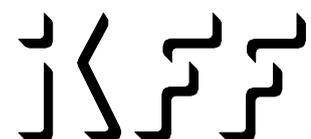


Universität Stuttgart

## **Jahresbericht IKFF 2010**

Institut für Konstruktion und  
Fertigung in der Feinwerktechnik



Herausgeber und Verlag:

Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik  
Pfaffenwaldring 9  
70550 Stuttgart

Tel.: 0711 685-66402

Fax: 0711 685-56402

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe

Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, Februar 2011

## **1 DAS INSTITUT**

- 1.1 Mitarbeiter
- 1.2 Jahresrückblick
- 1.3 Wissenschaftliche Arbeitsgebiete

## **2 LEHRVERANSTALTUNGEN**

- 2.1 Vorlesungen und Übungen für Vordiplom und Bachelor
- 2.2 Vorlesungen und Übungen für Hauptdiplom und Master
- 2.3 Prüfungen
- 2.4 Praktika
- 2.5 Seminar Feinwerktechnik

## **3 WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN, STUDIEN- UND DIPLOMARBEITEN**

- 3.1 Dissertationen
- 3.2 Diplomarbeiten am IKFF
- 3.3 Studienarbeiten am IKFF

## **4 ARBEITSGEBIETE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITER**

- 4.1 Aktorik
- 4.2 Spritzgießen
- 4.3 Zuverlässigkeitstechnik

## **5 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT**

- 5.1 Veröffentlichungen
- 5.2 Gremienarbeit
- 5.3 Tag der offenen Tür

## **6 KONGRESSE, TAGUNGEN UND MESSEN**

## **7 WERKSTATTBERICHT**

## **8 ANHANG - Ausgewählte Veröffentlichungen**



# 1 DAS INSTITUT

## 1.1 Mitarbeiter

### **Institutsleitung:**

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe

### **Emeritus:**

Prof. Dipl.-Ing. Artur Jung

### **Sekretariat:**

Ulrike Ortner

Kornelia Wanner

### **Unbefristeter wissenschaftlicher Mitarbeiter:**

Akademischer Oberrat: Dipl.-Ing. Eberhard Burkard

### **Befristete wissenschaftliche Mitarbeiter:**

Dipl.-Ing. Sebastian Bobrowski

Dipl.-Ing. Matthias Engel (Graduate Student der GSaME)

Dipl.-Ing. Philipp Joerges

Dipl.-Ing. Bastian Keller

Dipl.-Ing. Matthias Maier

Dipl.-Ing. Frank Mochel

Dipl.-Ing. Minh Nguyen (Graduate Student der GSaME)

Dipl.-Ing. Benjamin Reutzsch

Dipl.-Ing. Matthias Ulmer

Dipl.-Ing. Till Zimmermann

Dipl.-Ing. Michael Zülch

### **Modellbau und Versuchswerkstatt:**

Ralf Berwanger

Stefan Schneider

**Wissenschaftliche Hilfskräfte:**

Stefanie Bokesch

Andreas Maucher

Abir Braham

Axel Paul

Hamdi Choubani

Truong Tien Pham

Daniel Horneff

Diana Reiter

Benedikt Janny

Adrian Retzbach

Islem Koobar

Benjamin Reutzsch

Christian Lang

Alexander Scheel

**1.2 Jahresrückblick****Personalia**

Zum Ende des Jahres 2010 wechselten Herr Dipl.-Ing. Joerges und Herr Dipl.-Ing. Zülch nach Abschluss ihrer Promotion planmäßig in die Industrie. Als Nachfolger auf dem Gebiet der Lineardirektantriebe wurden Herr Dipl.-Ing. Reutzsch und auf dem Gebiet Spritzgießen Herr Dipl.-Ing. Maier eingestellt. Hinzu kam als weiterer GSaME-Stipendiat Herr Dipl.-Ing. Nguyen auf dem Gebiet Magnetspritzgießen.

**Aktivitäten in der Lehre**

Ab Oktober 2011 beginnen im Maschinenbau die Masterstudiengänge. Derzeit laufen die Vorbereitungen, um ab Oktober den ersten Bachelorabsolventen Masterstudiengänge anzubieten, unter anderem einen Masterstudiengang Maschinenbau/Mikrotechnik, Gerätetechnik und Technische Optik.

Die Anfängerzahlen im klassischen Maschinenbau sind weitgehend konstant bei 350 Studierenden. Allerdings wurden dafür bei ca. 1100 Bewerbern insgesamt 950 Zulassungen ausgesprochen. Dies zeigt die nach wie vor schwierige Situation mit nicht mehr kalkulierbaren Mehrfachbewerbungen auf.

Insgesamt liegen die regulären Anfängerzahlen aller maschinenbaulichen und verwandten Studiengänge der Universität Stuttgart (ohne Luft- und Raumfahrttechnik) derzeit aber schon bei ca. 1100 Studierenden gegenüber 850 im letzten Jahr, da immer mehr Bachelorstudiengänge hinzukommen (Erneuerbare Energien, Medizintechnik). Die Bachelorstudiengänge sind weitgehend ausgelastet, inklusive freiwilliger Überlast der Fakultät.

In der Konstruktionslehre Feinwerktechnik hatten wir bis zum Sommer 45 Studierende zu betreuen, im Wintersemester sind es 83. Die Bachelor-Lehrver-

anstaltungen konzentrierten sich nach wie vor auf die Fächer Konstruktionslehre Feinwerktechnik III und IV im dritten und vierten Semester als Wahlmöglichkeit für die beiden Bachelorstudiengänge Maschinenbau sowie Fahrzeug- und Motorentechnik. Ein Highlight ist dabei immer wieder der Konstruktionswettbewerb, auf den weiter hinten noch eingegangen wird.

Das Hauptfach Feinwerktechnik in den Diplomstudiengängen ist in diesem Jahr schwächer besucht, da die Diplomstudiengänge auslaufen und die Master noch nicht gestartet sind. Derzeit belegen 14 Studierende das Fach "Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik -" als Pflicht- oder Kernfach. Das Fach wurde umbenannt und an die neuen Bedingungen im Bachelor und späteren Master angepasst. 8 Studierende belegen das Kernfach „Aktorik“. Allerdings hatten wir im vergangenen Jahr mit 20 Studien- und Diplomarbeiten einen enormen Zuspruch in diesem Bereich.

Die Lehrveranstaltungen des Hauptdiploms konzentrieren sich auf die beiden Schwerpunkte Gerätekonstruktion als methodisch orientierte Linie und feinwerktechnische Aktorik als konkret forschungs- und entwicklungsorientierte Linie.

Die Vorlesung „Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik“ behandelt Grundlagen der Entwicklung und Konstruktion feinwerktechnischer Geräte bzw. Systeme. Den Schwerpunkt bilden Themenkreise wie zuverlässigkeits- und sicherheitsgerechte Konstruktion, Genauigkeit, Fehlverhalten und Toleranzrechnung in der Präzisionsgerätetechnik, Lärminderung in der Gerätetechnik sowie Beziehungen zwischen Gerät und Umwelt. Eingeschlossen in die Lehrveranstaltung sind zwei neue praktische Bestandteile zur Einführung in die Koordinatenmesstechnik und zur Zuverlässigkeit.

Die Vorlesung „Aktorik in der Feinwerktechnik - Konstruktion, Berechnung und Anwendung mechatronischer Komponenten“ beleuchtet dagegen ausgewählte Aspekte der Entwicklung und Konstruktion mechatronischer Komponenten und Systeme der Feinwerktechnik. Behandelt werden feinwerktechnische Antriebssysteme unterschiedlichster Wirkprinzipien. Den Schwerpunkt bilden elektromagnetische und elektrodynamische Stelltechnik, piezoelektrische und magnetostriktive Stelltechnik, Magnettechnik und -technologie sowie Beispiele zur Realisierung mechatronischer Lösungen in der Feinwerktechnik.

Unsere weitere Lehrveranstaltung „Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL“ wurde wieder sehr gut angenommen und ist gut ausgelastet. Auch unsere zweite neue Lehrveranstaltung „Praxis des Spritzgießens in der Geräte-

technik; Verfahren, Prozesskette, Simulation“ fand 2010, wenn auch mit kleiner Teilnehmerzahl, wieder statt. Diese Vorlesung wird zukünftig auf den doppelten Umfang (4 SWS) ausgeweitet und den gesamten Komplex Spritzgießen beinhalten.

Die Hauptfachpraktika Ultraschallantriebe, Lineardirektantriebe, Schrittmotoren, Gleichstrommotoren, Koordinatenmesstechnik, FEM-Berechnung mit ANSYS sowie MAXWELL, Spritzgießen inklusive Spritzgieß-Simulation mit Moldflow und Rasterelektronenmikroskopie sind in die Lehrveranstaltungen einbezogen. Mit diesen insgesamt 8 Praktika wurde das Angebot zum praktischen Arbeiten für die Studierenden erheblich erweitert. Die Ausstattung einiger Praktikumsversuche haben deutlich von den Studiengebühren profitiert.

Die Absolventen fanden auch 2010 trotz Krise nach unseren Erkenntnissen ihren Einstieg in die Industrie.

### **Aktivitäten in der Forschung**

Die Entwicklung alternativer Antriebssysteme für die Feinwerktechnik auf der Basis elektrodynamischer Kraftwirkung (elektrodynamische Linearmotoren) bzw. von Festkörpereffekten steht nach wie vor im Mittelpunkt des Arbeitsgebiets **Aktorik**.

Als Schwerpunkt in der Nutzung elektrodynamischer Antriebsprinzipien wurden 2010 die Untersuchungen zu Rastkräften in Lineardirektantrieben abgeschlossen. Darüber hinaus wurden Untersuchungen zum thermischen Verhalten derartiger Antriebe vertieft. Gleichzeitig wurde zur effizienten Realisierung von Kommutierung, Ansteuerung und Regelung die existierende dSPACE-Umgebung mit einer Power Unit weiter ausgebaut und genutzt.

Die Forschungen zur Entwicklung von neuartigen Direktantrieben mit piezoelektrischen Antrieben wurden 2010 ebenfalls fortgeführt. Hier bildet neben der Motorentwicklung und durchgängigen Motorberechnung bzw. -simulation die Realisierung von Ansteuerung und Regelung über eine dSPACE-Entwicklungsumgebung einen Schwerpunkt. Beide Antriebslinien ergänzen und befruchten sich dadurch.

Das Thema **Spritzgießtechnologie** in der Feinwerktechnik bildet einen weiteren Stützpfeiler des Instituts. Nach wie vor werden am IKFF die Entformungskräfte beim Spritzgießen in Abhängigkeit von Oberflächenrauheit und Beschichtung sowie vom eingesetzten Kunststoff untersucht und spezielle Werkstoffe und Beschichtungen für Firmen getestet.

Im Jahre 2010 wurden darüber hinaus die Arbeiten zur variothermen Prozessführung mit integrierten Induktoren und Impulskühlung weiterbetrieben. Ergebnisse dazu sind mehrfach veröffentlicht. Darüber hinaus wurde 2010 ein umfangreiches AiF-Projekt zur Nutzung der induktiven Temperierung bei der Herstellung von Komponenten für Brennstoffzellen und zusätzlich ein größeres Projekt zum Magnetspritzgießen abgeschlossen.

Im Arbeitsgebiet **Zuverlässigkeit feinwerktechnischer Antriebe** stehen derzeit Dauerversuche zur Ermittlung der Ausfalldaten vorzugsweise an Kleingetrieben im Mittelpunkt. Dazu wurde ein gemeinsames DFG-Projekt im Normalverfahren zusammen mit der Universität Hohenheim beantragt.

### 1.3 Wissenschaftliche Arbeitsgebiete

Im Institut werden vier Forschungsschwerpunkte bearbeitet:

Im Arbeitsgebiet **Aktorik** stehen feinwerktechnische Direktantriebe, vorzugsweise für lineare Antriebsbewegungen, im Mittelpunkt. Einen Schwerpunkt bilden elektrodynamische Linearantriebe, deren Berechnung und Simulation. Zusätzlich wurden die Aktivitäten auch auf die Entwicklung von Luftführungen für Linearantriebe erweitert. Neben den elektrodynamischen Systemen bilden piezoelektrische Antriebe einen zweiten Arbeitsschwerpunkt.

Im Arbeitsgebiet **Präzisionsspritzguss** steht die Abformung von Präzisionsbauteilen mit sehr feinen, genauen Strukturen durch Spritzgießen im Vordergrund. Dabei wird neben der Bauteilkonstruktion und dem Formenbau insbesondere der Formfüllvorgang sowohl theoretisch simuliert als auch praktisch an zwei Spritzgießautomaten untersucht. Maßnahmen zur Verbesserung des Füllvorgangs, wie die variotherme Prozessführung durch induktive Formtemperierung, sowie die Erfassung von Entformungskräften bilden gegenwärtig die Arbeitsschwerpunkte. Neuerdings kamen auch Aktivitäten zum Magnetspritzgießen hinzu.

Im Arbeitsgebiet **optische und mechanische Sensorik** standen bisher insbesondere die Verfahren zur integrierten Wegsignalerfassung in elektrodynamischen Linearmotoren mit bewegten Magneten oder auch bewegten Spulen im Mittelpunkt der Arbeiten.

Übergreifend bildet produktbezogene **Konstruktionsmethodik** in der Feinwerktechnik ein viertes Arbeitsgebiet. Schwerpunkte sind hier die konstruktive Gestaltung, die Berechnung von Systemen und die Simulation mit FEM. Dazu zählen auch Magnetfeldberechnungen für Linearantriebe oder die FEM-Analyse von piezoelektrischen Antrieben.

Auch das Arbeitsgebiet **Zuverlässigkeit feinwerktechnischer Antriebe** lässt sich in diesen Problemkreis einordnen. Hier arbeitet das Institut auf dem Gebiet der Zuverlässigkeit von elektromechanischen/mechatronischen Systemen am Beispiel feinwerktechnischer Antriebe/Aktorik. Dadurch wurde Kompetenz in der Zuverlässigkeitstechnik, speziell zur Zuverlässigkeit feinwerktechnischer Antriebe aufgebaut. Dies betrifft sowohl die elektromechanischen als auch die mechanischen Komponenten derartiger Antriebe.

Im Detail werden folgende Inhalte bearbeitet:

#### Feinwerktechnische Aktorik

- Entwicklung alternativer Antriebssysteme für die Feinwerktechnik auf der Basis elektrodynamischer Kraftwirkung bzw. von Festkörpereffekten (elektrodynamische Linearmotoren, Piezomotoren).
- Berechnung derartiger Antriebe und Simulation ihres dynamischen Verhaltens.
- Erarbeitung geeigneter Unterstützungsmittel und Methoden zur Entwicklung derartiger Antriebssysteme.
- Entwicklung von Luftführungen für Linearantriebe, Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten poröser Materialien für aerostatische Lagerungen und Führungen von Linearantrieben. Ermittlung von Bearbeitungsparametern zur Luftlagerherstellung und Dimensionierung der Luftlager.

#### Präzisions-Spritzgießtechnologie

- Herstellung von Präzisionsbauteilen und feinen Strukturen bis hin zur Verbindung mit mikromechanischen Bauelementen.
- Ermittlung von Entformungskräften beim Spritzgießen in Abhängigkeit von Oberflächenrauheit und Beschichtung sowie vom eingesetzten Kunststoff.
- Untersuchung spezieller Werkstoffe und Beschichtungen im Werkzeugbau.
- Dynamische Formtemperierung durch induktive Beheizung mit externem oder internem Induktor zur Verbesserung des Formfüllverhaltens, insbesondere im Hinblick auf die Abformung mikrotechnischer Strukturen.
- Magnetspritzgießen.

### Theorie des Konstruktionsprozesses

- Produktbezogene Konstruktionsmethoden in der Feinwerktechnik.
- Konstruktive Gestaltung unter Nutzung von 2D- und 3D-CAD.
- Simulation mit FEM, beispielsweise des Formfüllvorgangs beim Spritzgießen.
- Gekoppelte Feldberechnungen, beispielsweise elektromagnetisch, elektromagnetisch-thermisch, piezoelektrisch-dynamisch.

### Zuverlässigkeit feinwerktechnischer Antriebe

- Übertragung und Verifizierung bekannter Zuverlässigkeitstechniken auf feinwerktechnische mechatronische Baugruppen, Antriebe und Aktorik.
- Datensammlung.
- Experimentelle Untersuchungen, Aufbau von Dauerlauf-Versuchsständen für Kleinstmotoren und Getriebe.
- Erarbeitung von Ansätzen für die Ermittlung der Systemzuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen (Konzeptphase).

## 2 LEHRVERANSTALTUNGEN

### 2.1 Vorlesungen und Übungen für Vordiplom und Bachelor

#### **Konstruktionslehre III (Feinwerktechnik) (Schinköthe, Burkard)**

Wintersemester 2009/2010: 45 Studenten (mach + famo)

Wintersemester 2010/2011: 83 Studenten (mach + famo)

15 Vorlesungen à 2 SWS

14 Vorlesungen à 1 SWS

14 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Bobrowski, Burkard, Joerges, Keller, Maier, Mochel, Reutzsch, Ulmer

#### **Konstruktionslehre IV (Feinwerktechnik) (Schinköthe, Burkard)**

Sommersemester 2010: 39 Studenten (mach + famo)

13 Vorlesungen à 2 SWS

13 Vorlesungen à 1 SWS

13 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Bobrowski, Burkard, Joerges, Keller, Mochel, Ulmer

### 2.2 Vorlesungen und Übungen für Hauptdiplom und Master

#### **Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik, ehemals Grundlagen der Feinwerktechnik, Gerätekonstruktion und -fertigung (Schinköthe, Burkard, Bobrowski)**

Wintersemester 2009/2010: 15 Studenten

Wintersemester 2010/2011: 14 Studenten

20 Vorlesungen à 2 SWS

10 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Burkard, Bobrowski

**Aktorik in der Feinwerktechnik - Berechnung, Konstruktion und Anwendung mechatronischer Komponenten  
(Schinköthe)**

Wintersemester 2009/2010: 12 Studenten  
 Wintersemester 2010/2011: 8 Studenten  
 14 Vorlesungen à 2 SWS

Sommersemester 2010: 9 Studenten  
 5 Vorlesungen à 2 SWS  
 8 Übungen à 2 SWS  
 Betreuer: Joerges, Ulmer, Keller

**Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL  
(Ulmer, Joerges, Nguyen, Zülch)**

Sommersemester 2010: 7 Studenten  
 10 Vorlesungen à 2 SWS  
 10 Übungen à 2 SWS  
 Betreuer: Ulmer, Joerges, Nguyen, Zülch

**Praxis des Spritzgießens in der Gerätetechnik; Verfahren, Prozesskette, Simulation  
(Schinköthe/Burkard)**

Sommersemester 2010: 2 Studenten  
 6 Vorlesungen à 2 SWS  
 5 Übungen à 2 SWS  
 Betreuer: Burkard, Zimmermann

**Elektrische Bauelemente in der Feinwerktechnik  
(Effenberger; externer Lehrbeauftragter)**

Sommersemester 2010: 5 Studenten  
 14 Vorlesungen à 2 SWS

**Elektronik für Feinwerktechniker  
(Effenberger; externer Lehrbeauftragter)**

Wintersemester 2009/2010:	5 Studenten
Wintersemester 2010/2011:	6 Studenten
15 Vorlesungen à 2 SWS	

## 2.3 Prüfungen

Fach	Termin	Kandidaten
KL III + IV (Feinwerktechnik)	F 2010	28
	H 2010	38
Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik (Pflichtfach, schriftlich)	F 2010	7
	H 2010	2
Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik (Kernfach, mündlich)	F 2010	2
	H 2010	6
Aktorik in der Feinwerktechnik - Berechnung, Konstruktion und Anwendung mechatronischer Komponenten (Kernfach, mündlich)	F 2010	3
	H 2010	5
Praxis des Spritzgießens in der Gerätetechnik; Verfahren, Prozesskette, Simulation	H 2010	1
Praktische FEM Simulation mit ANSYS und MAXWELL	H 2010	7
Hauptfach Feinwerktechnik	F 2010	5
	H 2010	3
Studienarbeit Feinwerktechnik	F 2010	-
	H 2010	9
Diplomarbeiten	F 2010	-
	H 2010	7

## 2.4 Praktika

### Hauptfachpraktikum Feinwerktechnik (Für Studierende des Hauptfachs Feinwerktechnik)

#### Sommersemester 2010

Versuch 1: „Gleichstrommotoren“  
6 Teilnehmer 2 Termine  
Betreuer: Engel, Bobrowski

Versuch 2: „FEM-Simulation mit ANSYS/MAXWELL“  
7 Teilnehmer 5 Termine  
Betreuer: Ulmer, Nguyen, Joerges

Versuch 3: „Lineardirektantriebe“  
9 Teilnehmer 2 Termine  
Betreuer: Joerges, Ulmer

Versuch 4: „Ultraschallantriebe“  
10 Teilnehmer 3 Termine  
Betreuer: Keller

#### Wintersemester 2010/2011

Versuch 1: „Koordinatenmesstechnik“  
5 Teilnehmer 1 Termin  
Betreuer: Burkard

Versuch 2: „Einführung in die 3D-Messtechnik“  
(vorlesungsbegleitendes Praktikum)  
9 Teilnehmer 2 Termine  
Betreuer: Burkard

**Allgemeines Praktikum Maschinenbau (APMB)  
(Für Studierende im zweiten Studienabschnitt Maschinenbau)**

Wintersemester 2010/2011

Versuch 1: „Rasterelektronenmikroskopie“  
15 Teilnehmer 4 Termine  
Betreuer: Burkard

Versuch 2: „Schrittmotoren“  
6 Teilnehmer 2 Termine  
Betreuer: Mochel, Reutzsch

## 2.5 Seminar Feinwerktechnik

22.04.2010	Koobar, Islem	Simulative Voruntersuchungen zur Berechnung von thermisch-transienten Vorgängen in Lineardirektantrieben
22.04.2010	Paul, Axel	Experimentelle Betrachtung des thermischen Verhaltens von Antriebsspulen
29.04.2010	Rommel, Julia	Konzeption einer „induktiven Heizpatrone“
29.04.2010	Reiter, Diana	Ventile für Brennstoffzellenanwendungen
06.05.2010	Schweizer, Volker	Simulative Untersuchungen zur Gestaltung und Auslegung eines aerostatisch geführten Planarmotors mit passivem Läufer
10.06.2010	Scheu, Christian	Optimierung eines vollautomatischen universellen Prüfstandes zur Motordatenbestimmung
15.07.2010	Reutzsch, Benjamin	Regelung eines Lineardirektantriebs zur präzisen und laststeifen Positionierung

29.07.2010	Gaugler, Peter	Simulative Untersuchungen zur Gestaltung und Auslegung aerostatisch geführter Linearantriebe mit passiven Läufern
29.07.2010	Bayer, Tobias	Konstruktion, Aufbau und Untersuchung einer aerostatisch geführten Linearachse mit statorseitig kombiniert angeordneten Antriebs- und Führungskomponenten
29.09.2010	Tlili, Faycal	Realisierung eines stehenden Pendels mit Hilfe eines Lineardirektantriebs
04.11.2010	Kempel, Anton	Minimierung der Rastkräfte beim elektrischen zylindrischen Lineardirektantrieb
04.11.2010	Reiber, Mario	Optimierung eines aerostatisch geführten Linearantriebs mit statorseitig kombiniert angeordneten Antriebs- und Führungskomponenten
11.11.2010	Maucher, Andreas	Entwicklung eines zwangsgeführten Handlingsystems für die Positionierung externer Induktoren in Spritzgusswerkzeugen
11.11.2010	Rapp, Stefan	Optimierung eines Lineardirektantriebs zur Reduzierung von Rastkräften durch Verwendung von Zwischenlageblechen

### 3 WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN, STUDIEN- UND DIPLOMARBEITEN

#### 3.1 Dissertationen

Beier, Michael	Lebensdaueruntersuchungen an feinwerktechnischen Planetenradgetrieben mit Kunststoffverzahnung. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 32, 2010
Rothenhöfer, Elmar	Entwicklungsgrundlagen für piezoelektrische Ultraschallmotoren am Beispiel eines linearen Antriebs mit gekoppelten Moden. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 31, 2010
Zülch, Michael	Temperierung von Spritzgusswerkzeugen durch vollständige integrierte induktive Temperierung (eingereicht)
Joerges, Philipp	Rastkräfte und ihre Auswirkungen auf die Positioniergenauigkeit und die Dynamik in Lineardirektantrieben (eingereicht)

#### 3.2 Diplomarbeiten am IKFF

04/2010	Nguyen, Minh	Entwicklung eines Simulationssystems zur Untersuchung der Aufmagnetisierung kunststoffgebundener Dauermagnete
07/2010	Brenner, Christoph	Thermische Analyse eines Lineardirektantriebs mit MAXWELL und ANSYS

07/2010	Rieger, Thomas	Strukturmechanische Auslegung und Optimierung einer in 6 Freiheitsgraden aktiv einstellbaren Fassung für ein optisches Element
08/2010	Reuttsch, Benjamin	Regelung eines Lineardirektantriebs zur präzisen und laststeifen Positionierung
08/2010	Peters, Frederik	Konzeption und Entwicklung eines energieeffizienten Trennsystems
09/2010	Lutz, Jochen	Entwicklung und Auslegung eines aerostatisch geführten Mehrkoordinatenantriebs mit passivem Läufer
10/2010	Rommel, Julia	Untersuchung resonanter Schwingungsausprägungen in halbkugelähnlichen Geometrien aus vollkeramischem Piezowerkstoff als Basis für einen planaren Ultraschallmotor

### **3.3 Studienarbeiten am IKFF**

04/2010	Paul, Axel	Experimentelle Betrachtung des thermischen Verhaltens von Antriebsspulen
04/2010	Rommel, Julia	Voruntersuchungen zur Konzeption einer induktiven Heizpatrone
04/2010	Reiter, Diana	Ventile für Brennstoffzellenanwendungen
05/2010	Schweizer, Volker	Simulative Untersuchungen zur Gestaltung und Auslegung eines aerostatisch geführten Planarmotors mit passivem Läufer

06/2010	Scheu, Christian	Aufbau eines vollautomatischen universellen Prüfstandes zur Motordatenbestimmung
07/2010	Bayer, Tobias	Konstruktion, Aufbau und Untersuchung einer aerostatisch geführten Linearachse mit statorseitig kombiniert angeordneten Antriebs- und Führungskomponenten
07/2010	Gaugler, Peter	Simulative Untersuchungen zur Gestaltung und Auslegung aerostatisch geführter Linearantriebe mit passiven Läufern
07/2010	Koobar, Islem	Simulative Voruntersuchungen zur Berechnung von thermisch-transienten Vorgängen in Lineardirektantrieben
09/2010	Tlili, Faycal	Realisierung eines stehenden Pendels mit Hilfe eines Lineardirektantriebs
11/2010	Kempel, Anton	Minimierung der Rastkräfte beim elektrischen zylindrischen Lineardirektantrieb
11/2010	Reiber, Mario	Optimierung eines aerostatisch geführten Linearantriebs mit statorseitig kombiniert angeordneten Antriebs- und Führungskomponenten
11/2010	Rapp, Stefan	Optimierung eines Lineardirektantriebs zur Reduzierung von Rastkräften durch Verwendung von Zwischenlageblechen
12/2010	Maucher, Andreas	Entwicklung eines zwangsgeführten Handlingsystems für die Positionierung externer Induktoren in Spritzgusswerkzeugen

## 4 ARBEITSGEBIETE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITER

### 4.1 Aktorik

- Engel, M.            Lehre:
- Betreuung der Vordiplomsübungen in KL 3/4 in Form von Gruppenübungen.
- Durchführung des Praktikums „Gleichstrommotoren“ in Kooperation mit Herrn Bobrowski.
- Betreuung FEM-Praktikumsarbeit.
- Betreuung Bachelor-Projektarbeit.
- Forschung:
- Wirbelstrom- und Hystereseverluste in der Elektrotechnik und im Maschinenbau.
- Simulation von Wirbelstromverlusten in Rückschlussmaterialien mit Ansoft MAXWELL.
- Konzepte zur Reduzierung der Verlustkomponenten.
- Konstruktion des Prüfstands zur Verlustmessung in Rückschlussmaterialien.
- Sonstiges: Dokumentation des IKFF-Konstruktionslehre-Wettbewerbs.
- 
- Joerges, P.            Lehre:
- Betreuung der Vordiplomsübungen in KL 3/4, Vortrags- und Gruppenübungen; Betreuung der Übungskomplexe „Achsen-Wellen“ und „Kupplungen“ (KL 3/4); Ausarbeitung von Aufgabenstellungen und Musterlösungen für Übungsaufgaben, Korrektur von Übungsaufgaben, Erstellung von Prüfungsaufgaben und Musterlösungen; Prüfungsbeisitz Aktorik, Durchführung des FEM-Praktikums mit MAXWELL, Durchführung des APMB-Praktikums „Schrittmotoren“, Durchführung der Hauptfachübungen (Aktorik) „Lineardirektantriebe“ (Schwerpunkt Regelung) und des

zugehörigen Hauptfachpraktikums „Lineardirektantriebe”.  
Betreuung von Studien- und Diplomarbeiten.

Forschung:

Untersuchung von Rastkräften und ihre Auswirkungen auf die Positioniergenauigkeit und die Dynamik bei Lineardirektantrieben.

Industrieprojekte:

Dauerlaufuntersuchungen im Bereich Zuverlässigkeit zur Untersuchung des Ausfallverhaltens bürstenbehafteter DC-Motoren.

Sonstiges: PC-Administration.

Keller, B.

Lehre:

Betreuung der Vordiplomsübungen in KL 3/4 in Form von Gruppenübungen.

Ausarbeitung von Aufgabenstellungen für Übungs- und Klausuraufgaben sowie deren Korrektur.

Vorbereitung und Durchführung der Vortragsübung „Ultraschallantriebe” im Hauptfach Aktorik. Vorbereitung und Durchführung des Praktikums „Ultraschallantriebe”.

Betreuung von Studien- und Diplomarbeiten.

Forschung:

Entwicklung von piezoelektrischen Motoren mit Schwerpunkten in Schwingungsuntersuchungen und in der Entwicklung von geeigneten Ansteuerelektroniken der Motoren in Verbindung mit dSPACE.

Industrieprojekt:

Entwicklung und Fertigung von Hardware für Dauerlaufuntersuchungen an bürstenbehafteten DC-Motoren.

Sonstiges: PC-Administration.

Mochel, F.

Lehre:

Betreuung der Vordiplomsübungen in KL 3/4 in Form von Vortrags- und Gruppenübungen, Ausarbeitung von Aufgabenstellungen für Übungs- und Klausuraufgaben sowie deren Korrektur.

Organisation des Konstruktionslehrewettbewerbs.

Durchführung des APMB-Praktikums „Schrittmotoren“.

Betreuung von Studien- und Diplomarbeiten sowie einer Bachelor-Projektarbeitsgruppe.

Forschung:

Entwicklung und Untersuchung aerostatischer Führungen mit statorseitiger Druckluftversorgung für Ein- und Mehrkoordinatenantriebe zur Realisierung freier Läuferbewegungen.

Gestaltung der Mikrodüsen für die Drucklufteinspeisung, insbesondere Untersuchung der Verwendungsmöglichkeiten offenporöser Materialien.

Industrieprojekt:

Optimierung eines Hybridschrittmotors hinsichtlich der Blockkräfte.

Sonstiges: Betreuung der 3D-Koordinatenmessmaschine.

Reuttsch, B.

Lehre:

Betreuung der Vordiplomsübungen in KL 3/4, Testatgruppen. Betreuung des Übungskomplexes „Achsen-Wellen“, Korrektur von Übungsaufgaben.

Forschung:

Konzeption und Entwicklung eines magnetisch geführten Lineardirektantriebs.

Industrieprojekt:

Dauerlaufuntersuchungen im Bereich Zuverlässigkeit zur Untersuchung des Ausfallverhaltens bürstenbehafteter DC-Motoren.

Sonstiges: PC-Administration.

Ulmer, M.

Lehre:

Betreuung der Vordiplomsübungen in KL 3/4 in Form von Vortrags- und Gruppenübungen; Korrektur von Übungsaufgaben.

Durchführung des FEM-Praktikums und Betreuung der FEM-Testate.

Vortragsübung „Lineardirektantriebe“ im Hauptfach Aktorik und des zugehörigen Praktikums.

Industrieprojekte:

Simulation eines induktiven Ausheizprozesses.

Simulative Untersuchungen zu bürstenbehafteten Gleichstrommotoren mit Matlab/Simulink.

Sonstiges: Betreuung des Linux-Netzwerkes und der Netzwerksicherheit am Institut.

## 4.2 Spritzgießen

- Burkard, E.      Untersuchung des Einflusses von Werkzeugbeschichtungen auf die Entformungskraft bei Spritzgussbauteilen aus Thermoplastwerkstoffen.
- Bearbeitung von Industriaufträgen zur Entformung von Spritzgussteilen.
- Betreuung der Studenten im Vor- und Hauptdiplom.
- Betreuung von Vorlesungen und Übungen im Vor- und Hauptdiplom.
- Organisation des Konstruktionslehrewettbewerbs.
- Betreuung des Rasterelektronenmikroskops und Untersuchung von Proben, APMB-Versuch „Rasterelektronenmikroskopie“.
- Betreuung der Koordinatenmessmaschine und Vermessung von Werkstücken, Hauptfach-Versuch „Koordinatenmesstechnik“.
- Administration und Wartung der UNIX-Rechner und des Institutsnetzes.
- 
- Nguyen, M.      Lehre:
- Betreuung der Vordiplomsübungen in KL 3/4 in Form von Gruppenübungen.
- Durchführung der Vorlesung und Übung „Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL“.
- Forschung:
- Entwicklung und Aufbau einer Messeinrichtung zur Messung der Remanenz und Koerzitivfeldstärke kunststoffgebundener

Magnete.

Unterstützende Arbeiten zu einem öffentlich geförderten, industriellen Forschungsprojekt zur Herstellung kunststoffgebundener Dauermagnete.

Zimmermann, T.

Lehre:

Betreuung der Vordiplomsübungen in KL 3/4 in Form von Gruppenübungen.

Betreuung der FEM-Testate.

Durchführung Praktikum „Spritzgießsimulation mit Moldflow“ und „Spritzgießen“.

Betreuung von Studien- und Diplomarbeiten.

Industrieprojekt:

Auslegung und Simulation einer induktiv beheizten Spritzgussform für Bipolarplatten (AiF-Projekt).

Zülch, M.

Lehre:

Betreuung der Vordiplomsübungen in KL 3/4 (Gruppenübungen), Korrektur von Übungsaufgaben.

Betreuung der Vorlesung und Übung „Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL“.

Praktikum „Spritzgießen“ im Hauptdiplom.

Betreuung von Studien- und Diplomarbeiten.

Forschung:

Bearbeitung des DFG-Forschungsprojektes „Temperierung von Spritzgusswerkzeugen durch vollständig integrierte induktive Beheizung“.

Unterstützung AiF-Projekt "Variotherme Prozessgestaltung mittels Induktionstemperierung zur spritzgusstechnischen Verarbeitung hochgefüllter Thermoplaste in Brennstoffzellenanwendungen".

Industrieprojekte:

Bearbeitung eines öffentlich geförderten industriellen Forschungsprojektes zur Herstellung kunststoffgebundener Dauermagnete.

Verschiedene beratende Tätigkeiten zu Potential und Auslegung induktiver Werkzeugheizsysteme.

### 4.3 Zuverlässigkeitstechnik

Bobrowski, S. Lehre:

Durchführung der Vortragsübungen „Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme“ und des Praktikums „Zuverlässigkeit“ im Rahmen der Vorlesung Gerätekonstruktion und -fertigung.

Betreuung von Studienarbeiten und einer Bachelor-Projektarbeit.

Durchführung des Praktikums „Gleichstrommotoren/Motor-kennlinienermittlung“ (in Kooperation mit Herrn Engel).

Betreuung von Gruppenübungen KL 3/4 (Vordiplom), Korrektur von Übungsaufgaben.

Forschung:

Systemzuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen, Zuverlässigkeit von elektromechanischen/mechatronischen Systemen am Beispiel feinwerktechnischer Antriebe/Aktorik.

Betrieb von Dauerlaufprüfständen für mechatronische Systeme (rotatorische Kleinantriebe), Vermessung von Prüflingen.

Entwicklung von Methoden zur Zuverlässigkeitsermittlung und mathematischen Zuverlässigkeitsmodellen (Kooperation mit IAMS, Institut für Angewandte Mathematik und Statistik der Universität Hohenheim).

Vorbereitung für neuen DFG-Projektantrag in Kooperation mit dem IAMS.

Kooperation mit Industriepartnern (IMS Gear).

Sonstiges: Ansprechpartner für Literaturrecherchen.

## 5 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

### 5.1 Veröffentlichungen

#### Artikel oder Tagungsbeiträge:

Engel, M.; Wolynski, A.; Wentsch, K.; Westkämper, E.: Mobile Lasermikrobearbeitung – Production on demand. wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 100 (2010) H. 6, S. 461-464.

Joerges, P.; Schinköthe, W.: Rastkräfte bei Lineardirektantrieben - ein Vergleich geometrischer und elektronischer Kompensationsmöglichkeiten. Vortrag 18. Kleinmaschinen-Kolloquium, TU Ilmenau, 19.03.2010.

Joerges, P.; Schinköthe, W.: Geometrisch optimierte Rastkräfte bei Lineardirektantrieben. 8. ETG/GMM-Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Würzburg, 23.09.2010. Tagungsband.

Joerges, P.: Geometrisch optimierte Rastkräfte bei Lineardirektantrieben. Doktorandenkolloquium, IKFF, 11.11.2010.

Mochel, F.; Schinköthe, W.: Neuer Gestaltungsansatz bei aerostatisch geführten Ein- und Mehrkoordinatenantrieben. 8. ETG/GMM-Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Würzburg, 23.09.2010. Tagungsband.

Mochel, F.: Neuer Gestaltungsansatz bei aerostatisch geführten Ein- und Mehrkoordinatenantrieben. Doktorandenkolloquium, IKFF, 11.11.2010.

Ulmer, M.; Schinköthe, W.; Brenner, C.: Dreidimensionale transient-thermische Analyse eines Lineardirektantriebs mit MAXWELL und ANSYS. ANSYS Conference & 28th CADFEM Users Meeting, Aachen, 03.-05.11.2010.

Zimmermann, T.; Zülch, M.; Schinköthe, W.: Anwendungsgebiete der induktiven Erwärmung im Bereich der Kunststoffverarbeitung. 14. Engelskircher Kunststoff-Technologie-Tage, Engelskirchen, 24.06.2010.

Zimmermann, T.; Zülch, M.; Schinköthe, W.: Induktive Erwärmung - Anwendungsgebiete im Bereich der Kunststoffe. GIT Labor-Fachzeitschrift 4/2010, S. 286-287.

Zimmermann, T.; Schinköthe, W.; Zülch, M.: Induktiv-variotherme Prozessführung im Kunststoffspritzguss. Plastverarbeiter Jahrgang 61 (2010) H.11; S. 42-44.

Zülch, M.; Zimmermann, T.; Schinköthe, W.: Application Range of Inductive Heating in Plastics Processing. Micro Technology iNOVATION FORUM, Villingen-Schwenningen, 23.02.2010.

## **5.2 Gremienarbeit**

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe:

Mitglied des Wissenschaftlichen Beirates der Zeitschrift Mechatronik F&M

Mitglied im Kuratorium der Gustav-Magenwirth-Stiftung, Bad Urach

In der VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik (GMM):

Mitglied des Beirats der GMM

Fachbereichsleiter Fachbereich 3 Feinwerktechnik und Mechatronik

Mitglied des Fachausschusses 3.3 Elektrische Geräte- und Stellantriebe

Mitglied im Arbeitskreis Universitätsprofessoren der Mikro- und Feinwerktechnik

Mitglied des Programmausschusses der 8. ETG/GMM-Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Würzburg.

Ulmer, M.:

Leitung des Arbeitskreises für Elektromechanische Simulation mit ANSYS und MAXWELL.

Mitarbeit im Vorstand des Ansys User Clubs.

### 5.3 Tag der offenen Tür

**Wenn Schokoladen fliegen... Eigentlich stand im Programmheft „Wenn Schokoladen Treppen steigen ...“, aber nur fliegend kamen Tafeln im Ziel an.**

Was hat Schokolade mit dem Studium des Maschinenbaus und der Fahrzeug- und Motorentechnik zu tun? Dass Schokolade im Studium als Nervennahrung bei Prüfungen eingesetzt wird, ist bekannt, aber dass sie von kleinen Maschinen eine Treppe hinauf gebracht werden musste, war etwas Neues.

Für den 18. Konstruktionswettbewerb des Instituts für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik mussten in diesem Jahr Maschinen entwickelt werden, die nur mit Hilfe der in 20 Gramm Gummiband gespeicherten Energie Schokolade zu einem Ziel am oberen Ende einer Treppe bringen. Zusätzlich zur Einschränkung der Energiequelle waren noch die Größe und das Gewicht der Maschinen beschränkt.

Von den studentischen Teams wurden dabei zwei völlig unterschiedliche Lösungsansätze gewählt, die auch zu unterschiedlichem Erfolg führten. Die eine Hälfte der Teilnehmergruppen baute Maschinen, die die Treppe hinauffahren und am oberen Ende ihre Ladung in den Zielbehälter kippen sollten. Die andere Hälfte der teilnehmenden Studierenden baute Maschinen, die im Startbereich stehen blieben und die Schokolade im hohen Bogen ins Ziel warfen.

Für die Maschinen, die die Treppe hinauffahren wollten, war das Gummiband als Energiespeicher wohl zu schwach, spätestens in der Mitte der Treppe blieben die kleinen Geräte stehen.

Bei den Wurfmaschinen gab es verschiedene Varianten, die sich hauptsächlich in der Zielgenauigkeit unterschieden. War es für alle Maschinen noch einfach, eine einzelne kleine Tafel Schokolade ins Ziel zu werfen, wurden die Unterschiede in der zweiten Runde, als möglichst viel Schokolade in den Zielbehälter gebracht werden sollte, schon sehr deutlich. Bei manchen Maschinen verteilte sich die Schokolade rund um das Ziel, bei anderen dagegen lagen nach dem Wurf alle Tafeln zielsicher im Behälter.

Alles in allem war es auch dieses Jahr wieder ein spannender Wettbewerb, der den Studierenden die Möglichkeit gab, Theorie und Praxis zu vergleichen und die eigene Entwicklung im Wettkampf mit anderen Lösungen zu erleben. Und es war auch wieder ein spannendes Erlebnis für das Publikum.

Ein besonderer Dank gilt den folgenden Firmen, die den Wettbewerb teilweise schon seit vielen Jahren unterstützen:

ARBURG GmbH & Co, Audi AG, Carl Hanser Verlag GmbH & Co, Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG, Dr. Ing. Paul Christiani GmbH & Co KG, G. Ulmer Automation GmbH, H. Stoll GmbH & Co. KG, Kendrion Binder Magnete GmbH und Springer Verlag GmbH.

**Ergebnisse:**

1. Platz: Christian Lutz, Frank Schiele, Josef Sturm, Simon Tscheulin
2. Platz: Thomas Beier, Thilo Häussermann, Andreas Hofmann, Andreas Staudt
3. Platz: Jan Kurzendörfer, Morris Langwiesner, Dominik Lorenz, Sebastian Schmid.

## 6 KONGRESSE, TAGUNGEN UND MESSEN

Prof. Schinköthe, W.:

- 18. Kleinmaschinen-Kolloquium, TU Ilmenau, 18./19.03.2010
- 8. ETG/GMM-Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Würzburg, 23.09.2010

Berwanger, R.:

- AMB Internationale Ausstellung für Metallbearbeitung, Stuttgart, 28.09.2010

Bobrowski, S.:

- Mitarbeit im vdi Gremium FA825 thermoplastische Zahnräder (Richtlinie vdi 2736), Erlangen, 16.03.2010, Bochum, 12.10.2010
- 3. Tagung des DMV-Arbeitskreises „Zuverlässigkeit mechatronischer und adaptronischer Systeme“, Darmstadt, 14.-15.04.2010
- 4. Reliability Symposium „Zuverlässigkeitsabsicherung in Entwurf und Erprobung“, Stuttgart, 13.07.2010

Burkard, E.:

- ARBURG Technologietage, Loßburg, 18.03.2010

Engel, M.:

- 18. Kleinmaschinen-Kolloquium, TU Ilmenau, 18./19.03.2010
- Teilnahme an Vorträgen und Kongressen im Rahmen der GsaME Graduate School of advanced Manufacturing Engineering

Joerges, P.:

- 18. Kleinmaschinen-Kolloquium, TU Ilmenau, 18./19.03.2010
- 8. ETG/GMM-Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Würzburg, 23.09.2010

Mochel, F.:

- 8. ETG/GMM-Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Würzburg, 23.09.2010

Nguyen, M.:

- 14. Engelskirchener Kunststofftechnologietage, Engelskirchen, 25.06.2010
- Besuch der GSaME-Veranstaltung „Gender Mainstreaming“, Stuttgart, 29.11.2010

- Teilnahme am Kompaktkurs „Fortran for Scientific Computing“ im Rahmen des clusterspezifischen Programms der GSaME
- Teilnahme an clusterspezifischen Kolloquien, Doktorandenkolloquien und Kernprogramm-kolloquien im Rahmen der GSaME

Schneider, S.:

- AMB Internationale Ausstellung für Metallbearbeitung, Stuttgart, 28.09.2010

Ulmer, M.:

- 18. Kleinmaschinen-Kolloquium, TU Ilmenau, 18./19.03.2010
- ANSYS User Club Workshop 2010, Dresden, 23./24.04.2010
- ANSYS Workshop „ANSYS CFX“, Leinfelden-Echterdingen, 01./02.07.2010
- ANSYS Conference & 28. CADFEM Users Meeting, Aachen, 03.-05.11.2010
- ANSYS Workshop „Simulation elektrischer Antriebe mit Simplorer und MAXWELL“, Berlin, 07.-10.12.2010

Zimmermann, T.:

- ARBURG Technologietage, Loßburg, 18.03.2010
- 14. Engelskirchener Kunststofftechnologietage, Engelskirchen, 24.06.2010
- K-Düsseldorf, 29.10.2010
- CADFEM Users Meeting, Aachen, 03.-05.11.2010

Zülch, M.:

- Micro Technology iNNOVATION FORUM, Villingen-Schwenningen, 23.02.2010
- ARBURG Technologietage, Loßburg, 18.03.2010
- K-Düsseldorf, 29.10.2010

## **7 WERKSTATTBERICHT**

Mit der Fertigung von Linearmotoren, Linearmotorprüfständen, Spritzgussformen und Formeinsätzen sowie Bauteilen und Baugruppen für Versuche im Rahmen von praktischen Studienarbeiten, Diplomarbeiten und Dissertationen war die Institutswerkstatt auch in diesem Berichtsjahr wieder vollständig ausgelastet.

## **8 ANHANG - Ausgewählte Veröffentlichungen**

In diesem Jahr hängen wir exemplarisch zwei Veröffentlichungen aus dem Bereich Linearantriebe an:

Joerges, P.; Schinköthe, W.: Geometrisch optimierte Rastkräfte bei Lineardirektantrieben. 8. ETG/GMM-Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Würzburg, 23.09.2010. Tagungsband.

Mochel, F.; Schinköthe, W.: Neuer Gestaltungsansatz bei aerostatisch geführten Ein- und Mehrkoordinatenantrieben. 8. ETG/GMM-Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Würzburg, 23.09.2010. Tagungsband.

# Geometrisch optimierte Rastkräfte bei Lineardirektantrieben

## Geometrical optimized cogging forces at linear direct drives

Dipl.-Ing. Philipp Joerges, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik (IKFF) Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, 70550 Stuttgart, Deutschland, E-mail: ikff@ikff.uni-stuttgart.de

### Kurzfassung

Rastkräfte sind Reluktanzkräfte, die vorzugsweise zwischen den Grenzen des Eisenrückschlusses des Primärteils und den Grenzen der Magnete wirken. Als Störkraft sind sie im Betrieb von Lineardirektantrieben verantwortlich für Schwankungen in den Schubkräften und Verfahrgeschwindigkeiten sowie für eine begrenzte Positioniergenauigkeit. Durch gezielte Modifikation der Geometrien oder/und der Regelungsstruktur können Rastkräfte bei asymmetrischen Lineardirektantrieben reduziert und damit eine höhere Laufruhe und eine bessere Positioniergenauigkeit erreicht werden. Vereinzelt findet man in der Literatur Hinweise, wie Rastkräfte verringert werden können. Systematische Einteilungen der einzelnen Maßnahmen und deren Auswirkung auch auf die Dynamik von eisenbehafteten Linearmotoren sind selten zu finden und rücken derzeit vermehrt in den Vordergrund.

Die erfolgversprechendsten geometrischen Modifikationsmöglichkeiten wurden systematisch isoliert und mittels Finite-Element-Methoden durchvariiert. Die optimierten Rückschlussvarianten wurden aufgebaut und durch Messung überprüft. Die Maßnahmen und Ergebnisse der geometrischen Optimierung der Rastkräfte werden im Vortrag ausführlich dargestellt und kurz den regelungstechnischen Verfahren gegenüber bewertet. Der Fokus des Vortrages liegt hierbei auf der geometrischen Optimierung der Rückschlüsse.

### Abstract

Cogging Forces are reluctance forces, which are acting between the borders of the primary yoke and the borders of the magnets. Because these forces are disruptive forces, they are responsible for fluctuations in the propulsive force and in velocity as well as they are responsible for a limited positioning accuracy during the movement of linear direct drives. With the help of a targeted modification of the geometry and/or control structure, cogging forces can be reduced at linear direct drives and a higher running smoothness and a higher positioning accuracy can be achieved. Sporadically you can find references how to reduce cogging forces, but a systematic classification of the different methods and its effects on the dynamic are rare for ferrous linear motors and come more and more to the fore.

The most promising geometrical methods of modification have been systematically isolated and varied by means of Finite-Element-Methods. The ideal yoke model has been assembled and verified by measurement. The arrangements and the results of the geometrical optimization of the cogging forces are presented in the recitation in detail. The results will also be briefly compared to the control techniques, but the focus is the geometrical optimization of the yokes.

## 1 Einleitung

Rastkräfte sind als Reluktanzkräfte Störkräfte, die zwischen den Eisenkanten und den Magnetkanten wirken. Sie führen zu Schwankungen in den Schubkräften und Verfahrgeschwindigkeiten, wirken sich also auf die Dynamik des Antriebes aus und verschlechtern zudem die Positioniergenauigkeit und die Bahnfolgenauigkeit.

Sie können geometrisch mittels Finite-Element-Methode (FEM) optimiert werden. Zudem besteht die Möglichkeit, Rastkräfte durch eine geeignet ausgelegte Regelstruktur zu kompensieren.

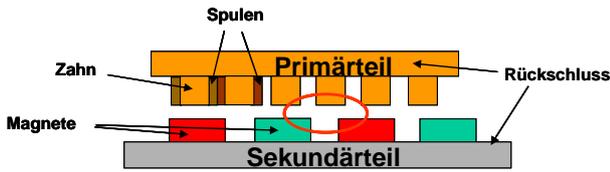
Grund genug, Rastkräfte näher zu untersuchen und die geometrischen, wie auch die regelungstechnischen Kompensationsmöglichkeiten einander gegenüber zu stellen und miteinander zu vergleichen. Da es eine Vielzahl an geometrischen Modifikationsmöglichkeiten gibt, sollten die markantesten und erfolgversprechendsten Einflussmöglichkeiten erfasst und validiert werden. Zudem ist das Be-

wegungsverhalten dynamischer Positionierprozesse unter der Berücksichtigung von Rastkräften zu analysieren.

Ziel ist, es Konstruktions- und Steuerungsparadigmen abzuleiten, um Lineardirektantrieben eine möglichst gute Dynamik bei gleichzeitig hoher Positioniergenauigkeit zu verleihen.

## 2 Rastkräfte

**Bild 1** stellt einen möglichen Wirkungsbereich der Rastkraft bei einem Zahnspulentrückschluss zwischen dessen Primärteil und dem magnetbesetzten Sekundärteil dar. Rastkräfte, im Englischen auch als „cogging forces“ bezeichnet, sind abhängig von der relativen Position des Läufers zu den Permanentmagneten und vom Motorstrom unabhängig. In eisenlosen bewegten Motorkomponenten können sie vernachlässigt werden. Durch zielgerichtete geometrische Parametervariation sind sie reduzierbar und durch regelungstechnische Verfahren zu kompensieren.



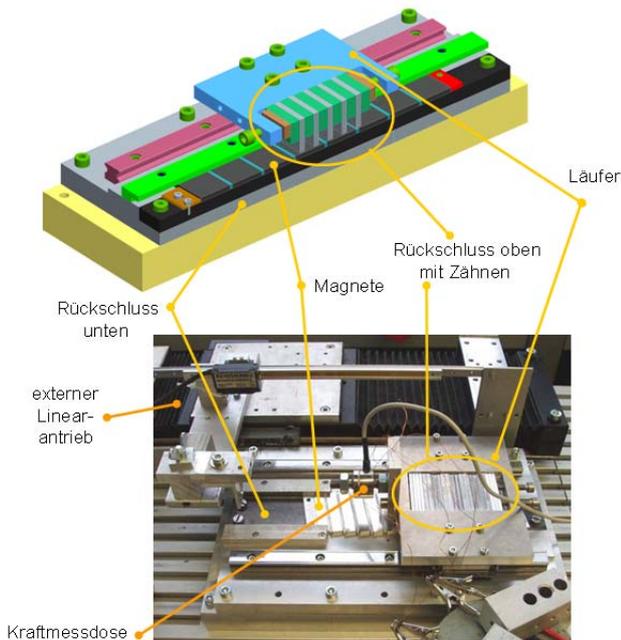
**Bild 1** Eisenbehafteter linearer Zahnspulendirektantrieb

Da Rastkräfte periodisch wiederkehrend sind, können sie mittels Fast-Fourier-Transformation (FFT) identifiziert und als Fourierreihe dargestellt werden.

Wie eingangs erwähnt, führen sie zu einer Verschlechterung der Bahnfolgegenauigkeit und der Positioniergenauigkeit. Auch sind Geschwindigkeitsschwankungen, die zu Instabilitäten und Schwingungen führen, festzustellen. Gerade bei geringen Geschwindigkeiten sind die Schwankungen besonders groß, da hier der Motorstrom und damit die Schubkräfte kleiner sind, die Rastkräfte aber unverändert wirken. Nichtlinearitäten sind die Folge. Jedoch können Rastkräfte auch erwünscht sein, jeder Schrittmotor nutzt das Prinzip der Reluktanz. So bleibt ein rastkraftbehafteter Motor im unbestromten Zustand an bestimmten Positionen stehen und hält den Läufer bis zu einer gewissen Belastung.

### 3 Vorgehensweise

Als Ausgangsuntersuchungen wurden die zahlreichen geometrischen Einflussmöglichkeiten zunächst simulativ untersucht und auf die viel versprechendsten rastkraftreduzierenden geometrischen Modifikationsmöglichkeiten reduziert. Die simulativ als rastkraftarm bewerteten Varianten wurden an einem eigens dafür entwickelten Rastkraftprüfstand durch Messung der Schub- und Rastkräfte validiert.



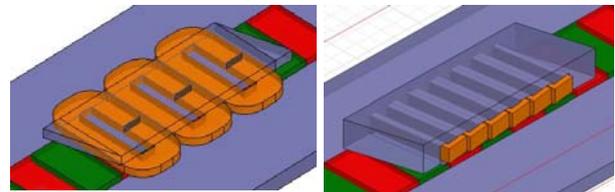
**Bild 2** Schnittansicht durch den Rastkraftteststand und realer Rastkraftteststand

Der Rastkraftteststand **Bild 2** besteht aus einem verfahrbaren Gestell, in das beliebige Primärteile (Rückschluss mit Wicklung) eingehängt und untersucht werden können. Hierbei wird der zu untersuchende Läufer bestromt oder unbestromt mit Hilfe eines zweiten rastkraftfreien Linearantriebs über seine Magnete hinweg bewegt. Mit Hilfe einer Zugdruckmessdose werden die zugehörigen Schub- oder Rastkräfte ermittelt. Die einzelnen geometrischen Effekte wurden erfasst und bewertet. Ausschlaggebend sind beispielsweise die Rückschlusslänge, eine geeignete Schrägung des Rückschlusses, also der Schrägungswinkel, bei Nutung der Nutenwinkel, die Nutbreite u.v.m. Die gewonnenen Daten dienen als Auslegungsbasis zweier neuer Rückschlüsse, auf die im Folgenden weiter eingegangen wird.

## 4 Ergebnisse

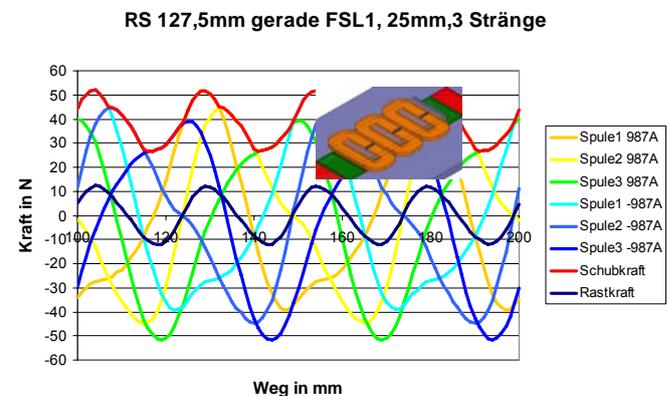
### 4.1 Ergebnisse der Geometrievariation

Beispielhaft wurde ein dreisträngiger Flachspulläufer geometrisch Stück für Stück variiert, bis ein Rastkraftminimum von 1,3 N anstatt der anfänglichen 12,3 N ermittelt wurde. Ein zweiter Rückschlusstyp, ein Zahnspulentrückschluss, der höhere Schubkräfte liefert, wurde ebenfalls geometrisch mittels FEM ausgelegt, optimiert und aufgebaut. Die hier ermittelte Rastkraft liegt simulativ bei 3,7 N, real allerdings bei 5,2 N. Die beiden Rückschlüsse sind in **Bild 3** nebeneinander dargestellt. Linker Hand ist der optimierte Flachspulläufer und rechter Hand der optimierte Zahnspulläufer zu sehen.



**Bild 3** Optimierter Flachspul- und Zahnspulläufer

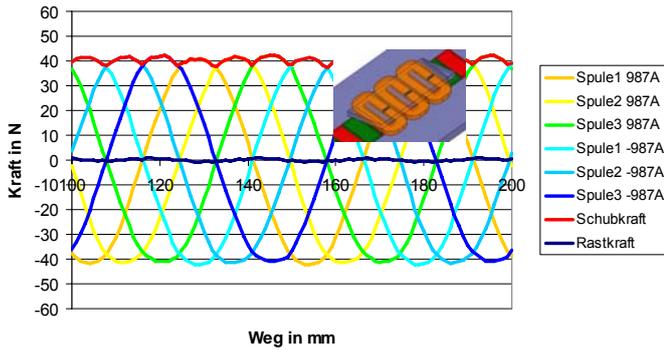
Das **Bild 4** zeigt den zugehörigen Schub- und Rastkraftverlauf des noch nicht optimierten Flachspulläufers über



**Bild 4** Schub- und Rastkraftverlauf des nicht optimierten Flachspulläufers

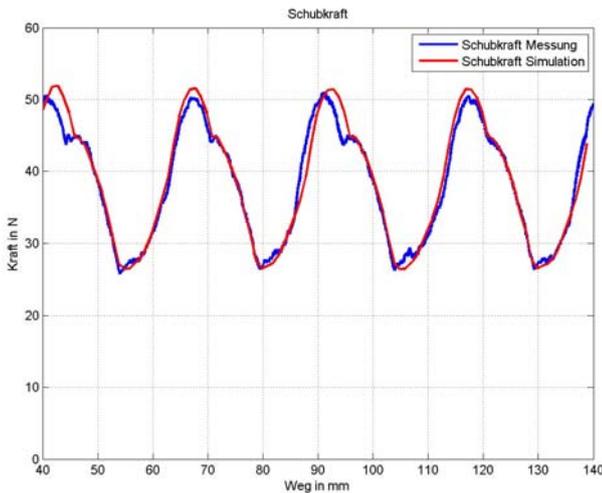
eine Verfahr­länge von 100 mm. Dies entspricht einer Länge von vier Magnetenlängen, also zwei magnetischen Perioden. Die Periodizität ist leicht zu erkennen. Deutlich sind die hohe Rastkraft und der damit verbundene wellige Schubkraftverlauf zu erkennen. Einmal wirkt die Rastkraft mit und einmal gegen die Schubkraft. Eine hohe Schubkraftwelligkeit und auch Geschwindigkeitswelligkeit sind die Folge. Betrachtet man hingegen den optimierten Läufer, ist eine deutliche Verbesserung im Läuferverhalten zu erkennen. Die Schubkraftwelligkeit ist bei gleicher Bestromung erheblich reduziert, **Bild 5**.

RS 139,5mm geschrägt FSL2, 25mm, 3 Stränge



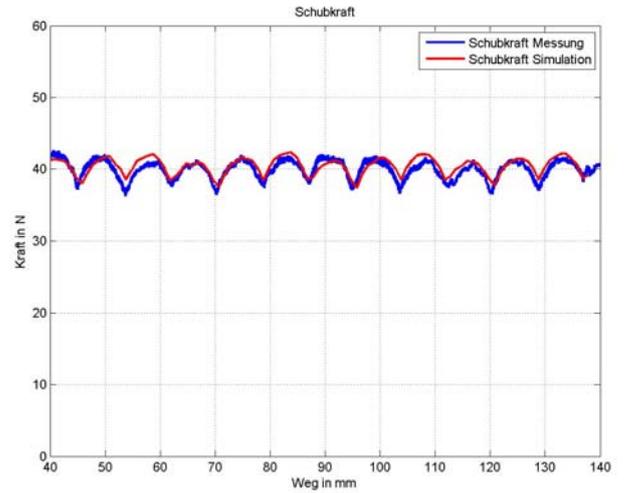
**Bild 5** Schub- und Rastkraftverlauf des optimierten Flachspulläufers

Vergleicht man jeweils die simulierten mit den gemessenen Schubkraftkurven des Ausgangsflachspulläufers, Rückschlusslänge 127,5 mm, und des optimierten geschrägten Flachspulmotors, Rückschlusslänge 139,5 mm, kann eine sehr gute Übereinstimmung in den gewonnenen Mess- und Simulationsdaten festgestellt werden, siehe auch **Bild 6** und **Bild 7**.



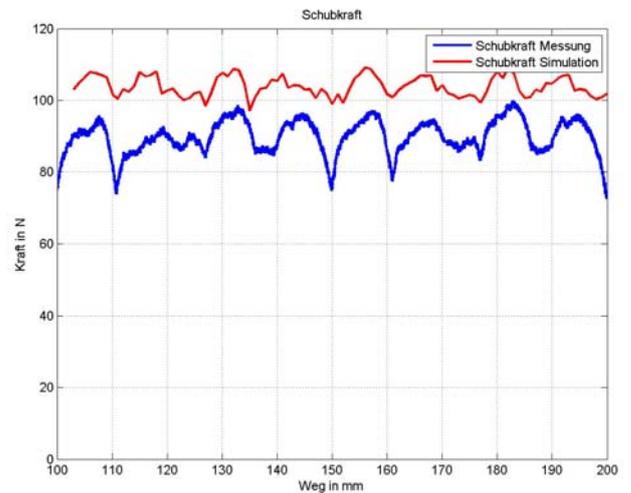
**Bild 6** Vergleich des simulierten und des realen Schubkraftverlaufes des Ausgangsflachspulläufers mit 127,5 mm

Deutlich ist zu erkennen, wie die maximale Schubkraft sinkt und die minimale Schubkraft durch die Rastkraftreduzierung angehoben wird. Eine geringere Schubkraftwelligkeit ist die Folge.



**Bild 7** Vergleich des simulierten und des realen Schubkraftverlaufes des optimierten Flachspulläufers mit 139,5 mm

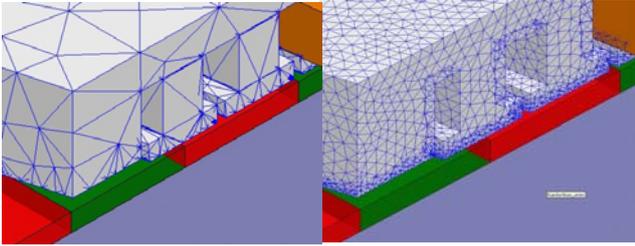
Vergleicht man die simulierten Schubkraftwerte mit den gemessenen Schubkraftwerten des optimierten asymmetrischen Zahnspulenrückschlusses kann hier ebenfalls eine gute Übereinstimmung festgestellt werden, siehe **Bild 8**.



**Bild 8** Vergleich des simulierten und des realen Schubkraftverlaufes des optimierten Zahnspulläufers mit 139,5 mm

Insgesamt stimmen die Kurven in der Form sehr gut überein. Allerdings ist eine Abweichung der Absolutwerte von etwa 15% festzustellen. Die Unterschiede sind durch Fertigungstoleranzen zu erklären und auch durch Schwankungen der Materialeigenschaften, die nicht in der Simulation berücksichtigt werden können. Der Vernetzungsgrad bei stark unterschiedlichen Aspektverhältnissen, wie sie hier vorliegen, ist für die Simulation sehr wichtig. Es muss hier sehr fein vernetzt werden. Eine Tetraedergröße kleiner 1 mm sollte verwendet werden, um eine höhere Übereinstimmung zwischen Simulation und Realität zu erhalten. Jedoch steigt dann die Rechenzeit derart an, dass eine Parametervariation keinen Sinn mehr macht. Dann kann eine Optimierung durch Parametervariation nicht mehr in ver-

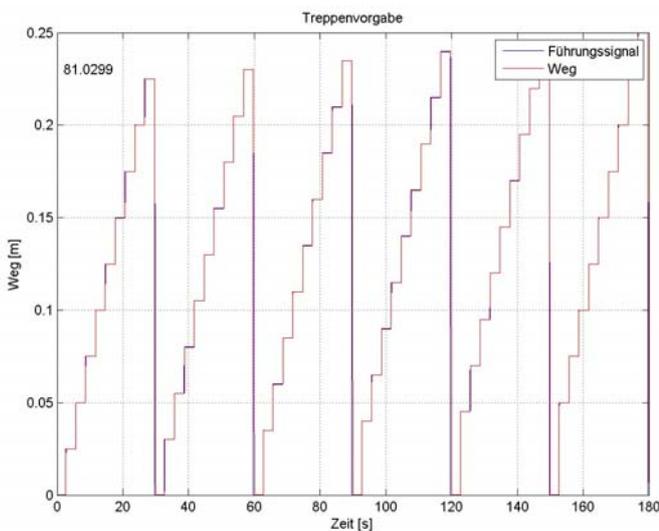
treibar Zeit erfolgen. Es muss also ein Kompromiss zwischen notwendiger und hinreichend genauer Vernetzung und der Realität getroffen werden. **Bild 9** zeigt den Läufer mit der „Standardvernetzung“ auf der linken und einer feineren, ergebnistreueren Vernetzung (Kantenlänge des Netzes = 3 mm) auf der rechten Seite.



**Bild 9** Niedriger und hoher Vernetzungsgrad des asymmetrischen Zahnspulläufers

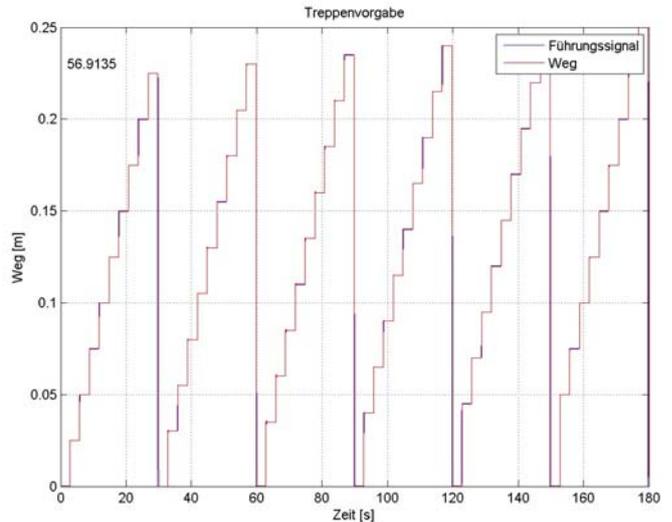
Um den Einfluss der Geometrieangepassung auf die Positioniergenauigkeit zu erfassen, wurden beispielhaft die beiden Flachspulläufer (mit geradem bzw. geschrägtem Rückschluss) mit einer nicht optimal eingestellten Internal Model Control Regelung einmal mit und einmal ohne Vorsteuerung untersucht. Es wird hier aber nur auf den Fall der reinen IMC-Regelung eingegangen. Diese wurde absichtlich mit nicht optimal eingestellten Regelparametern genutzt, um eine vollständige Ausregelung der Rastkräfte zu vermeiden. Ansonsten besteht nicht die Möglichkeit, Änderungen zu erkennen.

Um die Positioniergenauigkeit der beiden Läuferückschlussvarianten zu überprüfen, wurden über eine Länge von zehn Magneten jeweils pro Magnet fünf Positionen angefahren. Insgesamt wurden so 50 Punkte wiederholt angefahren. **Bild 10** und **Bild 11** zeigen die beiden Soll- und Ist-Diagramme mit der daraus ermittelten quadratischen Abweichung als Zahlenwert oben links für den Rückschluss mit 127,5 mm und den Rückschluss mit 139,5 mm.



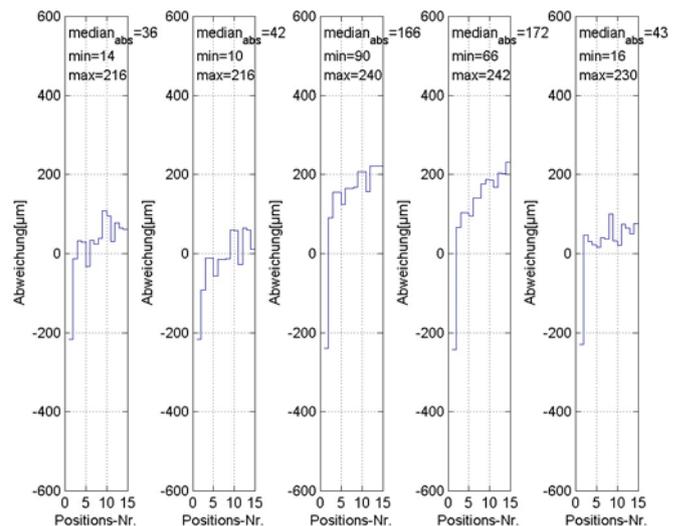
**Bild 10** Bahnfolgegenauigkeit des asym. Flachspulmotors 127,5 mm, nicht optimal eingestellte IMC-Regelung

Die Soll- und Istkurven scheinen in beiden Diagrammen zunächst deckungsgleich. Die quadratische Abweichung sinkt jedoch bei der geometrisch optimierten Variante von 81,0299 auf einen Wert von 56,9135. Es kann also ein Verbesserung in der Bahnfolgeeigenschaft von etwa 30% verzeichnet werden. Die beiden Messungen wurden jeweils mit identischen Parametern durchgeführt.



**Bild 11** Bahnfolgegenauigkeit des asym. Flachspulmotors 139,5 mm, nicht optimal eingestellte IMC-Regelung

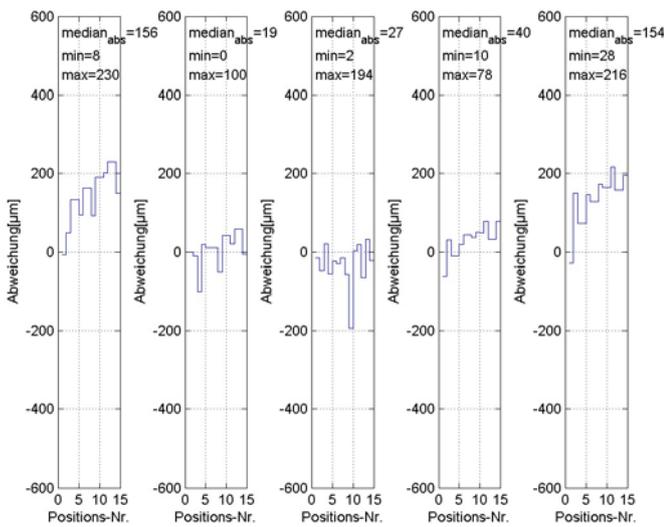
Betrachtet man nun die Positioniergenauigkeit dieser beiden Messungen, ist ein ähnlicher Trend festzustellen. Die Positioniergenauigkeit ist durch die Optimierung deutlich verbessert. Natürlich sind die ermittelten Größen nur in Relation zu einander zu sehen, wie in **Bild 12** und **Bild 13** zum Ausdruck kommt.



**Bild 12** Positioniergenauigkeit des asym. Flachspulmotors 127,5 mm, nicht optimal eingestellte IMC-Regelung

Eine Verbesserung der Positioniergenauigkeit von etwa 15% ist hier zu verzeichnen, betrachtet man die Medianwerte über die fünf Messpunkte gemittelt. Der Abschnitt

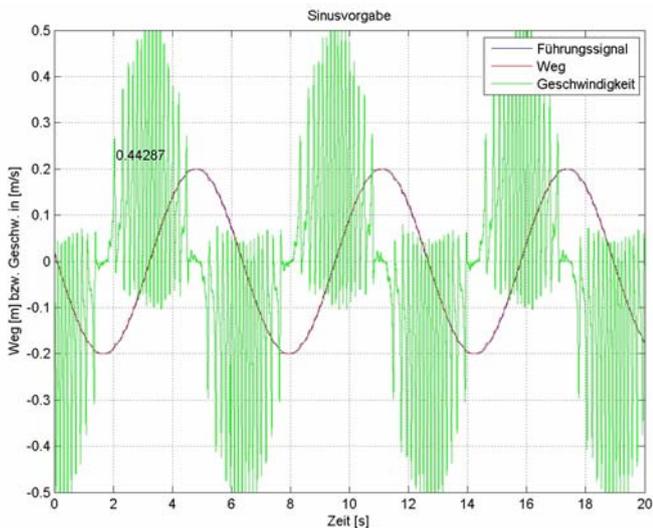
4.2 geht dann kurz auf die „richtig“ eingestellte Regelung mit ein.



**Bild 13** Positioniergenauigkeit des asym. Flachspulmotors 139,5 mm, nicht optimal eingestellte IMC-Regelung

## 4.2 Ergebnisse der Regelungsoptimierung

Um einen umfassenden Überblick in die Rastkraftthematik zu bekommen, wird noch kurz auf die Möglichkeiten der Regelung eingegangen.



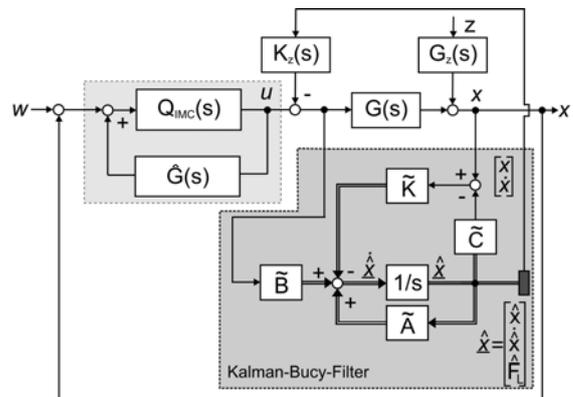
**Bild 14** Bahnfolgegenauigkeit des asymmetrischen Flachspulmotors 127,5 mm bei PI-Regelung

Das **Bild 14** zeigt die PI-Regelung des asymmetrischen Läufers der Läuferlänge von 127,5 mm, der eine sinusoidale Bewegung von  $\pm 200$  mm mit 1 rad/s ausführt. Deutlich ist ein Rucken vor allem in der Geschwindigkeit zu erkennen. Betrachtet man das vorgegebene Führungssignal mit dem zugehörigen Weg-Signal, ist zu erkennen, dass auch im Wegsignal ein leichtes Schlingern um die Sollkurve erfolgt. Das Schlingern ist in **Bild 14** durch einen

Hell-Dunkel-Wechsel zu erkennen. Das Führungs- und das Wegsignal liegen hier nur scheinbar gut übereinander. Der Rückschluss dieses Motors weist eine Rastkraft von 15,53 N auf. Zwei reguläre, gleichmäßige Sinuskurven für die Geschwindigkeit und den Weg sollten hier zu sehen sein.

Nachdem die Regelung mit einem Standard PI-Regler nur befriedigende Ergebnisse in der Geschwindigkeitswelligkeit aufweist, wurde nach einer umfassenden Regelstruktur gesucht, die sowohl unabhängig von Rastkräften hoch präzise positioniert als auch eine sehr geringe Geschwindigkeitswelligkeit liefert.

Die besten Ergebnisse wurden mit einer Internal Modell Control (IMC), einer modellbasierten Regelung in Kombination mit einem Kalman-Bucy-Filter, einem speziellen Beobachter, erzielt, siehe **Bild 15**.



**Bild 15** Struktur der IMC-Regelung in Kombination mit einem Kalman-Bucy-Filter

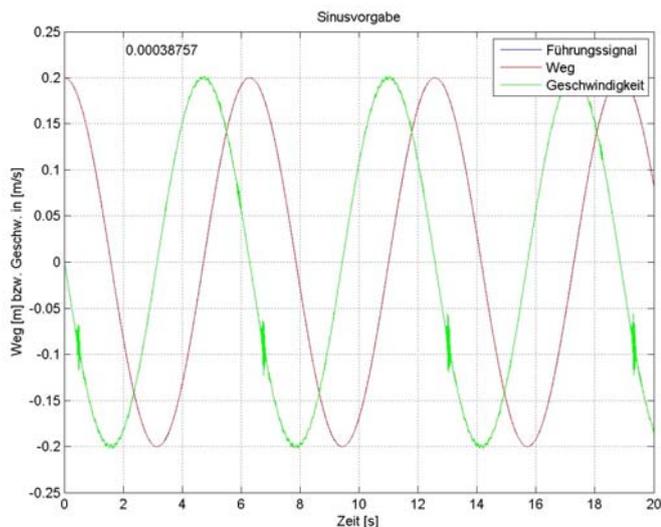
Auf die Funktionsweise beider Regelbereiche wird im Folgenden nur sehr kurz eingegangen, da der Fokus des Vortrages auf der geometrischen Optimierung liegt.

Beim IMC-Regler wird das Modell der Regelstrecke  $\hat{G}(s)$  der Regelstrecke  $G(s)$  parallel geschaltet, so dass nur die Differenz  $x(s) - \hat{x}(s)$  auf den IMC-Regler zurückgeführt wird. Die wahren und die durch das Modell vorherbestimmten Regelgrößen unterscheiden sich im störungsfreien Fall ( $z(s)=0$ ) nicht, sodass das Rückführsignal verschwindet. In diesem Fall wirkt der Regler als reine Vorwärtssteuerung. Natürlich müssen hierbei Modell und Realität in weiten Bereichen sehr ähnlich sein.

Beim Kalman-Filter betrachten wir ein System, das durch das Nutzsignal und ein stochastisches Rauschsignal angeregt wird. Das Messwerk liefert mit Hilfe des Beobachtungsvektors  $z(t)$  Messsignale an die in  $x_t$  ermittelten Zustandssignale des Systems. Die Messungen sind durch ein stochastisches Messrauschen zusätzlich verfälscht. Ziel ist es, ein System zu erzeugen, das aus  $z_t$  laufend optimale Zustandsschätzungen  $\hat{x}_t$  liefert. Gefunden werden muss nun ein geeigneter Algorithmus, ein Filter, der bei bekannter Systemdynamik und Messwerterfassung mit den Informationen über die Rauschsignale aus den Messungen  $z$  eine „optimale“ Schätzung  $\hat{x}$  für den Zustand derart bestimmt, dass das mittlere Schätzfehlerquadrat  $E = (x_t - \hat{x}_t)^2$  minimal ist. Soll also der Schätzfehler op-

timal sein, sodass die Komponenten des Schätzfehlers minimale Varianzen aufweisen, ist dies äquivalent mit der Forderung, dass die Spur der Kovarianzmatrix minimal ist. Das Kalman-Bucy-Filter hat die gleiche Struktur wie ein Beobachter, wobei die Berechnung der optimalen Filterverstärkung  $K$  über eine modifizierte Matrix-Ricatti-Gleichung erfolgt.

Betrachten wir wieder die sinusoidale Bahnfolgegenauigkeit für eine Geschwindigkeit von 1 rad/s, verbessert sich der Wert der quadratischen Soll-Ist-Differenz im Vergleich zur PI-Regelung von 0,44287 auf 0,000387. Nur noch eine minimale Geschwindigkeitswelligkeit ist festzustellen, siehe hierzu auch **Bild 16**.



**Bild 16** Bahnfolgegenauigkeit des asymmetrischen Flachspulmotors, 127,5 mm bei kalmangefilterter IMC-Regelung

Die kalmangefilterte IMC-Regelung ist für die hochgenaue Positionierung von Lineardirektantrieben hervorragend geeignet. Deutlich wird, dass durch eine geeignete Regelung ein eisenbehaffeter Motor höchste Dynamik trotz hoher Läufermasse besitzen kann. Flachspulmotoren weisen in dieser Kombination somit beste Eigenschaften auf. Auch für Zahnspulenlineardirektantriebe werden ähnlich gute Werte erzielt, jedoch schränkt die sehr hohe Läufermasse die Dynamik und die Bahnfolgegenauigkeit ein. Die Positioniergenauigkeit beträgt 0 bis 2  $\mu\text{m}$  für das hier genutzte Inkrementalmesssystem mit einer Auflösung von 2  $\mu\text{m}$ . Sie wird für sämtliche untersuchten Rückschlusstypen erreicht.

## 5 Zusammenfassung

Durch Verändern der Geometrie wie auch der Regelungsstruktur lässt sich zeigen, dass die Rastkräfte bei asymmetrischen Lineardirektantrieben stark reduziert, eine bessere Laufruhe und eine höhere Positioniergenauigkeit erreicht werden können. Eine systematische Einteilung der einzelnen Maßnahmen und deren Auswirkungen auf die Dyna-

mik und die Kraftentwicklung von eisenbehaffeten Lineardirektantrieben wurden bisher nicht nachgewiesen.

Um die störenden Rastkräfte besser Handhaben zu können, wurden die geometrischen Modifikationsmöglichkeiten an Flachspul- und Zahnspulläufem mittels Finite-Element-Methode auf Basis des Programms „Maxwell“ in realitätsnahen Grenzen systematisch variiert. Danach wurden markante Rückschlussvarianten aufgebaut, durch Messung überprüft und dokumentiert. Parallel wurden verschiedene Fahrregler, wie z. B. modellbasierte Regler und Regelungsstrukturen, mittels Simulation (MatLab/Simulink) dargestellt und mit dSpace überprüft.

Insgesamt können Rastkräfte geometrisch beispielsweise durch Veränderung der Rückschlusslänge, durch Schrägstellen der Eisenkanten und/oder Magnetkanten und durch Veränderung der Zahnform reduziert werden.

Es zeigt sich bei der Anwendung der Finiten-Element-Simulation, dass Rastkräfte vorher bestimmbar sind und in weiten Bereichen durch reale Modelle bestätigt werden. Dabei weisen Fertigungstoleranzen am Motor, Materialschwankungen und die Vernetzung der Simulationsmodelle bei den Ergebnissen möglicherweise einen größeren Einfluss auf, als vermutet.

Bei der Wahl der Regelungsstrukturen zeigen modellbasierte Internal Modell Control Regelungen kombiniert mit einem Kalman-Bucy-Filter die geringsten Schwankungen im Geschwindigkeitsverlauf bei gleichzeitig sehr hoher Positioniergenauigkeit und Wiederholbarkeit.

Die vielen Variationsmöglichkeiten der geometrischen Parameter können hier nur exemplarisch behandelt werden, um einen Einblick zu vermitteln. Die Gesamtergebnisse werden in einer nachfolgenden Dissertation im Detail erörtert.

## 6 Literatur

- [1] Atencia, J.; Martinez, G.: Minimization of cogging forces in flat permanent magnet linear motors. Nagana Japan: Proceedings of the LIDA Conference 2001
- [2] Brammer, K.; Siffling, G.: Kalman-Bucy-Filter: Deterministische Beobachtung und stochastische Filterung. Oldenbourg: München, Wien 1994
- [3] Cruise, R.; Landy C.: Reduction of cogging forces in linear synchronous Motors. South Africa: University of the Witwatersrand 1999
- [4] Fischer, R.: Elektrische Maschinen. München, Wien: Carl Hanser Verlag 2006
- [5] Föllinger, O.: Regelungstechnik Einführung in die Methoden und ihre Anwendung. Heidelberg: Hüthig Verlag 2008
- [6] Jurisch, F.: Nutrastrmomente in elektrischen Maschinen. Hanau: Vaccumschmelze GmbH Co. KG 2010
- [7] Stölting, H. D.; Kallenbach, E.: Handbuch Elektrische Kleinantriebe. München, Wien: Carl Hanser Verlag 2006

# Neuer Gestaltungsansatz bei aerostatisch geführten Ein- und Mehrkoordinatenantrieben

## New design approach to air-guided single- and multi-coordinate drives

Dipl.-Ing. Frank Mochel, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik (IKFF), Stuttgart, Deutschland, ikff@ikff.uni-stuttgart.de

### Kurzfassung

Ein neuer Gestaltungsansatz bei luftgeführten Ein- und Mehrkoordinatenantrieben sieht die vollständige Integration der aktiven Antriebs- und Luftführungskomponenten in den Stator vor. Mit dieser konstruktiven Umkehrung der sonst üblichen Anordnung der aktiven und passiven Baugruppen sollen die derzeit bei industriell verfügbaren Linearachsen und Planarmotoren bestehenden Nachteile wie begrenzte Verfahrswege und eingeschränkte Dynamik vermieden werden, die sich bauartbedingt infolge der sonst erforderlichen und permanent mitzuführenden Versorgungsleitungen für z. B. Strom, Druckluft, Steuer- und Messsignale ergeben. Während sich dieser Ansatz antriebsseitig mit vertretbarem Aufwand durch eine gestellfeste Antriebswicklung und einen passiven, magnetbehafteten Läufer realisieren lässt, entstehen bei der aerostatischen Führung auf Grund der ortsfesten Druckluftspeisung und des im Vergleich zum Läufer flächenmäßig größeren Luftaustrittsbereichs eine Reihe prinzipbedingter Probleme, die den Aufbau und den Betrieb derartiger Antriebssysteme grundlegend beeinflussen.

### Abstract

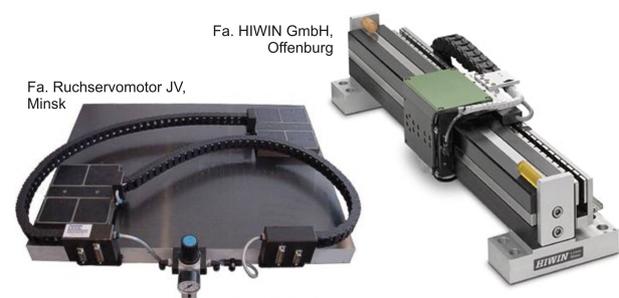
In a new design approach to air-guided single- and multi-coordinate drives, the active drive and air bearing components are completely integrated in the stator. By changing the usual arrangement of active and passive parts it is possible to eliminate the present disadvantages of commercial linear and planar drives i.e. the limited track and restricted dynamic. Normally these disadvantages are caused by the required wiring used for current, compressed air, control and measurement signals. For this approach the drive components could be realised with acceptable effort by using stator fixed coils and a passive slider with integrated magnets. Opposed to this, the implementation of the air bearing is more challenging because of the stationary air exhausting nozzles and the much larger exhausting stator area compared to the slider. This fact has a fundamental influence on the structure and the operation of the guidance concept.

## 1 Einleitung

Luftgeführte Ein- und Mehrkoordinatenantriebe sind in vielen Bereichen der Industrie und Wissenschaft unverzichtbar. Hohe Genauigkeit, nahezu nicht vorhandene Reibung, keine verunreinigenden Schmiermittel sowie weitgehende Wartungsfreiheit stellen wichtige Eigenschaften dar, die heute von vielen Anwendungen in Mess-, Prüf- und Produktionseinrichtungen gefordert werden und für den einwandfreien Betrieb dieser Anlagen häufig unabdingbar sind. Nicht zuletzt deshalb haben sich aerostatisch geführte Antriebssysteme längst im Bereich der Fein- und Mikrobearbeitung sowie in der Medizintechnik, der Pharma- und der Lebensmittelindustrie, wo neben kleinsten Abmessungen und höchster Präzision insbesondere auch ein kontaminationsfreier Betrieb angesichts steriler oder emissionskritischer Umgebungen (Reinraumtauglichkeit) zu garantieren ist, etabliert.

Den derzeit verfügbaren aerostatisch geführten Linearachsen und Planarmotoren (**Bild 1**) ist gemein, dass sie läuferseitig integrierte Führungskomponenten zur Druckluftspeisung im Zusammenhang mit ebenfalls meist läuferseitig aktiven Antriebskomponenten nutzen. Diese Anordnung der Funktionselemente bedingt aber Versorgungs-

leitungen für z. B. Druckluft, Strom, Steuer- und Messsignale, die nicht nur aufwändig und sorgsam nachgeführt werden müssen, sondern zugleich die Dynamik, die Bewegungsfreiheit und den Arbeitsraum, insbesondere wenn mehrere Läufer auf einem Stator genutzt werden, erheblich einschränken. Antriebe dieser Bauart eignen sich daher lediglich für kleine Verfahrswege.

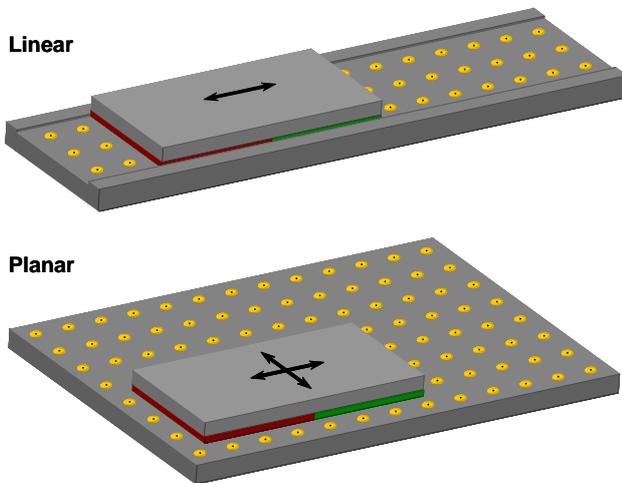


**Bild 1** Aerostatisch geführte Direktantriebe

## 2 Neues Antriebskonzept

Die Realisierung großer Verfahrswege für räumlich unbegrenzte Transport- und Positionieraufgaben erfordert ein

hiervon abweichendes Gestaltungskonzept, das die vollständige Integration der aktiven Antriebs- und Luftführungsteile in den Stator vorsieht, folglich auf die sonst läuferseitig notwendigen Zuleitungen verzichtet und einen gänzlich ungebundenen, frei beweglichen Läufer ermöglicht.



**Bild 2** Neuer Konstruktionsansatz für Direktantriebe mit passiven Läufern

Dieser Ansatz setzt allerdings eine konstruktive Umkehrung der bisher üblichen Anordnung der aktiven und passiven Baugruppen voraus (**Bild 2**). Während sich dies antriebsseitig mit vertretbarem Aufwand durch eine gestellfeste Antriebswicklung und einen passiven, magnetbehafteten Läufer realisieren lässt, ergeben sich bei der aerostatischen Führung auf Grund der ortsfesten Druckluftein- speisung und des im Vergleich zum Läufer flächenmäßig größeren Luftaustrittsbereichs eine Reihe prinzipbedingter Probleme, die den Aufbau und den Betrieb der Führung grundlegend beeinflussen.

Am IKFF sind deshalb neben der grundsätzlichen Gestaltung und Auslegung der Führungselemente insbesondere die Realisierung einer verbrauchsoptimierten Druckluftversorgung sowie das positions- und bewegungsabhängige Führungsverhalten Inhalt aktueller Forschungsarbeiten. Zu den Untersuchungsschwerpunkten zählen hierbei eine zuverlässige und möglichst selbsttätige Kommutierung der Druckluftzufuhr, um den in Abhängigkeit von der Statorfläche enorm ansteigenden Luftverbrauch zu begrenzen, sowie die gezielte Analyse des Läuferverhaltens bzw. der komplexen Strömungsvorgänge beim Überfahren der beaufschlagten, flächig verteilten Lufteinlassdüsen, um ein instabiles Verhalten auf Grund von Schwingungen, Kippmomenten, Rückstößen oder Grundieren auch unter Berücksichtigung der zeitlich und örtlich veränderlichen Normalkräfte des elektrodynamischen Antriebs zu vermeiden.

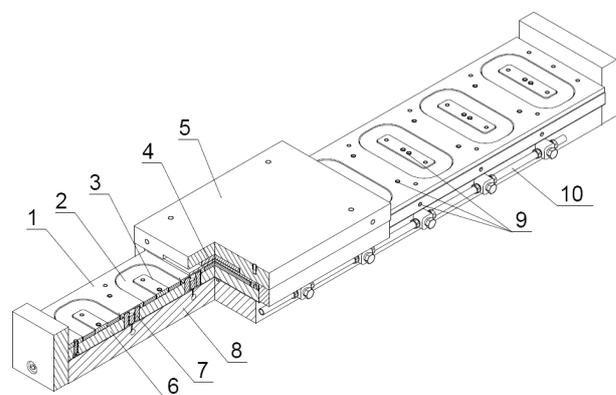
Aber auch die räumliche Anordnung der Antriebs- und Führungskomponenten zueinander und deren Integration in den Stator verursachen mitunter erhebliche Beeinträchtigungen, die im Betrieb u. a. schwankende Antriebs- und

störende Rastkräfte hervorrufen und folglich bei der Entwicklung des elektrischen Antriebssystems zu berücksichtigen sind. Umfangreiche Simulationen und Messungen an realisierten Prototypen zeigen, dass die bekannten bzw. etablierten Lösungen und Gestaltungsregeln der konventionellen Antriebstechnik oft nur eingeschränkt oder gar nicht auf diesen neuartigen Aufbau übertragen werden können, um die nachteiligen Auswirkungen eliminieren oder zumindest verringern zu können.

Die nachfolgenden Kapitel sollen deshalb die wesentlichen Probleme sowohl bei der Entwicklung und Auslegung der jeweiligen Teilsysteme (elektrodynamischer Direktantrieb, aerostatische Führung) als auch bei deren Zusammenführung zu einem funktionsfähigen Gesamtsystem aufzeigen. Es werden konkrete Lösungsansätze und deren Umsetzung anhand erster Prototypen diskutiert.

### 3 Aufbau und Funktionsweise

Zum besseren Verständnis ist der detaillierten Betrachtung der einzelnen Komponenten eine allgemeine Beschreibung des grundsätzlichen Aufbaus und der Funktionsweise des Gesamtsystems vorangestellt. **Bild 3** und **Bild 4** veranschaulichen den neuartigen Gestaltungsansatz am Beispiel eines aerostatisch geführten Linearantriebs mit räumlich kombiniert angeordneten Antriebs- und Führungselementen. Eine räumlich getrennte Anordnung (**Bild 5**) ist zwar mit geringerem Aufwand realisierbar, soll an dieser Stelle aber nicht näher erörtert werden, da sie lediglich bei Linearachsen genutzt und nicht auf Planarmotoren übertragen werden kann. Beide Konzepte basieren aber auf derselben Funktionsweise.



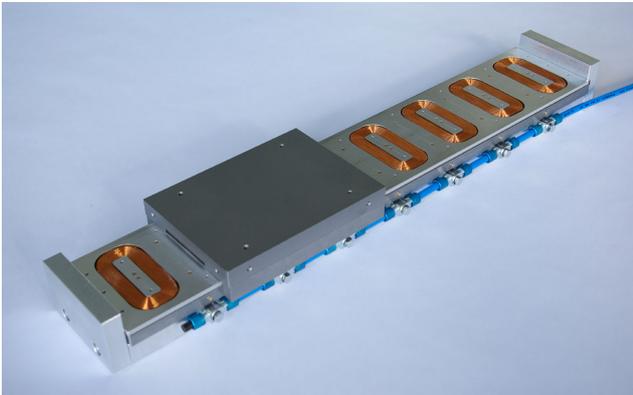
- |                           |                           |
|---------------------------|---------------------------|
| 1 Führungsdeckplatte      | 6 Statorrückschlussplatte |
| 2 Antriebsspule           | 7 Ventilkörper            |
| 3 Spulenkern              | 8 Grundplatte             |
| 4 Permanentmagnet         | 9 Mikrodüseneinsatz       |
| 5 Läuferrückschlussplatte | 10 Druckluftanschluss     |

**Bild 3** Prinzipieller Aufbau des linearen Antriebs

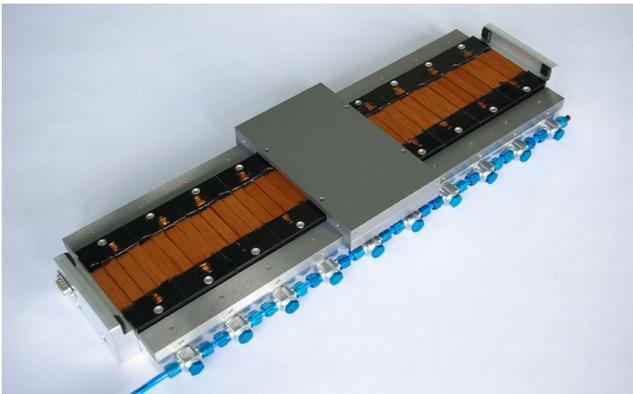
Zusammen mit den beiden weichmagnetischen Rückschlussplatten bilden die Permanentmagnete und die Spulen den elektrodynamischen Antrieb.

Die in der statorseitigen Führungsfläche eingelassenen, flächig verteilten Mikrodüseneinsätze fungieren als Drosseln und sind für den Aufbau eines tragfähigen Luftfilms

entscheidend. Die Druckluftversorgung erfolgt über einen zentralen Druckluftanschluss und intern angeordnete Verteilerkanäle, die im Ruhezustand von speziellen ferromagnetischen Ventilkörpern verschlossen und erst bei Überdeckung durch den Läufer geöffnet werden (s. Kapitel 4.2).



**Bild 4** Linearantrieb mit räumlich kombiniert angeordneten Antriebs- und Führungskomponenten



**Bild 5** Linearantrieb mit räumlich getrennt angeordneten Antriebs- und Führungskomponenten

## 4 Großflächige aerostatische Führungen

Basierend auf dem experimentell ermittelten, realen Betriebsverhalten dieser Führungen und den zusätzlichen Anforderungen, die speziell an ebene Ein- und Mehrkoordinatenantriebe mit uneingeschränkten Bewegungsräumen zu stellen sind, konnte der in [1] detailliert beschriebene Forschungs- und Entwicklungsbedarf abgeleitet werden.

Zu den Untersuchungsschwerpunkten zählen:

- das Führungsverhalten (insbesondere beim Überfahren beaufschlagter Drosselstellen und unter Berücksichtigung der zeitlich und örtlich veränderlichen Antriebskräfte),
- die Realisierung einer verbrauchoptimierten Druckluftversorgung (Entwicklung einer zuverlässigen und möglichst selbsttätigen Kommutierung der Luftauslassbereiche),

- die Gestaltung der Drosselstellen (Mikrodüsen oder offenporöse Werkstoffe) und Bestimmung der Anforderungen an die Führungsflächen,
- die modulare Gestaltung des Stators,
- die Entwicklung geeigneter Berechnungs- und Simulationsverfahren.

### 4.1 Stabiles Führungsverhalten

Wie bereits erwähnt, ändern sich infolge der neuen Anordnung der aktiven und passiven Baugruppen die Führungseigenschaften grundlegend. Im Gegensatz zum statischen bzw. quasistatischen Betriebsverhalten bei läuferseitig integrierten Elementarlagern weisen statorseitig beaufschlagte Führungen nicht nur dynamisch äußerst komplexe, sondern bisweilen auch instabile Strömungsvorgänge auf. Insbesondere das Überfahren der Mikrodüsen bewirkt eine permanente Veränderung bzw. Störung des tragenden Luftfilms, was wiederum zu Schwingungen, Kippmomenten, Grundieren oder Rückstößen führen kann. Bei den konventionellen Luftlagern gibt es kein vergleichbares Verhalten. Bisherige Untersuchungen zeigen aber, dass die beschriebenen Auswirkungen bei Verwendung von Mikrodüsen als Drosselstellen stärker ausfallen als bei porösen Werkstoffen und insofern deren optimale Gestaltung und Anordnung mit entscheidend sind.

Zudem schwankt die Anzahl der Druckluft zuführenden Mikrodüsen unter dem Läufer je nach dessen Position erheblich. Mit entsprechend optimierten Bypassrillen auf der läufer- und / oder statorseitigen Führungsfläche kann die Tragfähigkeit jedoch verbessert und damit der Einfluss der variierenden Düsenanzahl reduziert werden. Dies setzt allerdings eine individuelle Auslegung und Anpassung der Bypassrillen an den jeweiligen Anwendungsfall voraus.

### 4.2 Verbrauchsoptimierte Druckluftversorgung

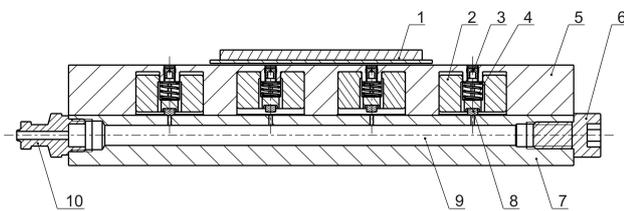
Unabhängig von der Statorgröße kann die Tragkraft der Führung nur über die kleinere Läuferfläche erzielt werden. Die den Läufer umgebenden Bereiche sind zwar beaufschlagt aber ohne Belastung, so dass nahezu die gesamte eingebrachte Druckluft ungenutzt entweicht. Zur Senkung des Luftverbrauchs ist folglich eine Begrenzung der Druckluftzufuhr auf die vom Läufer tatsächlich benötigte Statorzone unerlässlich.

Dazu ist eine Unterteilung der gesamten Statorfläche in geeignet kleine Ausströmbereiche vorzunehmen. Um eine ungestörte Läuferbewegung gewährleisten zu können, müssen diese einzelnen Segmente allerdings zeitlich und räumlich korrekt zueinander betrieben werden. Dies erfordert eine zuverlässige Steuerung oder Regelung der Luftzufuhr in Abhängigkeit von der aktuellen Position sowie dem vorgesehenen Fahrweg des Läufers, möglichst ohne großen Zusatzaufwand.

In Analogie zum elektrotechnischen Wortgebrauch wird dieser Vorgang der beabsichtigten Weiterschaltung bzw. der Zu- und Abschaltung der Druckluftversorgung zugeordneter Führungsbereiche ebenfalls als „Kommutierung“

bezeichnet. Realisierbar ist eine derartige Kommutierung zum Beispiel mittels extern gesteuerter Schaltventile. Jedoch wird hierfür mit zunehmender Statorgröße oder bei entsprechend kleiner Segmentierung der Fläche eine große Anzahl teurer Schaltventile benötigt, die ihrerseits einen enormen Montage- und Steuerungsaufwand verursachen. Aus wirtschaftlichen Gründen ist deshalb eine möglichst selbsttätige Kommutierung der Statorsegmente vorzusehen, die ggf. die vorhandenen Antriebs- und Führungskomponenten sinnvoll einbezieht und ohne äußeren Bedieneingriff auskommt, d. h. einzig durch die Läuferposition oder die Läuferbewegung gesteuert wird.

Am IKFF wurden deshalb bereits verschiedene Verfahren zur selbsttätigen Kommutierung der statorseitigen Luftversorgung entwickelt. Als besonders geeignet hat sich hierbei eine Lösung erwiesen, deren Funktionsweise auf der geschickten Ausnutzung des Antriebsmagnetfeldes durch integrierte ferromagnetische Ventilkörper basiert.

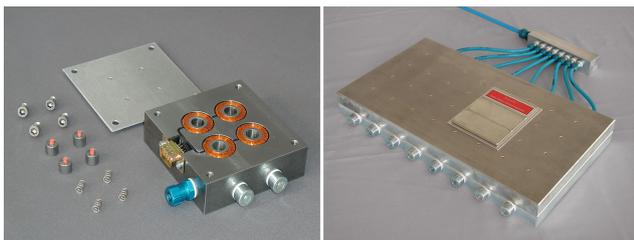


- |                                  |                              |
|----------------------------------|------------------------------|
| 1 magnetbehalteter Läufer        | 6 Verschlusschraube          |
| 2 ferromagnetischer Ventilkörper | 7 Führungsgrundplatte        |
| 3 Mikrodüseneinsatz              | 8 Dichtungseinsatz           |
| 4 Druckfeder                     | 9 Druckluftversorgungschanal |
| 5 Führungsdeckplatte             | 10 Druckluftanschluss        |

**Bild 6** Aerostatische Führung mit selbsttätiger Kommutierung der statorseitigen Druckluftzufuhr (ohne Antrieb)

Wie in **Bild 6** am Modellschnitt zu erkennen ist, verschließen diese Ventilkörper im Ruhezustand durch Federkraft die Druckluftversorgungskanäle und werden erst bei entsprechender Überdeckung durch den Läufer auf Grund der dann wirkenden Anziehungskraft des Permanentmagnetfeldes entgegen der Federkraft soweit angezogen, dass sich die Zuleitungen der Versorgungskanäle öffnen. Die Druckluft kann nunmehr durch die axialen Durchgangsbohrungen der Ventilkörper in die Vorkammern und von dort über die flächig angeordneten Mikrodüsen in den Luftspalt der Führung einströmen.

Dieses Funktionsprinzip lässt sich gleichermaßen auf ein- oder mehrachsige Antriebe übertragen. Sowohl das Öffnen als auch das Schließen der Ventile erfolgt bei richtiger



**Bild 7** Planare Versuchsmodelle

Auslegung des Magnetkreises, der Federkraft und des anliegenden Speisefluidrucks selbsttätig, ohne externen Eingriff, ausschließlich in Abhängigkeit von der Läuferposition. **Bild 7** zeigt exemplarisch zwei realisierte Führungen mit integrierter Kommutierung der Druckluftversorgung, mit denen nicht nur die Funktionsfähigkeit, sondern auch die Zuverlässigkeit der selbsttätigen Kommutierung eindeutig belegt werden konnte.

### 4.3 Genauigkeitsanforderungen an die Führungsflächen

Die Luftspalthöhe konventionell gestalteter und in ihrem Auslegungspunkt betriebener aerostatischer Führungselemente mit Einlassdrosselung liegt üblicherweise im Bereich von 7 – 15  $\mu\text{m}$ . Bewährte Gestaltungsempfehlungen (u. a. [2], [3]) fordern für einen störungsfreien Einsatz dieser Systeme eine Ebenheit der den Führungsspalt bildenden Flächen, die mindestens um den Faktor 3 bis 4 kleiner sein soll als der vorgewählte Luftspalt. Die Rautiefe der Führungsflächen hat im Vergleich zur Ebenheit einen geringeren Einfluss auf die Tragfähigkeit und das Betriebsverhalten. Es ist ausreichend, wenn sie in den gleichen Grenzen wie die Abweichung von der Ebenheit bleibt.

Diese Vorgaben können unverändert auch auf die neuen Führungssysteme angewandt werden, sie sind allerdings nur bei entsprechender Stabilität der Führungselemente zu erreichen. Insbesondere bei den großflächigen Statorn mit ihren integrierten Antriebs- und Luftkommutierungsteilen verursacht dies zuweilen erhebliche konstruktive und fertigungstechnische Probleme. Gängige Bearbeitungsverfahren zur Erzeugung der notwendigen Oberflächengenauigkeit sind beispielsweise Feinschleifen mit anschließendem Läppen oder Polieren sowie bei nicht eisenhaltigen Werkstoffen die Diamantbearbeitung. Mit Diamantfräsen (Fly-cutting) können Ebenheiten  $< 0,5 \mu\text{m} / 100 \text{mm}$  und Rauheiten  $R_a < 5 \text{nm}$  (materialabhängig) hergestellt werden. Es ist jedoch zu beachten, dass diese Fertigungsschritte an den bereits endmontierten Führungselementen erfolgen müssen, um nachträglichen Verzug ausschließen zu können. Denn bereits kleine Spannungsänderungen in den Führungsdeckplatten, wie sie z. B. beim Verschrauben mit einer nicht ideal ebenen Gegenfläche oder in den Verschraubungspunkten durch falsche Anzugsmomente entstehen, führen schnell zu mikrometergroßen Unebenheiten in Form von Vertiefungen oder Wölbungen, die den Gebrauch der Führungen nachteilig beeinflussen oder sogar ganz unterbinden können.

### 4.4 Berechnungsgrundlagen für die Auslegung

Die Berechnung erfolgt mit dem Ziel, konkrete Daten für die Dimensionierung, Gestaltung und den Betrieb der druckluftgespeisten Führungen bereitzustellen. Neben den geometrischen Abmessungen der Führungsflächen, der Anzahl und Verteilung der Drosselstellen sowie dem Drosselquerschnitt sind vor allem die anwendungs- und betriebsabhängigen Größen wie beispielsweise die Tragkraft,

die Steifigkeit, die Luftspalthöhe, der Speise- und der Kammerluftdruck von großer Bedeutung.

Die genaue Analyse der Strömungsvorgänge und der Druckverteilung sowohl im Führungsspalt als auch in den Drosselstellen ist eine notwendige Voraussetzung hierfür. Die Berechnungsgrundlage bilden dabei die Bernoullische Druck- und Energiegleichung, die Navier-Stokesschen Bewegungsgleichungen sowie die Kontinuitätsbedingung. Je nach Art und Form des zu untersuchenden Führungselements sowie nach gewähltem Berechnungsansatz ergeben sich allerdings unterschiedliche Näherungsverfahren zur Auslegung aerostatischer Systeme. Die bekanntesten Berechnungsmethoden gehen auf Unterberger [4], Loch [5], Heinzl [6], Gerke [7] und Donat [2] zurück.

Allen diesen Verfahren ist gemein, dass sie lediglich den stationären Betriebszustand abbilden. Während dies für die Auslegung konventioneller Führungen mit läuferseitig mitbewegten Einströmöffnungen zur Druckluftzufuhr ausreichend ist, ergeben sich bei der statorseitigen Druckluftversorgung auf Grund der ständig variierenden Anzahl und veränderlichen Lage der Düsen unter dem Läufer dynamische Zustände, die bislang durch kein Berechnungsverfahren erfasst werden können. Es besteht zwar die Möglichkeit, mehrere ausgewählte Extremstellungen statisch zu untersuchen und auf Basis dieser Ergebnisse Rückschlüsse auf die Betriebsparameter und Eigenschaften der aerostatischen Führungen zu ziehen, eine präzise Auslegung und vollständige Erfassung des Führungsverhaltens ist auf diese Weise jedoch nicht zu erreichen.

Auch die modernen Verfahren zur Strömungssimulation scheitern an dieser Aufgabe. Obgleich mit ihrem Einsatz das genaue Druckprofil im Luftspalt statisch und transient simuliert und somit die Tragkraft und Steifigkeit exakt berechnet werden können, sind keine Aussagen zum vollständigen Betriebs- und Schwingungsverhalten möglich. Da aber insbesondere die selbsterregten Schwingungen zum Ausfall („Air-Hammer“) führen können, sind experimentelle Untersuchungen an Prototypen unter realitätsnahen Bedingungen auch weiterhin unerlässlich.

## 5 Elektrodynamischer Antrieb

### 5.1 Kommutierung

Der Betrieb des elektrodynamischen Antriebs kann sowohl gesteuert als auch positionsgeregelt erfolgen. Auf Grund der großen Verfahrenwege und des durch die aktiven Antriebs- und Führungskomponenten bereits stark eingeschränkten, für die statorseitige Integration eines Wegmesssystems zur Verfügung stehenden Bauraums wurde zunächst die einfachere Ansteuerung mit zeitabhängiger Kommutierung bevorzugt. Der Läufer wird dabei durch die individuelle Bestromung der einzelnen Spulen angetrieben und positioniert. Für Bereiche, die eine höhere Positioniergenauigkeit erfordern, kann ein geregelter Betrieb vorgesehen werden.

Doch unabhängig von der Betriebsart ist die Realisierung eines solchen Antriebs technisch aufwändig, da für jede

Spule eine eigene Leistungsendstufe benötigt wird. Insbesondere bei den Planarmotoren mit ihren vielen, flächig angeordneten Antriebsspulen ist es deshalb sinnvoll, mittels zu Strängen zusammenschalteter Einzelspulen und spezieller Kommutierungsfunktionen eine Reduzierung der elektronischen Bauelemente und Vereinfachung der Ansteuerung zu bewirken, wie sie in [8] beschrieben wird. Bei entsprechender geometrischer Auslegung und günstiger Einbeziehung des Wickelsinns der Spulen ergeben sich so innovative Lösungen für die Ansteuerung von ein- und mehrachsigen Direktantrieben (**Bild 8**).



**Bild 8** 6-strängige Spulenverschaltung mit Wickelsinnanpassung für Bewegungen in x- und y-Richtung

### 5.2 Auslegung und Gestaltung

Sowohl die analytischen Berechnungsmethoden als auch die Simulationsverfahren zur Auslegung des elektrodynamischen Antriebs basieren auf den Maxwell'schen Gleichungen. Da diese in der Literatur ausführlich behandelt werden, soll an dieser Stelle der Einfluss des neuen Gestaltungsansatzes auf die Dimensionierung diskutiert werden. Der passive Läufer führt wegen der einseitigen Magnetanordnung beispielsweise zu einem unsymmetrischen Magnetkreis. Infolgedessen treten hohe Normalkräfte zwischen den bewegten und feststehenden Komponenten auf, die bis zum 15-fachen der Vorschubkräfte betragen können. Es handelt sich hierbei um Grenzflächenkräfte, die mit der Maxwell'schen Zugkraftformel berechnet werden können und von der aerostatischen Führung als Tragkräfte aufzunehmen sind.

Die Vorschubkräfte beruhen auf dem Wirkprinzip der Lorentzkraft, nach dem bewegte Ladungsträger in einem Magnetfeld eine Kraft erfahren. Da sich die felderzeugenden Permanentmagnete relativ zum ortsfesten Stator bewegen, kommt es im statorseitigen Eisenrückschluss zu Ummagnetisierungen und Wirbelstromeffekten, die eine dämpfende Wirkung auf das System haben. Der statorseitige Rückschluss ist außerdem in den feldführenden Bereichen möglichst homogen zu gestalten, d. h. ohne größere Fehlstellen wie Bohrungen oder überstehende Teile, da diese Störungen Reluktanzkräfte zwischen dem Stator und dem Läufer hervorrufen. Umfangreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass die bei konventionellen, mit bewegten Spulen ausgestatteten Antrieben erfolgreich einsetzbaren konstruktiven Abhilfen (z. B. Überhänge und Schrägen am läuferseitigen Rückschluss, Magnetschrägstellung etc.) zu

keinen nennenswerten Verbesserungen beim neuen Aufbau führen. Die einzige Möglichkeit besteht deshalb darin, mit Hilfe einer nahezu geschlossenen Statorrückschlussplatte die Rastkräfte zu minimieren.

Auf Grund des großen, durch die läufer- und statorseitige Führungsdeckplatte bedingten Arbeitsluftspalts des elektromagnetischen Kreises ergeben sich bei der Antriebsauslegung trotz der Verwendung von hochenergetischen Seltenerd-magneten nur kleine Vorschubkräfte. Eine Steigerung der Kräfte ließe sich zwar mit dem Einsatz ferromagnetischer Spulenkern erzielen, allerdings verursacht diese Maßnahme, wie bereits dargestellt, zusätzliche Rastkräfte, weshalb auf deren Umsetzung verzichtet wird.

## 6 Gesamtsystem

Bisher wurden der Antrieb und die Führung getrennt voneinander betrachtet. Da diese Teilsysteme neben dem Bau- raum auch mehrere Funktionselemente gemeinsam nutzen, ist bei der Auslegung und Gestaltung sowie beim Betrieb des Gesamtsystems auf deren gegenseitige Beeinflussung zu achten. Dies erfordert einen ganzheitlichen Lösungsansatz mit dem Ziel, ein voll funktionsfähiges Gesamtsystem zu entwickeln. Insbesondere die Gestaltung des Magnetkreises hat dabei so zu erfolgen, dass die resultierenden magnetischen Eigenschaften zugleich den Anforderungen des elektrodynamischen Antriebs, der statorseitigen Druckluftkommutierung und der Vorspannung der aerostatischen Führung genügen. Da die Ergebnisse des einen gleichzeitig die Grundlage für die Berechnung des anderen Teilsystems und umgekehrt darstellen, ist ein iterativer Auslegungs- und Optimierungsprozess zu durchlaufen.

Dabei sind folgende Zielkonflikte zu berücksichtigen:

- Änderungen an den Antriebskomponenten selbst, aber auch die Überlagerung des Permanentmagnetfeldes mit den elektromagnetischen Feldern der positionsabhängig bestromten Spulen bewirken ein zeitlich und örtlich veränderliches Gesamtmagnetfeld, das großen Einfluss auf die Höhe und den Verlauf der Ventilkörper- sowie der Normalkräfte hat. Die dynamischen Schwankungen der Normalkräfte müssen dabei von der Führung aufgenommen und kompensiert werden.
  - Stärkere Führungsdeckplatten auf Seiten des Stators und des Läufers erhöhen die Stabilität der Führungsflächen, bedingen aber gleichzeitig einen größeren Arbeitsluftspalt des elektromagnetischen Kreises, was zu geringeren Vorschub-, Normal- und Ventilkörperkräften führt.
  - Mit ferromagnetischen Spulenkernen, größeren oder über die Statorrückschlussplatte hinaus stehenden Ventilkörpern können zwar die Vorschub- bzw. Ventilkörperkräfte verbessert werden, allerdings verursachen diese Maßnahmen große Rastkräfte.
  - Ebenso führen Druckluftverteilerkanäle und Verschraubungspunkte im Rückschluss zu Störungen des magnetischen Feldverlaufs und somit zu nachteiligen Veränderungen der Kraftverläufe.
- Die prinzipielle Vergrößerung des Auslegungsluftspalts reduziert zwar die Anforderungen an die Form- und Oberflächengenauigkeit der Führungsflächen, allerdings senkt diese Maßnahme gleichzeitig die Steifigkeit und damit das Vermögen der aerostatischen Führung, auf Laständerungen reagieren zu können.
  - Bei Einfügen kleiner Magnetabstände erhöhen sich die Ventilkörper- und Rastkräfte auf Grund des stärker in den Statorrückschluss gedrängten Feldverlaufs. Die Vorschubkräfte nehmen jedoch nur geringfügig zu.

## 7 Zusammenfassung

Obgleich erste Ergebnisse bereits die Funktionsfähigkeit und das enorme Potenzial dieses neuen Gestaltungsansatzes aufzeigen, müssen noch eine Reihe offener Fragen gelöst werden, um einen wirtschaftlichen Betrieb dieser Systeme auch unter industriellen Einsatzbedingungen gewährleisten zu können.

Letztlich eröffnen die Vorteile dieser aerostatisch geführten Direktantriebe mit statorseitiger Druckluftversorgung und passivem Läufer aber die Chance, mit innovativen Lösungen neue Anwendungsfelder zu erschließen oder bestehende zu optimieren. Dies gilt insbesondere für die Fein- und Mikrobearbeitung sowie die Medizintechnik, die Pharma- und die Lebensmittelindustrie, wo neben höchster Präzision auch ein kontaminationsfreier Betrieb angesichts steriler oder emissionskritischer Umgebungen zu garantieren ist und die bisher realisierbaren Verfahrenswege nicht mehr ausreichen.

## 8 Literatur

- [1] Mochel, F.: Aerostatische Führungen in Direktantrieben. In: Festschrift – 40 Jahre IKFF mit Jahresbericht 2007. Universität Stuttgart, IKFF, 2008
- [2] Donat, H.: Aerostatische Führungen und Luftlagerungen. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2006
- [3] Langenbeck, P.: Wirtschaftliche Mikrobearbeitung. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2009
- [4] Unterberger, R.: Vereinfachte Berechnung der Tragfähigkeit von aerostatischen Luft-Lagern und Führungen. In: Feinwerktechnik & Messtechnik 87 (1987), Heft 8, S. 372 - 380
- [5] Loch, E.: Aerostatische Lager - Teil 1 und 2. In: Konstruktion 19 (1967), Heft 3, S.92 - 97 und Heft 4, S. 134 - 139
- [6] Heinzl, J.: Auslegung und Berechnung aerostatischer Lager mit Einzeldüsen und mit flächig verteilten Mikrodüsen. In: Bartz, W. J.: Luftlagerungen. Ehningen: expert-Verlag, 1993
- [7] Gerke, M.: Auslegung von ebenen und zylindrischen Lagern bei stationärem Betrieb. Dissertation, Technische Universität München, 1991
- [8] Clauß, C.; Schinköthe, W.; Welk, C.: Elektrischer Antrieb. Offenlegungsschrift DE 10 2006 042 707 A1, 2008