

Universität Stuttgart

Jahresbericht IKFF 2013

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 2014

1 DAS INSTITUT

- 1.1 Mitarbeiter
- 1.2 Jahresrückblick
- 1.3 Wissenschaftliche Arbeitsgebiete

2 LEHRVERANSTALTUNGEN

- 2.1 Vorlesungen und Übungen für das Bachelorstudium
- 2.2 Vorlesungen und Übungen für das Masterstudium und das Hauptdiplom
- 2.3 Prüfungen
- 2.4 Praktika
- 2.5 Projektarbeiten
- 2.6 Seminar Feinwerktechnik

3 WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN, STUDIEN-, DIPLOM- UND BACHELOR-ARBEITEN

- 3.1 Dissertationen
- 3.2 Diplomarbeiten am IKFF
- 3.3 Bachelorarbeiten am IKFF
- 3.4 Studienarbeiten am IKFF
- 3.5 Preise

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 Wissenschaft

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. Hakan Akkaya

Dipl.-Ing. Sebastian Bobrowski

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

Dipl.-Ing. Bastian Keller

Dipl.-Ing. Judith Kofler

Dipl.-Ing. (FH) Daniel Kreuzer (Graduate Student der GSaME)

Dipl.-Ing. Matthias Maier

Dipl.-Ing. Andreas Maucher

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

Dipl.-Ing. Adrian Retzbach

Dipl.-Ing. Benjamin Reutzsch

Dipl.-Ing. Gregor Schattka

Dipl.-Ing. Matthias Ulmer

Modellbau und Versuchswerkstatt:

Ralf Berwanger

Stefan Schneider

Wissenschaftliche Hilfskräfte:

Beckert, Markus

Dürr, Christian

Junginger, Elias

Karlowitz, Andreas

Kayarat, Rekha

Kraus, Corinna

Laabs, Kevin

Litwin, Thomas

Maul, Markus

Nußbaumer, Ralf

Riggenmann, Simon

Schneider, Marcel

Strohmeyr, Simon

1.2 Jahresrückblick

Personalia

Im Jahr 2013 wurde ein neuer wissenschaftlicher Mitarbeiter eingestellt (Dipl.-Ing. Andreas Maucher), liefen zwei Arbeitsverträge planmäßig aus (Dipl.-Ing. Matthias Ulmer, Dipl.-Ing. Hakan Akkaya) und kam ein neuer Stipendiat der GSaME ans IKFF (Dipl.-Ing. (FH) Daniel Kreuzer).

Aktivitäten in der Lehre

Seit Oktober 2011 laufen im Maschinenbau die Masterstudiengänge, unter anderem auch der Masterstudiengang Maschinenbau/ Mikrotechnik, Gerätetechnik und Technische Optik (Studiendekan Prof. Schinköthe, Studiengangsmanager Herr Burkard). Zuspruch zu unserem Master gibt es vor allem von außen, aus anderen Universitäten, Fachhochschulen bzw. aus Dualen Hochschulen. Bisher hat der Master 44 eingeschriebene Studierende. Die Studierendenzahl liegt noch leicht unter der langfristigen Zielstellung von 25 Immatrikulationen pro Jahr.

Die Anfängerzahlen im Maschinenbau sind konstant hoch. Die Anfängerzahlen aller maschinenbaulichen Studiengänge der Universität Stuttgart (ohne Luft- und Raumfahrttechnik) lagen wie schon im Vorjahr auch im Jahr 2013 bei ca. 1100 Studierenden. Im Studiengang Maschinenwesen selbst bewegen sich die Anfängerzahlen wie im Vorjahr bei ca. 370. Hinzu kommen noch insgesamt ca. 625 neu immatrikulierte Masterstudierende in allen Mastern der Fakultät, was einer Steigerung gegenüber dem Vorjahr um 50 % entspricht. Alle Fakultätsstudiengänge sind ausgelastet, inklusive freiwilliger Überlast.

In der Konstruktionslehre Feinwerktechnik hatten wir bis zum Sommer 76 Studierende zu betreuen, im Wintersemester haben 85 Studierende den Zyklus neu begonnen. Die Bachelor-Lehrveranstaltungen 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 Motorentchnik. Ein Highlight ist dabei immer wieder der Konstruktionswettbewerb, auf den weiter hinten noch eingegangen wird.

Im Hauptfach laufen die Diplomstudiengänge aus und die Master werden dominierend. Derzeit begannen 48 Studierende im Fach „Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik“ als Pflicht- oder Kernfach. 24 Studierende starteten im Kernfach „Aktorik“. Das Fach „Praxis des Spritzgießens in der Gerätetechnik, Verfahren, Prozesskette, Simulation“ belegten 5 Studierende, es ist noch im Aufbau, die „Praktische FEM Simulation mit ANSYS und MAXWELL“ belegten 17 Studierende. Im vergangenen Jahr hatten wir zudem mit 35 Studien-, Bachelor- und Diplomarbeiten wieder einen enormen Zuspruch in diesem Bereich. Hinzu kamen nochmals 30 Studierende in Projektarbeiten.

Die Lehrveranstaltungen des Hauptdiploms konzentrieren sich auf die beiden Schwerpunkte Gerätekonstruktion als methodisch orientierte Linie und feinwerktechnische Aktorik als konkret forschungs- und entwicklungsorientierte Linie, ergänzt durch die Lehrveranstaltungen Praxis des Spritzgießens und Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL.

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, Fehlerverhalten und Toleranzrechnung in der Präzisionsgerätetechnik, Lärminderung in der Gerätetechnik sowie Beziehungen zwischen Gerät und Umwelt. Eingeschlossen in die Lehrveranstaltung sind drei praktische Bestandteile, zur Einführung in die Koordinatenmesstechnik, zur Zuverlässigkeit und zur Geräuschemessung und Lärminderung.

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 magnetostruktive Stelltechnik, Magnettechnik und -technologie sowie Beispiele zur Realisierung mechatronischer Lösungen in der Feinwerktechnik.

Unsere Lehrveranstaltung „Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL“ wurde wieder sehr gut angenommen und ist mit 17 Studierenden sehr gut ausgelastet. Auch unsere Lehrveranstaltung „Praxis des Spritzgießens in der Gerätetechnik; Verfahren, Prozesskette, Simulation“ fand 2013, wenn auch mit kleiner Teilnehmerzahl, wieder erfolgreich statt. Diese Vorlesung wird ab SS 2012 mit dem doppelten Umfang (4 SWS) gelesen und beinhaltet den gesamten Komplex Spritzgießen.

Die Hauptfachpraktika Ultraschallantriebe, Lineardirektantriebe, Schrittmotoren, Gleichstrommotoren, Koordinatenmesstechnik, FEM-Berechnung mit ANSYS sowie MAXWELL, Spritzgießen inklusive Spritzgieß-Simulation mit Moldflow sind in die Lehrveranstaltungen einbezogen. Mit diesen insgesamt 7 Praktika wurde ein solides Angebot zum praktischen Arbeiten für die Studierenden geschaffen.

Die Absolventen fanden auch 2013 problemlos 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 2013 Untersuchungen zu magnetischen Führungen weitergeführt. Die Forschungen zur Entwicklung von neuartigen Direktantrieben mit piezoelektrischen Antrieben wurden ebenfalls fortgeführt. Generell bilden dabei 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 gegenseitig.

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. Dazu lief ein ZIM-Projekt. Darüber hinaus wurden im Jahre 2013 die Arbeiten zur variothermen Prozessführung mit integrierten Induktoren und Impulskühlung sowie zur Nutzung der Induktionserwärmung für andere Aufgaben (induktives Kleben) weiterbetrieben. Ergebnisse dazu sind mehrfach veröffentlicht. Auch hierzu liefen insgesamt drei ZIM-Projekte, die der breiten Überführung dieser Erkenntnisse dienen.

Im Arbeitsgebiet **Zuverlässigkeit feinwerktechnischer Antriebe** wurde das gemeinsame DFG-Projekt (Normalverfahren) zusammen mit der Universität Hohenheim weitergeführt. Ziel ist dabei eine Zuverlässigkeitsprognose in frühen Entwicklungsphasen mit Hilfe statistischer Modelle. Mit den zu entwickelnden Prognosesystemen sollen effiziente Werkzeuge für die Nutzung vorhandener Ausfalldaten zur statistischen Vorhersage des Ausfallverhaltens bei nicht unmittelbar getesteten Parametersätzen in verschiedenen Phasen der Entwicklungs- und Lebenszyklen verfügbar werden. Derzeit stehen Dauerversuche zur Ermittlung der Ausfalldaten vorzugsweise an Kleingetrieben und entsprechende Prognosemodule für Motoren und Getriebe im Mittelpunkt.

Generell werden dabei am Institut neben oder innerhalb dieser Forschungsarbeiten auch eine Vielzahl von Industrieprojekten realisiert.

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 und magnetische Schwebeführungen 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 kommen 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 sowie thermische Berechnungen 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. 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 magnetischen Schwebeführungen für Linearantriebe.

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.
- Magnetspitzgießen.
- Erweiterung der induktiven Erwärmung auf weitere Anwendungen (induktiv unterstütztes Kleben).

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 das Bachelorstudium

Konstruktionslehre III (Feinwerktechnik) (Schinköthe, Burkard)

Wintersemester 2012/2013: 79 Studenten (mach + famo)

Wintersemester 2013/2014: 85 Studenten (mach + famo)

15 Vorlesungen à 2 SWS

13 Vorlesungen à 1 SWS

13 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Burkard, Keller, Kofler, Reutzsch

Konstruktionslehre IV (Feinwerktechnik) (Schinköthe, Burkard)

Sommersemester 2013: 76 Studenten (mach + famo)

14 Vorlesungen à 2 SWS

14 Vorlesungen à 1 SWS

14 Übungen à 1 SWS

Betreuer: Bobrowski, Burkard, Kofler, Reutzsch, Schattka

2.2 Vorlesungen und Übungen für das Bachelor- und Masterstudium und das Hauptdiplom

Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik (Schinköthe, Burkard, Bobrowski)

Wintersemester 2012/2013: 35 Studenten

Wintersemester 2013/2014: 48 Studenten

18 Vorlesungen à 2 SWS

10 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Burkard, Bobrowski, Kofler, Reutzsch

2.3 Prüfungen

Fach	Termin	Kandidaten
KL III + IV (Feinwerktechnik)	F 2013	16
	H 2013	67
Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik (Kompetenzfeld, Pflichtfach)	F 2013	36
	H 2013	6
Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik (Kernfach, mündlich)	F 2013	8
	H 2013	0
Aktorik in der Feinwerktechnik - Berechnung, Konstruktion und Anwendung mechatronischer Komponenten (Kernfach, mündlich) (Pflichtfach, mündlich)	F 2013	4
	H 2013	8
	H 2013	2
Praxis des Spritzgießens in der Gerätetechnik; Verfahren, Prozesskette, Simulation	H 2013	5
Praktische FEM Simulation mit ANSYS und MAXWELL	H 2013	12
Projektarbeiten	F 2013	19
Hauptfach Feinwerktechnik	F 2013	0
	H 2013	1
Studienarbeit Feinwerktechnik	F 2013	3
	H 2013	8
Bachelorarbeiten	F 2013	12
	H 2013	8
Diplomarbeiten/Masterarbeiten	F 2013	2
	H 2013	2

2.4 Praktika

Hauptfach- bzw. Spezialisierungsfachpraktikum Feinwerktechnik (Für Studierende des Hauptfachs/Spezialisierungsfaches Feinwerktechnik)

Sommersemester 2013

Versuch 1: „Spritzgießen“

4 Teilnehmer 1 Termin

Betreuer: Maier

Versuch 2: „FEM-Simulation mit ANSYS/MAXWELL“

5 Teilnehmer 5 Termine

Betreuer: Nguyen, Reutzsch, Keller

Versuch 3: „Ultraschallantriebe“

15 Teilnehmer 3 Termine

Betreuer: Keller

Wintersemester 2013/2014

Versuch 1: „Koordinatenmesstechnik“

34 Teilnehmer 6 Termine

Betreuer: Burkard

Versuch 2: „Gleichstrommotoren“

19 Teilnehmer 5 Termine

Betreuer: Bobrowski, Kofler

Versuch 3: „Lineardirektantriebe“

19 Teilnehmer 4 Termine

Betreuer: Reutzsch, Kofler

Versuch 4: „Optische 3D-Vermessung“
35 Teilnehmer 6 Termine
Betreuer: Burkard

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

Sommersemester 2013

Versuch 1: „Schrittmotoren“
19 Teilnehmer 4 Termine
Betreuer: Reutzsch, Keller

Wintersemester 2013/2014

Versuch 2: „Koordinatenmesstechnik“
34 Teilnehmer 6 Termine
Betreuer: Burkard

Versuch 3: „Optische 3D-Vermessung“
35 Teilnehmer 6 Termine
Betreuer: Burkard

Praktika im Rahmen des Kompetenzfeldes Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik

Wintersemester 2013/2014

Versuch 1: „Einführung in die 3D-Messtechnik“
20 Teilnehmer 3 Termine
Betreuer: Burkard

Versuch 2: „Zuverlässigkeitsuntersuchung und Lebens-
dauertests“
22 Teilnehmer 2 Termine
Betreuer: Bobrowski

Versuch 3: „Einführung in die Geräuschmesstechnik
und Lärminderung“
35 Teilnehmer 1 Termin
Betreuer: Reutzsch, Kofler

2.5 Projektarbeiten

Wintersemester 2012/2013

- | | |
|------------|---|
| 31.01.2013 | Konstruktion eines Spritzgießwerkzeugs mit Kassetteneinsätzen |
| 31.01.2013 | Entwicklung von Regelungskonzepten für einen elektromagnetischen Schwebeaktor |
| 07.02.2013 | Aufbau einer Messvorrichtung zur Bestimmung der Reibwerte von axial belasteten Lagern |
| 07.02.2013 | Entwicklung und Inbetriebnahme eines DC-Motorprüfstands |
| 07.02.2013 | Funktionsanalyse eines feinwerktechnischen Geräts aus der Computertechnik |

Wintersemester 2013/2014

- | | |
|------------|--|
| 30.01.2014 | Aktives Gehörschutzgerät |
| 30.01.2014 | Entwicklung und Entwurf von Kinematik-Varianten für Ultraschall-Demonstratoren |
| 30.01.2014 | Konstruktion von Spritzgießwerkzeugen für Demonstratorteile für den Tag der Wissenschaft |
| 06.02.2014 | Forschungstrends bei Lineardirektantrieben |
| 06.02.2014 | Entwicklung und Aufbau eines Lineardirektantriebs |
| 06.02.2014 | Untersuchungen von Alternativen zur Verwendung von kommerziellem Filament beim 3D-Druck |

2.6 Seminar Feinwerktechnik (WS 2012/13 und SS 2013)

10.10.2012	Pricci, Roberto	Konstruktion eines Kerns zur Messung der Schwindkräfte für das Spritzgießwerkzeug zur Messung von Entformungskräften
29.11.2012	Jamroz, Ariel	Entwicklung einer trajektoriengeplanten Vorschubregelung für einen synchronen Lineardirektantrieb
29.11.2012	Kauer, Benjamin	Messdatenerfassung und Prüfstandssteuerung mit Microcontrollern und USB
06.12.2012	Altdörfer, Denis	Untersuchungen zum Verschleiß und zur Lebensdauer von Kunststoff-Zahnradern
06.12.2012	Kofler, Judith	Entwicklung einer Mehrgrößenregelung für einen Schwebeantrieb
10.01.2013	Knelz, Walter	Entwicklung eines kombinierten Prüfstands zur Aufnahme von Motorkennlinien
17.01.2013	Beckert, Markus	Entwicklung und Konstruktion eines motorischen Antriebs für den Fokus eines Mikroskops zur Erweiterung des Schärfentiefebereichs
17.01.2013	Schönwiesner, Micha	Entwicklung und Konstruktion einer Ausgabe- und Selektivvorrichtung für Spritzgießmaschinen
31.01.2013	Wuschek, Christian	Regelung eines elektromagnetischen Schwebeaktors
20.02.2013	Keilbach, Daniel	Untersuchung des Einflusses der Einspannung auf das Resonanzverhalten piezoelektrischer Resonatoren

21.02.2013	Lipowsky, Tobias	Konstruktion eines Lineardirektantriebs mit statorseitigen Halbach-Arrays
21.02.2013	Kuczera, Matthias	Konzeption, Konstruktion und Simulation eines Tauchspulmotors
14.03.2013	Yuan, Wenbo	Simulative Untersuchung des Einflusses der Abmaße von Piezokeramiken auf die Schwingungsqualität im Resonanzfall an diversen Geometrien
20.03.2013	Benamor, Tasmin	Konzeption und Aufbau eines Praktikumsversuchsstands zur Funktionsweise eines bürstenlosen DC-Servomotors
20.03.2013	May, Florian	Aufbau eines elektrischen Filters zur Konditionierung der Erregersignale von Ultraschallmotoren
04.04.2013	Dietz, Nina/Kaucher, Ina	Entwicklung einer Prüfumgebung für induktiv erwärmbare Materialien
11.04.2013	Hetzinger, Stephan	Anpassung eines Spritzgießwerkzeugs zur Realisierung einer variablen Formteillänge
11.04.2013	Thiele, Julia	Simulationsgestützte Messung der Neukurve zylinderförmiger Stahlproben
11.04.2013	Freund, Steffen	Regelung eines invertierten Pendels über einen synchronen Lineardirektantrieb
18.04.2013	Coulon, Lukas	Entwicklung von Regelungsstrukturen für einen elektromagnetischen Schweißantrieb
02.05.2013	Tajmiri, Babak	Thermische Analyse einer induktiv erwärmten Klebstoffprobe
23.05.2013	Soetebier, Philipp	Entwurf eines neuen Praktikums für die Spritzgussimulation mit Moldflow

12.09.2013	Schulz, Tobias	Entwicklung und Konstruktion eines Prüfstands zur Ermittlung der Reibkraft in Abhängigkeit von der Mikrostruktur der Oberfläche
12.09.2013	Liu, E	Entwicklung einer Näherungsfunktion für magnetische Neukurven
12.09.2013	Maul, Markus	Untersuchung zur Nutzung von kostengünstigen Induktionsgeneratoren aus dem Konsumgüterbereich für industrielle Anwendungen
26.09.2013	Nußbaumer, Ralf	Optimierung eines kombinierten Prüfstands zur Aufnahme von Motorkennlinien
26.09.2013	Karlowitz, Andreas	Entwicklung und Bewertung von Regelungskonzepten für einen linearen Schweißantrieb
26.09.2013	Stegmaier, Tobias	Analyse und Ausarbeitung eines rotatorischen Messprinzips zur Messung der Adhäsionskräfte im Kunststoffspritzguss

Wintersemester 2013/2014 (unvollständig)

10.10.2013	Gharsallaoui, Mohamed	Entwicklung und Konstruktion eines motorisch angetriebenen X-Y-Tisches für die Objektverschiebung für Mikropanoramaaufnahmen mit einem Mikroskop oder einer Makrooptik
10.10.2013	Riggenmann, Simon	Untersuchung von Hard- und Software zur optischen 3D-Vermessung und Entwicklung eines darauf aufbauenden Praktikumsversuchs
24.10.2013	Strohmeyr, Simon	Entwicklung eines schwebenden Rütteltisches mit passivem Läufer

24.10.2013 Palenga, Julian

Entwicklung eines elektromagnetischen Aktors für lineare Schwebeantriebe

21.11.2013 Litwin, Thomas

Entwicklung einer sensorlosen Vorschubsteuerung für Lineardirektantriebe

3 WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN, STUDIEN-, DIPLOM- UND BACHELORARBEITEN

3.1 Dissertationen

Wibbing, Daniel	Wegmess-System für Miniatur-Linearmotoren (SensMiLi). Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 36, 2013
Ulmer, Matthias	Einbeziehung des thermischen Teilsystems in die Dimensionierung feinwerktechnischer elektrodynamischer Lineardirektantriebe. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 37, 2014

3.2 Diplomarbeiten am IKFF (WS 2012/13 und SS 2013)

11/2012	Maucher, Andreas	Entwicklung und Konstruktion eines RTM- Werkzeugs mit energieeffizienter, vari- oothermer Temperierung zur Herstellung großflächiger CFK-Bauteile
09/2013	Scheu, Christian	Konstruktion eines Prüfstandes zur Ermitt- lung des Einlaufverhaltens von Erstmustern
09/2013	Rupanovic, Christian	Entwicklung eines rotatorischen Magnet- lagers mit Lorentzkraft-basierten Aktoren
Wintersemester 2013/2014 (unvollständig)		
10/2013	Bayerlein, Philipp	Untersuchung von Abkühlvorgängen bei induktiv beheizten Spritzgusswerkzeugen
11/2013	Schmid, Matthias	Auslegung von Kunststoffformwerkzeugen mit energetisch optimierter Temperierung

3.3 Bachelorarbeiten am IKFF (WS 2012/13 und SS 2013)

10/2012	Pricci, Roberto	Konstruktion eines Kerns zur Messung von Schwindkräften für das Spritzgießwerkzeug zur Messung von Entformungskräften
11/2012	Kauer, Benjamin	Messdatenerfassung und Prüfstandssteuerung mit Mikrocontrollern und USB
11/2012	Schönwiesner, Micha	Entwicklung und Konstruktion einer Ausgabe- und Selektivvorrichtung für Spritzgießmaschinen
12/2012	Jamroz, Ariel	Entwicklung einer trajektoriengeplanten Vorschubregelung für einen synchronen Lineardirektantrieb
12/2012	Knelz, Walter	Entwicklung eines kombinierten Prüfstands zur Aufnahme von Motorkennlinien
12/2012	Altdörfer, Denis	Untersuchungen zum Verschleiß und zur Lebensdauer von Kunststoff-Zahnradern
01/2013	Wuschek, Christian	Regelung eines elektromagnetischen Schwebeaktors
02/2013	Lipowsky, Tobias	Konstruktion eines Lineardirektantriebs mit statorseitigen Halbach-Arrays
03/2013	May, Florian	Aufbau elektrischer Filter zur Konditionierung der Erregersignale von Ultraschallmotoren
03/2013	Freund, Steffen	Regelung eines invertierten Pendels über einen synchronen Lineardirektantrieb

03/2013	Benamor, Tasmin	Konzeption und Aufbau eines Praktikumsversuchsstands zur Funktionsweise eines bürstenlosen DC-Servomotors
05/2013	Soetebier, Philipp	Entwurf eines neuen Praktikums für die Spritzgusssimulation mit Moldflow
07/2013	Gharsallaoui, Mohamed	Entwicklung und Konstruktion eines motorisch angetriebenen X-Y-Tisches für die Objektverschiebung für Mikropanoramaaufnahmen mit einem Mikroskop oder einer Makrooptik
09/2013	Schulz, Tobias	Entwicklung und Konstruktion eines Prüfstands zur Ermittlung der Reibkraft in Abhängigkeit von der Mikrostruktur der Oberfläche
09/2013	Karlowitz, Andreas	Entwicklung und Bewertung von Regelungskonzepten für einen linearen Schwebetrieb
09/2013	Stegmaier, Tobias	Analyse und Ausarbeitung eines rotatorischen Messprinzips zur Messung der Adhäsionskräfte im Kunststoffspritzguss
09/2013	Riggenmann, Simon	Untersuchung von Hard- und Software zur optischen 3D-Vermessung und Entwicklung eines darauf aufbauenden Praktikumsversuchs
09/2013	Nußbaumer, Ralf	Optimierung eines kombinierten Prüfstands zur Aufnahme von Motorkennlinien

Wintersemester 2013/2014 (unvollständig)

10/2013	Maul, Markus	Untersuchungen zur Nutzung von kostengünstigen Induktionsgeneratoren aus dem Konsumgüterbereich für industrielle Anwendungen
10/2013	Litwin, Thomas	Entwicklung einer sensorlosen Vorschubsteuerung für Lineardirektantriebe

3.4 Studienarbeiten am IKFF (WS 2012/13 und SS 2013)

02/2013	Kuczera, Matthias	Konzeption, Konstruktion und Simulation eines Tauchspulmotors
02/2013	Yuan, Wenbo	Simulative Untersuchung des Einflusses der Abmaße von Piezokeramiken auf die Schwingungsqualität im Resonanzfall an diversen Geometrien
03/2013	Keilbach, Daniel	Untersuchung des Einflusses der Einspannung auf das Resonanzverhalten piezoelektrischer Resonatoren
04/2013	Thiele, Julia	Simulationsgestützte Messung der Neukurve zylinderförmiger Stahlproben
04/2013	Coulon, Lukas	Entwicklung von Regelungsstrukturen für einen elektromagnetischen Schwebetrieb
04/2013	Hetzinger, Stephan	Anpassung eines Spritzgießwerkzeugs zur Realisierung einer variablen Formteillänge
05/2013	Dietz, Nina / Kaucher, Ina	Entwicklung einer Prüfumgebung für induktiv erwärmbare Materialien

07/2013	Tajmiri, Babak	Thermische Analyse einer induktiv erwärmten Klebstoffprobe
09/2013	Palenga, Julian	Entwicklung eines elektromagnetischen Aktors für lineare Schwebeantriebe
09/2013	Liu, E	Entwicklung einer Näherungsfunktion für magnetische Neukurven

Wintersemester 2013/2014 (unvollständig)

10/2013	Strohmeyr, Simon	Entwicklung eines schwebenden Rütteltisches mit passivem Läufer
---------	------------------	---

3.5 Preise

Dipl.-Ing. Judith Kofler

Gustav-Magenwirth-Preis

4 ARBEITSGEBIETE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITER

4.1 Aktorik

Engel, M.

Lehre:

Betreuung der Bachelorübungen in KL 3/4 in Form von Gruppenübungen. Korrektur von Klausuraufgaben.

Betreuung einer Bachelor-Projektarbeit.

Forschung:

Wirbelstrom- und Hystereseverluste in Linearmotoren.

Simulation von Wirbelstromverlusten und Hystereseverlusten in Rückschlussmaterialien.

Konzepte zur Reduzierung der Verlustkomponenten.

Messungen am Prüfstand zur Verlustmessung in Materialien.

Aufnahme von Kennlinien.

Keller, B.

Lehre:

Betreuung von Gruppenübungen in KL 3/4.

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

Überarbeitung und Durchführung der Vortragsübung „Getriebedimensionierung/-gestaltung“ in KL 3/4.

Durchführung der Vortragsübung „Ultraschallantriebe“ im Hauptfach Aktorik.

Durchführung der Vorlesung und Übung „Praktische FEM-Simulation mit MAXWELL und ANSYS“ und Ausarbeitung von Aufgabenstellungen für Prüfungsaufgaben sowie deren Korrektur.

Durchführung des Hauptfachpraktikums „Ultraschallantriebe“.

Betreuung von Projekt-, Bachelor-, Master-, Studien- und Diplomarbeiten.

Forschung:

Entwicklung von piezoelektrischen Motoren mit Schwerpunkt in Schwingungsuntersuchungen von Mehrkoordinaten-Ultraschallmotoren.

Industrieprojekte.
Sonstiges: PC-Administration.

Kofler, J. Lehre:
Betreuung der Vordiplomsübungen in KL 3/4, Testatgruppen.
Vortragsübung und Vorlesung KL 3/4 zur Lagerberechnung.
Durchführung der Praktika „Lineardirektantriebe“ sowie „Gleichstrommotoren“ und „Geräuschmesstechnik“.
Erstellen der Übung zur Lagerauswahl des Testats „Welle-Lager“.
Betreuung von Bachelor- und Projektarbeiten.
Industrieprojekte.
Sonstiges: PC-Administration.

Kreuzer, D. Forschung:
Entwicklung von Lineardirektantrieben und FEM-Simulation.

Reutzsch, B. Lehre:
Vortragsübung und Vorlesung KL 3/4 zum Themenkomplex „Welle-Lager“ und „Kupplungen“.
Vorlesung zum Themenkomplex „Ansteuerung und Regelung von Lineardirektantrieben“ in „Aktorik in der Feinwerktechnik“.
Vorlesung „Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL“.
Durchführung der Praktika „Lineardirektantriebe“ sowie „Schrittmotoren“ und „Geräuschmesstechnik“.
Betreuung der Vordiplomsübungen in KL 3/4, Testatgruppen.
Organisation des Übungskomplexes „Welle-Lager“ und „Kupplungen“.
Betreuung von Bachelor-, Studien- und Diplomarbeiten.
Forschung:
Forschungsschwerpunkt: Magnetschwebetechnik für feinwerktechnische Antriebe.
Simulative Auslegung und Konstruktion sowie Regelung und Ansteuerung magnetischer Führungen und linearer Direktantriebe.
Industrieprojekte.
Sonstiges: PC-Administration.

4.2 Spritzgießen

- Akkaya, H. Lehre:
Betreuung der Vordiplomsübungen in KL 3/4, Testatgruppen.
Forschung:
Modellbildung, Simulation und Auslegung von induktiven Heizsystemen.
Industrieprojekte.
- Burkard, E. Untersuchung des Einflusses von Werkzeugbeschichtungen auf die Entformungskraft bei Spritzgussbauteilen aus Thermo-
plastwerkstoffen.
Bearbeitung von Industrienaufträgen.
Betreuung der Studenten im B. Sc., M. Sc. und Hauptdiplom.
Betreuung von Vorlesungen und Übungen im B. Sc., M. Sc. und Hauptdiplom.
Organisation des Konstruktionslehrewettbewerbs.
Betreuung und Durchführung der Vorlesung „Praxis des Spritzgießens in der Gerätetechnik“.
Betreuung der 3D-Messmaschinen und Vermessung von Werkstücken und der Praktika zur 3D-Messtechnik.
Administration und Wartung der UNIX/Linux-Rechner und des Institutsnetzes.
Stundenplanbeauftragter und Studiengangsmanager für den M. Sc. Maschinenbau/Mikrotechnik, Gerätetechnik und Technische Optik.
- Maier, M. Lehre:
Betreuung der Vordiplomsübungen in KL 3/4, Testatgruppen.
Durchführung des Hauptfachpraktikums „Spritzgießen“.
Betreuung von Bachelor- und Studienarbeiten.
Forschung:
Weiterentwicklung von FEM-Simulationsmodellen zur quantitativen Beschreibung von Induktionserwärmung unter Berücksichtigung des Generatorschwingkreises.
Einsatz von Hochleistungskeramiken in induktiv beheizten Spritzgusswerkzeugen.
Industrieprojekte.

- Maucher, A. Lehre:
Betreuung der Vordiplomsübungen in KL 3/4, Testatgruppen.
Ausarbeitung von Aufgabenstellungen für Übungs- und Klausuraufgaben sowie deren Korrektur.
Durchführung der Vortragsübung „Koppelgetriebe“ im Vordiplom KL 3/4.
Betreuung einer Projektarbeit und einer Diplomarbeit.
Forschung:
Untersuchung des Abkühlverhaltens von induktiv beheizten Spritzgusswerkzeugen.
Simulative Untersuchung des Strömungsverhaltens von Kühlflüssigkeiten in Spritzgusswerkzeugen im Hinblick auf unterschiedliche Einströmarten mittels CFD.
Entwicklung von Simulationsmodellen zur Untersuchung des Energiehaushalts bei Phasenübergängen von Fluiden in Kühlkreisläufen.
Sonstiges: Netzwerk-Administration.
- Nguyen, M. Lehre:
Betreuung der Vordiplomsübungen in KL 3/4 in Form von Gruppenübungen. Korrektur von Klausuraufgaben.
Durchführung des Hauptfachpraktikums „Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL“.
Betreuung von Studienarbeiten.
Forschung:
Aufbau und Inbetriebnahme eines Spritzgusswerkzeugs zur variothermen Herstellung kunststoffgebundener Dauermagnet-Probekörper.
Durchführung und Auswertung von Versuchen zur variothermen Messung der Materialeigenschaften kunststoffgebundener Dauermagnete.
Konstruktion eines Werkzeugs und einer Messeinrichtung zur Verifikation des entwickelten Simulationssystems.
- Retzbach, A. Lehre:
Betreuung der Vordiplomsübungen in KL 3/4, Testatgruppen.
Betreuung von Bachelor- und Studienarbeiten.

Forschung:

Entwicklung neuer Ansätze zur Vorkonditionierung partikelgefüllter Klebstoffe.

Untersuchungen zu Einflussfaktoren bei der induktiven Erwärmung partikelgefüllter Klebstoffe.

Modellbildung, Simulation und Auslegung von induktiven Heizsystemen.

Schattka, G.

Lehre:

Betreuung der Vordiplomsübungen in KL 3/4, Testatgruppen.

Korrektur von Prüfungsaufgaben in KL 3/4.

Betreuung von Bachelor- und Studienarbeiten.

Organisation des Konstruktionslehrewettbewerbs.

Forschung:

Konstruktion eines Spritzgusswerkzeugs zur Ermittlung der Adhäsionskräfte verschiedener Kunststoff-Beschichtungs-Paarungen beim Spritzgießen.

Messung mehrerer Entformungskräfte unterschiedlicher Kunststoff-Beschichtungs-Paarungen.

Ansätze zur theoretischen Ermittlung der Adhäsionskräfte im Kunststoffspritzguss.

4.3 Zuverlässigkeitstechnik

Bobrowski, S.

Lehre:

Durchführung der Vortragsübungen „Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme“ im Rahmen der Vorlesung Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik im Masterstudium.

Konzeption von Übungsaufgaben und Prüfungsaufgaben zur Zuverlässigkeit.

Durchführung des Praktikums „Gleichstrommotoren“.

Betreuung von Gruppenübungen in KL 3/4, Korrektur von Übungsaufgaben.

Durchführung des Praktikums „Zuverlässigkeitsuntersuchung und Lebensdauerests“ für die Vorlesung Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik.

Betreuung von Studienarbeiten und einer Bachelor-Projektarbeit.

Forschung:

Mitarbeit im DFG-Projekt „Zuverlässigkeitsprognose mechatronischer Systeme mit Hilfe statistischer Modelle am Beispiel feinwerktechnischer Komponenten“ (GZ: Je 162/10-1, Schi 457/12-1)

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

Aufbau und Betrieb von Dauerlaufprüfständen für mechatronische Systeme (rotatorische Kleinantriebe), Dokumentation.

Vermessung von Prüflingen.

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

Industrieprojekte.

Sonstiges: Ansprechpartner für Literaturrecherchen.

5 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

5.1 Veröffentlichungen

Artikel oder Tagungsbeiträge:

Bobrowski, S.; Döring, M.; Jensen, U.; Schinköthe, W.: Zuverlässigkeitsprognose mit dem Cox-Proportional-Hazards-Modell. Vortrag Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2013, Stuttgart 20.06.2013.

Bobrowski, S.; Schinköthe, W., Döring, M.; Jensen, U.: Reliability Prediction for Mechatronic Drive Systems. 9. GMM/ETG-Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik 2013, Nürnberg 19./20.09.2013.

Engel, M.; Schinköthe, W.: Eddy current and hysteresis losses in high dynamic direct-drive linear motors for manufacturing systems. Postervortrag GSaME Jahrestagung 2013, Stuttgart 21.03.2013.

Keller, B.; Schinköthe, W.: Multi-Degree-of-Freedom Ultrasonic Motors using Rotation-Symmetric Piezoelectric Vault Geometries. 9. GMM/ETG-Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik 2013, Nürnberg 19./20.09.2013.

Landfried, R.; Gadow, R.; Maier, M.; Schinköthe, W.: Spritzgusswerkzeuge mit keramischen Formbereichen zur prozessintegrierten induktiven Erwärmung von Einlegeteilen. Vortrag und Tagungsbandbeitrag, 23. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 06./07.03.2013

Maier, M.; Retzbach, A.; Schinköthe, W.: Induktionserwärmung für die Kunststoffverarbeitung - Ganzheitliche Modellbildung. Plastverarbeiter. Jahrgang 64(2013)H 10; S. 134-137.

Maier, M.; Schinköthe, W.: Anwendungspotential der Induktionserwärmung in der Kunststoffverarbeitung. Fachbeitrag Forschungsreport für den Maschinenbau in Baden-Württemberg WS 2013/14, Public Verlagsgesellschaft und Anzeigenagentur mbH, Bingen, 2013, S. 24-27.

Nguyen, M.; Schinköthe, W.: Characterization of magnetic injection molding processes. Postervortrag GSaME Jahrestagung 2013, Stuttgart 21.03.2013.

Nguyen, M.: Messung magnetischer Materialdaten. Posterveröffentlichung am IKFF, 29.05.2013.

Reuttsch, B.; Schinköthe, W.: Magnetic Levitation System for Linear Direct Drives based on Lorentz Forces. 9. GMM/ETG-Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik 2013, Nürnberg 19./20.09.2013.

Schattka, G.; Burkard, E.; Schinköthe, W.: Entformungskraftuntersuchungen beim Spritzgießen - Neuer messtechnischer Ansatz zur Ermittlung der Adhäsions- und Gleitreibungskräfte bei der Entformung. Vortrag und Tagungsbandbeitrag. 23. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 06./07.03.2013.

Schinköthe, W.: Induktive Temperierung zur Effizienzsteigerung beim Spritzgießen. Vortrag GSaME Jahrestagung 2013, Stuttgart 21.03.2013.

Patente:

Maier, M.; Burkard, E.; Zimmermann, T.; Schinköthe, W.: Vorrichtung zur Verbindung zweier elektrischer Leitungen. DE 10 2011 086 212, Patent angemeldet am 11.11.2011, erteilt mit Wirkung zum 01.08.2013.

Retzbach, A.; Schinköthe, W.; Wellmann, S.; Dura, G.: Optimierung der Energieeinbringung in partikelgefüllte Klebstoffe bei induktiver Erwärmung. Erfindungsmeldung an Uni Stuttgart.

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

Programmausschuss Tagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Nürnberg.

5.3 Tag der Wissenschaft

1 Maschine, 6 Taschen, 15 Kugeln - 2 Maschinen, 6 Taschen, 30 Kugeln...
Es soll eine Maschine entwickelt werden, die Billardkugeln einlocht.

So einfach lautete die Aufgabenstellung des diesjährigen Konstruktionswettbewerbs des Instituts für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart, der dieses Jahr zum 21. Mal ausgetragen wurde. Wie in den vergangenen Jahren waren einige Randbedingungen zu beachten.



Dabei waren die limitierte Größe der Maschinen beim Start und die Vorgaben zur Energieversorgung wohl die stärksten Einschränkungen.

In der Vorrunde mussten die Maschinen einfach möglichst viele Kugeln in die Taschen einlochen. Alle Maschinen, die mindestens eine Kugel einlochten, nahmen am zweiten Teil des Wettbewerbs teil. Nun mussten sie gegeneinander antreten und konnten sowohl in der eigenen, als auch in der gegnerischen Hälfte Kugeln einlochen. Dabei zählten die beim Gegner eingelochten Kugeln doppelt.

Wer selbst schon Poolbillard gespielt hat, kennt die Tücken des Spiels und nur knapp an der Tasche vorbei gespielte Kugeln, und genau mit diesen Problemen mussten auch die studentischen Maschinen kämpfen, die gleichzeitig Spieler, Queue und Spielkugel waren.

Die Teilnehmergruppen konnten beim Wettbewerb erleben, dass die Umsetzung von theoretischem Wissen in eine praktisch funktionierende, kleine Maschine nicht ganz so einfach ist, wie sie wohl am Anfang gedacht hatten. Schon die vermeintlich einfache Aufgabe, auf einer freien Fläche wenige Meter geradeaus zu fahren und dann rückwärts wieder präzise zum Ausgangspunkt zu kommen, ist für eine kleine Maschine ohne aufwendige Sensorik nicht unbedingt einfach zu bewältigen. Umgekehrt ist es aber auch nicht einfach, innerhalb nur weniger Wochen eine mit einem Mikrocontroller gesteuerte Maschine mit zugehöriger Software und der notwendigen Antriebstechnik zu entwickeln und aufzubauen. Am Ende standen zwei Maschinen im Finale, die beide auf dem gleichen Grundprinzip basierten und die Aufgabe rein elektromechanisch lösten.

Für die Teilnehmer und die Zuschauer war besonders der zweite Teil des Wettkampfs spannend, da sich hier zeigte, welches Grundprinzip die beste Lösung für den Billardwettkampf war und wessen Lösung am zuverlässigsten die Kugeln einlochte.

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

ARBURG GmbH & Co, Audi AG, Bilz Werkzeugfabrik GmbH & Co. KG, Carl Hanser Verlag GmbH & Co, Christian Bürkert Stiftung gGmbH, Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG, Dr. Ing. Paul Christiani GmbH & Co KG, G. Ulmer Automation GmbH, Hauni Maschinenbau AG, Kendrion GmbH, SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG, Springer Verlag GmbH und Verlag Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer GmbH & Co. KG.

Ergebnisse:

1. Platz: André Färber, Lorenz Görne, Daniel Haas, Sven Schuster.
2. Platz: Sebastian Held, Felix Kurz, Jonas Manz, Alena Modic.
3. Platz: Andreas Gruber, Thomas Labitzke, Peter Maderthaner, Mike Schneider.

6 KONGRESSE, TAGUNGEN UND MESSEN

Prof. Schinköthe, W.:

- 23. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 06./07.03.2013
- Jahrestagung der GSaME Graduate School of advanced Manufacturing Engineering, Stuttgart, 21.03.2013
- Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2013, 20.06.2013
- 9. GMM/ETG-Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Nürnberg, 19./20.09.2013
- Kendrion Symposium, Villingen-Schwenningen, 07.11.2013

Akkaya, H.:

- ARBURG Technologietage, Loßburg, 13.03.2013

Bobrowski, S.:

- Tagung „Technische Zuverlässigkeit“, Leonberg, 23./24.04.2013.
- VDI Gremium FA825 thermoplastische Zahnräder (Richtlinie VDI 2736), Stuttgart, IKFF, 05.02.2013, Bubikon, 05.06.2013
- Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2013, 20.06.2013
- 9. GMM/ETG-Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Nürnberg, 19./20.09.2013

Burkard, E.:

- 23. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 06./07.03.2013
- ARBURG Technologietage, Loßburg, 13.03.2013

Engel, M.:

- Jahrestagung der GSaME Graduate School of advanced Manufacturing Engineering, Stuttgart, 21.03.2013
- 5. CADFEM EM-Symposium 2013, Würzburg, 13.11.2013

Keller, B.:

- 9. GMM/ETG-Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Nürnberg, 19./20.09.2013

Kofler, J.:

- 9. GMM/ETG-Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Nürnberg, 19./20.09.2013

Maier, M.:

- ARBURG Technologietage, Loßburg, 13.03.2013
- Composites-Europe, Stuttgart, 18.09.2013
- K-Messe, Düsseldorf, 22.10.2013
- CADFEM EM-Symposium, Würzburg, 13.11.2013

Maucher, A.:

- ARBURG Technologietage, Loßburg, 13.03.2013

Nguyen, M.:

- Jahrestagung der GSaME Graduate School of advanced Manufacturing Engineering, Stuttgart, 21.03.2013
- Kendrion Symposium, Villingen-Schwenningen, 07.11.2013
- CADFEM EM-Symposium, Würzburg, 13.11.2013

Retzbach, A.:

- K-Messe, Düsseldorf, 18.10.2013
- CADFEM EM-Symposium, Würzburg, 13.11.2013

Reutzsch, B.:

- 9. GMM/ETG-Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Nürnberg, 19./20.09.2013

Schattka, G.:

- ARBURG Technologietage, Loßburg, 13.03.2013

7 WERKSTATTBERICHT

Mit der Fertigung von Linearmotoren, Linearmotorprüfständen, Spritzgussformen und Formeinsätzen sowie Bauteilen und Baugruppen für Versuche im Rahmen von studentischen Arbeiten 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 Aktorik an, einerseits einen Beitrag zu neuartigen piezoelektrischen Mehrkoordinatenantrieben mit Gewölbegeometrien als Erregerstruktur und andererseits einen Beitrag zu Lineardirektantrieben mit integrierter Magnetführung:

Keller, B.; Schinköthe, W.: Multi-Degree-of-Freedom Ultrasonic Motors using Rotation-Symmetric Piezoelectric Vault Geometries. 9. GMM/ETG-Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik 2013, Nürnberg 19./20.09.2013.

Reutzsch, B.; Schinköthe, W.: Magnetic Levitation System for Linear Direct Drives based on Lorentz Forces. 9. GMM/ETG-Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik 2013, Nürnberg 19./20.09.2013.

Multi-degree-of-freedom ultrasonic motors using rotation-symmetric piezoelectric vault geometries

Dipl.-Ing. Bastian Keller, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinkoethe, University of Stuttgart, Institute of Design and Production in Precision Engineering, Stuttgart, Germany

Abstract

The multi-degree-of-freedom (multi-DOF) ultrasonic motors described in this paper use one rotation-symmetric vault geometry (e.g. a hemispherical shell) made of piezoelectric material to provide three dimensional (3-D) trajectories on the top of this vault shaped vibrator. There with spherical, planar or a combination of linear and rotatory drives can be driven in several directions by a friction contact. The 3-D trajectories are generated by superposition of one horizontal and one vertical eigenmode. The horizontal eigenmode causes the vibrators top to move in several horizontal directions and the vertical eigenmode causes a movement in the vertical direction. So the superposition of these movements results in 3-D trajectories on the top of the vault vibrator. The coincidence of the resonance frequencies of the used eigenmodes and the fixing of the vibrator are key issues that have to be incorporated by the development of such motors. Furthermore, the excitation structure - specified by the electrode division that can be ordered circular segmented on the vibrator – looms large, too. There are different types of vault shapes (e.g. bell shells) and excitation techniques such multi-DOF ultrasonic motors can be build from. Out of this arises a multiplicity of opportunities to realize several variants of this type of motor. A prototype vibrator, composed of a hemispherical shell glued on a metal disk, will be described at the end of this paper that proves to be promising to use vault shaped vibrators for the development of multi-DOF ultrasonic motors.

1 Multi-DOF ultrasonic motors

Multi-DOF ultrasonic motors operate like other ultrasonic motors. They use solid vibrations to generate trajectories that drive a rotor or linear slider by friction contacts [1]. Especially, multi-DOF motors can drive spherical rotors or planar sliders with two or more degrees of freedom.

1.1 Drive side variants of multi-DOF motors

In addition to conventional one dimensional (1-D) rotors or linear sliders, multi-DOF motors can drive other forms of drive side movements. **Figure 1** shows three examples of how such multi-dimensional movements can be accomplished. Furthermore, there are other variants that result from combinations of several translational and/or rotational movements.

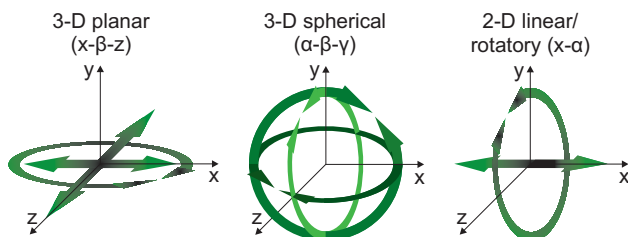


Figure 1 Examples of 2-D and 3-D drive side variants

When designing multi-DOF actuators the dimension of the trajectories plays a major role. These determine the direction of the drive side motion by the friction contact.

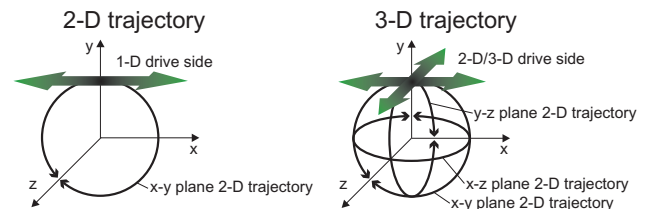


Figure 2 Dimensions of trajectories

Two dimensional (2-D) trajectories arise from a phase-shifted superposition of two motions with different directions. 3-D trajectories are generated by the superposition of three phase-shifted motions with different directions, respectively by shaping of 2-D plane trajectories with several orientations, see **Figure 2**. Thus, drive side movements of at least two degrees of freedom are possible.

1.2 Established designs of multi-DOF motors

The vibrators of common ultrasonic motors generate elliptical 2-D trajectories, which allow 1-D drive side movements only [2] [3]. In order to achieve multi-dimensional drive side movements with such vibrators,

[4] and [5] use spatially displaced vibrators that are arranged with different orientations, cf. **Figure 3**.

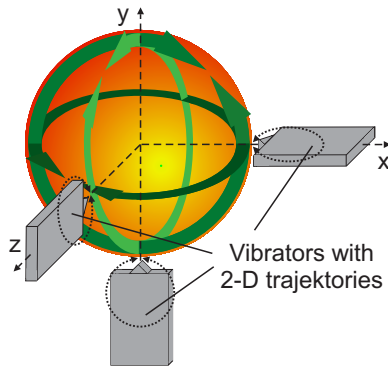


Figure 3 Example of a spherical drive side with three spatially arranged vibrators.

In the past few years, various multi-DOF ultrasonic motors have been developed that use a single vibrator forming 3-D trajectories [6]-[10]. These motors are all made of so-called composite vibrators. This means they use a special shaped vibrator made of metal, which is excited by multiple displaced ordered piezo-elements, to vibrate it in different directions. The operating principle is the same for all these motors: A frictional contact at one front side or in the middle of the vibrator is used to form 3-D trajectories that allow driving multi-DOF drive side variants with at least two degrees of freedom. In [6] and [7] one vibrator drives 3-D spherical drive sides. In contrast, [8] and [9] describe planar 2-D drive side movements with one vibrator. In order to achieve further degrees-of-freedom multiple vibrators can be arranged spatially displaced. For that purpose **Figure 4** shows a planar array of multiple vibrators [10]. In this connection the vibrators are embedded into the drive side that slides over a base surface. The translations (x and y) come about if the vertical standing 2-D trajectories of all vibrators have the same orientation. The rotation (β) takes place if the orientations of the vertical standing 2-D trajectories are skewed each other; for example if the orientation of each trajectory is perpendicular to the rotation point.

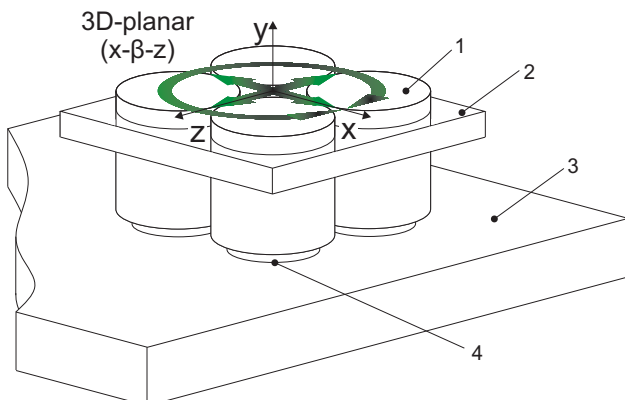


Figure 4 Multiple in a plane arranged vibrators.
1. Vibrator, 2. Drive side, 3. Base surface, 4. Friction contact

2 Multi-DOF motors with rotation-symmetric piezoelectric vault vibrators

The piezoelectric motor variants described here are based on the same operating principle as the motors with the composite vibrators described above. In contrast, however, a composite vibrator is not used here, but rather a rotation symmetric vault geometry (e.g. a hemispherical shell) made of piezoelectric material with radial polarisation and electrodes on the inner and outer surface to provide 3-D trajectories on the top of the vault vibrator.

The 3-D trajectories are formed by superposition of a vertical and a horizontal eigenmode, wherein the horizontal eigenmode can be excited in multiple directions (for example in the direction of the x - and z -axis), see **Figure 5**. The top of the vault vibrator swings in the same direction as the eigenmodes are reflected in, whereby 3-D trajectories or 2-D trajectories with different orientations can be generated.

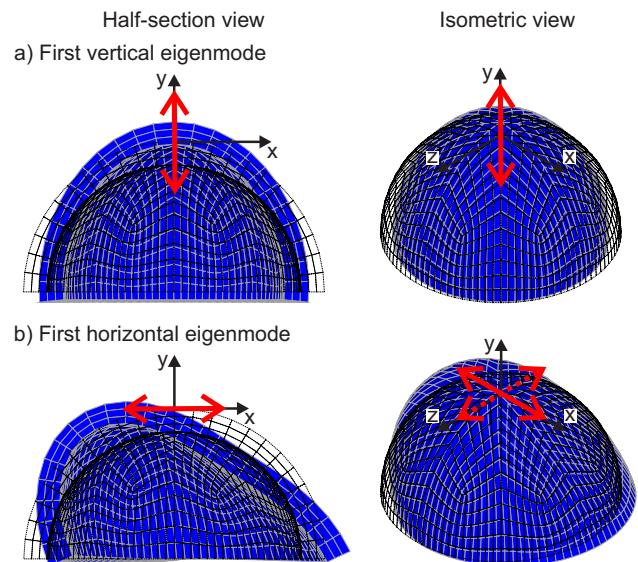


Figure 5 Examples of a vertical and a horizontal eigenmode of a hemispherical shell

A phase-shifted excitation of a vertical and a horizontal eigenmode generates plane, vertical standing trajectories (ex. x - y or y - z plane 2-D trajectories).

In order to circulate the trajectories evenly, the frequency of all vibrations has to be identical. Because maximum amplitudes arise if both eigenmodes are operating in resonance, the coincidence of both eigenfrequencies is desirable.

2.1 Excitation structure and techniques

In view of the excitability of horizontal and vertical eigenmodes the excitation structure looms large. This is specified by patterning the electrodes on the outer and/or inner surface of the vault vibrator. There are many different possibilities for partitioning the electrodes. When selecting the partition of the electrodes, it must be consid-

ered that the quality of the excitation - respectively the resonance behavior - of the individual eigenmode depends on the excitation structure. The resonance behavior can be characterized by the admittance frequency response (see **Figure 11**).

In the following some excitation structures are shown that stimulate horizontal and vertical eigenmodes at the same time. Thereby, the entire electrode on the inner surface always is set to zero potential.

An all-over outer electrode causes a rotation-symmetric excitation that stimulates vertical eigenmodes only. In order to stimulate horizontal eigenmodes, the excitation structure has to be area-symmetric to a vertical plane. A single vertical division results with an asymmetric stimulation - by anti-phase (180° electrical phase shift) energizing of both electrode sections - to an excitation of horizontal eigenmodes. So as horizontal eigenmodes can be stimulated in different directions there must be more vertical divisions, which lead to an, at least partially, circular segmented electrode structure.

The circular segmented arrangement of the electrodes shown in **Figure 6** allows a simultaneous excitation of both the vertical and horizontal eigenmodes. Of course, further divisions are conceivable.

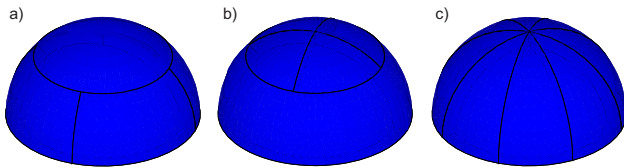


Figure 6 Examples of circular segmented electrodes

In Figure 6 structure a) and b), the excitation of horizontal eigenmodes is effected by energizing the four circular segmented electrodes. Vertical eigenmodes are excited by energizing the remaining all-over part. The eight cakelike segmented electrodes of Figure 6 structure c), the excitation of the eigenmodes can be carried out in several ways.

2.1.1 Multi-phase excitation

Multi-phase excitation of Figure 6, structure c) can be accomplished in two ways: The allocation of the segments to the eigenmodes can be done alternately (see **Figure 7** a), or two adjacent segments can be alternately allocated to one of each eigenmodes (see Figure 7 b). In both variants, two adjacent horizontal-mode segments became energized in phase and the opposite horizontal-mode segments became energized out-of-phase for stimulating horizontal eigenmodes. The stimulation of vertical eigenmodes is done by in phase energizing of all vertical-mode segments.

The orientation of the horizontal eigenmodes is changed by switching the allocation of the segments. Thus, with this electrode structure, the horizontal eigenmodes can be excited in total eight different orientations, corresponding to the purple arrows in Figure 7. Analog to these orientations, plane, vertical standing 2-D trajectories arise that determine the direction of the drive side movement.

This variant of excitation needs several mutually phase-shifted excitation signals – one signal for vertical eigenmodes and two for horizontal eigenmodes. But also there is an excitation variant that needs only one excitation signal.

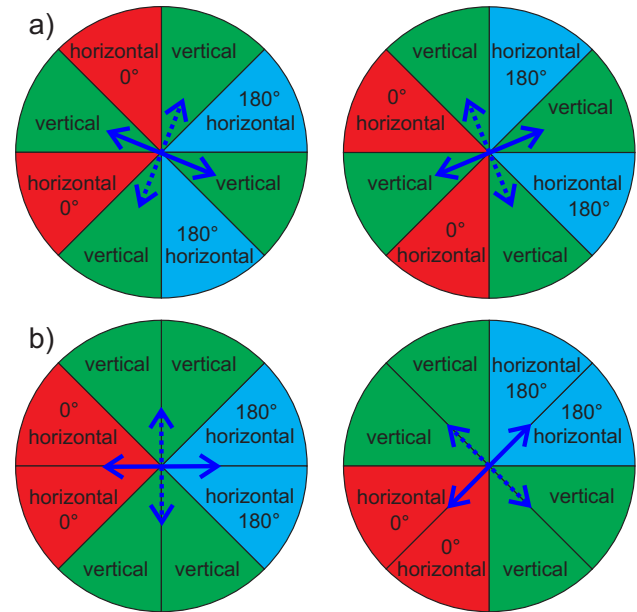


Figure 7 Multi-phase excitation with eight cakelike segmented electrode segments

2.1.2 Single-phase excitation

In single-phase excitation, only a part of the segments (e.g. a half) is energized with only one excitation signal and the rest of the electrodes remain unenergized. Due to such an asymmetric excitation, both vertical and horizontal eigenmodes are stimulated simultaneously. Out of the excitation structure, with the cakelike arranged segments, there are equal possibilities for the orientation of the horizontal eigenmodes and the plane, vertical standing 2-D trajectories. These were previously described during multi-phase excitation. **Figure 8** a) shows the orientation possibilities if an even number of adjacent segments is energized. Figure 8 b) shows the orientation possibilities if an odd number of adjacent segments is energized.

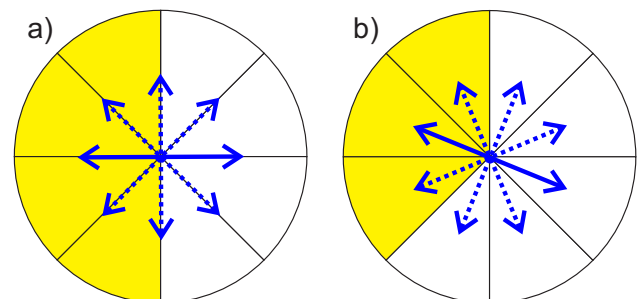


Figure 8 Single-phase excitation with eight cakelike segmented electrode segments

Thus 8 different orientations of the trajectories are possible and changing these orientations takes place by switching the allocation of the segments again.

The single-phase excitation causes significantly less effort in control and therefore it requires simpler electronics, than the multi-phase excitation.

2.2 Examples of vault shaped vibrators

In addition to simple hemispherical shells it is possible to use other vault shaped vibrators to design multi-DOF motors. **Figure 9** shows a few selected examples. Here the vault vibrators are designed with a constant shell thickness (w). These can be generated by rotating single or composite graphs (see **Table 1**) with a defined line thickness corresponding to the shell thickness.

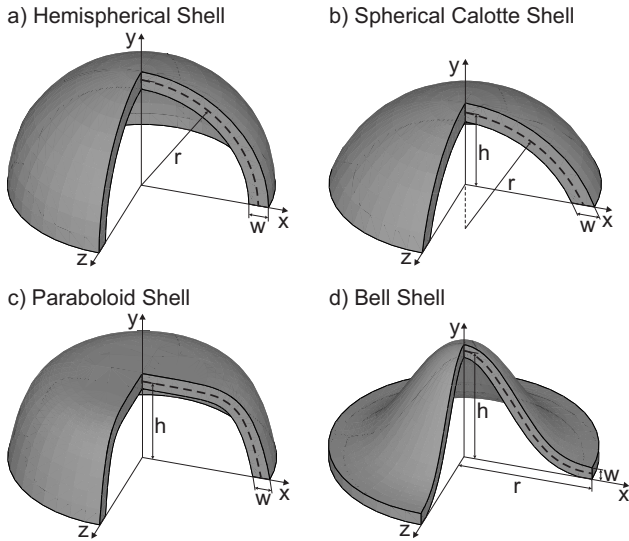


Figure 9 Examples of vault shaped vibrators generated by rotating a graph (see table 1)

Vault shape	Function of the Graph in the x-y plane	Indep. param.
Hemisphere	$y = \sqrt{r^2 - x^2}, 0 < x < r$ (1)	w, r
Spherical Calotte	$y = \sqrt{r^2 - x^2} - (r - h), 0 < x < \sqrt{2 \cdot r \cdot h - h^2}$ (2)	w, r, h
Paraboloid	$y = -a \cdot x^n + h, 0 < x < \sqrt[n]{h/a}$ (3)	w, a, h, n
Bell	$y = h \cdot e^{-a \cdot x^2}, 0 < x < r$ (4)	w, a, h, r

Table 1 Graphs of rotation for several vault vibrators

As previously mentioned, the coincidence of the eigenfrequencies of a vertical and a horizontal eigenmode is desirable. The eigenfrequencies can be modified and mutually shifted via varying the dimensions of the vibrator. For many vault shapes there exist several horizontal and vertical eigenmodes. At least two of these should be coincided by variation of the dimensions (geometrical parameters). Therefore the number of independent parameters, with those the vault shape is built up, plays an important role.

In case of the Hemispherical Shell, the graph of rotation is a quarter circle (Equation 1). This vault shape can be depicted by only two independent parameters (here: radius r and shell thickness w). A Spherical Calotte Shell has an additional independent parameter (here: the height h), about what the eigenfrequencies can be influenced more extensive. The possibilities of a coincident pair of horizontal and vertical eigenmodes are even more extensive at Paraboloid and Bell Shells with four independent parameters. The Bell Shells exhibit additional eigenmodes due to the inflection point in the graph.

Detailed studies of combinable eigenmodes and the influence of geometrical parameters on the eigen-frequencies have not been performed yet for all these vault shapes. At this point, only the variety of possibilities is pointed up, to illustrate the potential of this type of vibrators.

The production of individual piezoelectric ceramics with these special shapes is very laborious and entails high costs. But Hemispherical Shells can be found in the product portfolio of some manufacturers of ceramics ([11], [12]) and are available at affordable prices. Therefore, detailed studies were performed on this vault shape.

CeramTec GmbH provides a Hemispherical Shell with $r = 12$ mm and $w = 2$ mm - made of the material "Sonox P5" - in their product portfolio. FEM-analyses of the free-vibrating Hemispherical Shell show which eigenmodes are suitable using the excitation structure described above. The first mode shapes (shown previously in Figure 5) lead to large amplitudes at the top of this Hemispherical Shell, however, they exhibit insufficient resonance behavior. That means, these eigenmodes are stimulable deficient via the electrodes on the inner and outer surface. Eigenmodes at higher frequencies (see **Figure 10**) show distinctly better resonance behavior, which can be seen on the high admittance values at 81880 Hz respectively 110487 Hz in Figure 11.

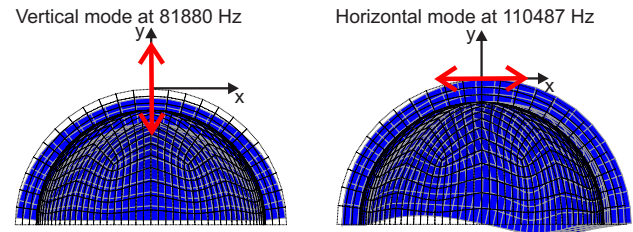


Figure 10 Eigenmodes with maximum admittance values in half section view

Figure 11 shows the eigenfrequencies of vertical eigenmodes, which are not in coincidence with the eigenfrequencies of horizontal eigenmodes. According to Figure 11, a simultaneous resonant excitation of two eigenmodes is not possible for the free-vibrating Hemispherical Shell. However, the vibrator has to be mounted on the stator to fasten it with the environment. This has a strong influence on the eigenmodes. For example, the Hemispherical Shell can be connected with the stator at its base area by an adhesive bond. The influence of such an adhesive bond is

elucidated in the following by means of a prototype vibrator.

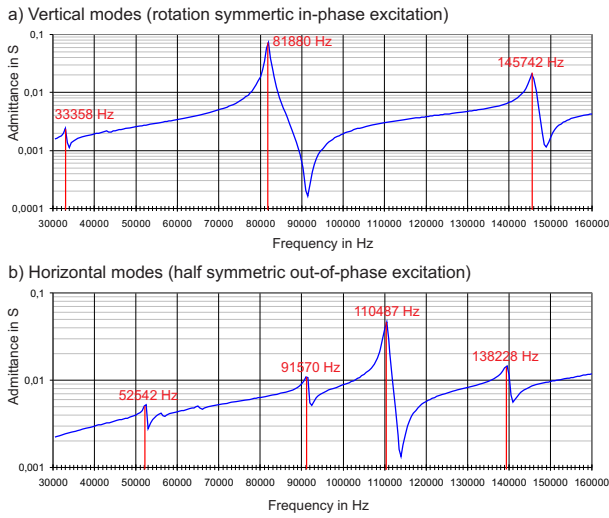


Figure 11 Admittance frequency response of the free-vibrating Hemispherical Shell

3 Prototype vibrator

A Prototype vibrator is built up of the previously simulated Hemispherical Shell with $r = 12$ mm and $w = 2$ mm. The original ceramic has one all-over electrode on each inner and outer surface and the cakelike segmented electrode structure was created by ablation of the gaps via laser processing. On the top of the Hemispherical Shell a low-wear friction tappet is glued, see **Figure 12**. The Hemispherical Shell is glued on an aluminium disk, whereby it can be screwed onto a test rig.

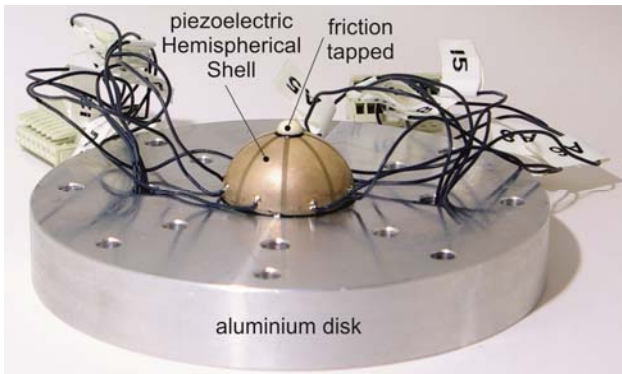


Figure 12 Prototype vibrator

3.1 Test rig with changeable drive side variants

A test rig was built up that enables tests of vault vibrators on several drive side variants, see **Figure 13**. It is composed of a portal that can have several drive side modules inserted into it. The drive side modules are fixed by lateral clamps that are moveable to the vertical direction. Above the drive side modules is a preload module, which allows a fine adjustment of the vertical moveable drive side modules onto the vibrator. This is needed, in order to

investigate the influence of the preload on the drive side behavior (e.g. force and speed dependencies).

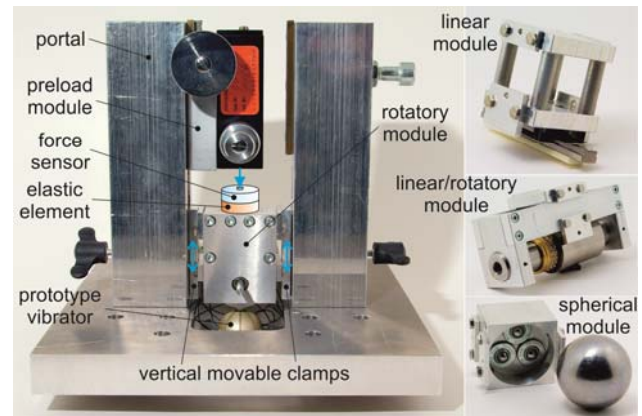


Figure 13 Test rig

3.2 Operating characteristics

The Hemispherical Shell glued on the aluminium disk indicates another resonance behavior as the previously investigated free-vibrating Hemispherical Shell, whose eigenmodes no longer exist in the forms described above. Due to the adhesive connection many other eigenmodes occur, which result from a superposition of the eigenmodes of the aluminium disk and the Hemispherical Shell.

The prototype vibrator works best by a frequency of about 64 kHz and can be driven both by multi-phase or single-phase excitation.

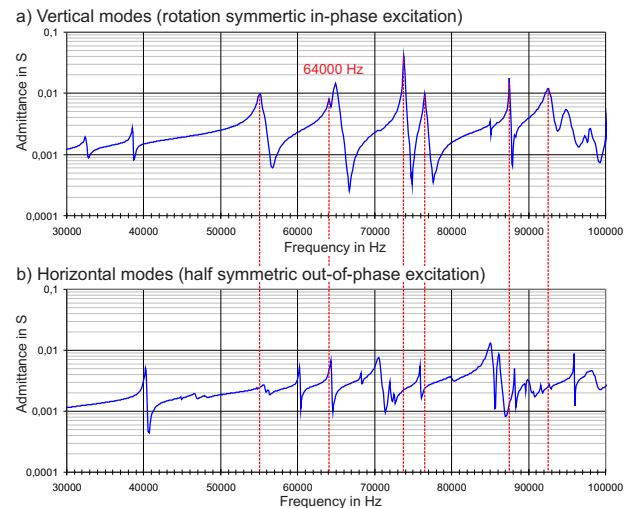


Figure 14 Measured admittance frequency response of the prototype vibrator

In **Figure 14** it can be seen that at 64 kHz the eigenfrequencies of a vertical and a horizontal eigenmode are very close to each other, so that both get excited in resonance simultaneously. In this case an output speed of up to 400 mm/s - with 120 Vamp excitation voltage and 20 N preload force - is possible. By increasing the preload force up to 40 N, the maximum speed decreases continuously

down to approximately 120 mm/s. Above 40 N preload no meaningful operation is possible.

In addition to the preload, the resonances are widely influenced by screwing the aluminium disk to the test rig. The greater the torque of the screws, the greater the resonant behavior deviates from that shown in Figure 14, since this greatly modifies the vibration ability of the aluminium disk.

3.3 Opportunities for optimizing

The eigenmodes of the prototype vibrator exhibit not a optimal resonance behavior at 64 kHz. In order to achieve a better output behavior, eigenmodes with higher admittance values and larger deflections at the vaults top must be brought to coincidence. On the one hand this is possible by using other vault shapes as shown in Figure 9 - e.g. a Spherical Calotte Shell can be generated easily by cutting a Hemispherical Shell at a defined height. On the other hand, the eigenmodes of the Hemispherical Shell can be influenced and adjusted by the dimensions and the material of a glued disk, whereby other, better suitable eigenmodes can be utilized. Furthermore, the usage of other electrode structures can be an advantage for energizing other eigenmodes. In addition, another fixation with radial degrees of freedom is necessary to influence the eigenmodes by the fixture as little as possible.

4 Conclusion

Many capabilities of how multi-degree-of-freedom ultrasonic motors using rotation-symmetric piezoelectric vault vibrators can be build were presented. The potential of these vibrators was illustrated by several vault shapes and various exciting techniques with an, at least partially, circular segmented electrode structure. The prototype vibrator, made of a Hemispherical Shell with eight cakelike segmented electrodes, is glued on a metal disc, via this the vibrator can be screwed on a test rig. However, a good behavior can be obtained only at low screw torques. So there is a lot of optimization potential in this kind of vibrator.

5 References

- [1] Chunsheng, Z.: *Ultrasonic Motors Technologies and Applications*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011
- [2] Nanomotion Ltd.: HS series motors, available at: www.nanomotion.com/HRseries.html [13.05.2013]
- [3] Shinsei Corporation: Products, available at: www.shinsei-motor.com/English/product/index.html [13.05.2013]
- [4] Lee, C.-W.; Song, J.-Y.; Ha, T.-H.: Planar motor based on the principle of ultrasonic wave using pzt, Dallas Texas: ASPE 22nd annual meeting, 2007
- [5] Toyama, S.; Purwanto, E.: Development of an ultrasonic motor as a fine-orienting stage, IEEE Transac-

- tions on Robotics and Automation, VOL. 17, NO. 4: pp. 464 – 471, 2001
- [6] Minghui, Z.; Wei, G.; Lining, S.: A multi-degree-of-freedom ultrasonic motor using in-plane deformation of planar piezoelectric elements, *Sensors and Actuators A-physical*, vol. 148, no. 1: pp. 193–200, 2008
- [7] Takemura, K.; Maeno, T.: Design and control of an ultrasonic motor capable of generating multi-dof motion, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, VOL. 6, NO. 4: pp. 499–506, 2001
- [8] Chang, W. S.; Youcef-Toumi, K.: Modeling of an omni-directional high precision friction drive positioning stage, Leuven Belgium: IEEE International Conference on Robotics & Automation, 1998
- [9] Shi, S.J.; Liu, J.K.; Chen, W.S.; Liu, Y.X.: Development of a 2-dof planar ultrasonic motor using longitudinal-bending hybrid transducer, Xian China: 18th IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics, 2009
- [10] Decoster, K.; De Volder, M.; Devos, S.: A motor combining a resonant vibration mode, a stepping mode and a direct positioning mode, Patent No. WO 2004/082037 A2, 2004
- [11] Ceramtec GmbH: Structural shapes of piezoceramics, available at: www.ceramtec.de/werkstoffe/piezokeramik/bauformen/ [13.05.2013]
- [12] Ferroperm Piezoceramics A/S: Custom products, available at: www.ferroperm-piezo.com/ [13.05.2013]

Magnetic Levitation System for Linear Direct Drives based on Lorentz Forces

Dipl.-Ing. Benjamin Reutzsch; Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinkoethe, Institute of Design and Production in Precision Engineering, University of Stuttgart, Germany

Abstract

Linear rolling and plain bearings are established and proven in Mechanical Engineering. However, for highest requirements concerning stiffness, dynamics and durability, as well as in dust-free and vacuum rooms, usage of magnetically levitated linear bearings can be economically worthwhile. Existent magnetic levitation systems are designed in greater dimensions, especially for purposes of passenger transportation like the German *Transrapid* and for usage in machine tools [2] [1]. Furthermore, they are mostly based on electromagnets, what is firstly attended by damping effects due to eddy currents and hysteresis losses and secondly attended by need for complex closed-loop control algorithms.

In this paper an innovative magnetic levitation system for linear direct drives is presented, that is exclusively based on Lorentz forces and which is designed in dimensions for application in precision engineering systems [3]. Permanent magnets are arranged similar to a Halbach array within the guideway and thereby establish a magnetic field for the levitation and guidance coils. The comparatively low weight of the moving part and its lack of eddy currents allow for highest dynamics. Moreover, easy and efficient closed-loop algorithms can be implemented because of the linear correlation of Lorentz force and current. Finally, the performance of the levitation system is shown using the example of an existing prototype.

1 Introduction

Linear bearings are standard components in a wide range of industrial applications and are mostly designed as rolling or plain bearings. Nevertheless, for highest requirements concerning stiffness, dynamics and durability, as well as in dust-free and vacuum environments, an implementation of magnetically levitated linear bearings can make sense. These systems do not exhibit any mechanical friction and tribological wear and feature the possibility to adjust their stiffness according to their individual application. Most systems, which are part of scientific examinations are based on electromagnets and therefore show some disadvantages, such as damping effects.

This paper presents an innovative magnetic levitation system for application in precision engineering, which is solely based on Lorentz forces and hence has inherent advantages such as highest dynamics, compact design and low power requirements. After a short introduction in magnetic levitation technology, the basic design of all necessary components is shown, such as the configuration of permanent magnets in the guideway, the actuator coils in the moving part and positioning of displacement sensors. Afterwards, special requirements for use in precision engineering applications are discussed and feasible performance characteristics, such as motion speed, acceleration and dynamic stiffness of the proposed system are shown. Finally, comparisons with measurement results of a physical prototype are presented.

2 Magnetic Levitation Technology

Magnetic levitation technology is widely connected with electromagnetic actuators, although there are more physical principles that can technically be used for levitation purposes, such as electrodynamic, diamagnetic, superconductive and ultrasonic levitation.

2.1 Magnetic Levitation Systems

Magnetic levitation systems are established in public transport, such as the German *Transrapid* [2] (**Figure 1**), whose levitation forces are based on electromagnets. Furthermore, modern machine tools are latterly equipped with magnetically levitated linear bearings, even though maturity stage is not yet achieved and scientific investigations are still in progress [1]. In the last years, more development work has been conducted, especially for applications in nanopositioning, such as the PIMagTM 6D, a magnetically levitated table for 6 dimension positioning, whose physical levitation and guidance principles are based on Lorentz forces, see Figure 1 (right) [4][5].



Figure 1 Transrapid [2] and PIMagTM 6D (PI GmbH) [5]

2.2 Special Requirements for Levitated Systems in Precision Engineering

Most levitation systems exhibit comparatively great dimensions and are therefore not applicable for precision engineering. Furthermore, special requirements must be considered for smaller dimensions, which determine design and usage of physical principles:

- Short travel distance, usually < 1 m, which prevents usage of electrodynamic levitation, where high velocities are needed.
- Operation with safety-low voltage < 100 V, which leads to a slower increase of levitation forces.
- Light weight of the moving part < 10 kg, so that an active force is needed, facing downwards in direction of gravity.
- Small load forces in process < 100 N.
- Compact design.
- Passive compensation of weight for low power requirements in static state of levitation.

3 Basic Configuration

The innovative design of a levitation system for usage in precision engineering applications and exclusively based on Lorentz forces is now presented.

3.1 Design

In order to stabilise 3 rotational and 2 translational degrees of freedom of a rigid body, 5 independent actuators must exist. They are implemented as copper coils, placed within a magnetic field and named A_1 to A_5 in **Figure 2**.

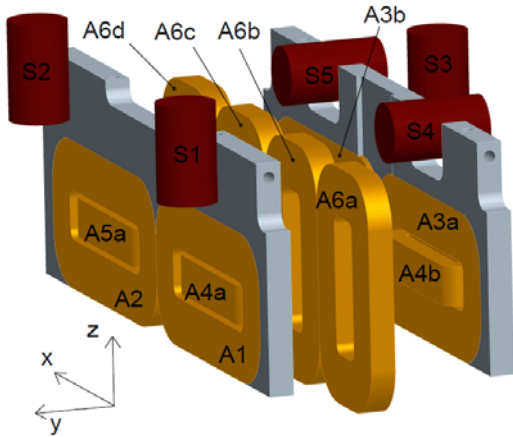


Figure 2 Moving part [3]

Actuators A_3 to A_5 consist of two coils, e.g. A_{4a} and A_{4b} , which are connected in series and therefore act as one actuator A_4 . The propulsion system, denoted by actuator A_6 is implemented as a heteropolar, 2-phased linear direct drive, using symmetrically arranged propulsion magnets with alternating polarisations, see **Figure 3**. It comprises 4 coils, whereas respectively 2 are connected in series. Furthermore, 5 independent displacement sensor signals

are needed (sensor S_1 to S_5 , **Figure 2**), which measure the position of the moving part against its guideway. A sectional view of an exemplary model with guideway and moving part is shown in **Figure 4**. Three rows of permanent magnets, whose polarisations are arranged similar to a Halbach array, are placed within two paramagnetic carriers. In combination with 2 back iron parts, they guide the magnetic flux in a way, that they allow for a directed magnetic flux density in the area of the levitation coils (actuators A_1 , A_2 and A_3) and the guidance coils (actuators A_4 and A_5).

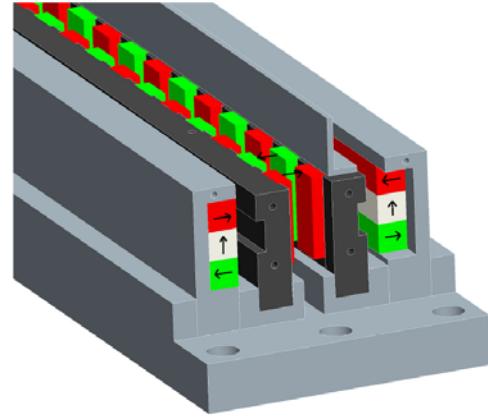


Figure 3 Guideway [3]

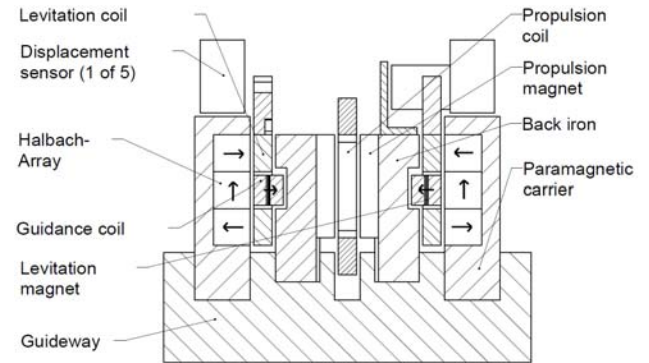


Figure 4 Sectional view

Table 1 presents the variables that are used frequently throughout this contribution along with their respective units and descriptions.

Symbol	Unit	Description
\tilde{A}	$[m^2]$	Coil area
a_{\max}	$[m/s^2]$	Maximum acceleration
$\vec{B}_j \in R^{3 \times 1}$	[T]	Magnetic induction vector for actuator j
$\vec{B}_{j\perp} \in R^{3 \times 1}$	[T]	Rectangular part of magnetic induction vector to \vec{l}_j for actuator j
C		Centre of gravity
f_S	[N]	Load force
F_S	[N]	Load force (including weight)
$ \vec{F}_j = k_j \cdot i_j$	[N]	Force of actuator j

i_j	[A]	Current of actuator j
g	[m/s ²]	Acceleration of gravity
k_j	[N/A]	Force constant of actuator j
L_j	[H]	Inductivity of actuator coil j
$ \vec{l}_j $	[m]	Effective length of conductor of actuator coil j
m	[kg]	Mass of moving part
R_j	[Ω]	Resistance of actuator coil j
s_j	[m]	Sensor signal of sensor j
Δt	[s]	Delay time
u_j	[V]	Input voltage of actuator coil j
$u_{j,ind}$	[V]	Induced voltage of actuator coil j
u_{max}	[V]	Intermediate circuit voltage
v_{max}	[m/s]	Maximum motion speed
x_{min}	[m]	Minimum distance to achieve $\varepsilon \cdot v_{max}$
x, y, z	[m]	Cartesian coordinates
Δz	[m]	Vertical deviation of C from levitation height
$\pm \tilde{z}$	[m]	Switching-band of virtual hysteresis controller

Table 1 Variables with descriptions

3.2 FEM Simulation

In order to pre-estimate parameters of the levitation system, such as coil inductivity L , coil resistance R and force constant k , preliminary FEM simulations are conducted. An electromagnetic 2D-FEM simulation in **Figure 5** shows that the magnetic flux density vector \vec{B}_j in the area \tilde{A} of the levitation coil exhibits a large horizontal component $\vec{B}_{j\perp}$ in y-direction and rectangular to \vec{l}_j .

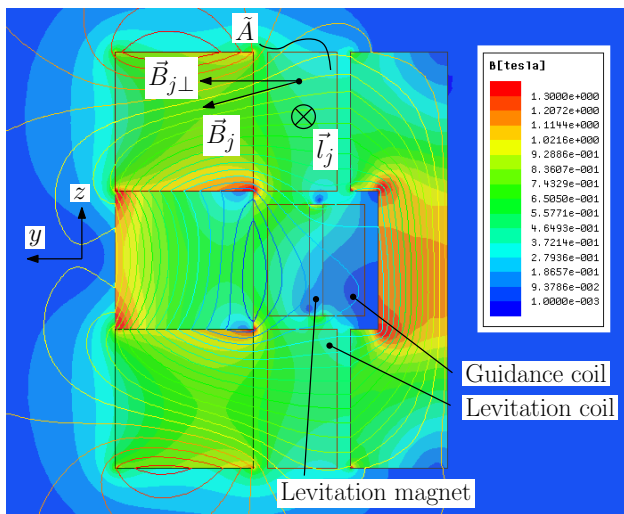


Figure 5 2D-FEM simulation, magnetic flux density

It therefore allows for vertical Lorentz forces F_j in the current i_j carrying levitation coils of actuator A_j , for $j=1(1)3$. Similar considerations apply to the guidance

coils, where the vertically polarised magnets in the middle of the Halbach array lead to a vertical component in z-direction of flux density $\vec{B}_{j\perp}$ in the area of one wing of the small guidance coils and hence cause transverse Lorentz forces in A_4 and A_5 . Its other wing, that stays in the slot of the back iron part is not exposed to high magnetic flux density and therefore does not obtain appreciable forces. The Lorentz forces F_j of the levitation and guidance actuators are dependent on force constants k_j and are derived from the FEM simulation in **Figure 5**, as shown in (3.1) and (3.2):

$$|\vec{F}_j| = F_j = \frac{1}{\tilde{A}} \int_{\tilde{A}} |\vec{l}_j \times \vec{B}_{j\perp}| d\tilde{A} \cdot i_j, \quad (3.1)$$

$$\Rightarrow F_j = |\vec{l}_j| \cdot \left(\frac{1}{\tilde{A}} \int_{\tilde{A}} |\vec{B}_{j\perp}| d\tilde{A} \right) \cdot i_j = k_j \cdot i_j. \quad (3.2)$$

Passive compensation of weight is achieved by means of horizontally polarised levitation magnets, implemented within the windows of the guidance coils, which interact with the magnetic field of the Halbach array and therefore obtain upwards directed forces in z-direction.

4 Performance Characteristics

Based on results of FEM simulations and in consideration of used power electronics and available space, preliminary analytic performance characteristics can be identified.

4.1 Motion Characteristics

The maximum motion speed v_{max} and maximum acceleration a_{max} are important characteristics of a linear direct drive.

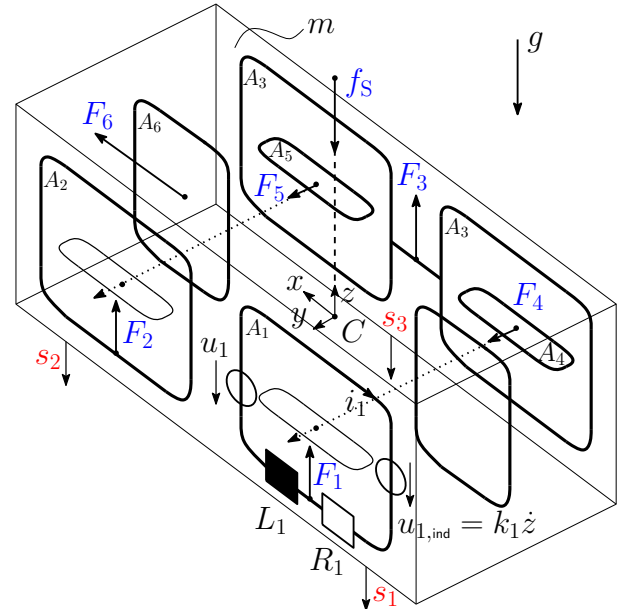


Figure 6 Kinetic and electronic part systems

Levitated systems are not exposed to appreciable friction or mechanical wear, so that their kinetic propulsion characteristics are only limited by their electronic properties. **Figure 6** shows a schematic arrangement of all actuators

within the moving part and additionally their kinetic and electronic part systems, whereas only actuator A_1 is shown in detail. Applying the principle of linear momentum on the moving part, projected to the positive x -direction, and using (3.2) yields

$$m\ddot{x} = F_6 \Rightarrow \ddot{x} = \frac{1}{m} k_6 \cdot i_6. \quad (4.1)$$

Neglecting the angular speeds, the electronic part system of actuator A_6 can be described as

$$u_6 = R_6 i_6 + k_6 \dot{x} + \frac{di_6}{dt} L_6. \quad (4.2)$$

Equation (4.1) in (4.2) yields the linear differential equation (4.3). The inductivity L_6 of the actuator coil is neglected, because inertia of the moving part is essentially higher than dynamics of the electronic part system:

$$\Rightarrow u_6 = \frac{R_6 m}{k_6} \ddot{x} + k_6 \dot{x}. \quad (4.3)$$

With $u_6 = u_{\max}$ as the maximum applicable voltage results in

$$x(t) = \frac{u_{\max}}{k_6} t + \frac{u_{\max} R_6 m}{k_6^2} \left(e^{-\frac{k_6^2}{R_6 m} t} - 1 \right) \quad (4.4)$$

$$v(t) = \dot{x}(t) = \frac{u_{\max}}{k_6} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_6^2}{R_6 m} t} \right) \quad (4.5)$$

$$a(t) = \ddot{x}(t) = \frac{u_{\max} k_6}{R_6 m} \cdot e^{-\frac{k_6^2}{R_6 m} t}. \quad (4.6)$$

With equation (4.5), the maximum motion speed v_{\max} is

$$v_{\max} = \lim_{t \rightarrow \infty} v(t) = \frac{u_{\max}}{k_6}. \quad (4.7)$$

A comparison between analytic considerations, represented by equations (4.4) and (4.5) and measurements of a real implementation of the levitation system (see chapter 5) are plotted in **Figure 7**.

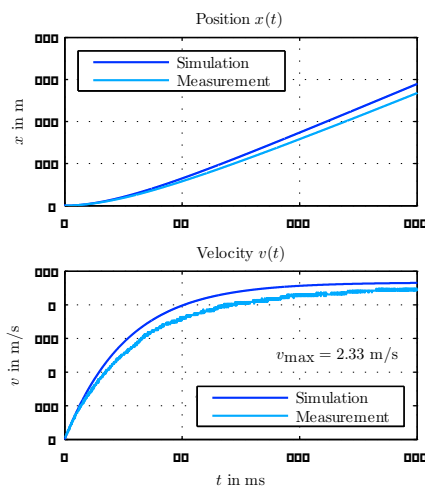


Figure 7 Propulsion characteristics in x -direction

Moreover, the minimum distance x_{\min} must be provided to achieve the stationary speed $v = \varepsilon \cdot v_{\max}$ (with $0 < \varepsilon < 1$):

$$x_{\min} = -\frac{u_{\max} R_6 m}{k_6^2} (\varepsilon + \ln(1 - \varepsilon)). \quad (4.8)$$

Maximum acceleration a_{\max} can be derived from (4.6):

$$a_{\max} = a(0) = \frac{u_{\max} k_6}{R_6 m}. \quad (4.9)$$

It should be emphasized, that the maximum motion speed v_{\max} and the maximum acceleration a_{\max} are proportional to the applied voltage u_{\max} and can therefore be increased, according to the limits of implemented power electronics.

4.2 Dynamic Stiffness

Contrary to conventional linear rolling and plain bearings, where static external loads lead to a persistent offset in position, a static stiffness cannot be defined for magnetically levitated systems, due to its controlled tracking behaviour. Therefore, a dynamic stiffness must be specified, which can be defined as the maximum deviation Δz of the centre of gravity C from its static levitation height, when a vertical load f_s is applied at time $t = 0$ s. The ratio $\Delta z / f_s$ gives a universal classification number for dynamic stiffness, independent from weight and applied load force f_s . An analytic estimation of the expected dynamic stiffness can be conducted as follows:

Applying the principle of linear momentum on the centre of gravity of the moving part, projected to the positive z -direction and using (3.2), yields

$$m\ddot{z} = \sum F_z = k_1 i_1 + k_2 i_2 + k_3 i_3 - F_S, \quad (4.10a)$$

with $F_S = f_s + mg$. Applying Kirchhoff's voltage law, according to Figure 6, gives

$$L_j \frac{di_j}{dt} = u_j - R_j i_j - k_j \dot{z}, \quad \text{for } j=1(1)3. \quad (4.10b)$$

As all levitation coils are identical, simplifying assumptions can be conducted, that is

$$k_2 = k_1, \quad R_2 = R_1, \quad L_2 = L_1 \quad (4.11a)$$

$$k_3 = 2k_1, \quad R_3 = 2R_1, \quad L_3 = 2L_1 \quad (4.11b)$$

$$u_1 = u_2 = u_3 = u. \quad (4.11c)$$

We assume, that at time $t_1 = \Delta t$, the maximum voltage $u(t - \Delta t) = u_{\max}$ is applied to all levitation coils, whereas

$$u(t - \Delta t) \begin{cases} u = 0, & \text{for } t \leq \Delta t \\ u = u_{\max}, & \text{for } t > \Delta t. \end{cases} \quad (4.12)$$

For delay Δt , a point of time is chosen, where the deviation Δz of the moving part reaches a value $\pm \tilde{z}$ from its static levitation height. This behaviour describes a hysteresis controller, whereas $\pm \tilde{z}$ is the switching-band of hysteresis. Evidently, a hysteresis controller is not applicable in reality, due to stability problems, but gives an analytic forecast of theoretically achievable stiffness within physical constraints. Applying Laplace transformations on (4.10), considering (4.11) and (4.12) and eliminating i_1 to i_3 , leads to

$$L_1 m \ddot{z} + R_1 m \dot{z} + 4k_1^2 z = 3k_1 u(t - \Delta t) - R_1 F_S - L_1 \dot{F}_S. \quad (4.13)$$

Solving the differential equation (4.13) results in an analytic statement of $z(t)$. **Figure 8** shows a comparison between the theoretically achievable deviation Δz_{hyst} from levitation height with a real measurement Δz_{PID} , where a PID-controller is implemented. According to Figure 8, a maximum deviation of $\Delta z_{\text{hyst}} = -9.3 \mu\text{m}$ can be achieved in theory with a hysteresis controller, whereas the real PID-controller shows $\Delta z_{\text{PID}} = -31.7 \mu\text{m}$. In comparison with the theoretical trajectory, the measured trajectory of $z(t)$ in Figure 8 shows a slower fall around $t = 0 \text{ s}$.

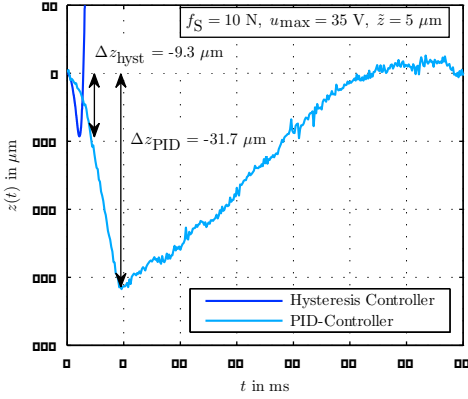


Figure 8 Position $z(t)$ with external load $f_S = 10 \text{ N}$

The reason is, that at time $t < 0 \text{ s}$, the PID-controller is already working to keep levitation height, so that an initial current and hence a force is already present within the levitation coils. **Figure 9** shows the results of further examinations, where maximum deviations Δz are plotted against different load forces f_S , which are applied to the moving part. Again comparisons between theoretical analyses and real measurements are conducted. The offset at $f_S = 0 \text{ N}$ gives the maximum deviation, when only the weight of the moving part is present. The theoretical dynamic stiffness $\Delta z_{\text{hyst}} / f_S = -0.19 \mu\text{m}/\text{N}$ reaches a superior value than the real implementation with a PID controller, where $\Delta z_{\text{PID}} / f_S = -2.61 \mu\text{m}/\text{N}$ is achieved. Figure 9 makes clear, that there's still need for improving the implemented PID control algorithm.

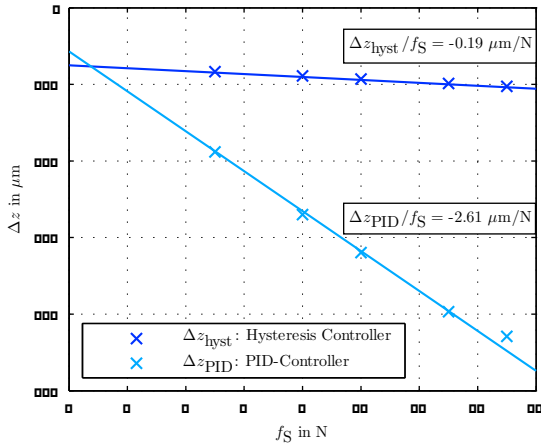


Figure 9 Maximum deviation Δz

Again, it should be mentioned, that dynamic stiffness $\Delta z / f_S$ is highly dependent on the quality of control

algorithm and other operation parameters such as voltage and measurement noise of displacement sensors.

Annotation: $z(t)$ as the vertical position of C can be derived from measured sensor signals s_1 to s_3 , due to the symmetric arrangement of sensors within the moving part

$$z = \frac{1}{4}s_1 + \frac{1}{4}s_2 + \frac{1}{2}s_3. \quad (4.14)$$

4.3 Increase of Levitation Force

The performance parameter $\dot{f}_z(0)$ (increase of levitation force) expresses, how fast a levitation force f_z can be impressed on the moving part. The levitation force f_z is modelled as

$$f_z = k_1 i_1 + k_2 i_2 + k_3 i_3, \quad (4.15)$$

using (3.2). Applying (4.10b) and neglecting induced voltages $u_{j,\text{ind}} = k_j \dot{z} = 0 \text{ V}$, yields

$$L_j \frac{di_j}{dt} = u_j - R_j i_j, \quad \text{for } j=1(1)3. \quad (4.16)$$

Considering simplifying assumptions (4.11), leads to

$$L_1 \dot{f}_z(t) + R_1 f_z(t) = 3k_1 u(t). \quad (4.17)$$

Solving (4.17), yields

$$f_z(t) = \frac{3k_1 u}{R_1} (1 - e^{-\frac{R_1 t}{L_1}}). \quad (4.18)$$

Finally, the maximum increase of levitation force can be expressed as

$$\dot{f}_z(0) = \frac{3k_1}{L_1} u. \quad (4.19)$$

Figure 10 shows a comparison between the theoretical analysis of equation (4.18) and a real measurement. The consistency between simulation and reality is acceptably accurate and gives an increase of levitation force of $\dot{f}_z(0) = 24.7 \text{ N/ms}$.

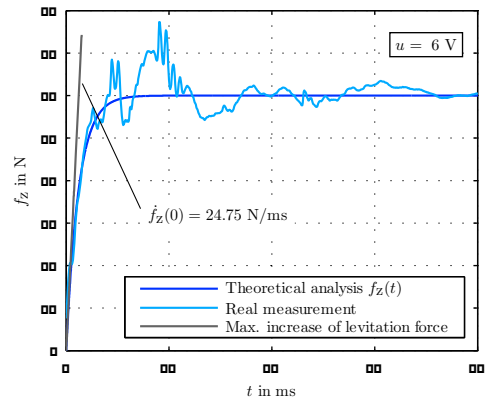


Figure 10 Levitation force $f_z(t)$ ($u = 6 \text{ V}$)

The comparatively volatile trajectory of measured levitation force exhibits influences of elasticity and bouncing phenomena of the measurement setup.

5 Implementation

A real implementation of the discussed levitation system, comprising stator and moving part, is shown in **Fig-**

ure 11. All light-coloured materials are made of aluminium, which on the one hand allow for low weight of the moving part and on the other hand fulfil necessity for paramagnetic properties. The maximum moving distance is $x_{\max} = 35$ cm, whereas the maximum dimensions of the guideway can be specified as 580 x 100 x 76 mm. All Cable and cable inlets are not displayed.

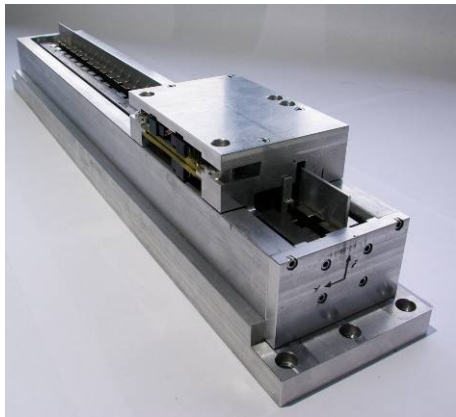


Figure 11 Prototype of levitation system

The levitation and guidance coils of the moving part (**Figure 12**) are fixed within a matrix of black epoxide resin to obtain stability and enhance heat release.

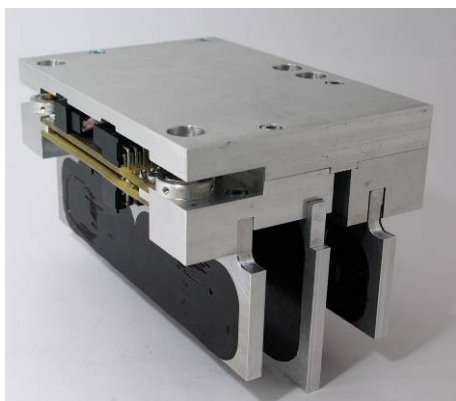


Figure 12 Moving part of levitation system

The sensor system consist of five eddy current sensors with a measuring range between 0 mm - 2 mm and a static repeatability of 0.1 μm , whereas measurement noise in operation mode is in the range of ± 1 μm , because of deficient electromagnetic compatibility of hardware environment. A high-power motor driver, implemented as a discrete MOSFET H-bridge is used as power electronics and operates with PWM frequency of 40 kHz at intermediate circuit voltage of $u_{\max} = 35$ V. For AD-conversion, PWM output, evaluation of incremental encoder signals, data acquisition and operation monitoring, the real-time digital signal processor dSPACE DS1103 PPC Controller Board is used. It comprises a PowerPC 750GX micro-processor, which runs at frequencies up to 1 GHz, including 1 MB internal L2 cache, providing amongst others 50 Bit-I/O channels, 36 A/D channels, 8 D/A channels, PWM generation and 7 incremental encoder interfaces.

Additionally, there is the possibility to synchronize the A/D channels with the internal PWM signal. Some operation parameters of the prototype are summarised in **Table 2**.

Parameter	Symbol	Value	Unit
Mass of moving part	m	1.05	kg
Max. moving distance	x_{\max}	0.35	m
Levitation force, short-term	F_{\max}	250	N
Max. motion speed (at u_{\max})	v_{\max}	2.3	m/s
Max. acceleration (at u_{\max})	a_{\max}	92	m/s^2
Dyn. stiffness (PID-ctrl.)	$\Delta z / f_s$	2.6	$\mu\text{m/N}$
Intermediate circuit voltage	u_{\max}	35	V
Max. power, short term	P_{\max}	330	W
Max. current, short-term	I_{\max}	10	A
PWM frequency	f_{PWM}	40	kHz

Table 2 Data sheet prototype levitation system

6 Conclusion and Application

The present contribution presents an innovative design of a magnetically levitated linear direct drive, solely based on Lorentz forces. The basic configuration of the presented system is introduced with regard to applications in precision engineering.

It's shown, how to identify important parameters with an FEM simulation, such as force constant k and using them to pre-estimate performance characteristics like motion speed, dynamic stiffness and increase of levitation force at a stage, where a real implementation is not yet existent. A comparison between theoretically achievable values for dynamic stiffness, based on analytic analyses and real measurements with a PID controller show potentials for improving control algorithm.

7 References

- [1] Ruskowski, M.: Aufbau und Regelung aktiver Magnetfuehrungen. Leibniz Universitaet Hannover, 2004
- [2] Meins, J.; Miller, L.: The high speed maglev transportations system Transrapid, IEEE Transactions on Magnetics. Volume 24, 1988
- [3] Reutzsch, B.; Schinkoethe, W.: Linearfuehrung fuer Schwebeantriebe, Patent application, DE 10 2012 002 266.2, 2012
- [4] Schäffel, C.; Katzschmann, M.: Anordnung eines planaren 6D-Positionierers, Patent application, DE 10 2011 100 153 A1
- [5] PI GmbH & Co KG.: Setting trends in nanopositioning technology: development project PIMagTM 6D, Topics Newsletter, Issue 48, 2013