betätigung von Ventilen (Einspritzventile, Gaswechselventile, Lufttaktventile) in modernen PKW schnellwirkende magnetische Aktoren mit Schaltzeiten im Bereich von 0.5 bis 3 ms benötigt. Im Mittelpunkt steht der Systementwurf zur Erarbeitung eines mechatronischen Lösungskonzeptes, das besonders die Gesichtspunkte der Schnellwirkung berücksichtigt. Dabei wird gezeigt, dass die frühen Phasen des mechatronischen Entwurfes, die die Auswahl der optimalen Wirkprinzipien der Teilfunktionen unter dem Gesichtspunkt einer späteren Integration umfassen, außerordentlich wichtig sind, besonders wenn man bei dem Entwurf bis an die physikalischen Grenzen gehen muss. Die technische Umsetzung eines solchen Systems stellt infolge der extrem kurzen Schaltzeiten im Bereich von 2 ms bei einem vergleichsweise sehr großen Drehwinkel (45°) zum Öffnen und Schließen des Ansaugquerschnittes eine große Herausforderung dar, die nur mit Hilfe einer mechatronischen Entwicklungsmethodik erreicht werden konnte.

2.2 Projektdurchführung

2.2.1 Realisierung eines magnetischen Resonanzaktors

Systemkritisches Bauelement für das Lufttaktventil ist der elektromagnetische Aktor. Auf Grund des begrenzten Bauraumes, des notwendigen Schaltwinkels, der zu realisierenden Schaltzeit und der Vorgabe der maximal zulässigen Verlustleistung kommt dem effektiven Energiemanagement und einer geeigneten Auswahl des Magnetwerkstoffes eine besondere Bedeutung zu.

Die Anforderungen an den Aktor lauten:

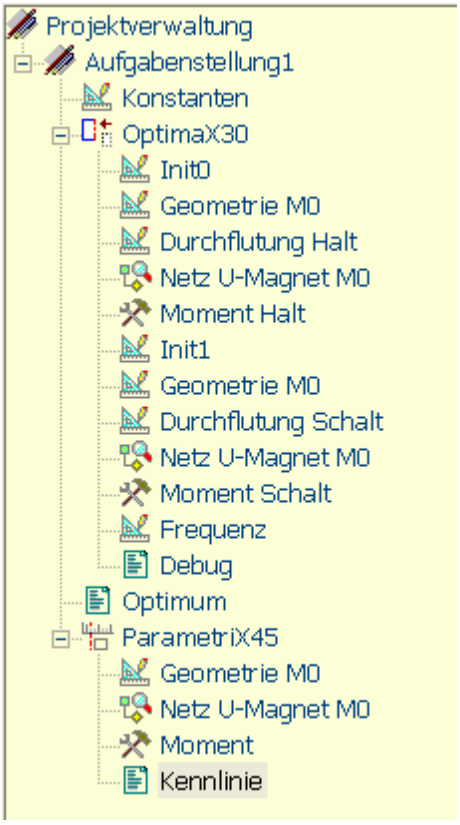
Bewegungsform	rotatorisch, starre Kopplung mit Luftklappe
Bewegungsablauf	wechselsinnig mit steuerbaren Rastzeiten
Lebensdauer	sehr hoch, trotz rauer Umgebungsbedingungen
Direktantrieb	gute Anpassung an das Wirkelement
Steuer-/Regelbarkeit	gut, z.B. zur Realisierung von „Soft-Landing“.

Für den Anker bedeutet das:

konstruktiv	drehachsnahe Position, minimale radiale Ausdehnung, maximal zulässige axiale Ausdehnung, „Leichtbauweise“, geringe Eisenweglänge
magnetisch	Nutzung von Werkstoffen mit sehr hohen magnetischen Flussdichten und hohem spezifischen elektrischen Widerstand
mechanisch	Nutzung von Werkstoffen mit hoher Festigkeit und hoher zulässiger Biegewechselspannung.

Die Forderungen an den Werkstoff für den Magnetanker sind gegenläufig. Werkstoffe, die alle Forderungen gleichermaßen erfüllen, gibt es nicht, so dass ein akzeptabler Kompromiss gefunden werden muss. Höchste magnetische Flussdichten bei mittlerem spezifischen elektrischen Widerstand und niedriger mechanischer Festigkeit werden z.B. durch Relaiseisen oder Eisen-Kobalt-Legierungen erreicht. Hohe mechanische Festigkeiten und spezifische elektrische Widerstände bei geringen magnetischen Flussdichten können z.B. durch korrosionsfeste, legierte, ferritische X-Stähle realisiert werden (Tabelle 1). Die Hauptfunktion der Magnete besteht im leistungsarmen Halten in einer der beiden Endlagen, bei in erster Näherung vernachlässigbarem Restluftspalt. Für diese Funktion spielen die magnetischen Eigenschaften eine besonders große Rolle. Für die Zweitfunktion des Fangens, zur Kompensation von Verlusten (Strömungsverlust, Reibungsverlust), spielen auf Grund der recht großen Luftspalte die magnetischen Eigenschaften nur eine untergeordnete Rolle. In diesem Fall ist eine möglichst hohe Durchflutung notwendig, die jedoch durch die maximal zulässige Verlustleistung bzw. die maximal zulässige Übertemperatur begrenzt wird.

Zur Durchführung der messtechnischen Untersuchungen an Werkstoffproben (BH-Kennlinie für Ringkern oder Stab) sowie an magnetischen Kreisen (Φ–Θ-Kennlinien und Ψ-i-Kennlinien für Magnete oder Motore) wurde der neuartige Messplatz **MagHyst** konzipiert und aufgebaut [14].



Im Weiteren werden unterschiedliche Magnetgrundformen bezüglich ihrer Eignung für die Antriebsaufgabe untersucht. Hierfür wird das gemeinsam an der TU Ilmenau und der Innomas GmbH entwickelte Programmsystem SESAM genutzt. Es beruht auf der magnetischen Netzwerkmethode. Vorteile dieser Vorgehensweise sind die gute Abstraktionsmöglichkeit technischer Gebilde, die vergleichsweise kurze Rechenzeit, welche damit die Möglichkeit zur Untersuchung großer Lösungsräume für Optimierungen bietet. Vorhandene Netzwerkmodelle lassen sich problemlos parametrisieren und erweitern. Am Beispiel des U-Magneten (Bild 2) soll die Vorgehensweise erläutert werden. Die einzelnen Module des Programmsystems müssen je nach Aufgabenstellung (z.B. Dimensionierung, Optimierung, Dynamiksimulation) in geeigneter Weise in einer Baumstruktur angeordnet und seriell abgearbeitet werden (Bild 1).

Bild 1 Baumstruktur in Sesam

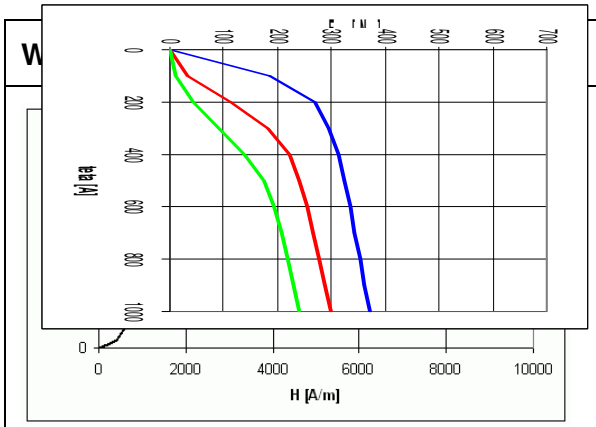
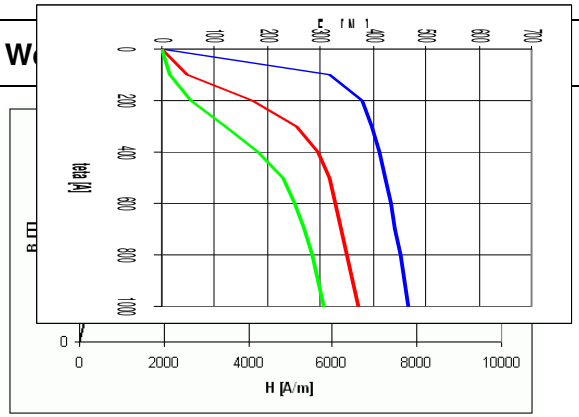
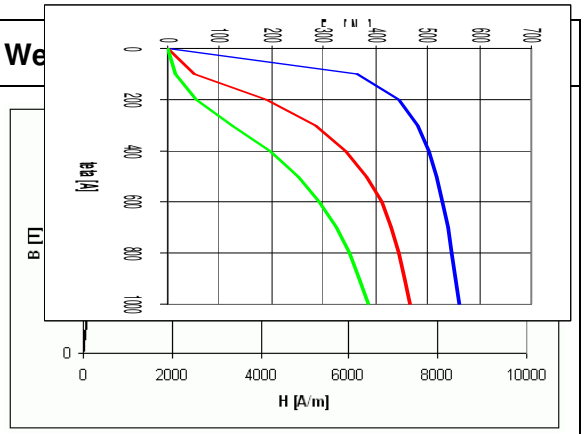
 Werkstoffkennlinie	 Werkstoffkennlinie	 Werkstoffkennlinie
Kraft-Durchflutungs-Kennlinie bei unterschiedlichen Restluftspalten	Kraft-Durchflutungs-Kennlinie bei unterschiedlichen Restluftspalten	Kraft-Durchflutungs-Kennlinie bei unterschiedlichen Restluftspalten
Streckgrenze **hoch**	Streckgrenze **mittel**	Streckgrenze sehr **niedrig**
Spezifischer. elektr. Widerstand **hoch**	Spezifischer. elektr. Widerstand **mittel**	Spezifischer. elektr. Widerstand **niedrig**
Kostenfaktor **mittel**	Kostenfaktor sehr **niedrig**	Kostenfaktor **sehr hoch**

Tabelle 1 Eigenschaften ausgewählter Werkstoffe

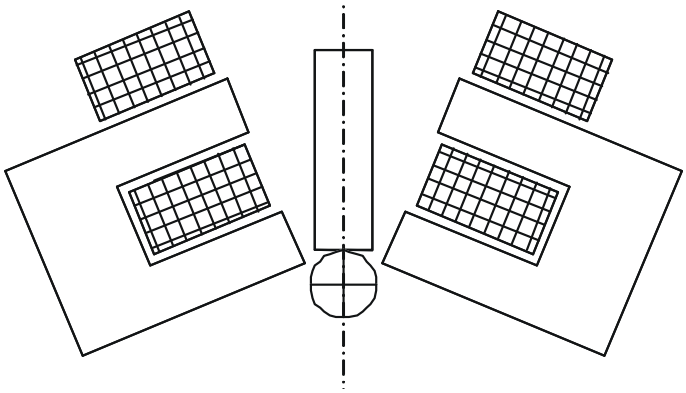


Bild 2 Klappanker- U- Magnet als Antrieb

Im Modul Aufgabenstellung sollten alle Vorgaben für elektrische, magnetische, mechanische und thermische Parameter wie z.B. Bauraumabmessungen, Verlustleistung, Spannung oder Schaltzeit abgelegt werden. Mathematisch-physikalische Konstanten (π, μ_0) werden im Modul Konstanten hinterlegt. In OptimaX30 werden nach Festlegung der Optimierungsstrategie die Laufvariablen mit oberer und unterer Grenze, das Optimierungsziel (Maximierung bzw. Minimierung bestimmter Parameter) und die Restriktionen definiert. Nach einer Visualisierung der Geometrie wird ein Netzwerk aus Spulenelementen, nichtlinearen magnetischen Widerständen, linearen Luftspalt- und Streuflusswiderständen aufgebaut.

Während der Netzwerkgenerierung werden die Ergebnisse aus SESAM ständig mit den Ergebnissen aus FEM-Simulationen (MAXWELL) validiert. Das Netzwerk sollte so gestaltet sein, dass die Geometrie der einzelnen Elemente durch einfache geometrische Körper im Modul Geometrie M0 beschrieben werden kann. Im Gegensatz zu den magnetisch leitfähigen Eisenteilen ist die Geometrie der Streufluss- und Luftspaltwiderstände vor allem bei hohen Durchflutungen schwieriger zu beschreiben.

Die Werkstoffdaten sind in einer Datei hinterlegt, Die Daten der Geometrie können als Konstante, als berechneter Parameter oder als Laufvariable vorgegeben werden.

Im Ergebnis der Optimierung werden die Hauptabmessungen, die Momenten-Winkel-Kennlinien sowie die Momenten-Durchflutungs-Kennlinien ausgegeben. Für 12 unterschiedliche Bauformen (neutrale bzw. polarisierte U-Magnete, E-Magnete, Drehmagnete, elektrodynamische Antriebe) wurden unter Beachtung der Randbedingungen erstens die Grenzwerte für die kürzeste Schaltzeit (höchste Schaltfrequenz) und zweitens die Grenzwerte für gutes Fangverhalten berechnet. Die minimal erreichbaren Schaltzeiten der einzelnen Bauformen variieren um den Faktor 6. Der Bewertungskoeffizient für „gutes Fangen“ variiert um den Faktor 5. In Tabelle 2 sind ausgewählte Bauformen mit den dazugehörigen Momenten-Winkel-Kennlinienfeldern dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich bei gleichen Randbedingungen das Fangverhalten der einzelnen Aktoren deutlich unterscheidet.

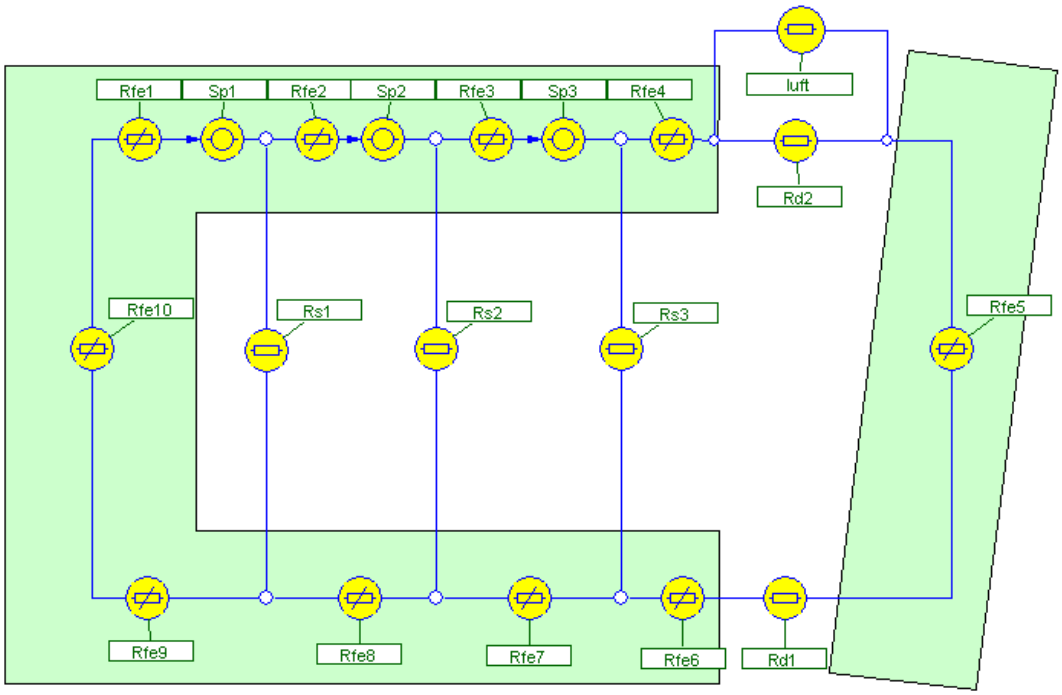
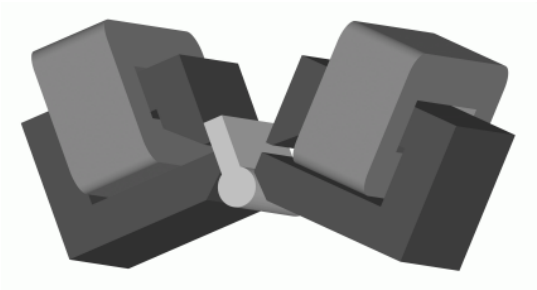
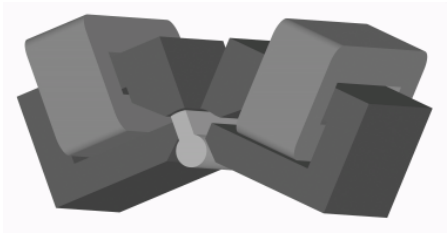
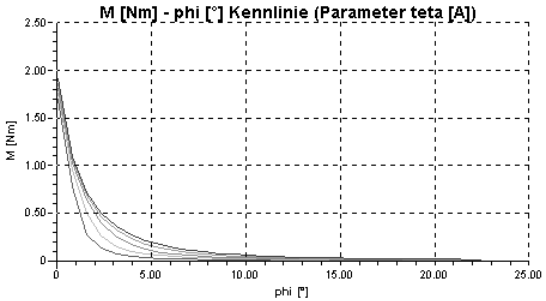
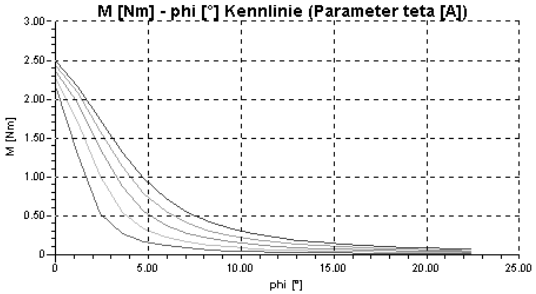
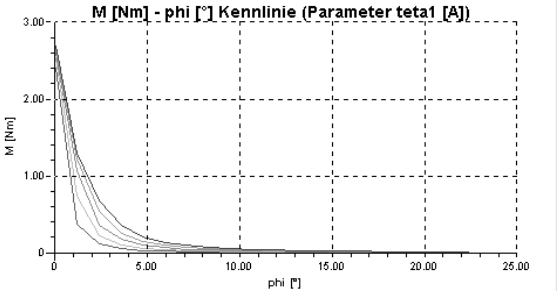


Bild 3 Netzwerkmodell für einen U-Magnet

Nach der Optimierung der Hauptabmessungen wurde die favorisierte Bauform konstruktiv an das Wirkelement und das Gehäuse angepasst und mittels FEM-Simulation nachgerechnet. In dieser Phase der Projektbearbeitung sollten nur noch kleine Änderungen an den funktionsrelevanten Bauteilen vorgenommen werden. Sonst ist eine erneute Grobdimensionierung mit veränderten Randbedingungen mit SESAM entsprechend dem V-Modell [23] ratsam. Der bisherige Entwicklungsprozess ist durch eine quasistationäre Grob- bzw. Feindimensionierung mit teilweise dynamischen Kennwerten gekennzeichnet. Im Folgenden sollen für die mittels FEM berechnete Bauform dynamische Untersuchungen durchgeführt werden, welche nicht nur die Nennwerte der Randbedingungen sondern auch deren Extremwerte berücksichtigen. Ein Modell der elektro-magneto-mechanischen Energiewandlung ist in MATLAB-SIMULINK aufgebaut. Nach ersten Simulationen konnte festgestellt werden, dass z.B. die durch die minimal zulässige Umgebungstemperatur von t_U = -25°C resultierenden Widerstands- und Federmomentänderung das Feder-Masse-System soweit verstimmen, dass ein zeitgesteuertes Anschwingen nicht mehr möglich ist Bild 4.

Tabelle 2 Ausgewählte Bauformen bei geleichen Randbedingungen

Bauform UM5	**Bauform UM8**	**Bauform EM1**
		
		
Bauform eignet sich besonders zur Realisierung:		
niedriger Federraten	guten Fangens	kurzer Schaltzeiten
Vorteile:		
• *geforderte Frequenz wird erreicht*	• geforderte Frequenz wird erreicht • Kennlinienbeeinflussung	• geforderte Frequenz wird erreicht • Spulen einfach montierbar • symmetrische Last
Nachteile:		
• *unsymmetrische Last* • *aufwendige Spulentechnologie* • *Anschlag*	• *unsymmetrische Last* • *aufwendige Spulentechnologie* • *Anschlag*	• *Anschlag*

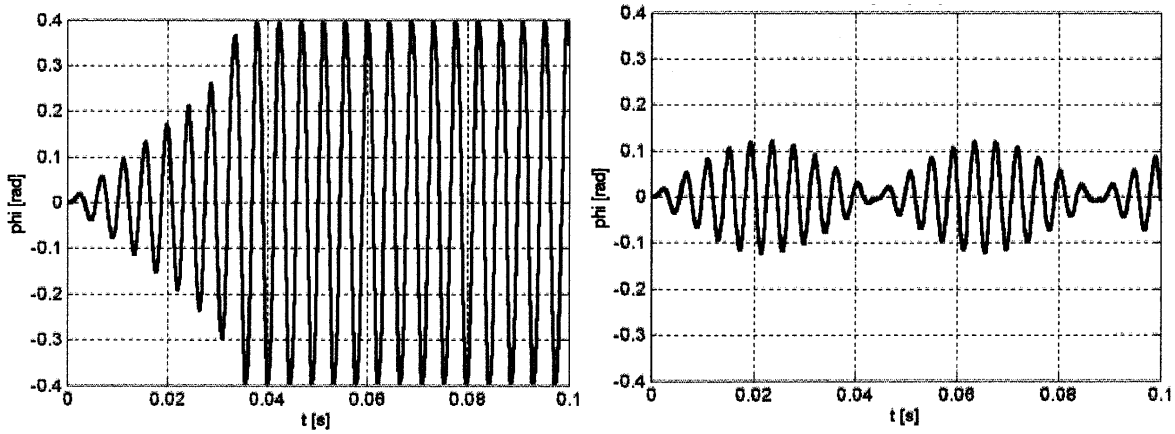


Bild 4 Anschwingvorgang bei Nennwerten (links) und bei Extremwerten (rechts)

Aufgrund dieser Simulationsergebnisse konnte schon vor Beginn der Laborversuch ein Verfahren zum Anschwingen mit veränderlicher Ansteuerfrequenz entwickelt und patentiert werden [12]. Dieses Verfahren ermöglicht auch bei extremen Umgebungsbedingungen ein sicheres Anschwingen der Lufttaktventile. Basierend auf den Ergebnissen der theoretischen Untersuchungen sind Labormuster aufgebaut und am Motor untersucht worden.

2.3 Erzielte Ergebnisse

Die umfangreichen Untersuchungen der einzelnen Modelle mit dem Programmsystem SESAM haben zu einer Reihe von Verbesserungsvorschlägen für die Weiterentwicklung des Programms geführt. In Zusammenarbeit mit der TU Ilmenau, wurden auftretende Probleme besprochen und von Seiten der TU Ilmenau behoben. Es konnten verschiedene Funktionen in das Programm implementiert und die Gebrauchsfähigkeit erhöht werden. Auch die Richtigkeit der berechneten Daten konnte bestätigt werden. Die Ergebnisse der einzelnen Berechnungen wurden mit den Ergebnissen aus FEM - Rechungen mit MAXWELL verglichen.

Eine Vielzahl von Bauformen wurde als Netzwerk implementiert und dient nun als Wissensbasis für weitere Arbeiten (Siehe Anlage 1).

Ziel der Untersuchungen war es, besonders hochdynamische Antriebe für die Bewegungsaufgabe zu finden. Herauskristallisiert haben sich dabei die Bauformen U-Magnet und E-Magnet. Diese wurden genauer experimentell untersucht. Diese Untersuchungen wurden teilweise im STZ und teilweise bei MAHLE durchgeführt. Die Fertigung der Funktionsmuster (Laserschneiden, Glühen, Schweißen, Spulen wickeln) konnte größtenteils über ortsansässige Firmen abgewickelt werden.

Die benötigten Endstufen und Ansteuerelektroniken wurden im STZ entwickelt und aufgebaut. Erste Laboruntersuchungen ohne Störkräfte wurden im STZ durchgeführt. Spezielle Untersuchungen am Motorprüfstand (Schleppprüfstand, Befeuerter Motor) fanden bei MAHLE statt (siehe auch Teilbericht MAHLE).

Die Aktoren UM0, UM5, UM8 und E-Magnet erfüllen die dynamischen Randbedingungen. Aus technologischen Gründen wurde der Antrieb UM0 ausgewählt.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen

Die gesammelten Erfahrungen bei der Modellerstellung mit dem Programmsystem SESAM sind bei der Weiterentwicklung und Anpassung des Programmsystems eingeflossen.

Das bei den Arbeiten im STZ gewonnene KnowHow kann auch für zukünftige Arbeiten genutzt werden. Dies betrifft vor allem die Bereich Antriebstechnik, Optimierung von Antrieben (Optimierungsstrategien) und Elektronikentwicklung.

Die technische Verwertung der Ergebnisse erfolgt bei MAHLE. Motorversuche wurden bereits von einzelnen Automobilherstellern erfolgreich durchgeführt. Eine Großserie kann jedoch frühestens im Jahr 2010 anlaufen.

2.5 Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen

Keine

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die folgenden Schutzrechte wurden gemeinsam von Mahle International GmbH bzw. Mahle Filtersysteme GmbH und STZ Mechatronik erarbeitet und angemeldet.

„Verfahren zum Anschwingen einer elektromagnetischen Stelleinrichtung“

Aktenzeichen: DE 103 32 489.5

„LTV-Magnetantrieb“

Aktenzeichen: PCT / DE 02 / 02992

„Verfahren zum Betätigen einer elektromagnetischen Stelleinrichtung“

Aktenzeichen: DE 103 15 585.6

„Verfahren zum Betätigen einer elektromagnetischen Stelleinrichtung“

Aktenzeichen: DE 103 15 584.8

„Elektromagnetischer Stellantrieb“

Aktenzeichen: DE 103 35 516

„Elektromagnetischer Stellantrieb“

Aktenzeichen: 10 2004 037 360.4

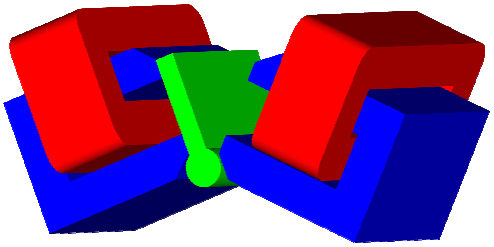
Veröffentlichungen siehe Punkt 1.4.2: [6], [15], [16], [17], [24]

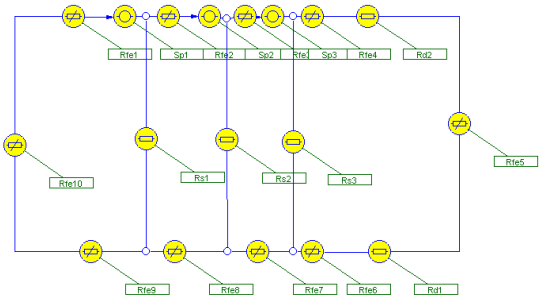
3 Fortschreibung des Verwertungsplans

Das STZ Mechatronik ist nicht Endnutzer der Ergebnisse. Die Verwertung der Ergebnisse erfolgt bei auch MAHLE bzw. an der TU Ilmenau.

Anlage 1: Übersicht der berechneten Magnetformen

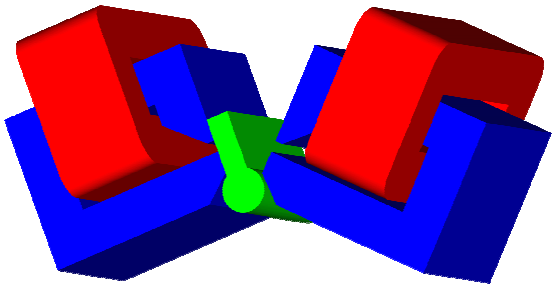
U-Magnet UM0

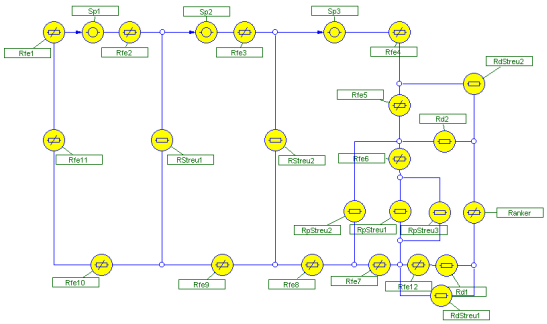




Vorteile	*Nachteile*
- geforderte Frequenz wird erreicht *- Spulen einfach montierbar* *- optimiert auf gute Steuerbarkeit*	*- unsymmetrische Last* *- Anschlag*

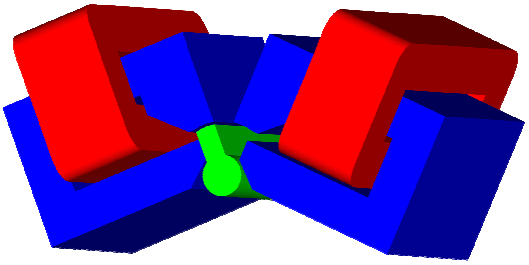
U-Magnet UM5

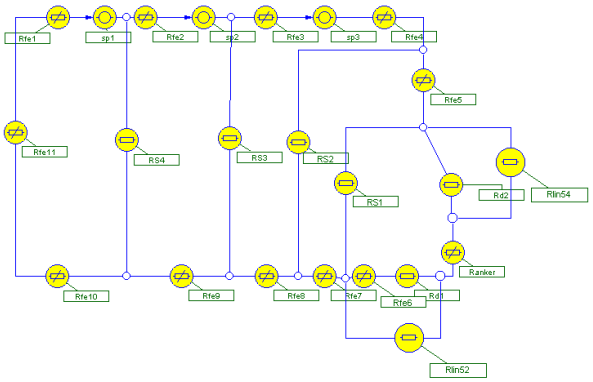




Vorteile	*Nachteile*
- geforderte Frequenz wird erreicht *- optimiert auf gute Steuerbarkeit* *- Geringste Federkonstante*	*- unsymmetrische Last* *- aufwändige Spulentechnologie* *- Anschlag*

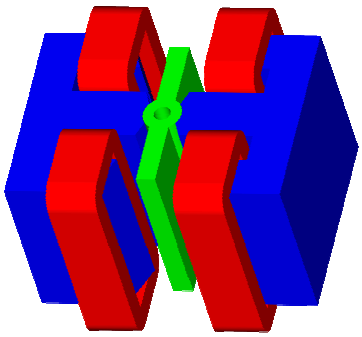
U-Magnet UM8

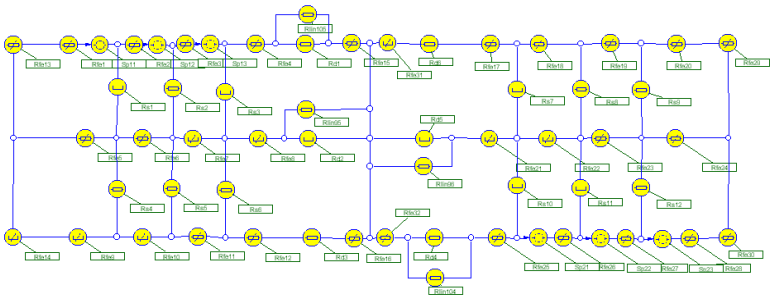




Vorteile	*Nachteile*
- geforderte Frequenz wird erreicht *- Kennlinienbeeinflussung* *- optimiert auf gute Steuerbarkeit*	*- unsymmetrische Last* *- Anschlag* *- aufwändige Spulentechnologie*

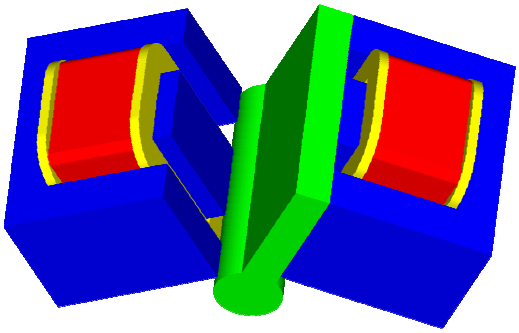
E-Magnet EM1

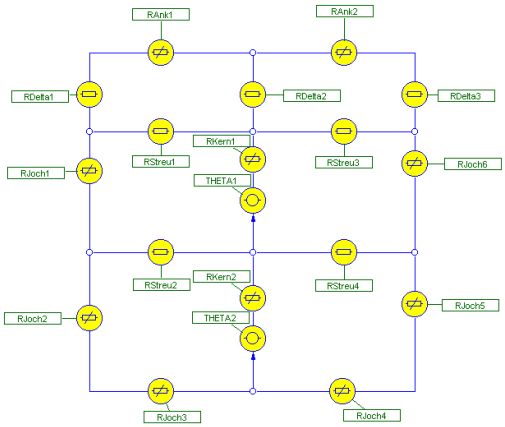




Vorteile	*Nachteile*
- geforderte Frequenz wird erreicht *- Spulen einfach montierbar* *- symmetrische Last*	*- hohe fertigungstechnische Präzision erforderlich* *- Anschlag*

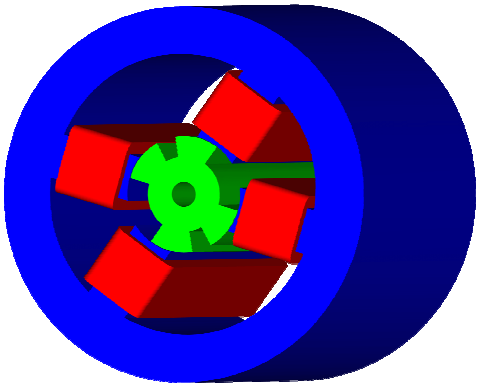
E-Magnet EM2

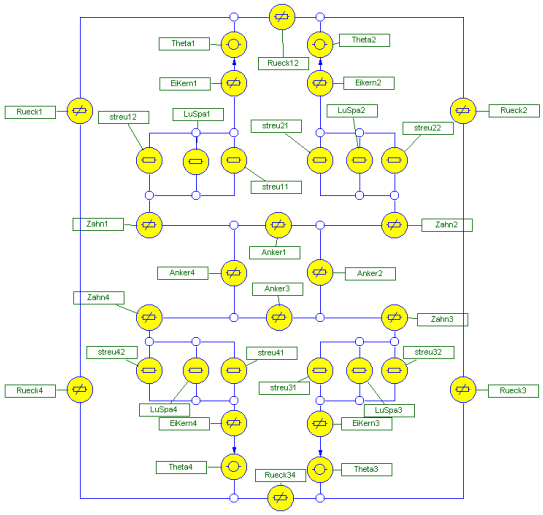




Vorteile	*Nachteile*
- Spulen einfach montierbar	*- unsymmetrische Last* *- Anschlag* *- geforderte Frequenz wird nicht erreicht*

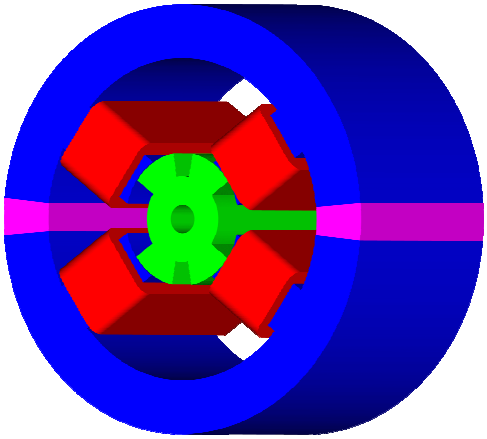
Drehmagnet D1N

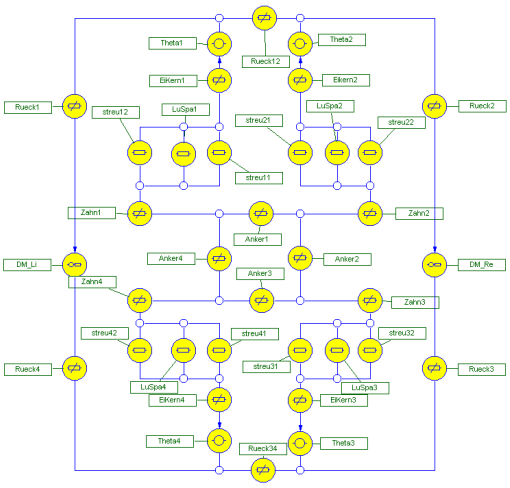




Vorteile	*Nachteile*
- kein Anschlag *- symmetrische Last*	*- geforderte Frequenz wird nicht erreicht* *- aufwändige Spulentechnologie*

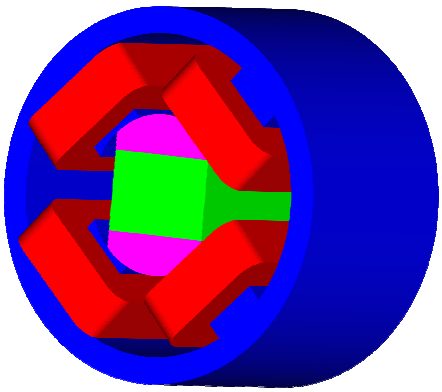
Polarisierter Drehmagnet D1P

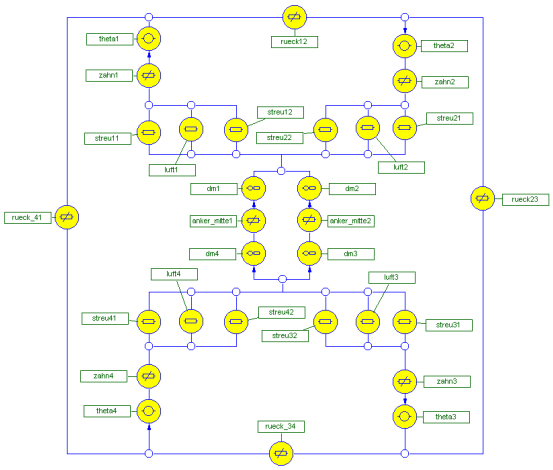




Vorteile	*Nachteile*
- kein Anschlag *- symmetrische Last*	*- geforderte Frequenz wird nicht erreicht* *- Temperaturabhängigkeit und Alterung der Permanentmagneten* *- aufwändige Spulentechnologie*

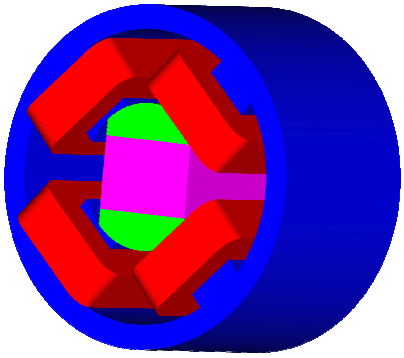
Pol. Drehmagnet D2P

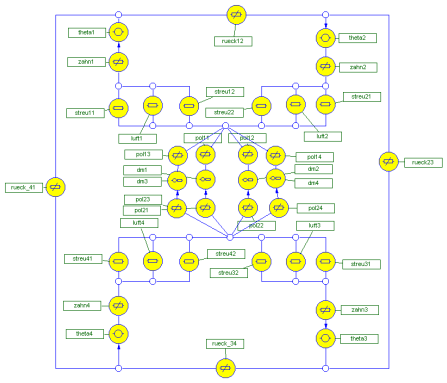




Vorteile	*Nachteile*
- kein Anschlag *- symmetrische Last*	*- geforderte Frequenz wird nicht erreicht* *- Temperaturabhängigkeit und Alterung der Permanentmagneten* *- aufwändige Spulentechnolgie*

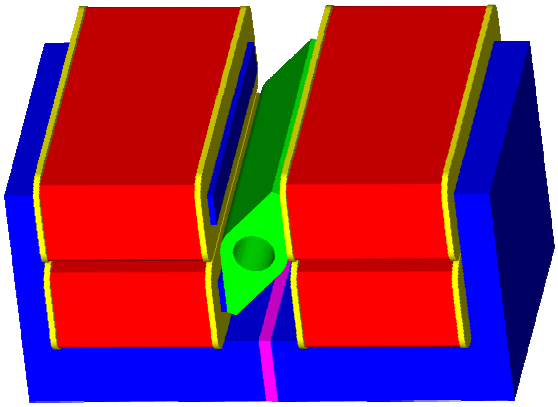
Pol. Drehmagnet D3P

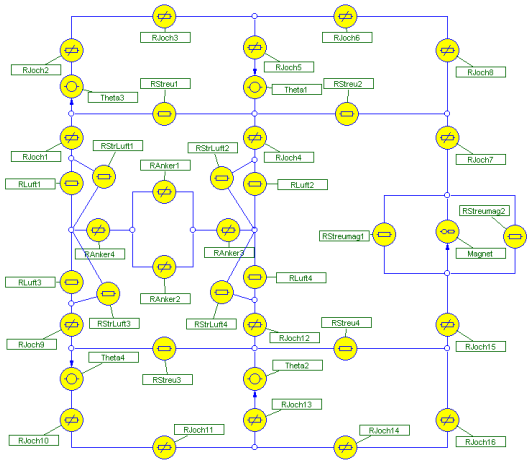




Vorteile	*Nachteile*
- kein mechanischer Anschlag *- symmetrische Last*	*- geforderte Frequenz wird nicht erreicht* *- Temperaturabhängigkeit und Alterung des Permanentmagneten*

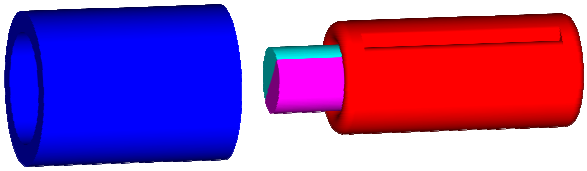
Polarisierter Brückenkreis

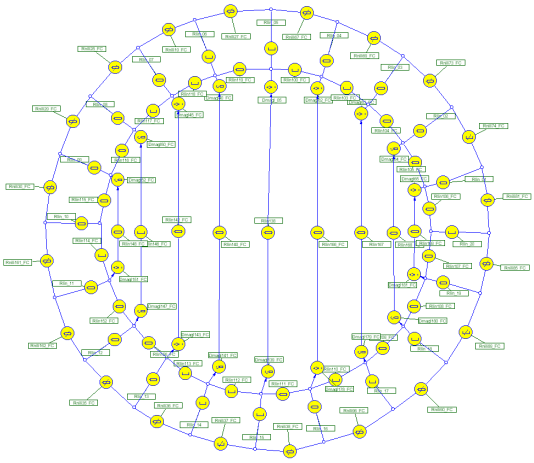




Vorteile	*Nachteile*
- verlustloses Halten *- symmetrische Last*	*- geforderte Frequenz wird nicht erreicht* *- Temperaturabhängigkeit und Alterung der Permanentmagneten* *- hohe fertigungstechnische Präzision an den Polflächen* *- Federkonstante relativ groß* *- Anschlag*

Elektrodynamischer Antrieb





Vorteile	***Nachteile***
- nahezu konstante Kraft *- gut steuerbar* *- kein Anschlag* *- symmetrische Last*	*- geforderte Frequenz wird nicht erreicht* *- Temperaturabhängigkeit und Alterung der Permanentmagneten* *- aufwändige Wicklung*