

Universität Stuttgart

Jahresbericht IKFF 2017

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 2018

1	DAS INSTITUT	1
1.1	Mitarbeiter	1
1.2	Jahresrückblick	2
1.3	Wissenschaftliche Arbeitsgebiete	5
2	LEHRVERANSTALTUNGEN	8
2.1	Vorlesungen und Übungen für das Bachelorstudium.....	8
2.2	Vorlesungen und Übungen für das Bachelor- und Masterstudium.....	8
2.3	Prüfungen	11
2.4	Praktika.....	12
2.5	Exkursion	14
2.6	Projektarbeiten.....	14
2.7	Seminar Feinwerktechnik (WS 2016/17 und SS 2017)	15
3	WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN, BACHELOR-, STUDIEN- UND MASTERARBEITEN	19
3.1	Dissertationen	19
3.2	Masterarbeiten am IKFF (WS 2016/17 und SS 2017).....	19
3.3	Bachelorarbeiten am IKFF (WS 2016/17 und SS 2017)	22
3.4	Studienarbeiten am IKFF (WS 2016/17 und SS 2017)	22
4	ARBEITSGEBIETE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITER ..	25
4.1	Aktorik.....	25
4.2	Spritzgießen.....	27
5	ÖFFENTLICHKEITSARBEIT	31
5.1	Veröffentlichungen	31
5.2	Doktorandenkolloquien	32
5.3	Gremienarbeit	32
5.4	Tag der Wissenschaft	32
6	KONGRESSE, TAGUNGEN UND MESSEN	34
7	WERKSTATTBERICHT	35
8	ANHANG - Ausgewählte Veröffentlichungen	35

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. Judith Henzler (geb. Kofler)

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

M.Sc. Thomas Litwin

Dipl.-Ing. Andreas Maucher

M.Sc. Marcel Mittag

M.Eng. Markus Raab

Dipl.-Ing. Adrian Retzbach

Dipl.-Ing. Gregor Schattka

M.Sc. Frank Schiele

Dipl.-Ing. Maximilian Schönherr

M.Sc. Simon Strohmeyr

Modellbau und Versuchswerkstatt:

Ralf Berwanger

Stefan Schneider

Wissenschaftliche Hilfskräfte:

Fleischmann, Patrick

Hirsch, Felix

Gadegast, Simon

Hutter, Marco

Greis, Marius

1.2 Jahresrückblick**50. Jahrestag der Gründung des IKFF - ein besonderer Höhepunkt**

Am 01.04.2017 wurde das IKFF 50 Jahre alt. Aus diesem Anlass fand am 28.04.2017 dazu eine Jubiläumsfeier mit Mitarbeitern, Ehemaligen und Gästen sowie Angehörigen statt. Prof. Schinköthe hielt zunächst einen Vortrag zur Historie des Institutes und zur zusammenfassenden Darstellung der Lehrbelastung des IKFF. Anschließend gab er einen Überblick über die Forschung am Institut, schwerpunktmäßig in den letzten 25 Jahren. Herr Burkard hat sich in einem weiteren Beitrag auf die Lehre und insbesondere auf die Konstruktionswettbewerbe als Highlight der Lehre des IKFF konzentriert. Im Anschluss gab es einen Imbiss und die Möglichkeit zu Gesprächen, zum Austausch mit den Ehemaligen und Gästen.

Anlässlich des Jahrestages wurde eine Festschrift 50 Jahre IKFF erstellt, die die Entwicklung des IKFF in diesen 50 Jahren veranschaulicht. Sie kann über das Sekretariat bezogen werden. Im Rahmen der Vorbereitung des 50. Jahrestages wurde auch das Doktoranden-Kolloquium wiederbelebt und außerdem eine Ganztages-Institutsexkursion in das Technikmuseum Sinsheim mit Führung, Mittagessen und Besuch des IMAX 3D Kinos sowie einem Ausklang auf der Burg Steinsberg organisiert.

Personalia

Im Jahre 2017 konnten drei neue Mitarbeiter gewonnen werden, Herr Litwin für das Thema Induktionserwärmung beim Spritzgießen, Herr Schönherr für die Entformungskraft-Untersuchungen beim Spritzgießen und Herr Mittag für das Gebiet Lineardirektantriebe. Ebenfalls drei Mitarbeiter verließen planmäßig das Institut.

Aktivitäten in der Lehre

Die Anfängerzahlen im Maschinenbau sind nach wie vor hoch, wenngleich nun erneut ein weiterer Rückgang zu erkennen ist. Die Anfängerzahlen aller maschinenbaulichen Bachelor-Studiengänge der Universität Stuttgart (ohne Luft- und Raumfahrttechnik) lagen im Jahr 2017 bei ca. 900 Studierenden. Im Bachelor-Studiengang Maschinenwesen selbst fielen die Anfängerzahlen gegenüber dem Vorjahr nochmals auf ca. 250. Hinzu kommen noch ca. 1000 neue Masterstudierende.

Der Masterstudiengang Maschinenbau/Mikrotechnik, Gerätetechnik und Technische Optik (Studiendekan Prof. Schinköthe, ab 01.01.2018 Prof. Zimmermann vom IFM, Studiengangsmanager Herr Burkard, ab 01.01.2018 Herr Mohr vom IFM) hat ca. 20 Anfänger pro Jahr, ebenfalls weniger als früher. Zuspruch zu unserem Master gibt es vor allem von außen, aus anderen Universitäten, Fachhochschulen bzw. aus Dualen Hochschulen. Die Studierendenzahl liegt damit etwas unter der langfristigen Zielstellung von 25 Immatrikulationen pro Jahr.

In der Konstruktionslehre Feinwerktechnik hatten wir im Wintersemester nur 45 Studierende, im Vorjahr noch 95. 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 Bachelor-Studiengänge Maschinenbau sowie Fahrzeug- und Motorentchnik.

Im Spezialisierungsfach dominieren nun die Masterstudierenden. Derzeit begannen 30 Studierende im Fach „Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik“ als Pflicht- oder Kernfach. 22 Studierende starteten im Kernfach „Aktorik“. Das Fach „Praxis des Spritzgießens in der Gerätetechnik, Verfahren, Prozesskette, Simulation“ belegten 5 Studierende, die „Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL“ belegten 17 Studierende. Im vergangenen Jahr hatten wir zudem mit erneut 42 Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten wieder einen sehr hohen Zuspruch in diesem Bereich. Hinzu kommen noch Projektarbeiten.

Die Lehrveranstaltungen des Masterstudiums 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 Gerätetechnik - Konstruktion, Berechnung und Anwendung mechatronischer Komponenten“ beleuchtet dagegen ausgewählte As-

pekte 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.

Hinzu kommen die Lehrveranstaltungen „Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL“ und „Praxis des Spritzgießens in der Gerätetechnik; Verfahren, Prozesskette, Simulation“, die einen guten Anklang finden.

Seit dem Wintersemester 2013/14 hat das Institut zusätzlich das Spezialisierungsfach Medizingerätekonstruktion übernommen, der dafür vorgesehene Professor startete nun zum 01.07.2017. Das Spezialisierungsfach Medizingerätekonstruktion setzt sich zum Teil aus vorhandenen Lehrveranstaltungen zusammen, die inhaltlich dazu passen. Als spezifische Lehrveranstaltung wurde die Vorlesung Medizingerätetechnik I/II neu etabliert. Sie wird durch externe Dozenten gehalten, im Wintersemester Medizingerätetechnik I durch Prof. Frank und im Sommersemester Medizingerätetechnik II durch Dr. Maier. Diese Vorlesung ist sehr stark nachgefragt. In diesem Jahr waren 53 Studierende in dieser Mastervorlesung. Das IKFF war bis zum Ende des Sommersemesters für diese Vorlesung verantwortlich, das gesamte Spezialisierungsfach wird erst ab April 2018 an den neuen Kollegen übergeben. Dies führt nach wie vor zu einer enormen Überlastung des Institutes in der Lehre, insbesondere durch derzeit noch über 40 offene Anmeldungen zu studentischen Arbeiten aus dem Spezialisierungsfach Medizingerätekonstruktion.

Die Spezialisierungsfachpraktika 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 existiert ein solides Angebot zum praktischen Arbeiten für die Studierenden.

Die Absolventen fanden auch 2017 überwiegend 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 standen 2017 Arbeiten zum Entwurf und zur Optimierung von anwendungsspezifischen Lineardirektantrieben sowie die Weiterführung der Aktivitäten zu magnetischen Führungen an. Die Forschungen zur Entwicklung von neuartigen mehrdimensionalen piezoelektrischen Antrieben werden weiter geführt. 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 seit 2015 erneut ein ZIM-Projekt. Die Arbeiten zur Nutzung der Induktionserwärmung für das Spritzgießen, aber auch für das induktive Kleben wurden fortgeführt bzw. abgeschlossen. Ergebnisse dazu sind mehrfach veröffentlicht.

Hinzu kamen neben oder innerhalb dieser Forschungsarbeiten auch Industrieprojekte.

1.3 Wissenschaftliche Arbeitsgebiete

Im Institut werden zusammengefasst vier Forschungsschwerpunkte bearbeitet:

Im Arbeitsgebiet **Aktorik** stehen feinwerktechnische Direktantriebe, vorzugsweise für lineare Antriebsbewegungen, im Mittelpunkt. Einen Schwerpunkt bilden elektrodynamische Linearantriebe, deren Berechnung, Optimierung 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.

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 arbeitete 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 und Optimierung derartiger Antriebe, 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 2016/2017: 95 Studenten (mach + famo)

Wintersemester 2017/2018: 45 Studenten (mach + famo)

14 Vorlesungen à 2 SWS

15 Vorlesungen à 1 SWS

15 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Burkard, Kreuzer, Maucher, Raab, Retzbach, Schattka, Schiele, Schönherr, Strohmeyr

Konstruktionslehre IV (Feinwerktechnik)

(Schinköthe, Burkard)

Sommersemester 2017: 74 Studenten (mach + famo)

14 Vorlesungen à 2 SWS

12 Vorlesungen à 1 SWS

12 Übungen à 1 SWS

Betreuer: Burkard, Maucher, Raab, Retzbach, Schattka, Schiele, Schönherr, Strohmeyr

2.2 Vorlesungen und Übungen für das Bachelor- und Masterstudium

Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik

(Schinköthe, Burkard)

Wintersemester 2016/2017: 54 Studenten

Wintersemester 2017/2018: 30 Studenten

17 Vorlesungen à 2 SWS

11 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Burkard, Raab, Retzbach, Schiele

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

Wintersemester 2016/2017: 26 Studenten
 Wintersemester 2017/2018: 22 Studenten
 9 Vorlesungen à 2 SWS
 5 Übungen à 2 SWS
 Betreuer: Kreuzer, Raab

Sommersemester 2017: 24 Studenten
 11 Vorlesungen à 2 SWS
 3 Übungen à 2 SWS
 Betreuer: Schiele

**Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL
(Maucher, Strohmeyr)**

Sommersemester 2017: 17 Studenten
 10 Vorlesungen à 2 SWS
 10 Übungen à 2 SWS
 Betreuer: Maucher, Litwin, Schiele, Schönherr

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

Sommersemester 2017: 5 Studenten
 18 Vorlesungen à 2 SWS
 8 Übungen à 2 SWS
 Betreuer: Burkard, Schönherr

**Medizingerätetechnik
(Schinköthe/Frank/Maier)**

Wintersemester 2016/2017: 51 Studenten
 12 Vorlesungen à 2 SWS
 Sommersemester 2017: 53 Studenten
 12 Vorlesungen à 2 SWS

Projektarbeiten für alle Studierenden der Maschinenbaufakultäten

Wintersemester 2016/2017 12 Studierende (3 Projektgruppen)

Sommersemester 2017 3 Studierende (1 Projektgruppe)

Wintersemester 2017/2018 0 Studierende

2.3 Prüfungen

Fach	Termin	Kandidaten
KL III + IV (Feinwerktechnik)	F 2017	26
	H 2017	62
Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik (Kompetenzfeld, Pflichtfach)	F 2017	37
	H 2017	5
Gerätekonstruktion und -fertigung in der Feinwerktechnik (Kernfach, mündlich)	F 2017	13
	H 2017	2
Aktorik in der Gerätetechnik - Berechnung, Konstruktion und Anwendung mechatronischer Komponenten (Kernfach/Pflichtfach, mündlich)	F 2017	12
	H 2017	17
Medizingerätetechnik (Gesamtnote)	F 2017	30
	H 2017	44
Teilprüfung Medizingerätetechnik 1	F 2017	50
Teilprüfung Medizingerätetechnik 2	F 2017	17
Teilprüfung Medizingerätetechnik 1	H 2017	11
Teilprüfung Medizingerätetechnik 2	H 2017	42
Praxis des Spritzgießens in der Gerätetechnik; Verfahren, Prozesskette, Simulation	F 2017	2
	H 2017	5
Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL	F 2017	2
	H 2017	11
Projektarbeiten	F 2017	12
	H 2017	3
Studienarbeit Feinwerktechnik	F 2017	5
	H 2017	9
Bachelorarbeiten	F 2017	5
	H 2017	1
Masterarbeiten	F 2017	7
	H 2017	15

2.4 Praktika

Spezialisierungsfachpraktikum Feinwerktechnik

(Für Studierende des Spezialisierungsfaches Feinwerktechnik)

Sommersemester 2017

Versuch 1: „FEM-Simulation mit ANSYS/
MAXWELL“

17 Teilnehmer 5 Termine

Betreuer: Maucher, Schiele, Litwin, Schönherr

Versuch 2: „Ultraschallantriebe“

14 Teilnehmer 5 Termine

Betreuer: Schiele

Versuch 3: „Spritzgießen“

17 Teilnehmer 4 Termine

Betreuer: Burkard, Maucher, Litwin, Schönherr

Wintersemester 2017/2018

Versuch 1: „Koordinatenmesstechnik“

15 Teilnehmer 4 Termine

Betreuer: Burkard

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

9 Teilnehmer 3 Termine

Betreuer: Maucher, Litwin, Schiele

Versuch 3: „Gleichstrommotoren“

9 Teilnehmer 3 Termine

Betreuer: Raab, Strohmeyr

Versuch 4: „Lineardirektantriebe“

10 Teilnehmer 2 Termine

Betreuer: Raab, Strohmeyr

Versuch 5:	„Optische 3D-Vermessung“
14 Teilnehmer	3 Termine
Betreuer: Burkard	

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

Sommersemester 2017

Versuch 1:	„Schrittmotoren“
16 Teilnehmer	4 Termine
Betreuer: Raab, Strohmeyr	

Wintersemester 2017/2018

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

Versuch 2:	„Optische 3D-Vermessung“
14 Teilnehmer	3 Termine
Betreuer: Burkard	

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

Wintersemester 2017/2018

Versuch 1:	„Einführung in die 3D-Messtechnik“
20 Teilnehmer	2 Termine
Betreuer: Burkard	

Versuch 2:	„Einführung in die Geräuschesstechnik und Lärminderung“
30 Teilnehmer	1 Termin
Betreuer: Schiele, Schönherr	

2.5 Exkursion

Am 6. Juli 2017 fand zusammen mit dem IKT eine Exkursion mit insgesamt 18 Studenten und Mitarbeitern zur Firma ARBURG GmbH + Co KG in Loßburg statt. Von Herrn Dr. Walther, einem ehemaligen IKFFler, wurden uns wieder die Firma ARBURG und insbesondere die Sonderverfahren beim Spritzgießen in einer mehr als zweistündigen Vorlesung nähergebracht. Daran anschließend bekamen wir noch eine umfangreiche Führung in vier Gruppen durch das Kundencenter und die Fertigung. Beeindruckend waren die hohe Fertigungstiefe in der Produktion und ein offenbar sehr angenehmes Betriebsklima. Die Exkursion wurde im Rahmen der Vorlesung Praxis des Spritzgießens organisiert und war darüber hinaus auch für Studierende der anderen IKFF-Vorlesungen und des IKT offen.

2.6 Projektarbeiten

Wintersemester 2016/2017

09.02.2017 Recherche der Geschichte der frühen elektrischen Antriebe und Konstruktion und Aufbau eines Demonstrators basierend auf historischen Vorbildern

09.02.2017 Literaturrecherche zum Stand der Technik zu Kühlprinzipien von Elektromotoren und Konzeptfindung für Lineardirektantriebe

Sommersemester 2017

13.07.2017 Entwicklung einer pulsweitenmodulierten Stromregelplatine

2.7 Seminar Feinwerktechnik (WS 2016/17 und SS 2017)

06.10.2016	Analyse adhäsiver Kraftkomponenten beim Kunststoffspritzguss zwischen Werkzeugoberfläche und Spritzgussteil
20.10.2016	Weiterentwicklung eines Systems für die berührungslose 3D-Vermessung auf Basis des Laserscannings und Structured Light Scannings
20.10.2016	Umkonstruktion eines Gehäuses für eine Strommesszange
20.10.2016	Modellbasierte Entwicklung eines homopolaren Flachspulenantriebes unter Berücksichtigung parasitärer Effekte
09.11.2016	Konstruktion, Aufbau und Inbetriebnahme eines Flachspulen-Lineardirektantriebs mit optimierter Kraftwelligkeit
01.12.2016	Konzeptfindung zur passiven und aktiven Kühlung anhand eines Lineardirektantriebs
08.12.2016	Durch Simulation gestützte Prozessoptimierung eines induktiven Erwärmungsprozesses und experimentelle Validierung
08.12.2016	Untersuchung der Abtriebskraft eines Mehrkoordinaten-Ultraschall-Piezomotors
12.01.2017	Untersuchung verschiedener Konzepte zur Miniaturisierung des Induktors bei induktiven Erwärmungsprozessen
12.01.2017	Untersuchungen und Simulation zum Einsatz eines neuen Piezowerkstoffes für einen multidimensionalen Ultraschallantrieb
26.01.2017	Entwicklung von Vorlesungsmodellen für Koppelgetriebe

- 26.01.2017 Untersuchung des thermischen und dynamischen Verhaltens von Lineardirektantrieben mit integriertem Fluidkreislauf
- 26.01.2017 Praktische Untersuchungen an einem induktiv beheizten Spritzgusswerkzeug und Optimierung mittels gekoppelter elektromagnetisch/thermischer Simulation
- 09.02.2017 Recherche und Vergleich von Dimensionierungskenngrößen für Elektromagnete bzw. elektromagnetische Antriebe
- 20.04.2017 Untersuchung der Leistungssteigerung von freitragenden Spulen in Kombination mit zusätzlichem Materialeinsatz
- 20.04.2017 Konstruktion und Aufbau eines Tisch-Windkanals zur Messung thermischer Vorgänge
- 20.04.2017 Entwicklung eines antagonistisch wirkenden elektromagnetischen Aktors mit integrierter Wegmessung
- 20.04.2017 Optimierung und Inbetriebnahme eines Magnetschwebeantriebs
- 25.04.2017 Entwurf einer Einstell- und Prüfvorrichtung für die reproduzierbare Fertigung von Spindelantrieben
- 11.05.2017 FEM Simulation eines homopolaren Lineardirektantriebs
- 11.05.2017 Konzeptfindung zur passiven Kühlung anhand eines rotationssymmetrischen Lineardirektantriebs
- 22.06.2017 Auswahl und Entwicklung von automatisch verbindbaren elektrischen Anschlüssen für Induktionsgeneratoren
- 22.06.2017 Untersuchung von in Rapid-Tooling-Verfahren hergestellten Spritzgießwerkzeugeinsätzen aus Thermoplasten für den Thermoplastspritzguss

- 29.06.2017 Untersuchung von Entformungskräften beim Kunststoffspritzguss von nanostrukturierten Werkzeugoberflächen
- 29.06.2017 Konstruktion und Modellierung eines elektromagnetischen Magnetschwebeantriebs
- 27.07.2017 Analyse adhäsiver Kraftkomponenten beim Kunststoffspritzguss zwischen Werkzeugoberfläche und Spritzgussteil
- 17.08.2017 Simulative und experimentelle Untersuchungen von Piezokeramiken für Ultraschall-Aktoranwendungen
- 31.08.2017 Entwicklung einer Echtzeitsteuerung für einen mehrdimensionalen Ultraschallmotor
- 06.09.2017 Automatisierung der Resonanzfrequenz-Suche bei piezoelektrischen Ultraschall-Resonatoren
- 26.09.2017 Untersuchung der Miniaturisierung einer induktiv variothermen Beheizung von Spritzgusskavitäten

Wintersemester 2017/2018 (unvollständig)

- 19.10.2017 Verarbeitung von hart- und weichmagnetisch-gefüllten Thermoplasten im 3D-Druck
- 02.11.2017 Design und Aufbau eines Antriebssystems für einen neuartigen multidimensionalen Ultraschallmotor
- 23.11.2017 Aufbau und Untersuchung eines homopolaren Linear-direktantriebs in Leiterplattenbauform
- 31.01.2018 Simulation der Abkühlung einer einfachen induktiv beheizten Leistengeometrie mittels unterschiedlicher Berechnungsmethoden
- 31.01.2018 Untersuchung verschiedenartiger Induktor-Geometrien hinsichtlich der optimalen elektromagnetischen Feldausbreitung anhand einer Versuchsgeometrie

18

27.02.2018

Control System and User Interface of a Finger and
Wrist Rehabilitation Robotic Drive

3 WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN, BACHELOR-, STUDIEN- UND MASTERARBEITEN

3.1 Dissertationen

Kreuzer, Daniel	Entwurfsmethodik für applikationsspezifische Lineardirektantriebe kleiner Leistung
Retzbach, Adrian	Simulationsgestützte Prozessauslegung bei der induktiven Schnellhärtung partikelgefüllter Reaktivklebstoffe

3.2 Masterarbeiten am IKFF (WS 2016/17 und SS 2017)

10/2016	Konstruktion, Aufbau und Inbetriebnahme eines Flachspulen-Lineardirektantriebs mit optimierter Kraftwelligkeit
11/2016	Praktische Untersuchung an einem induktiv beheizten Spritzgusswerkzeug und Optimierung mittels gekoppelter elektromagnetisch-thermischer Simulation
11/2016	Durch Simulation gestützte Prozessoptimierung eines induktiven Erwärmungsprozesses und experimentelle Validierung an einer induktiv erwärmten Klebeschicht
12/2016	Untersuchung des thermischen und dynamischen Verhaltens von Lineardirektantrieben mit integriertem Fluidkreislauf
01/2017	Konzeption einer Maulteil- und Rohrschaftkinematik für ein HF-Dissektionsinstrument
01/2017	Recherche und Vergleich von Dimensionierungskenngrößen für Elektromagnete bzw. elektromagnetische Antriebe
02/2017	Entwicklung von Funktionskonzepten für ein manipulierbares distales Ende eines hydrochirurgischen Instruments

- 04/2017 Entwurf einer Einstell- und Prüfvorrichtung für die reproduzierbare Fertigung von Spindelantrieben
- 04/2017 Konstruktion und funktionale Erweiterung einer Prüfvorrichtung für Rotorlagesensoren von EC-Motoren neuartiger Bremssysteme für aktiven Fußgängerschutz und autonomes Fahren
- 04/2017 Entwicklung eines elektromagnetischen Aktors mit integrierter Wegmessung
- 04/2017 Konstruktion eines miniaturisierten Antriebsmoduls zum Einstechen von Sensoren in die Haut
- 04/2017 Bestimmung und Optimierung des Reibungs-/Verschleißverhaltens und der Verformung von Verriegelungsmechaniken für Frontklappen von Infusionspumpen
- 04/2017 Optimierung bipolarer Koagulationsinstrumente hinsichtlich des Verschweißens von Gewebe
- 04/2017 Machbarkeitsstudie für eine resorbierbare Version eines OTSC Clips
- 05/2017 Beschreibung und Untersuchung des Zulassungsverfahrens sowie technische und kommerzielle Untersuchung und Bewertung eines funktionellen Mundstücks aus der Medizintechnik
- 05/2017 Konstruktive Integration eines optischen Moduls zur Patientenüberwachung unter Berücksichtigung thermischer, klinischer und regulatorischer Anforderungen an das Designkonzept
- 05/2017 Untersuchung und Anpassung von Piezoventilen für die Anwendung im Bereich der Beatmungstechnik
- 05/2017 Untersuchung von additiv gefertigten Thermoplast-Spritzgießwerkzeugen aus Kunststoff

- 06/2017 Konstruktion und Modellierung eines elektromagnetischen Magnetschwebeantriebs
- 06/2017 Medizinprodukte-Entwicklung am Beispiel eines externen Arbeitskanals für flexible Endoskope
- 07/2017 Entwicklung eines anwendungsnahen Prüfverfahrens zur Erprobung von Klebeverbindungen an mehrteiligen Zahnimplantaten
- 07/2017 Entwicklung eines Osteosynthese-Systems für die distale Tibia und Fibula
- 09/2017 Konzeption eines Reinigungsgerätes für Heiz-Kühl-Systeme von Herz-Lungen-Maschinen

Wintersemester 2017/2018 unvollständig

- 10/2017 Verarbeitung von hart- und weichmagnetisch-gefüllten Thermoplasten im 3D-Druck
- 10/2017 Design und Aufbau eines Antriebssystems für einen neuartigen multidimensionalen Ultraschallmotor
- 10/2017 Entwicklung eines Verfahrens zur indirekten Volumenstrommessung und Fehlererkennung in miniaturisierten Gaspfaden von Atemanalysegeräten
- 12/2017 Konzepte zur laserspektroskopischen Bestimmung des Ethanolgehaltes für eine schnelle Nüchternheitskontrolle
- 01/2018 Untersuchung verschiedenartiger Induktor-Geometrien hinsichtlich der optimalen elektromagnetischen Feldausbreitung anhand einer Versuchsgeometrie

3.3 Bachelorarbeiten am IKFF (WS 2016/17 und SS 2017)

10/2016	Umkonstruktion eines Gehäuses für eine Strommesszange
10/2016	Weiterentwicklung eines Systems für die berührungslose 3D-Vermessung auf Basis des Laserscannings und Structured Light Scannings
12/2016	Entwicklung von Vorlesungsmodellen für Koppelgetriebe
12/2016	Untersuchungen und Simulationen zum Einsatz eines neuen Piezowerkstoffes für einen multidimensionalen Ultraschallantrieb
03/2017	Konstruktion und Aufbau eines Tisch-Windkanals zur Messung thermischer Vorgänge
05/2017	Auswahl und Entwicklung von automatisch verbindbaren elektrischen Anschlüssen für Induktionsgeneratoren

3.4 Studienarbeiten am IKFF (WS 2016/17 und SS 2017)

10/2016	Konzeptfindung zur passiven und aktiven Kühlung anhand eines Lineardirektantriebs
10/2016	Analyse adhäsiver Kraftkomponenten beim Kunststoffspritzguss zwischen Werkzeugoberfläche und Spritzgussteil
10/2016	Modellbasierte Entwicklung eines homoplanaren Flachspulenantriebes unter Berücksichtigung parasitärer Effekte
12/2016	Erprobung eines mehrdimensionalen Ultraschallaktors bei Variation der relevanten Betriebsparameter mit dem Ziel der Messung der Abtriebskraft

12/2016	Untersuchung verschiedener Konzepte zur Miniaturisierung des Induktors bei induktiven Erwärmungsprozessen
04/2017	Optimierung und Inbetriebnahme eines Magnetschwebeantriebs
04/2017	Untersuchung der Leistungssteigerung von freitragenden Spulen in Kombination mit zusätzlichem Materialeinsatz
04/2017	FEM Simulation eines homopolaren Lineardirektantriebes
04/2017	Konzeptfindung zur passiven Kühlung anhand eines rotationssymmetrischen Lineardirektantriebs
06/2017	Untersuchung von Entformungskräften im Kunststoffspritzguss von unterschiedlichen Werkzeugbeschichtungen und -strukturen
07/2017	Analyse adhäsiver Kraftkomponenten beim Kunststoffspritzguss zwischen Werkzeugoberfläche und Spritzgussteil
08/2017	Automatisierung der Resonanzfrequenz-Suche bei piezoelektrischen Ultraschall-Resonatoren
08/2017	Simulative und experimentelle Untersuchungen von Piezokeramiken für Ultraschall-Aktoranwendungen
09/2017	Untersuchung der Miniaturisierung einer induktiv variothermen Beheizung von Spritzgusskavitäten

Wintersemester 2017/2018 unvollständig

10/2017	Entwicklung einer Echtzeitsteuerung für einen mehrdimensionalen Ultraschallmotor
10/2017	Aufbau und Untersuchung eines homopolaren Lineardirektantriebs in Leiterplattenbauform

Simulation der Abkühlung einer einfachen induktiv beheizten Leistengeometrie mittels unterschiedlicher Berechnungsmethoden

4 ARBEITSGEBIETE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITER

4.1 Aktorik

Kreuzer, D.

Lehre:

Betreuung der Gruppenübungen in KL 3/4.

Betreuung der Lineardirektantriebeübung.

Betreuung der Praktika „Lineardirektantriebe“.

Forschung:

Erstellung einer bauformspezifischen schnellen und auf analytischen Berechnungsgleichungen gründenden Dimensionierungssoftware.

Entwicklung einer rechnergestützten Entwurfsmethodik für applikationsspezifische Lineardirektantriebe kleiner Leistung.

Aufbau und Prüfung von Prototypen zur Verifizierung der Optimierungsergebnisse.

Mittag, M.

Lehre:

Korrekturmithilfe bei der Prüfungsaufgabe „Konstruktion“ und Korrektur der „Aktorikfragen“.

Erstellung und Korrektur der Testataufgabe „Welle/Lager“.

Vortragsübung zum Themenkomplex „Welle und Lager“.

Unterstützung beim Durchführen des FEM-Praktikums.

Betreuung der KL 3/4 Übungen, Testatgruppen.

Betreuung einer Studienarbeit.

Forschung:

Forschungsschwerpunkt: Kabellose Energieübertragung bei Lineardirektantrieben.

Simulative Auslegung, Konzeptionierung und Aufbau einer induktiven Energieübertragung.

Programmierung und Inbetriebnahme einer kabellosen Datenübertragung mittels Bluetooth Technologie.

Industrieprojekte.

Raab, M.

Lehre:

Vortragsübung und Vorlesung KL 3/4 zum Themenkomplex „Kupplungen“.

Vortragsübung zum Themenkomplex „Ansteuerung und Regelung von Lineardirektantrieben“ in „Aktorik in der Gerätetechnik“.

Erstellung und Betreuung FEM-Aufgabe „Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL“.

Betreuung der Bachelorübungen in KL 3/4, Testatgruppen.

Organisation und Durchführung des APMB-Praktikums „Schrittmotoren“.

Organisation und Durchführung des Spezialisierungsfachpraktikums „Gleichstrommotoren“.

Organisation und Durchführung des Spezialisierungsfachpraktikums „Lineardirektantriebe“.

Betreuung von Projekt-, Studien- und Masterarbeiten.

Forschung:

Forschungsschwerpunkt: Magnetschwebetechnik für feinwerktechnische Antriebe mit minimaler Leistungsaufnahme.

Simulative Auslegung und Konstruktion sowie Regelung und Ansteuerung magnetischer Führungen und linearer Direktantriebe.

Entwicklung von Aktoren auf Basis magnetischer Formgedächtnislegierungen.

Industrieprojekte.

Schiele, F.

Lehre:

Betreuung der Übungen und Testatgruppen in KL 3/4.

Vortragsübungen „Koppelgetriebe“ und „Welle/Lager“ in KL 3/4.

Erstellung und Korrektur der Testataufgaben „Koppelgetriebe“ und „Welle/Lager“ in KL 3/4.

Vortragsübung „Piezoelektrische Antriebssysteme“ in „Aktorik in der Gerätetechnik“.

Betreuung von Bachelor-, Studien- und Masterarbeiten.

Forschung:

Forschungsschwerpunkt „Mehrdimensionale Ultraschallantriebe“.

Simulative und experimentelle Untersuchungen geeigneter Geometrien und Piezo-Materialien.

Entwicklung eines Prüfstandes für derartige mehrdimensionale Ultraschallantriebe.

Sonstiges:

PC-Administration.

Strohmeyr, S. Lehre:
 Vortragsübung und Vorlesung KL 3/4 zum Themenkomplex „Kupplungen“.
 Durchführung und Betreuung von Prüfungen des Praktikums/der Vorlesung „Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL“.
 Betreuung der Übungen in KL 3/4, Testatgruppen.
 Organisation des Übungskomplexes „Kupplungen“.
 Betreuung von Studien- und Masterarbeiten.
 Betreuung Gleichstrommotorenpraktikum.
 Forschung:
 Forschungsschwerpunkt: Thermische Untersuchungen an feinwerktechnischen Lineardirektantrieben.
 Simulative Auslegung und Konzeptionierung von Lineardirektantrieben mit verbesserter thermischer Wärmeabführung.
 Entwicklung neuartiger Spulenkonzepte.
 Industrieprojekte.
 Sonstiges:
 PC-Administration.
 Lizenzadministration.

4.2 Spritzgießen

Burkard, E. Untersuchung des Einflusses von Werkzeugbeschichtungen auf die Entformungskraft bei Spritzgussbauteilen aus Thermoplastwerkstoffen.
 Bearbeitung von Industrieaufträgen.
 Betreuung der Studenten im B.Sc. und M.Sc.
 Betreuung von Vorlesungen und Übungen im B.Sc. und M.Sc.
 Organisation des Konstruktionswettbewerbs.
 Betreuung und Durchführung der Vorlesung „Praxis des Spritzgießens in der Gerätetechnik“.
 Betreuung der 3D-Messmaschinen und der Praktika zur 3D-Messtechnik sowie Vermessung von Werkstücken.
 Administration und Wartung der Linux-Rechner und des Institutsnetzes.
 Stundenplanbeauftragter und Studiengangsmanager für den M.Sc. Maschinenbau/Mikrotechnik, Gerätetechnik und Technische Optik.

Litwin, T.

Lehre:

Betreuung der Übungen in KL 3/4 sowie der Testatgruppen.
Erstellung und Korrektur der Testataufgabe „Koppelgetriebe“.
Vortragsübung zum Themenkomplex: Zuverlässigkeitstechnik.

Betreuung des Spezialisierungsfachpraktikums „Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL“. Vortrag, Ausarbeitung und Korrektur von Prüfungsaufgaben.

Betreuung des Spezialisierungsfachpraktikums „Spritzgießen“.

Betreuung von Studien- und Masterarbeiten.

Forschung:

Forschungsschwerpunkt: Einbindung von elektromagnetisch durchleuchtbaren Materialien zur Steigerung der Energieeffizienz von induktiv-variothermen Spritzgießwerkzeugen.

Untersuchungen zur Einbindung der induktiven Temperierung in Einsatz- sowie Kassettenwerkzeuge.

Untersuchungen zur Miniaturisierung von Induktionsgeneratoren.

Praktische Untersuchung des induktiven Schwebens.

Sonstiges:

Netzwerk-Administration.

Maucher, A.

Lehre:

Betreuung der Bachelorübungen in KL 3/4, Testatgruppen.
Organisation und Durchführung der/s Vorlesung/Spezialisierungsfachpraktikums und der Übung „Praktische FEM-Simulation mit MAXWELL und ANSYS“ und Ausarbeitung von Prüfungsaufgaben sowie deren Korrektur.

Betreuung des Spezialisierungsfachpraktikums „Spritzgießen“.

Betreuung von Studienarbeiten.

Forschung:

Steigerung der Energieeffizienz induktiv-variothermer Spritzgusswerkzeuge durch geeignete Temperatur- sowie Wirbelstromführung.

Untersuchungen zur Miniaturisierung von Induktionsgeneratoren.

Untersuchung der Herstellbarkeit von stentartigen Strukturen mittels eines induktiv-variothermen Spritzgussverfahrens.

Sonstiges:
Netzwerk-Administration.

- Retzbach, A. Lehre:
Vorlesung und Vortragsübung in KL 3/4 zum Themenkomplex „Getriebedimensionierung/-gestaltung“.
GFF Praktikum „Geräuschmesstechnik“.
Betreuung der Übungen in KL 3/4, Testatgruppen.
Forschung:
Entwicklung neuer Ansätze zur Vorkonditionierung partikelgefüllter Klebstoffe.
Untersuchungen zu Einflussfaktoren bei der induktiven Erwärmung partikelgefüllter Klebstoffe.
Modellbildung, Simulation und Auslegung von induktiven Heizsystemen.
Untersuchungen zu induktivem Entkleben von partikelgefüllten Klebstoffen.
- Schattka, G. Lehre:
Betreuung der Übungen in KL 3/4, Testatgruppen.
Erstellung und Ausarbeitung der Testataufgabe zur Thematik „Getriebe“ und „Konstruktionsmethodik“ in KL 3/4.
Organisation des Konstruktionswettbewerbs.
Betreuung von zwei Studienarbeiten.
Forschung:
Untersuchung der Entformungskräfte unterschiedlicher Nanostrukturen und Oberflächenbeschichtungen sowie unterschiedlicher Prozessparameter.
Untersuchung der adhäsiven Komponente der Entformungskraft bei ausschließlich polierten Werkzeugoberflächen mittels eines neu aufgebauten Torsionswerkzeugs.
Simulative Analyse des Entformungsverhaltens hülsenförmiger Formteile.
Bearbeitung des ZIM-Projektes „Belagsreduzierung“ und weitere Drittmittelprojekte.
- Schönherr, M. Lehre:
Betreuung der Übungen in KL 3/4, Testatgruppen.
Erstellung und Korrektur der Prüfungsaufgabe „Getriebe“ in KL 3/4.
Erstellung und Korrektur der Testataufgabe „Getriebe“ in KL 3/4.

Korrekturmithilfe Testataufgabe „Kutzbachplan“ in KL 3/4.
Erstellung und Betreuung FEM-Aufgabe „Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL“.

Betreuung einer Studienarbeit.

Forschung:

Messung mehrerer Entformungskräfte unterschiedlicher Kunststoff-Beschichtung-Paarungen.

Ansätze zur praktischen Ermittlung der Adhäsionskräfte im Kunststoffspritzguss.

Konzeption eines Spritzgusswerkzeugs zur Ermittlung der Adhäsionskräfte.

Industrieprojekt.

Sonstiges:

PC-Administration.

5 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

5.1 Veröffentlichungen

Artikel oder Tagungsbeiträge:

Maucher, A.; Retzbach, A.; Schinköthe, W.: Offenlegungsschrift: Vorrichtung und Verfahren zur Herstellung von Werkstücken aus Kunststoff. OS 10 2016 102 415.5 A1.

Maucher, A.; Schinköthe, W.: Zykluszeitreduzierung durch gezielte Temperaturführung im induktiv-variothermen Kunststoffspritzguss. Zeitschriftenartikel, Ingenieurspiegel, Ausgabe 3/2017.

Maucher, A.; Schinköthe, W.: Weniger ist mehr! Optimierung der induktiven Temperierung von Spritzgusswerkzeugen durch gezielte Ausrichtung der Erwärmung. Zeitschriftenartikel, Zeitschrift Kunststoffe, voraussichtlich Februar 2018.

Raab, M.; Schinköthe, W.: Magnetically levitated linear drive with repulsive magnetic guidance and nearly zero power emission. Euspen 17th International Conference & Exhibition, 29.05.-02.06.2017, Hannover.

Raab, M.; Schinköthe, W.: Entwicklung von magnetisch geführten Linearantrieben für feinwerktechnische Anwendungen. 11. Tagung Feinwerktechnische Konstruktion, 21./22.09.2017, Dresden.

Raab, M.; Neureuther, P.; Schönwiesner, M.; Schinköthe, W.: Magnetically levitated linear drive with passive stabilized axes using repulsive magnetic guidance. Vortrag 11. GMM/ETG-Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik - IKMT 2017, Saarbrücken 27./28.09.2017, Tagungsband S. 98-103.

Raab, M.; Schinköthe, W.: Aktuatorvorrichtung zur Gewichtskraftkompensation. Patentanmeldung DE 10 2017 217 946.5 vom 09.10.2017.

Raab, M.; Schinköthe, W.: Steuerungsvorrichtung für einen Magnetkreis. Patentanmeldung DE 10 2017 217 945.7 vom 09.10.2017.

Schattka, G.; Burkard, E.; Schinköthe, W.: Charakterisierung von Entformungskräften im Kunststoffspritzguss unter Berücksichtigung adhäsiver Bindungskräfte. Vortrag 25. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 22./23.3.2017. Tagungsband, IKT S. 101-107.

Schinköthe, W.: Festschrift 50 Jahre IKFF. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, Stuttgart April 2017.

5.2 Doktorandenkolloquien

12/2017	Strohmeyr, Simon	Potentiale der Leistungssteigerung von feinwerktechnischen Lineardirektantrieben mittels aktiver und passiver Kühlung
---------	------------------	---

5.3 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.

5.4 Tag der Wissenschaft

Können Maschinen klettern?

„Affen klettern. Die Energie dafür liefern ihnen unter anderem Bananen. Auch Maschinen können klettern - zum Beispiel mithilfe von Strom.“



So war die Aufgabe des 24. Konstruktionswettbewerbs des Instituts für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart im Programmheft angekündigt. Das klang zunächst ganz einfach, wer den Text weitergelesen hat, fand dann aber sehr schnell Einschränkungen, die die Aufgabe spannend machten.

Die Maschinen mussten am Boden liegende Tischtennisbälle greifen und nach oben transportieren. Als Energiequelle war dabei aber lediglich die aus der Masse der Maschine resultierende potentielle Energie zulässig. Die weiteren Einschränkungen, wie Höhe über dem Boden und Größe beim Start, sowie Spielfeldgröße und maximales Gewicht der Maschine, fielen da schon kaum mehr auf, und wie in allen bisherigen Wettbewerben mussten die von den Studierenden

konstruierten und selbst aufgebauten Maschinen die Aufgabe nach dem Start ohne den Eingriff eines Bedieners bewältigen.

Von den 11 Maschinen der Teams, die die erste Aufgabe, mindestens einen Tischtennisball bewegen und dann möglichst weit hinaufsteigen, lösten, kamen 8 in die Endrunde.

Jetzt galt es möglichst viele Bälle mitzunehmen und möglichst weit hinaufzusteigen.

Hier musste es sich nun zeigen, welches Prinzip und welche Bauausführung die beste Lösung ergab. Ist es besser, die potentielle Energie umzuwandeln und z. B. in einem Schwungrad zu speichern, kann man mit einem Flaschenzug und einem Gegengewicht genügend Höhe erreichen, oder ist es geschickter eine Maschine zu bauen, die leichter als Luft ist? Welche Möglichkeiten gibt es, zuverlässig Tischtennisbälle zu greifen und diese beim Transport nicht mehr zu verlieren?

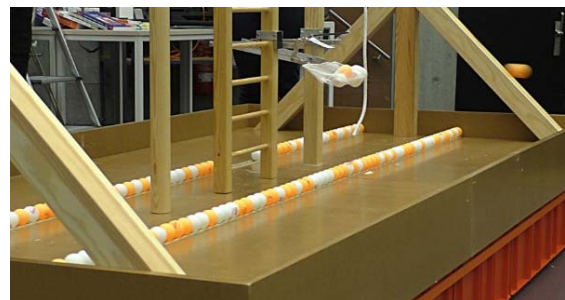
Auch dieses Jahr wurden wieder sehr unterschiedliche Lösungsansätze von den studentischen Teams gewählt und es zeigte sich, dass der Weg von der Analyse der Aufgabenstellung bis zum funktionierenden Prototyp aufwendig ist und dass nicht alle, anfänglich gut wirkenden Ideen mit den studentischen Mitteln so umsetzbar sind, dass sie zum Erfolg führen.

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

Arburg GmbH & Co, Bilz Werkzeugfabrik GmbH & Co. KG, Carl Hanser Verlag GmbH & Co, Christian Bürkert Stiftung gGmbH verbunden mit der Christian Bürkert GmbH & Co. KG, Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG, G. Ulmer Automation GmbH, Hauni Maschinenbau GmbH, JOOLA Tischtennis GmbH & Co. KG, Springer Verlag GmbH, Verlag Europa-Lehrmittel Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG.

Ergebnisse:

1. Platz: Lukas Mann,
Patrick Fleischmann,
Marius Greiss,
Felix Hirsch.
2. Platz: Lars Klingel,
Steffen Zeile,
Stefan Weingand,
Michael Medek.
3. Platz: Richard Fröschle,
Jakob Ulrich,
Philipp Schmidt.



6 KONGRESSE, TAGUNGEN UND MESSEN

Prof. Schinköthe, W.:

- 11. Tagung Feinwerktechnische Konstruktion, Dresden, 21./22.09.2017
- Tagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik - IKMT 2017, Saarbrücken, 27./28.09.2017
- 25. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, Universität Stuttgart, 22.03.2017

Burkard, E.:

- ARBURG Technologietage, Loßburg, 16.03.2017
- 25. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, Universität Stuttgart, 22.03.2017
- MOULDING EXPO, Messe Stuttgart, 31.05.2017
- FAKUMA, Messe Friedrichshafen, 18.10.2017

Mittag, M.:

- SPS IPC Drives, Nürnberg, 29.11.2017

Raab, M.:

- Euspen 17th International Conference & Exhibition, Hannover, 29.05.-02.06.2017
- 11. Tagung Feinwerktechnische Konstruktion, Dresden, 21./22.09.2017
- Tagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik - IKMT 2017, Saarbrücken, 27./28.09.2017

Schattka, G.:

- 25. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, Universität Stuttgart, 22.03.2017

Schiele, F.:

- SPS IPC Drives, Nürnberg, 29.11.2017

Schönherr, M.:

- ARBURG Technologietage, Loßburg, 16.03.2017
- MOULDING EXPO, Messe Stuttgart, 31.05.2017
- ARBURG Spritzgusslehrgang KT 4, Loßburg, 21./22.06.2017
- FAKUMA, Messe Friedrichshafen, 18.10.2017

Strohmeyr, S.:

- SPS IPC Drives, Nürnberg, 29.11.2017

7 WERKSTATTBERICHT

Mit Arbeiten zur Herstellung von 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 verweisen wir exemplarisch auf zwei Veröffentlichungen, einerseits zur Charakterisierung von Entformungskräften im Kunststoffspritzguss und andererseits zur Entwicklung von magnetisch geführten Linearantrieben für feinerwerktechnische Anwendungen.

Schattka, G.; Burkard, E.; Schinköthe, W.: Charakterisierung von Entformungskräften im Kunststoffspritzguss unter Berücksichtigung adhäsiver Bindungskräfte. Vortrag 25. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 22./23.3.2017. Tagungsband, IKT S. 101-107.

Raab, M.; Neureuther, P.; Schönwiesner, M.; Schinköthe, W.: Magnetically levitated linear drive with passive stabilized axes using repulsive magnetic guidance. Vortrag 11. GMM/ETG-Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik - IKMT 2017, Saarbrücken 27./28.09.2017, Tagungsband S. 98-103.

CHARAKTERISIERUNG VON ENTFORMUNGSKRÄFTEN IM KUNSTSTOFFSPRITZGUSS UNTER BERÜCKSICHTIGUNG ADHÄSIVER BINDUNGSKRÄFTE

CHARACTERIZATION OF EJECTION FORCES IN INJECTION MOULDING IN CONSIDERATION OF ADHESIVE BINDING FORCES

G. Schattka, E. Burkard und W. Schinköthe

IKFF, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart
Tel.: + 49 (0) 711 685 66423, Fax: + 49 (0) 711 685 56402, E-Mail: schattka@ikff.uni-stuttgart.de

Kurzfassung: Adhäsive Bindungskräfte können im Kunststoffspritzguss sehr hohe Entformungskräfte hervorrufen. Die Kunststoffschmelze kann sich bei ungünstigen Bedingungen regelrecht an die Werkzeugoberfläche festkleben. Der hier vorgestellte Beitrag zeigt ausgereifte Messsysteme, die eine Separierung der Adhäsionskomponente in der Entformungskraft ermöglichen. Dies lässt einen Abgleich bekannter Zusammenhänge der Grenzflächenforschung mit praktischen Entformungskräften zu. Darüber hinaus wird gezeigt, dass diese Adhäsionskomponente durch eine geeignete Auswahl an Werkzeugbeschichtungen und/oder Oberflächenstrukturen um ein vielfaches reduziert werden können. Die Fülle an Erkenntnissen wird schlussendlich auf einen einzigen Wert der adhäsiven Scherfestigkeit zusammengefasst. Mit dieser Scherfestigkeit und geeigneten FEM-Simulationsprogrammen können allgemeingültige und geometrieunabhängige Aussagen über Entformungsbelastungen getroffen werden.

Abstract: Adhesive binding forces in injection moulding can cause very high ejection forces. In worst conditions the melt can extremely bond to the tool surface. The present paper shows a highly evolved measurement system, which is able to separate the adhesive force component from the forces of the ejection process. This forms a link between known theories of interfacial forces and practical measured ejection forces. Furthermore it will be shown, that the adhesive component can be reduced with a suitable selection of tool coatings and/or surface structures. Finally, the abundance of knowledge will be reduced to one parameter – the adhesive shear strength. With this shear strength and suitable FEM programs it is possible to make universal and geometry-independent statements about the stress of moulded parts, reasoned of ejection forces.

Schlagwörter: Entformungskraft, Adhäsion, adhäsive Scherfestigkeit, Entformungssimulation

Keywords: ejection forces, adhesion, adhesive shear strength, simulation of ejection forces

Einleitung und Motivation

Das Entformen eines Werkstücks ist einer der letzten Prozessschritte in der Spritzgusstechnik, der in aller Regel durch den Einsatz von Entformungsschrägen reibungslos funktioniert. In vielen Fällen wird dies aber durch die Forderung oder die technische Notwendigkeit nach möglichst geringen Entformungsschrägen und dem Wunsch nach hochglanzpolierten Oberflächen, die zu höheren Grenzflächenkräften führen, verschärft. Die resultierenden Entformungskräfte können enorme Belastungen der Formteile hervorrufen, die sich in mikroskopischen Oberflächenschädigungen oder gar makroskopischen Brüchen äußern.

Auf die jeweiligen Prozessbedingungen ausgewählte Werkzeugbeschichtungen und -strukturen können diesen Umstand entschärfen und Entformungskräfte in vielen Fällen deutlich reduzieren. Die Entformungskraft eines exemplarischen Werkstücks, welches mit 2 kN entformt werden muss, kann bei einer günstigen Schichtauswahl auf 1/5 der Kraft reduziert werden.

Die Reduzierung der Entformungskraft eröffnet außerdem weitere Optimierungsmöglichkeiten. So ist beispielsweise eine frühzeitige Entformung denkbar, da die entsprechenden Formteile bei reduzierter Entformungskraft eine geringere Festigkeit zum Entformungszeitpunkt aufweisen müssen. Geringere Kühl- und Zykluszeiten sind die Folge.

Die Optimierung des Entformungsprozesses darf also nicht lediglich auf eine Reduzierung der Entformungskraft hinzielen, sondern muss alle im jeweiligen Anwendungsfall relevanten Anforderungen berücksichtigen. Mit der Auswahl geeigneter Werkzeugbeschichtungen und -strukturen können auf einen Schlag gewünschte Nanostrukturen der Formteiloberflächen erzeugt, Zykluszeiten reduziert und Formteilbelastungen und Schädigungen verringert werden.

Grundlagen

„Die bisher in der Literatur mitgeteilten Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen gezielten Oberflächenveränderungen und den daraus resultierenden Veränderungen des Adhäsionsvermögens, also der Haftungseigenschaften, hatten im wesentlichen empirischen Charakter. Es konnte noch keine exakte wissenschaftlich begründete Deutung der Ergebnisse gefunden werden oder die Erklärungen sind lückenhaft.“[1]

Die Inhalte dieses Beitrags knüpfen an diesem Missstand an. Generell lassen sich in Hinblick auf die Untersuchung der Entformungskraft zwei grundlegende einfache Fragestellungen herausarbeiten:

1. Wie hoch ist die zu erwartende Entformungskraft einer Polymer-Werkzeugoberflächenkombination eines fiktiven Werkstücks?
2. Wie kann die Entformungskraft reduziert werden?

Adhäsion ist in der Literatur ein sehr dehnbarer Begriff. Die Definition nach Bischoff und Possart besagt:

„Adhäsion ist der Zustand einer sich zwischen zwei in Kontakt tretenden kondensierten Phasen ausbildenden Grenzflächenschicht. Der Zustand zeichnet sich wesentlich durch den mechanischen Zusammenhalt der beteiligten Phasen aus, welcher durch molekulare Wechselwirkungen in der Grenzflächenschicht hervorgerufen wird.“ [1]

Kurzum: Adhäsion bzw. Adhäsionskräfte sind für das Kleben oder Anhaften von zwei unterschiedlichen Grenzflächen auf Basis molekularer Grenzflächenkräfte verantwortlich. Reibung, auch oft als mechanische Adhäsion bezeichnet, wird hiermit explizit nicht in die Kategorie der Adhäsion aufgenommen, wobei sie natürlich einen Anteil der Entformungskraft darstellt. Außerdem wird vorausgesetzt, dass die zum Einsatz kommenden Werkzeugoberflächen und Polymere in sich chemisch stabil sind und daher keine Hauptvalenzbindungen zu erwarten sind. Übrig bleiben Nebenvalenzbindungen, wobei besonders die Intensität von Wasserstoffbrückenbindungen hervorzuheben ist.

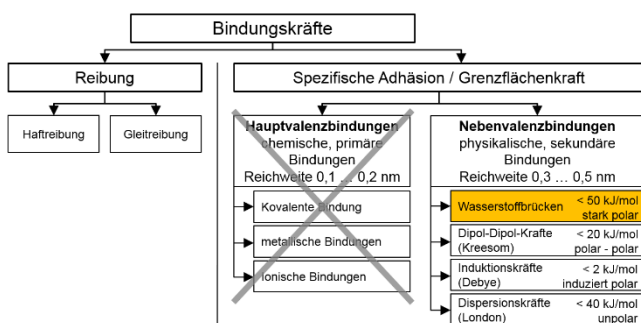
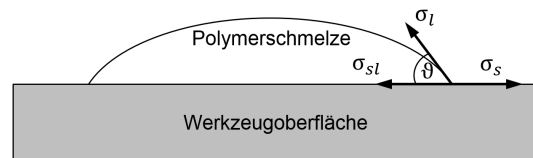


Bild 1: Übersicht der im Entformungsprozess wirkenden Bindungsmechanismen

Charakterisierung von Grenzflächenkräften Die Grenzflächenforschung bedient sich heutzutage einer Vielzahl an unterschiedlichen Messprinzipen, die eine Charakterisierung von Oberflächen- und Grenzflächenspannungen ermöglichen. Die anschauliche und verbreitete Messung des Kontaktwinkels am liegenden Tropfen beschreibt den Gleichgewichtszustand der Oberflächenspannungen von Werkzeugoberfläche und Polymerschmelze und der gemeinsamen Grenzflächenspannung.



Dieses Verhalten wird in der Zustandsgleichung nach Young beschrieben:

$$\sigma_{sl} = \sigma_s - \sigma_l \cdot \cos \vartheta \quad (1)$$

- mit
- σ_{sl} = Grenzflächenspannung
 - σ_s = Oberflächenspannung der Werkzeugoberfläche
 - σ_l = Oberflächenspannung der Polymerschmelze
 - ϑ = Kontaktwinkel

Die mit diesem Verfahren ermittelten Grenzflächenkräfte ausgewählter Werkzeugoberflächen (unbeschichtet 1.2344 und Titannitrid (TiN)) und Polymere (PET und PP) werden mit bekannten Adhäsionstheorien abgeglichen und mit real gemessenen Entformungskräften in Relation gebracht.

Wichtig ist hierbei eine kritische Begutachten dieses direkten Abgleichs, da die gemessenen Grenzflächenkräfte mit dem beschriebenen Messprinzip und real wirkenden Entformungskräfte im Kunststoffspritzguss auf teils deutlich unterschiedlichen Randbedingungen basieren. Aktuell erforderliche hohe Messzeiten der Kontaktwinkelmessung von bis zu 100 Minuten können zu unerwünschten Zersetzungsprozessen der Polymerschmelze führen und die im Spritzguss vorherrschenden Prozessdrücke können ein vollkommen differentes Benetzungsverhalten resultieren.

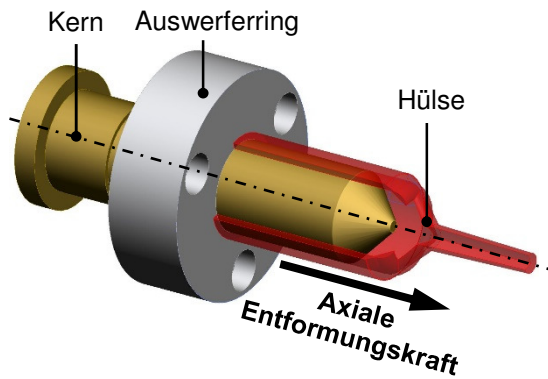
Tabelle 1: Relevante Parameterunterschiede zwischen der Kontaktwinkelmessung und dem Spritzgussprozess

	Kontaktwinkel-messung	Spritzguss
Druck	Umgebungsdruck	Wirkender Spritzdruck
Zeit	100 Minuten	Einspritzzeit
Oberflächentemperatur	Idealisiert homogen	inhomogen

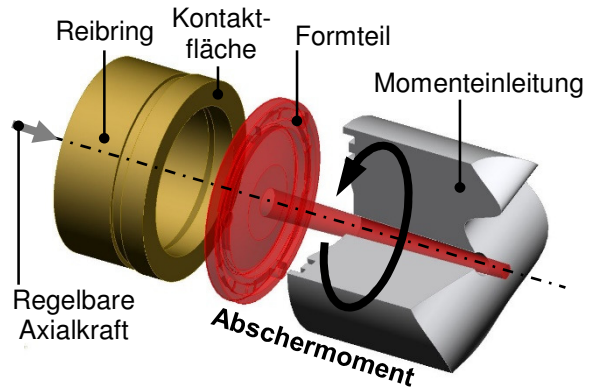
Systemtechnik

Die ermittelten Entformungskräfte basieren auf zwei unterschiedlichen und sich ergänzenden Messwerkzeugen, welche explizit nur die Scherfestigkeit einer Polymer-Werkzeugoberflächen-Verbindung untersuchen.

**Messung Von Entformungskräften
MEVEK**



**Torsionsprüfstand zur Messung von Adhäsionskräften
TOMAK**



Das Messprinzip dieses Werkzeugkonzeptes ist schnell erklärt. Eine auf einen beschichteten und/oder strukturierten ideal zylindrischen Werkzeugkern ohne Entformungsschräge aufgespritzte Kunststoffhülse (hier geschnitten dargestellt) wird axial entformt und dabei die Entformungskraft gemessen. Dieses Werkzeug liefert äußerst zuverlässige und aussagekräftige Messergebnisse, welche jedoch in Hinblick auf die explizite Untersuchung der spezifischen Adhäsionskomponente gewissen Einschränkungen und schwer kalkulierbaren Randbedingungen unterliegen, da die gemessenen Kräfte stets eine Überlagerung von Adhäsion und Reibung darstellen.

Der neu konzipierte Torsionsprüfstand soll die geringen Einschränkungen [2] des MEVEK-Werkzeugs kompensieren und eine ausschließliche Untersuchung der Adhäsionskomponente ermöglichen. Über den wechselbaren Reibring kann eine Normalkraft auf die Bezugsfläche aufgebracht werden, sodass eine definierte und konstante Flächenpressung erreicht werden kann. Das in der rechten Komponente eingeleitete Drehmoment wird über die Kontaktfläche übertragen, abgeschert und über eine Sensorik auf der Seite des Reibrings erfasst. Im Prinzip könnte das Abschermoment zwischen der Grenzfläche der Werkzeugoberfläche (hier Reibring) und dem Formteil ohne eine Normalkraftkomponente und somit ohne den im MEVEK-Werkzeug stets anwesenden Reibanteil erfolgen. In diesem Fall wäre ein Drehmomentverlauf des übertragenen Drehmomentes zu erwarten, der in Bild 3 in der schwarzen Kurve zu sehen ist und nur den vorhandenen Adhäsionsanteil repräsentiert. Die Einleitung einer Normalkraft (blau) sollte zwar eine zusätzliche und voraussichtlich konstante Gleitreibkomponente über die Drehbewegung verursachen, die Adhäsionskomponente dürfte dadurch aber nur geringfügig beeinflusst werden.

Der in Bild 2 dargestellte Kraft-Weg-Verlauf von drei Messungen eines Polymers bei identischen Prozessparametern verdeutlicht den positiven Einfluss von Beschichtungen. Die zu Beginn der Entformungsbewegung erhöhte „adhäsive Losbrechkraft“ (schwarzen Referenzkurve), welche eindeutig auf adhäsive Grenzflächenkräfte hindeutet, kann durch den Einsatz einer TiN Beschichtungen eliminiert werden. Eine Siliziumcarbid (SiC) Beschichtung reduziert zusätzlich den Gleitreibkoeffizienten dieser Werkstoffpaarung, zu erkennen am Parallelversatz der blauen Kraftkurve.

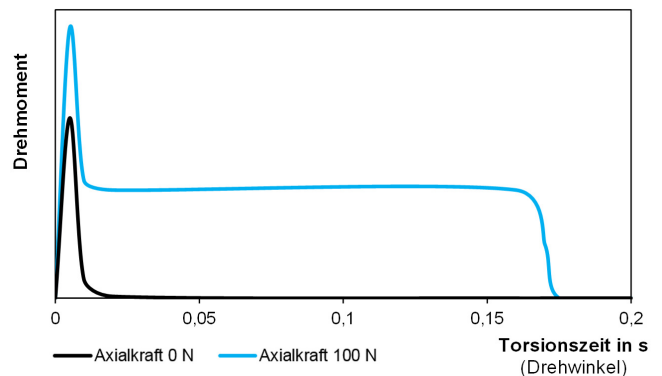
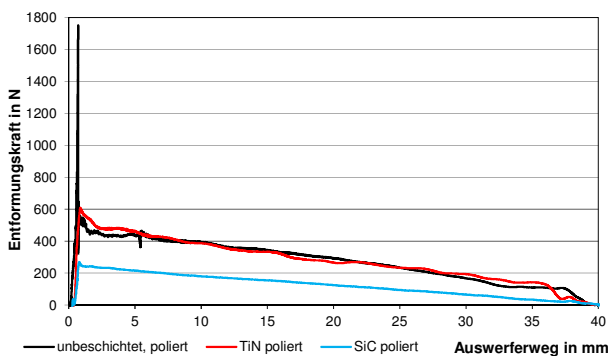
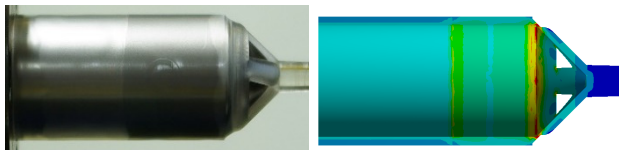


Bild 2: Exemplarischer Kraft-Weg-Verlauf

Bild 3: Theoretischer Drehmoment-Zeit-Verlauf

Ein grundlegendes Problem beider Messwerkzeuge steht der Separierung der Adhäsionskomponente im Weg. Die gemessene adhäsive Losbrechkraft muss in Relation zu der zum Messzeitpunkt aktiv adhäsiv klebenden Oberfläche gebracht werden. In Abhängigkeit vieler Einflussfaktoren erzeugt die Verarbeitungsschwindung Spannungsverteilungen im Formteil, welche ein vorzeitiges Lösen der adhäsiven Klebeverbindung vor der tatsächlichen Messung hervorrufen. Die im Anschluss folgende Messung bezieht sich auf einen undefinierten adhäsiv haftenden Flächenanteil. Am Beispiel des Entformungskraftwerkzeugs kann dies optisch begutachtet werden. Die dunkle Fläche in Bild (links) zeigt den aktuell adhäsiv klebenden Flächenanteil, rechts daneben ist die simulierte axiale Normalspannungsverteilung der Hülse in dieser Kontaktsituation zu sehen, mit einem deutlichen Spannungsanstieg am linken Rand der Adhäsionsfläche sowie am rechten Rand des Angusskegels. Hier ist auch im linken Bild eine leichte Ablösung (helle Flächenanteile) zu erkennen. Der gesamte linke gelöste Flächenanteil ist quasi spannungsfrei.



Wirkende Adhäsionsfläche:
ca. 43 % \pm 1043 mm²

Bild 4: links: Optische Messung der adhäsiv klebenden Oberfläche – **rechts:** Simulierte Normalspannungsverteilung einer Hülse in dieser Kontaktsituation

Einschränkung: Dieses optische Messverfahren kann nicht sicherstellen, dass der ermittelte Flächenanteil auch vollständig den adhäsiven Bindungskräften zugeschrieben werden kann. Es besteht durchaus die Möglichkeit, dass sich geringe Flächenanteile innerhalb dieses hier beispielsweise 43% betreffenden Bereiches vorzeitig gelöst haben und optisch nicht erkennbar sind. Die Praxis hat jedoch gezeigt, dass mit diesem Vorgehen recht gute adhäsive Scherfestigkeiten ermittelt werden können. Die zugehörige Kraft-Weg-Kurve ist in Bild 5 zu sehen. Nicht jede Messung zeigt sehr schöne lineare Kraftkurven, dieses Verhalten ist auf geringfügige Geometrieabweichung der idealen Zylinderform des Kerneinsatzes zu begründen. Der Adhäsionsanteil (rot markiert) bildet sich als Differenz der gesamten Losbrechkraft und der zu Beginn wirkenden Reibung. Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass bei polierten und entformungsgestrahlten Werkzeugoberflächen keine nennenswerten Unterschiede zwischen Haft- und Gleitreibung festzustellen sind, sodass dies hier gleichgesetzt wird. An dieser Stelle sei angemerkt, dass diese Untersuchungen nur relativ grobe Abschätzungen der tatsächlich wirkenden Grenzflächenkräfte darstellen können. Weitaus schwerwiegendere

Einschränkungen der Prozesstemperaturführung wirken sich ebenfalls sehr stark auf die gesamte Analysekette aus. Die Summe an umfangreichen Untersuchungen bekräftigt jedoch die erzielte Gesamtaussage.

Damit ergibt sich in diesem Beispiel mit einem Adhäsionsanteil von 257 N und einer Wirkfläche von 1043 mm² eine Scherfestigkeit von 0,25 N/mm². Diese ermittelte Scherfestigkeit bezieht sich auf die untersuchte Werkstoffpaarung (hier PET und eine unbeschichtete, hochglanzpolierte Oberfläche aus 1.2344) und die entsprechenden Prozessparameter (in erster Linie die Werkzeugtemperatur).

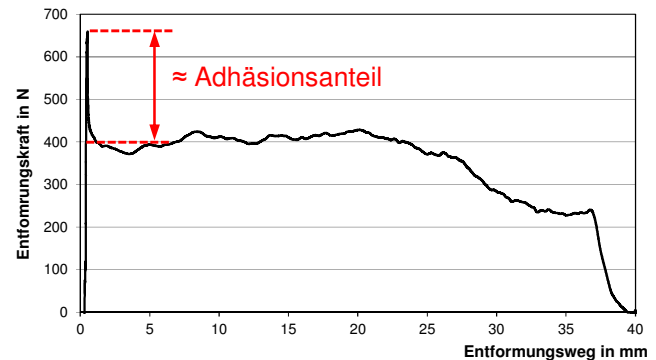


Bild 5: Kraft-Weg-Kurve einer Messung mit PET und einem adhäsiven Flächenanteil von 43%

Auch das zweite Werkzeugkonzept unterliegt der Formteilschwindung. Eine ähnliche optische Begutachtung der zum Torsionszeitpunkt wirkenden Adhäsionsfläche ist hier jedoch nicht möglich. Stattdessen wurde die Formteilgeometrie mit Hilfe von Füll- und Verzugssimulationen dahingehend optimiert, dass eine möglichst geringe Schwindung zu erwarten ist. Zusätzlich sollen mechanische Verankerungen das Formteil an der Schwindung hindern. Mit dieser Formteilauslegung kann aber nicht mit Sicherheit garantiert werden, dass die Kontaktfläche zum Messzeitpunkt vollständig adhäsiv haftet. Aus diesem Grund wird auf die Bezugsfläche eine Normalkraft eingeleitet, die das Lösen der Grenzflächenkräfte vor Beginn der Messung durch die zusätzliche Reibung unterbinden soll. Mit einer Variation der Normalkraft kann im Anschluss der Reibkoeffizient mit der bekannten Normalkraft ermittelt und die Reibkomponenten kompensiert werden. Mit diesen Maßnahmen soll die gesamte Kontaktfläche als Bezugsfläche für die Berechnung der Scherfestigkeit sichergestellt werden.

In Bild 6 ist exemplarisch die Normalkraftvariation einer Torsionsmessung über drei Normalkräfte mit PET und einer hochglanzpolierten Oberfläche zu sehen. Eine Messreihe besteht noch aus zwei weiteren Normalkräften, die der Übersichtlichkeit halber jedoch nicht dargestellt werden. Auf den Ordinaten sind rechts das tatsächlich gemessene Abschermoment und links die zugehörige umgerechnete Scherfestig-

keit aufgetragen. Zunächst fällt auf, dass alle drei Messungen in der zweiten Hälfte sehr konstante Gleitreibkräfte zeigen. Eine Erhöhung der Normalkraft von 100 N auf 200 N führt aber nicht zwangsläufig zu einer proportionalen Erhöhung der Gleitreibung. Dieses Verhalten deckt sich qualitativ mit einigen Untersuchungen von Polymerwerkstoffen [2]. Es hat sich gezeigt, dass Gleitreibungskoeffizienten einiger Werkstoffpaarungen einer Abhängigkeit der Flächenpressung unterliegen.

Zu Beginn der Messung ist ein deutlich erhöhter Losbrechanteil zu erkennen, der im Anschluss noch vor der Gleitreibung teilweisen Vibrationen des Gesamtsystems unterliegt. Der Adhäsionsanteil ist davon jedoch unberührt. Dieser Anteil wirkt im Vergleich zu den bekannten Entformungskraftmessungen deutlich gestreckter. Dies ist zum einen auf die Darstellung über die Zeit zu begründen (eine Winkelmessung war zum Zeitpunkt der Messung nicht möglich), zum anderen erhöht sich die Streckung auch mit dem Anstieg der Normalkraft. Die äquivalente Flächenpressung der Entformungskraftmessungen ist in der grauen Kurve zu sehen und zeigt eine deutlich geringere Streckung als die blaue Kurve. Diese Kurven können direkt mit den zuvor vorgestellten Entformungskraftmessungen verglichen werden. Die zuvor ermittelte adhäsive Scherfestigkeit von 0,25 N/mm² wird in diesem Beispiel mit Scherfestigkeiten zwischen 0,22 N/mm² und 0,3 N/mm² sehr gut bestätigt.

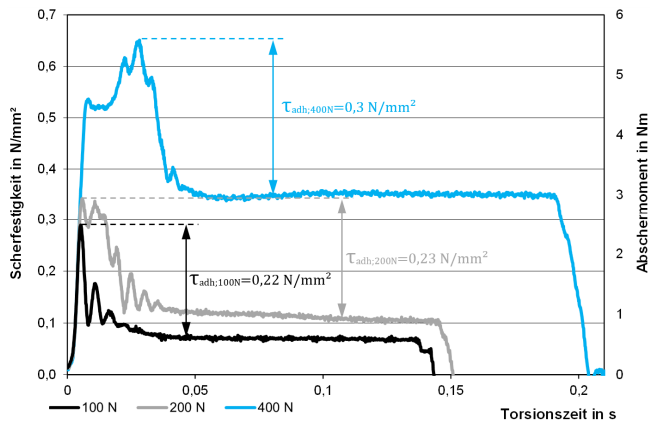


Bild 6: Exemplarische Drehmomentkurven des Abschermomentes bzw. der flächenbezogenen Scherfestigkeiten

Ein weiterer großer Vorteil dieses Messsystems ist die Möglichkeit der Untersuchung der Formteiloberflächenschädigung. Die Einleitung der Torsion ist in diesem Messwerkzeug nicht zwingend erforderlich, sodass die Oberflächengüte eines Formteils ohne Scherbeanspruchung, welches lediglich die Werkzeugoberfläche abformt (Referenzfläche) und Formteile mit Scherbeanspruchungen bei unterschiedlichen Normalkräften verglichen werden können. In Tabelle 2 ist die Abformgüte eines TOPOCROM®-Schichtsystems mit den Aufnahmen eines Konfokal-

mikroskops an einer definierten Stelle zu sehen. Die tatsächliche Formteiloberfläche ist ganz rechts dargestellt und stellt die Negativstruktur der Werkzeugoberfläche dar. Zum besseren optischen Abgleich ist in der Mitte das negierte Profil der abgeformten Formteiloberfläche zu erkennen, welches eine sehr gute Abformung der realen Werkzeugoberfläche zeigt.

Tabelle 2: Kontrolle der Abformung eines TOPOCROM®-Schichtsystems auf das Formteil

	Ringensatz	Negierte Formteilstruktur	Reale Formteilstruktur
Farbhöhenprofil			
Linienanschnitt			
3D-Darstellung			

Eine Schädigung der Formteiloberflächen durch die Torsionseinleitung ist in Echtlichtaufnahmen (Tabelle 3) besser ersichtlicher. Das TOPOCROM®-Schichtsystem zeigt auch unter maximaler Axialbelastung von 1600 N (≈ 2 MPa) trotz der relativ tiefen Schichtstruktur keinerlei Schädigungsverhalten. Geschliffene Oberflächen, die durch ihre leicht angeraute Oberfläche ähnliche entformungskraftreduzierende Eigenschaften aufweisen, zeigen deutliche Oberflächenschädigungen (ausstehende Schuppenstruktur), die auf deutliche schärfere Kanten im Vergleich zur Kugelkalottenstruktur zu begründen sind.

Tabelle 3: Schadensbeurteilung der Formteiloberflächen von geschliffenen und TOPOCROM®-Strukturen

	Schleifstruktur	TOPOCROM®
Referenz 0 N Axialkraft		
1600 N Axialkraft ≈ 2 MPa		

Messergebnisse

... der zu Beginn gestellte ersten Frage:

„Wie hoch ist die zu erwartende Entformungskraft einer Polymer-Werkzeugoberflächenkombination eines fiktiven Werkstücks?“

Eine absolute adhäsive Scherfestigkeit einer Polymer-Werkzeugoberflächenkombination kann aktuell nicht im Vorfeld ermittelt werden. Mit Hilfe der Kontaktwinkelmessung können lediglich Tendenzen erkannt werden, die die entformungskraftreduzierende Eigenschaft einer Werkzeugbeschichtung nahelegen oder eher ausschließen. In Bild 7 sind Ergebnisse von Grenzflächenkräften und Entformungskraftmessungen gegenübergestellt. Die Ergebnisse der Adhäsionsarbeit und der Grenzflächenspannungen wurden explizit in diesen vier und weiteren Kombinationen ermittelt.

Anmerkung: Die physikalisch richtige Vergleichsgröße der Adhäsionsarbeit ist die Entformungsarbeit im Bereich der adhäsiven Losbrechkraft, die als Intergral der Losbrechkraft über den zugehörigen Entformungsweg ermittelt werden kann. Da dieser Trennungsweg in der Praxis derart klein ist, konnten keine realistischen Ergebnisse der Entformungsarbeit erzielt werden, die eine sinnvolle Korrelation mit gemessenen Grenzflächenkräften zeigen.

Der Vergleich eines Polymers bei zwei unterschiedlichen Oberflächen macht aber deutlich, dass eine geringe Grenzflächenspannung auf eine hohe Bindungsaffinität und somit hohe Grenzflächenkräfte hindeutet. Dieser Zusammenhang ist am Beispiel von PET ersichtlich, der Einsatz einer TiN-Beschichtung erhöht die Grenzflächenspannung und reduziert somit die Grenzflächenkräfte. Das Ergebnis ist eine Reduzierung des adhäsiven Anteils der Entformungskraft. Auch bei PP ist diese Tendenz in Hinblick auf die Grenzflächenspannung in geringerem Maße zu erkennen, wobei die Adhäsionsarbeit hier gar keinen Unterschied zeigt.

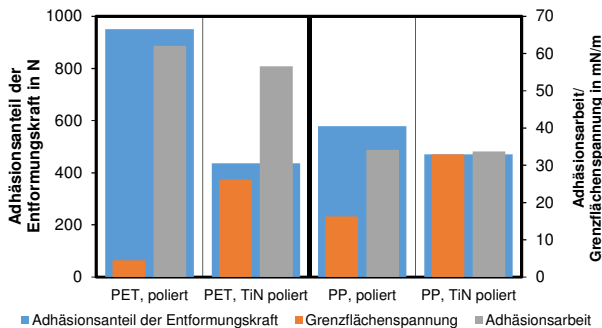


Bild 7: Vergleich von gemessenen Grenzflächenkräften und Entformungskraften

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor dieser Grenzflächenkräfte ist die tatsächliche Benetzungsoberfläche. Es ist anzunehmen, dass die vorgestellten polierten

Oberflächen eine gute Benetzung aufweisen. Bei weiteren Messungen mit rauen entformungsgestrahnten Werkzeugoberflächen kann dies eher bezweifelt werden, die Übereinstimmung dieser Ergebnisse mit realen Entformungskraftmessungen ist ebenfalls geringer.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass in diesem Beispiel der direkte Zusammenhang zwischen molekularen Grenzflächenkräften und praktischen Entformungskraften bei polierten Werkzeugoberflächen gezeigt werden kann.

Der Nachteil dieses vorgestellten Vorgehens ist die Tatsache, dass die Oberflächenspannungen beider Werkstoffe **und** deren gemeinsame Grenzflächenspannung ermittelt werden muss. Ein geeignetes Adhäsionsmodell, welches die Vorhersage der Grenzflächenspannung mit der Kenntnis der Oberflächenspannungen der Polymere und der Werkzeugoberflächen (die oftmals Literaturwerten entnommen werden können) wurde nicht gefunden. Der Ansatz von Good und Girifalco liefert zwar qualitativ richtige Tendenzen, die Absolutwerte weichen aber deutlich von den hier gemessenen Grenzflächenspannungen ab.

„Wie kann die Entformungskraft reduziert werden?“

Auch hierfür gibt es keine pauschalen Aussagen, unterschiedliche Grenzflächenkräfte erfordern eine individuelle Schichtauswahl der Werkzeugoberflächen auf den jeweiligen Kunststoff. Dies basiert aktuell auf einem umfangreichen Erfahrungswissen. In Bild 8 ist exemplarisch die Variation der Losbrechkraft eines PET über die Änderung der Werkzeugoberflächentemperatur oder verschiedener Werkzeugbeschichtungen und -strukturen zu sehen, wobei die letzten drei Strukturen eine Oberflächenrauheit von $Rz \approx 2$ aufweisen und somit keine glänzenden Kunststoffoberflächen ermöglichen. Generell ist in vielen Fällen eine Reduzierung der Entformungskraft mit unterschiedlichen Maßnahmen möglich – es muss jedoch stets berücksichtigt werden, ob diese eventuell weiteren Anforderungen im Wege stehen.

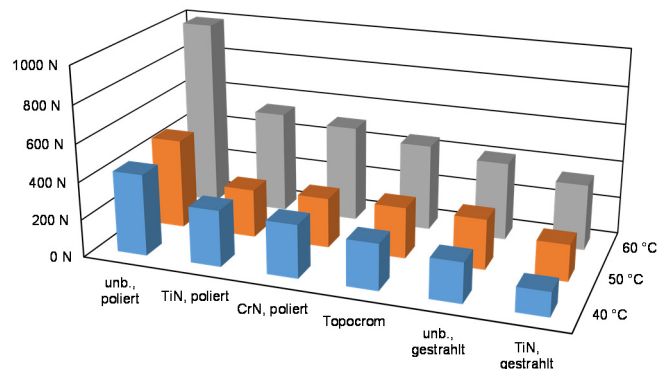


Bild 8: Variation der Losbrechkraft über die Werkzeugtemperatur oder mit Werkzeugbeschichtungen und -strukturen

FEM-Simulation

Die erzielten Erkenntnisse beziehen sich auf die vorgestellten und bewusst einfach gehaltenen Geometrien einer Hülse und einer flachen Scheibe. Doch wie lassen sich diese Ergebnisse auf komplexere Geometrien realer Spritzgusskomponenten überführen?

Die ermittelten Scherfestigkeiten zum Zeitpunkt der Formteilbildung sind allgemeingültig und nicht von der Formteilgeometrie abhängig. Lediglich geometrieabhängige Spannungen im Formteil stellen einen Unterschied dar. Eine FEM-Simulation kann diese Effekte berücksichtigen und die Entformungssituation mit Einbeziehung adhäsiver Bindungskräfte abbilden.

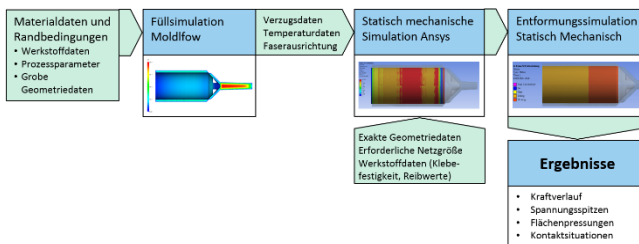


Bild 9: Simulationsablauf

Eine Füllsimulation liefert die erforderlichen Verzugs- und Temperaturdaten für die mechanische Analyse. Im Anschluss erfolgt eine statisch mechanische Simulation mit ANSYS, die den Zustand zum Zeitpunkt des Beginns der Entformungsbewegung abbildet. Hier wird der Umstand berücksichtigt, dass sich adhäsive Bindungskräfte partiell auf Grund von erhöhten Normalspannungen lösen. Dafür ist die Kenntnis der adhäsiven Klebefestigkeit erforderlich, die sich aus einem Scher- und einem Zugspannungsanteil zusammensetzt. Die adhäsive Zugfestigkeit ist mit den vorgestellten Werkzeugen nicht messbar und stellt einen möglichen Ansatzpunkt dieser aktuellen Forschung dar.

Im Anschluss folgt die entscheidende mechanische Entformungssimulation, welche die erforderliche Entformungskraft sowie lokale Spannungsspitzen, Kontaktsituationen und Flächenpressungen liefert.

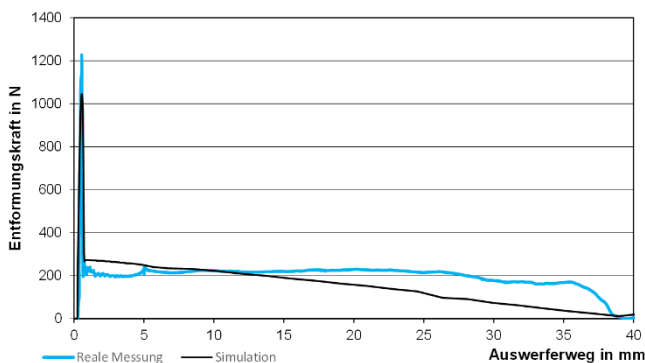


Bild 10: Vergleich von Simulation und Messung

Der Vergleich der Entformungskraft einer realen Messung und der zugehörigen Simulation zeigt eine recht

gute Abbildung der Losbrechkraft. Eine Abweichung von 10-20 % ist angesichts vieler getroffener Vereinfachungen gut (Beispiel: Adhäsionskräfte wirken in einem Bindungsabstand von $<0,5$ nm, eine Verfeinerung des Simulationsnetzes in dieser Größenordnung ist aktuell unrealistisch). Die linear abfallende Gleitreibung wirkt auf den ersten Blick plausibel, in der Realität zeigt sich jedoch auf Grund von minimalen Formabweichungen des Werkzeugkerns ein anderes Bild. Diese Formabweichungen sind in der FEM-Simulation zwar ebenfalls implementiert und bei genauer Betrachtung werden diese auch in der Kraftkurve abgebildet, jedoch nicht in dieser Intensität, wie sie die reale Messung zeigt.

Zusammenfassung

Die vorgestellte Messtechnik ermöglicht eine sehr gute Analyse der Entformungseigenschaften unterschiedlicher Werkzeugbeschichtungen und -strukturen sowie verschiedener Polymere. Ebenso sind der Einfluss von Entformungshilfen und Prozessparametern sowie eine optische Analyse der abgebildeten Formteiloberflächen möglich. Die Zuverlässigkeit des Messsystems und die Qualität der Messergebnisse des MEVEK-Werkzeugkonzeptes, die auf Erfahrungen und stetigen Optimierungen von über 20 Jahren beruht, muss das neue TOMAK-Werkzeugkonzept noch beweisen.

Die Bestimmung erforderlicher Materialkennwerte der Klebefestigkeit (wenn auch bisher auf den Scheranteil beschränkt) erweitert die Möglichkeiten der FEM-Simulation mit einer schnellen und umfangreichen Gesamtanalyse der zu erwartenden Materialbeanspruchungen. Diese Erkenntnisse können für eine Anpassung der Kavitätsgeometrie in Hinblick auf eine Optimierung des Gesamtprozesses durch die Einsparung von Zykluszeit oder der Steigerung der Produktqualität eingesetzt werden.

Literatur

- [1] KOPCZYNSKA, A. *Oberflächenspannungseffekte bei Kunststoffen - Bestimmung und Anwendung*, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2008
- [2] SCHATTKA, G. *Neuer messtechnischer Ansatz zur Ermittlung der Adhäsions- und Gleitreibungskräfte bei der Entformung*. Tagungsbeitrag 23. Stuttgarter Kunststoff-Kolloquium, Universität Stuttgart, 2013.
- [3] BASF *Reibung und Verschleiß bei Polymerwerkstoffen*, Technische Information, 2014

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Magnetically levitated linear drive with passive stabilized axes using repulsive magnetic guidance

Markus Raab M. Eng., Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe, Micha Schönwiesner M. Sc., Philip Neureuther B. Sc., Institute of Design and Production in Precision Engineering, University of Stuttgart, Germany

Abstract

Magnetically levitated linear drives are used in applications of precision engineering as they offer high dynamics and low friction. In addition the durability of these systems is high, as there is no wear caused in the guidance. One of the main disadvantages of magnetically levitated linear drives in precision engineering is, that a constant electric current in the guidance is required to compensate the force of gravity. Also the complexity of these systems is high, as a huge amount of power and sensing electronics as well as complex control algorithms are required.

In this paper, a magnetically levitated linear motor with two passive stabilized axes using a repulsive permanent magnet configuration is presented. The remaining axes are controlled by Lorentz coils, which uses the same magnetic field than the repulsive guidance. In this configuration, the complexity of the system and the amount of power and sensing electronic is reduced. As a second effect of the repulsive magnetic guidance, the force of gravity can be compensated to powerless levitation by the negative spring stiffness of the permanent magnet guidance up to a weight of 400g. Due to forces of the permanent magnet guidance and a flexure design on the armature of the motor, loads of the armature will levitate with zero watts power dissipation at a constant levitation height.

1 Introduction and state of the art

In many parts of industry the linear positioning of movable parts is required. For most applications, rotatory stages with a screw or a belt can be used. When higher requirements are imposed, linear direct drives can be deployed, as they reduce the clearance while positioning and increase the dynamics in the system. For highest requirements concerning durability, dynamics, precision and wear, the guidance of linear drives becomes the most critical part. In these applications, magnetically levitated linear drives can be used as there is no mechanical contact between the armature and the stator in a magnetic guidance.

For the design of a magnetic guidance, the six degrees of freedom (DOF), in which the armature can move and rotate, have to be stabilized. Most magnetic guidance concepts using electromagnetic [1, 2] or electrodynamic actuators [3] for the stabilization of these six DOF. Both actuator principles require a constant electric current to compensate the force of gravity. Also the amount of sensing and power electronics is high, as all six degrees of freedom needs to be actively controlled.

In the last years magnetic levitation is presented using superconductivity [4], which requires no active control in the guidance and no electric power to compensate the force of gravity. The downside of these concepts is, that a cooling of the superconductors to temperatures far below zero °C is required which increases the complexity of the system. Another option is the use of repulsive magnet forces, as it is proposed by Nguyen [5] or Bundig [6]. In this guidances, the gravity is compensated by permanent magnetic forces, and the number of axes, which have to be actively controlled, can be reduced.

In this paper a magnetically levitated linear drive is presented, in which two axes are stabilized by repulsive permanent magnet forces. Due to this forces, levitation with

nearly zero watts power emission can be achieved. Using a flexible stage at the armature and an additional active control loop, loads of the levitating part will be hold always at the same height, independent of their weight.

In Chapter 2 of this paper, the general motor and guidance concept is presented. Chapter 3 focuses on the design of a repulsive permanent magnetic guidance. Chapter 4 focuses on the design of the armature to achieve zero watts levitation at the same levitation height. The modelling and control of the guidance and the motor is described in chapter 5.

2 Guidance and motor concept

In this chapter the overall concept of the motor and guidance is described. As all components of the system needs to work together, aspects of the different parts has to be taken into account by designing each separate section.

2.1 Guidance concept

Permanent magnets can be used to apply static attractive or repulsive forces. When repulsive forces are used, a positive spring stiffness in at least one axis is achieved. On the other hand, a permanent magnet suspension will always result in negative spring stiffness in another axis which destabilizes the system based on Earnshaw theorem. This is illustrated in **Figure 1**.

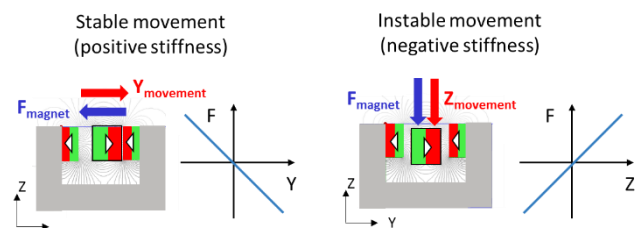


Figure 1 Schematic of stable and instable guidance axes

The guidance design, shown in **Figure 2**, uses two tracks of permanent magnets which are mounted on the stator. At the armature of the motor three permanent magnets (PM1-PM3) are mounted in repulsive configuration as indicated in Figure 1. This way positive spring stiffness in the Y axis of the guidance as well as in the rotational degree of freedom φ_z is achieved.

The repulsive guidance magnets also create negative spring stiffness in the Z, φ_x and φ_y axis of the motor, which requires an active control to stabilize them. To apply controlled forces in these three axes, four coils (S1-S4), which are mounted on the armature, are placed in the magnetic field of the permanent magnet tracks. Based on the Lorentz force, forces and torques in these axes can be applied by a separate control of the coils.

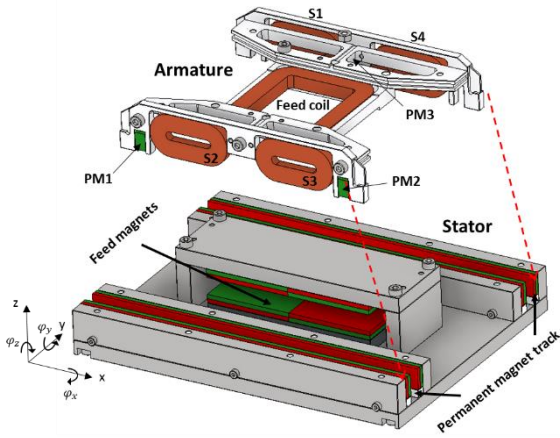


Figure 2 Guidance and motor concept

2.2 Motor concept

For the actuation of the feed axis a homopolar linear drive using a flat coil mounted on the armature is designed. The force of the motor is created by the Lorentz force. In this motor there is a proportional relationship between the current through the coil and the force of the motor. The motor principle can be seen in Figure 2. As this principle uses no ferromagnetic material on the moving part, no parasitic reluctance forces are created.

2.3 Armature concept

To achieve levitation with nearly zero watts power dissipation, the negative spring stiffness k_{pm} in the Z axis is used. By changing the position in the Z axis the force in this axis can be adjusted. At one specific point, the force of the permanent magnets is equal to the force of gravity.

Nevertheless, the armature and load of the motor will change its position to adjust the equilibrium of permanent magnetic forces and force of gravity. When the load increases, the armature will levitate at a higher position due to an additional active control. This change of height can be cancelled by adding a spring with the same magnitude of spring stiffness than the permanent magnetic guidance and a positive sign. As a combination of both stiffness's,

the armature load will not change its position independent of its load. The principle of this combination is depicted in **Figure 3**.

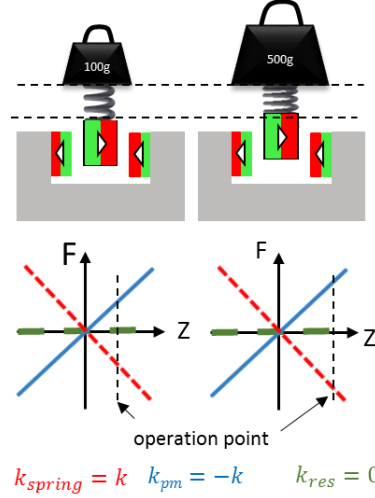


Figure 3 Spring configuration for zero power levitation

3 Guidance Design

The magnetic guidance of the motor consists of the permanent magnets, which stabilizes the Y and φ_z axis, the coils for applying forces in the remaining three DOF as well as the sensors for sensing the position in these axes. The design of these parts is described in the following section.

3.1 Repulsive permanent magnet design

3.1.1 Placement of permanent magnets

For a stabilization of two axes (Y and φ_z) at least two positive stiffness and thus two permanent magnets are required. Nevertheless, for a gravity compensation with the concept of Figure 2 a third permanent magnet needs to be used in the guidance.

By calculating the overall stiffness in the Y axes, the stiffness's of all three magnets can be added. In the rotational axes of the Z axes only the two magnets placed at the ends of the armature (PM1 and PM2) have a share of the torque as the permanent magnet in the middle of the armature does not have a lever of the force.

3.1.2 Permanent magnet design

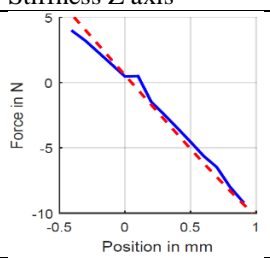
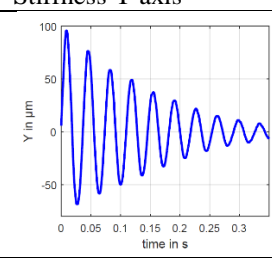
The repulsive permanent magnets as shown in Figure 1 needs to be designed to achieve a good ratio between positive stiffness in the Y axis and negative stiffness in the Z axis. For this reason a parametric study using a finite element method has been done.

The simulation showed, that good results can be achieved, when the height of the movable magnets on the armature are slightly lower than the height of the stationary magnets on the stators. Also it can be seen, that the thickness of the movable magnet should be in the range of the thickness of the stationary magnets. For this reason, stationary magnets with a volume of $10 \times 4 \times 160 \text{ mm}^3$ with a grade of N35 has been chosen. The three permanent magnets on the armature

have a dimension of $8 \times 4 \times 5 \text{ mm}^3$. The air gap between stator and armature is 1 mm between each side of the guidance.

The simulated results are compared to the measured stiffness's of the real setup (see **Table 1**). It can be seen, that there is a linear coherence of the instable Z axis in the movable range between force and travel distance. Also it can be seen, that the simulation results fit well to the measured value with a variation of 10 %. The positive stiffness of the Y axis has been measured by detecting the oscillation after an impulse of the Y axis. It can be seen, that the measured stiffness has only two-thirds of the expect stiffness. Reasons for this lower stiffness can be explained by variations in remanent flux density and misalignments in the permanent magnets.

Table 1: Permanent magnet stiffness in Y and Z

Stiffness Z axis	Stiffness Y axis
	
Simulation: $k_{PM_Z} = -11.2 \text{ N/mm}$	Simulation $k_{PM_Y} = 9.1 \text{ N/mm}$
Measurement: $k_{PM_Z} = -10.1 \text{ N/mm}$	Measurement: $f_{osc} = 27 \text{ Hz}$ $k_{PM_Y} = 6.5 \text{ N/mm}$ $d = 2.47 \text{ Ns/m}$

In the movable range of the X axis, the disturbance forces created by the permanent magnets are low. Measured disturbance forces in this axis are in the range lower than 200 mN and mainly caused by the falt-flex-cable connection between armature and stator.

3.2 Coils for active stabilization

For the stabilization of the instable axes Z, φ_x and φ_y , four coils, which create forces based on the Lorentz force are mounted in the armature as illustrated in Figure 2. Using the decoupled control of Chapter 5, forces and toques in the three axes can be adjusted independently.

The force and torques created by the coils need to be higher than the ones created by the negative stiffness of the permanent magnets. Using finite element method coils with a force constant of $k_z 2.95 \text{ N/A}$ and a maximum force of six Newton have been designed. Based on the force of the coils, and the geometry of the armature, the current to torque constants k_{φ_x} and k_{φ_y} in Nm/A have been calculated. For actuating the coils, four independent current controlled amplifiers are used. Each amplifier uses operational amplifier, which are used in a current controlled loop with an internal crossover frequency of 7 kHz. Due to the high dynamic of this amplifier the voltage to current dynamic does not affect the armature dynamics.

3.3 Position detection

For the position detection of the armature in the destabilized axes, a sensor concept is developed.

As the main goal of the armature is to levitate at the point of minimum energy, the accuracy of the sensors is less important. The main focus is to use sensors which have a high resolution and high dynamic, which is required to achieve the necessary control bandwidth in the system. As the armature is small in scale, the sensors need to be small enough, to be mounted on the armature.

Sensors which fulfill the requirement are analog Hall elements, which measure the exposed magnetic field of the permanent magnet tracks. When the armature is moving, the Hall sensors detect the change of magnetic field and convert this information into an analog value. To reduce inhomogeneity's of the magnetic field when the armature change its position in the Y axis, as depict in **Figure 5**, two Hall elements are placed next to each other in the magnetic field of the permanent magnet tracks. When the armature moves in Y direction the voltage in Hall sensor 1 will decrease, and the voltage in Hall sensor 2 will increase. By adding both values this effect can be cancelled to a big amount.

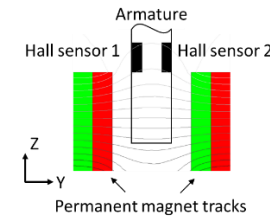


Figure 5 Hall sensor placement

The sensor to position behavior is nonlinear, so a fitting curve has been deposed to get the metric position of each sensor. To measure the three instable axes, at least three sensor values from Hall sensors are needed. Nevertheless, to create a higher accuracy, four pairs of Hall sensors at each end of the armature are used. Using a matrix transformation, the four sensor values can be converted into the Cartesian coordinates Z, φ_x and φ_y .

4 Armature design

A main requirement of the levitated motor, is a load independent levitation with zero watt power at the same levitation height. When the load of the armature increases, the permanent magnets of the armature have to levitate at a higher position to compensate the force of gravity (see Figure 3).

To compensate this load dependent change of position, an additional spring with the opposite stiffness than the permanent magnet stiffness in the Z axis is included on the armature. For this reason, three flexures are used, which are placed above the permanent magnets. The principle design of the flexures on the armature is shown in **Figure 6**.

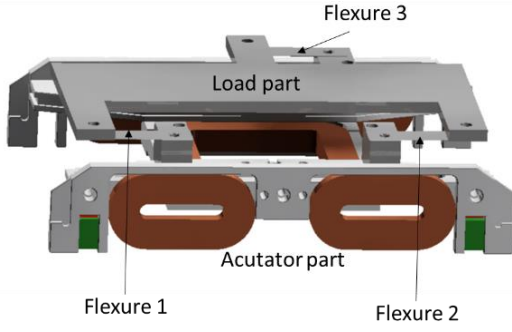


Figure 6 Flexure hinge design on the armature

This flexures have a low damping, which can causes problems in the control of the system. To increase the damping of the flexures, a silicone layer is included in the flexures as it is shown in **Figure 7**. Due to the viscous layer damping of this interlayer between two spring plates, the damping of the flexures is significantly increased to a damping ratio over a value of 0.7.

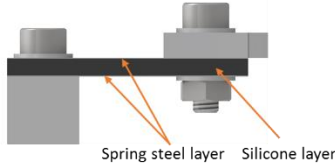


Figure 7 Flexure hinge with viscous layer damping

5 Modelling and Control

5.1 Dynamic Model

The dynamic model of the levitated motor contains permanent magnet forces, the forces and dynamics of different coils as well as the armature dynamics.

5.1.1 Force and Torque calculation

The resulting force and torque of each stabilization coil, which is applied in the three controlled axes of the guidance, can be calculated according to (1). In addition the forces and torques of the three permanent magnets of the guidance are also represented in this equation.

$$\begin{bmatrix} F_z \\ M_{\varphi_x} \\ M_{\varphi_y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_z & 0 & 0 \\ 0 & k_{\varphi_x} & 0 \\ 0 & 0 & k_{\varphi_y} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{S1} \\ I_{S2} \\ I_{S3} \\ I_{S4} \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} k_{pm_z} & 0 & 0 \\ 0 & k_{pm_{\varphi_x}} & 0 \\ 0 & 0 & k_{pm_{\varphi_y}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z \\ \varphi_x \\ \varphi_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

The force of the linear motor, which is created by the electrical current I_v through the feed coil and the force constant of the feed axis k_x (12 N/A) is calculated by (2). As the feed coil is placed near the center of gravity of the armature parasitic torques in the axis of the guidance are small.

$$F_x = k_x \cdot I_v \quad (2)$$

5.1.2 Armature dynamics

As the armature is levitated, the system can move in six degrees of freedom. Therefore its transfer function needs to be calculated in each axis.

In the feed axis of the system of the armature only very small disturbance forces and torques, created by the cables and the ends of the permanent magnets appear, which are neglected in the model. For this reason the system can be modeled as a moving mass. The passive stabilized axes of the armature behaves as a slightly damped second order spring mass system.

Due to the flexure in the armature, the three controlled axes of the guidance behave as a collocated two mass system with a negative spring stiffness in the dynamic response, as indicated in **Figure 8**.

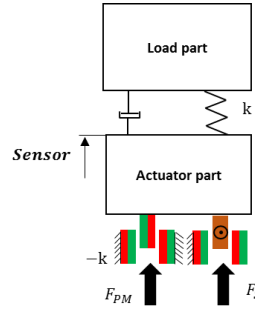


Figure 8 Schematic of the Z axis behaviour

The frequency response comparison between model and measurement of the Z axis is shown in **Figure 9**. In the modelled blue line can be seen, that the system has a negative phase of 180° for frequencies up to 30 Hz. At a frequency of 110 Hz there is a small lift of the phase caused by the collocation of the mass of the actuator and the load part. For higher frequencies, an additional drop of the phase can be seen, which is caused by the sampling rate of the real-time target, the Hall sensors and the current controllers. The magnitude of the frequency response remains constant up to a value of 20 Hz. For higher frequencies the magnitude decreases.

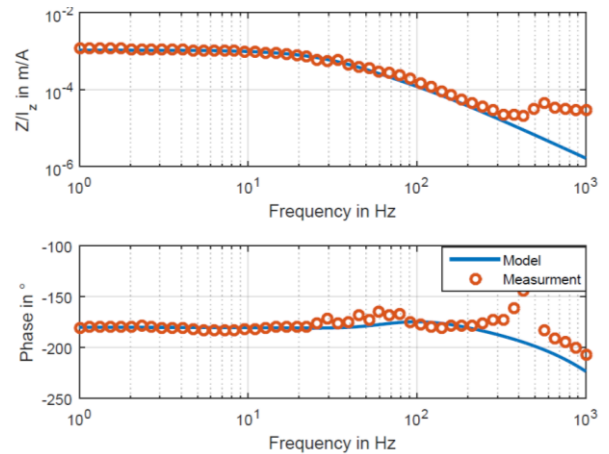


Figure 9 Frequency response of the Z axis

The red dots in the figure represents the measured frequency response in the Z axis. It can be seen that up to a value of 300 Hz there is a good comparability between

measurement and model in the magnitude of the system. In the phase of the plot it can be seen that the lift of the phase is 70 Hz which is at a slightly lower frequency than in the model.

For frequencies over 300 Hz a higher deviation between model prediction and actual measurement can be seen, caused by mechanical resonances of the armature, which are not included in the model and the limitation of resolution of the Hall sensors.

In the controlled rotational axis φ_x and φ_y the system behavior are comparable to the one shown in Figure 9.

5.2 Control

The control of the armature is sectioned in two cascaded control loops. At the inner control loop, the position of the armature is controlled based on the information of the Hall sensors. The outer control loop regulates the desired levitation height and angle to achieve zero power levitation. This is illustrated in **Figure 10** for one axis.

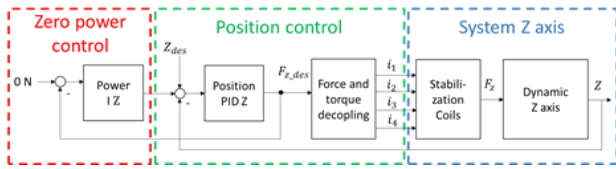


Figure 10 Control structure of the Z axis

5.2.1 Position control

The control scheme for the guidance in three DOF uses individual PID-T₁ controllers for the Z, φ_x and φ_y axis. For this reason the measured Cartesian coordinates of the Hall sensors are used. The controller calculates the desired forces and torques of each axis, needed to stabilize the guidance. These forces are separated to the individual actuator forces of the stabilization coils (S1-S4) by inverting the 3x4 matrix of the actuator forces and torques of (1). A schematic for one axis is shown in Figure 10.

Based on the frequency response of the system in the three axes (see Figure 9), PID-T₁ controllers were tuned. The frequency responses of the three axes indicates that a controller crossover frequency in the range between 40 Hz and 100 Hz should be chosen. The tuned controllers realize a crossover frequency of 60 Hz with a phase margin of 40°. Crossover frequency and phase margin were verified by measuring the frequency response of the return ratio of the system.

Figure 11 shows the disturbance compensation of the guidance for a drop of a 100 g weight from a distance of 4 cm at the time of 0.1 s. It can be seen, that disturbances in each axis are created. To compensate this disturbance overshoots in each axis appear. Nevertheless, after this disturbance, the system regulates to its desired position within 0.2 seconds.

Using an accelerated reduced path planning, changes of position without overshoots within 0.2 seconds can be applied to the controlled axes of the guidance and the feed axis of the motor. This can be seen in **Figure 12**. The red line indicates the desired position of the armature. It can be seen,

that there are only small deviations between desired and measured position.

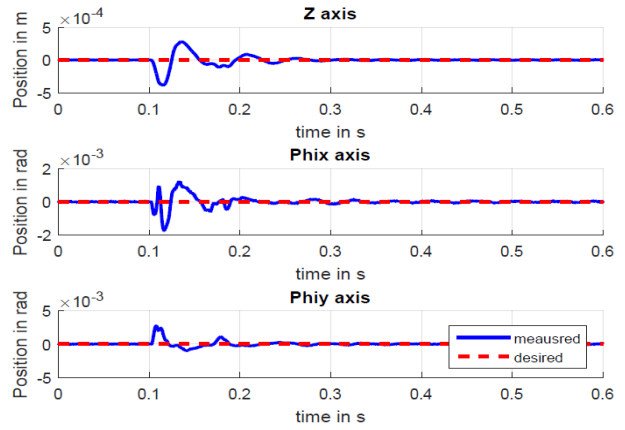


Figure 11 Disturbance compensation

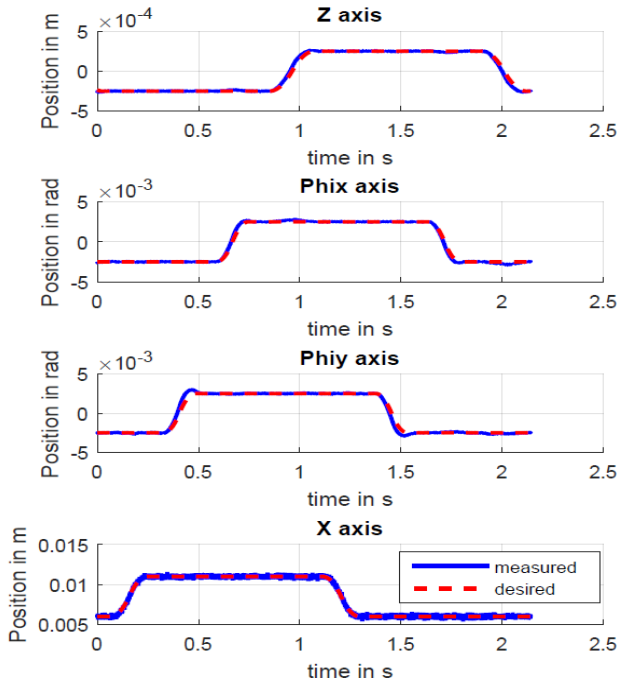


Figure 12 Step responses of the levitated axis

5.2.2 Zero power control

For levitation with zero watts power losses, the force of gravity of the armature has to be compensated by the forces generated by the negative spring stiffness of the permanent magnets. Additionally the torques created by the permanent magnets have to be zero Nm.

To achieve levitation with zero watts power dissipation, the desired levitation position is controlled in an extra control loop. As the power loss created by each position controller is proportional to its controller output, this signal is feed back into an additional controller for the levitation power as it is shown in Figure 10. The analog control structure is used for the two controlled rotational DOF of the guidance. The three controllers are designed as integrators with a small crossover frequency (about 1 Hz) to avoid interactions between the different control loops.

Based on the flexure design on the armature the load carrying part of the armature stays at a constant position, when different loads are attached to the armature and the zero power levitation control is activated.

Figure 13 shows an example of the zero power levitation control. In the first section no load is attached to the armature and the zero power control is deactivated. It can be seen, that the armature is not in its position of minimum levitation power, as electrical currents of 0.3 A in two coils are required for stable levitation. In section two, the zero power levitation is switched on and the armature adjusts its position to achieve minimum power levitation. The actuator part and the load part changes its position in the same way, as no load is applied to the armature.

In the next section an additional load of 200 g is attached to the load part of the armature. It can be seen, that the load part drops by 0.2 mm for roughly one second. Due to the zero power control, the actuator part, where the permanent magnets are placed increases its position to achieve a current of zero A in each coil. As the drop of the load part, caused by the flexures is the same than the increase of the actuator part, the levitation height of the load went back to its former position within 1.4 s.

In section four the load of the armature is removed. Here it can be seen, that the actuator part went back to its original position of section two and the load part keeps stays constant after regulating this disturbance.

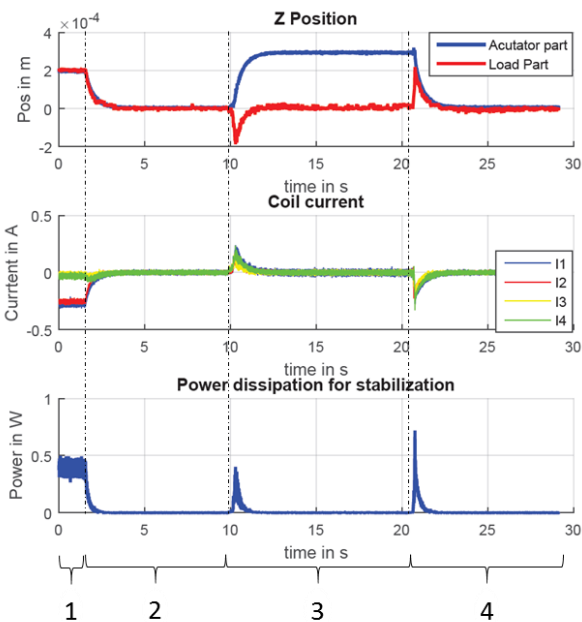


Figure 13 Zero power control

As it can be seen in Figure 13, the current in the coils has some amount of noise, which is created by limitation of resolution of the position sensors. This creates a power dissipation of 4 mW in the coils. Using sensors with higher performance, this value can be reduced significantly.

In this configuration, loads up to 400 g can be carried using this control. **Figure 14** shows a picture of the prototype of the system.

6 Summary and Conclusion

In this paper, a magnetically levitated linear drive is developed. The guidance uses repulsive permanent magnet forces for a passive stabilization of two degrees of freedom. In the remaining axes of the guidance an active control of four Lorentz coils is implemented, to stabilize the armature and compensate the negative spring stiffness which are created by the permanent magnets.

Using an additional cascaded control loop it is possible to achieve levitation with nearly zero watts power emission. This is done by adjusting the armature position to get an equilibrium between the force of gravity of the armature and the forces created by the permanent magnets.

The armature of the motor is designed to have flexible elements with a defined spring stiffness to compensate the effect of position change of the zero power control loop. This way, the armature will levitate load independent at the same levitation height with nearly zero watts power dissipation.

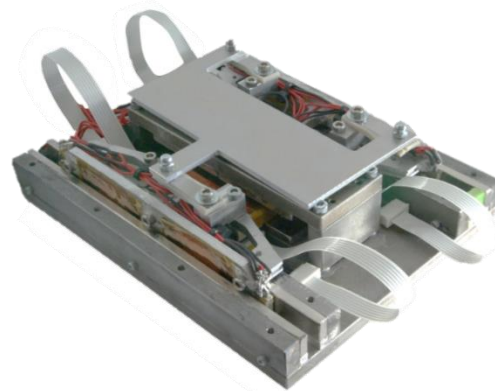


Figure 14 Prototype of the magnetically levitated motor

7 Literature

- [1] SPEIß, A.: Regelung magnetischer Führungen für lineare Transportsysteme [Dissertation]. Technische Universität Darmstadt, 2010
- [2] RUSKOWSKI, M.; POPP, K.: Improved position control of a magnetic guide using acceleration measurement and a laser position reference: 8th International Symposium on Magnetic Bearing, Mito, 2002
- [3] REUTZSCH, B.: Entwicklung feinwerktechnischer Magnetschwebeführungen [Dissertation]. Universität Stuttgart, 2015
- [4] MOON, F C.: Superconducting Levitation, New York: John Wiley & Sons, 1994
- [5] NGUYEN, H., ANGELIS, G.; MOLENAAR, E.; SAHIN, F.; STOUTJESDIJK, H.; STEINBUCH, M., Magnetic levitation for precision motion with only two off the shelf linear motors and a novel passive magnetic bearing Design: Modelling and control challenges: Proceedings of the 24th ASPE annual Meeting 2009, 2009
- [6] BUNDIG, P., Direct Linear Drives For The Application in High Vacuum: 51. International Scientific Colloquium. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium. Ilmenau. 11.09.2006-15.09.2006, 2006