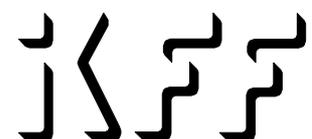


Universität Stuttgart

Jahresbericht IKFF 2009

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 2010

1 DAS INSTITUT

- 1.1 Mitarbeiter
- 1.2 Jahresrückblick
- 1.3 Wissenschaftliche Arbeitsgebiete

2 LEHRVERANSTALTUNGEN

- 2.1 Vorlesungen und Übungen für das Vordiplom
- 2.2 Vorlesungen und Übungen für das Hauptdiplom
- 2.3 Prüfungen
- 2.4 Praktika
- 2.5 Exkursion
- 2.6 Seminar Feinwerktechnik

3 WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN, STUDIEN- UND DIPLOMARBEITEN

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

4 ARBEITSGEBIETE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITER

- 4.1 Aktorik
- 4.2 Spritzgießen
- 4.3 Zuverlässigkeitstechnik

5 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

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

6 KONGRESSE, TAGUNGEN UND MESSEN

7 WERKSTATTBERICHT

8 ANHANG - Ausgewählte Veröffentlichungen

1 DAS INSTITUT

1.1 Mitarbeiter

Institutsleitung:

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe

Emeritus:

Prof. Dipl.-Ing. Artur Jung

Sekretariat:

Ulrike Ortner

Margit Reinhardt (seit 01.04.2009 in Ruhestand)

Kornelia Wanner

Unbefristeter wissenschaftlicher Mitarbeiter:

Akademischer Oberrat: Dipl.-Ing. Eberhard Burkard

Befristete wissenschaftliche Mitarbeiter:

Dipl.-Ing. Michael Beier

Dipl.-Ing. Sebastian Bobrowski

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

Dipl.-Ing. Philipp Joerges

Dipl.-Ing. Bastian Keller

Dipl.-Ing. Frank Mochel

Dipl.-Ing. Elmar Rothenhöfer

Dipl.-Ing. Matthias Ulmer

Dipl.-Ing. Till Zimmermann

Dipl.-Ing. Michael Zülch

Modellbau und Versuchswerkstatt:

Ralf Berwanger

Stefan Schneider

Wissenschaftliche Hilfskräfte:

Philipp Beyerlein

Abir Braham

Hamdi Choubani

Axel Ege

Marouane Haouel

Daniel Horneff

Tobias Kaupp

Alexander Keck

Islem Koobar

Christian Lang

Andreas Maucher

Huyen Trang Nguyen

Minh Nguyen

Diana Reiter

Adrian Retzbach

Benjamin Reutzsch

Christian Scheu

1.2 Jahresrückblick

Personalia

Im Jahr 2009 wechselten Herr Dr.-Ing. Beier und Herr Dr.-Ing. Rothenhöfer planmäßig in die Industrie bzw. in andere Einrichtungen. Als Nachfolger auf dem Gebiet der Zuverlässigkeitstechnik wurden Herr Dipl.-Ing. Bobrowski und auf dem Gebiet Piezoantriebe Herr Dipl.-Ing. Keller eingestellt. Unsere langjährige Sekretärin Frau Reinhardt wechselte am 01.04.2009 in den verdienten Ruhestand.

Aktivitäten in der Lehre

Seit September 2008 gibt es im Maschinenbau der Universität Stuttgart keine Studienanfänger in Diplomstudiengängen mehr. Alle Studierenden starten in Bachelorstudiengängen. Folgende Bachelorstudiengänge sind den Fakultäten des Stuttgarter Maschinenbaus derzeit zugeordnet:

- Maschinenbau
- Fahrzeug- und Motorentechnik
- Technologiemanagement
- Mechatronik
- Erneuerbare Energien
- Technische Kybernetik
- Verfahrenstechnik.

Die darauf aufbauenden Masterstudiengänge starten ab WS 2011/12, unter anderem ein Studiengang Mikrotechnik, Gerätetechnik und Technische Optik.

Die Anfängerzahlen im Maschinenbau sind weitgehend konstant geblieben und fast alle Bachelorstudiengänge voll ausgelastet, inklusive freiwilliger Überlast der Fakultät. Insgesamt liegen die regulären Anfängerzahlen aller maschinenbaulichen Studiengänge der Universität Stuttgart (ohne Luft- und Raumfahrttechnik) derzeit bei ca. 850 Studierenden. Im Studiengang Maschinenwesen selbst bewegen sich die Anfängerzahlen bei 350. Allerdings wurden dafür bei ca. 1300 Bewerbern insgesamt fast 1000 Zulassungen ausgesprochen. Dies zeigt eine schwierige Situation mit nicht mehr kalkulierbaren Mehrfachbewerbungen.

In der Konstruktionslehre Feinwerktechnik hatten wir bis zum Sommer 92 Studierende zu betreuen, im Wintersemester sind es 50. Die Bachelor-Lehrveranstaltungen konzentrierten sich nach wie vor auf die Fächer Konstruktionslehre Feinwerktechnik III und IV im dritten und vierten Semester als Wahlmöglichkeit für die beiden Bachelorstudiengänge Maschinenbau sowie Fahrzeug- und Motorentchnik. Ein Highlight ist dabei immer wieder der Konstruktionswettbewerb, auf den weiter hinten noch eingegangen wird.

Das Hauptfach Feinwerktechnik in den Diplomstudiengängen ist ebenfalls wieder gut besucht. Derzeit belegen 22 Studierende das Fach „Grundlagen der Feinwerktechnik - Gerätekonstruktion und -fertigung“ als Pflicht- oder Kernfach, leider nur 8 Studierende das Kernfach „Aktorik“. Die Lehrveranstaltungen des Hauptdiploms konzentrieren sich auf die beiden Schwerpunkte Gerätekonstruktion als methodisch orientierte Linie und feinwerktechnische Aktorik als konkret forschungs- und entwicklungsorientierte Linie.

Die Vorlesung „Grundlagen der Feinwerktechnik - Gerätekonstruktion und -fertigung“ behandelt Grundlagen der Entwicklung und Konstruktion feinwerktechnischer Geräte bzw. Systeme und betont dabei insbesondere den engen Zusammenhang zwischen konstruktiver Gestaltung und zugehöriger Fertigungstechnologie. Den Schwerpunkt bilden Themenkreise wie zuverlässigkeits- und sicherheitsgerechte Konstruktion, Genauigkeit, Fehlverhalten und Toleranzrechnung in der Präzisionsgerätetechnik, Lärminderung in der Gerätetechnik, Beziehungen zwischen Gerät und Umwelt sowie die Kunststofftechnologie und -anwendung in der Gerätetechnik (Werkstoffe, Verfahren, Konstruktion, Werkzeugkonstruktion).

Die Vorlesung „Aktorik in der Feinwerktechnik - Konstruktion, Berechnung und Anwendung mechatronischer Komponenten“ beleuchtet dagegen ausgewählte Aspekte der Entwicklung und Konstruktion mechatronischer Komponenten und Systeme der Feinwerktechnik. Behandelt werden feinwerktechnische Antriebs-

systeme 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. Die Lehrinhalte zur Aktorik sind 2008 in dem englischsprachigen Handbuch „Handbook of Fractional-Horsepower Drives“ erschienen.

Unsere neue Lehrveranstaltung „Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL“ wurde wieder sehr gut angenommen und ist voll ausgelastet. Auch unsere zweite neue Lehrveranstaltung „Praxis des Spritzgießens in der Gerätetechnik; Verfahren, Prozesskette, Simulation“ fand 2009, wenn auch mit kleiner Teilnehmerzahl, wieder statt.

Im Juli 2009 fand eine Exkursion zur Firma ARBURG GmbH + Co. in Loßburg statt. Auf dem Programm standen Vorführungen von Sonderverfahren des Spritzgießens. Ferner fand eine Führung durch die Anwendungstechnik und eine Besichtigung der Produktionseinrichtungen statt.

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

Die Absolventen fanden 2009 trotz Krise nach unseren Erkenntnissen ihren Einstieg in die Industrie.

Aktivitäten in der Forschung

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

Als Schwerpunkt in der Nutzung elektrodynamischer Antriebsprinzipien wurden 2009 die Untersuchungen zu Rastkräften in Lineardirektantrieben intensiviert. Darüber hinaus wurden Untersuchungen zum thermischen Verhalten derartiger Antriebe vertieft. Gleichzeitig wurde zur effizienten Realisierung von Kommutierung,

Ansteuerung und Regelung die existierende dSPACE-Umgebung weiter ausgebaut und genutzt.

Die Forschungen zur Entwicklung von neuartigen Direktantrieben mit piezoelektrischen Antrieben wurden 2009 ebenfalls fortgeführt. Hier bildet neben der Motorentwicklung und durchgängigen Motorberechnung bzw. -simulation die Realisierung von Ansteuerung und Regelung über eine dSPACE-Entwicklungsumgebung einen Schwerpunkt. Beide Antriebslinien ergänzen und befruchten sich dadurch.

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

Im Jahre 2009 wurden darüber hinaus die Arbeiten zur variothermen Prozessführung mit integrierten Induktoren und Impulskühlung im Rahmen eines DFG-Projektes abgeschlossen. Ergebnisse dazu sind veröffentlicht. Darüber hinaus wurde 2009 ein umfangreiches AiF-Projekt zur Nutzung der induktiven Temperierung bei der Herstellung von Komponenten für Brennstoffzellen bearbeitet. Zusätzlich startete ein Projekt zum Magnetspritzgießen.

Im Arbeitsgebiet **Zuverlässigkeit feinwerktechnischer Antriebe** liegt inzwischen die zweite Dissertation am IKFF als Entwurf vor. Sie behandelt die Zuverlässigkeit mechanischer Komponenten feinwerktechnischer Antriebssysteme. Die Dauerversuche zur Ermittlung der Ausfalldaten wurden vorzugsweise an Kleingetrieben vorgenommen. Die DFG-Forschergruppe „Systemzuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen“ ist damit beendet. Gemeinsam hat die Forschergruppe ihre Ergebnisse in einem Buch „Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme - Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen“ zusammengefasst. Es erschien zum Jahresanfang 2009. Die Fortsetzung in Form eines Sonderforschungsbereiches gelang trotz hervorragender Begutachtung des umfangreichen Antrages leider nicht.

1.3 Wissenschaftliche Arbeitsgebiete

Im Institut werden vier Forschungsschwerpunkte bearbeitet:

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

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

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

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

Auch das Arbeitsgebiet **Zuverlässigkeit feinwerktechnischer Antriebe** lässt sich in diesen Problemkreis einordnen. Im Rahmen der DFG-Forschergruppe „Systemzuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen“ bearbeitete das Institut das Thema „Zuverlässigkeit von elektromechanischen/mechatronischen Systemen am Beispiel feinwerktechnischer Antriebe/Aktorik“. Dadurch wurde Kompetenz in der Zuverlässigkeitstechnik, speziell zur Zuverlässigkeit feinwerktechnischer Antriebe aufgebaut. Dies betrifft sowohl die elektromechanischen als auch die mechanischen Komponenten derartiger Antriebe.

Im Detail werden folgende Inhalte bearbeitet:

Feinwerktechnische Aktorik

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

Präzisions-Spritzgießtechnologie

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

Theorie des Konstruktionsprozesses

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

Zuverlässigkeit feinwerktechnischer Antriebe

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

2 LEHRVERANSTALTUNGEN

2.1 Vorlesungen und Übungen für das Vordiplom

Konstruktionslehre III (Feinwerktechnik) (Schinköthe, Burkard)

Wintersemester 2008/2009: 101 Studenten (mach + famo)

Wintersemester 2009/2010: 50 Studenten (mach + famo)

16 Vorlesungen à 2 SWS

16 Vorlesungen à 1 SWS

16 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Burkard, Joerges, Keller, Mochel, Ulmer

Konstruktionslehre IV (Feinwerktechnik) (Schinköthe, Burkard)

Sommersemester 2009: 101 Studenten (mach + famo)

13 Vorlesungen à 2 SWS

13 Vorlesungen à 1 SWS

13 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Burkard, Joerges, Mochel, Rothenhöfer, Ulmer

2.2 Vorlesungen und Übungen für das Hauptdiplom

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

Wintersemester 2008/2009: 19 Studenten

Wintersemester 2009/2010: 22 Studenten

20 Vorlesungen à 2 SWS

10 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Burkard, Beier, Bobrowski

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

Wintersemester 2008/2009: 15 Studenten
 Wintersemester 2009/2010: 8 Studenten
 15 Vorlesungen à 2 SWS

Sommersemester 2009: 13 Studenten
 5 Vorlesungen à 2 SWS
 8 Übungen à 2 SWS
 Betreuer: Joerges, Ulmer, Keller

Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL (Schinköthe/Rothenhöfer/Ulmer)

Sommersemester 2009: 18 Studenten
 10 Vorlesungen à 2 SWS
 10 Übungen à 2 SWS
 Betreuer: Ulmer, Joerges, Zülch

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

Sommersemester 2009: 4 Studenten
 6 Vorlesungen à 2 SWS
 5 Übungen à 2 SWS
 Betreuer: Burkard, Zimmermann

2.3 Prüfungen

Fach	Termin	Kandidaten
KL III + IV (Feinwerktechnik)	F 2009	21
	H 2009	92
Grundlagen der Feinwerktechnik; Gerätekonstruktion und -fertigung (Pflichtfach, schriftlich)	F 2009	1
	H 2009	0
Grundlagen der Feinwerktechnik; Gerätekonstruktion und -fertigung (Kernfach, mündlich)	F 2009	12
	H 2009	1
Aktorik in der Feinwerktechnik - Berechnung, Konstruktion und Anwendung mechatronischer Komponenten (Kernfach, mündlich)	F 2009	5
	H 2009	12
Praxis des Spritzgießens in der Gerätetechnik; Verfahren, Prozesskette, Simulation	H 2009	4
Praktische FEM Simulation mit ANSYS und MAXWELL	H 2009	9
Hauptfach Feinwerktechnik	F 2009	12
	H 2009	8
Studienarbeit Feinwerktechnik	F 2009	9
	H 2009	9
Diplomarbeit	F 2009	2
	H 2009	2

2.4 Praktika

Hauptfachpraktikum Feinwerktechnik (Für Studierende des Hauptfachs Feinwerktechnik)

Sommersemester 2009

Versuch 1: „Gleichstrommotoren“
16 Teilnehmer 3 Termine
Betreuer: Engel, Bobrowski

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

Versuch 3: „Lineardirektantriebe“
16 Teilnehmer 4 Termine
Betreuer: Joerges, Ulmer

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

Wintersemester 2009/2010

Versuch 1: „Koordinatenmesstechnik“
9 Teilnehmer 2 Termine
Betreuer: Mochel

Versuch 2: „Spritzgießen“
7 Teilnehmer 2 Termine
Betreuer: Zimmermann, Zülch

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

Wintersemester 2009/2010

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

Versuch 2: „Schrittmotoren“
9 Teilnehmer 2 Termine
Betreuer: Joerges, Keller, Mochel

2.5 Exkursion

Am 1. Juli 2009 besuchten die Studierenden und Betreuer der Vorlesung "Praxis des Spritzgießens" die Firma ARBURG GmbH + Co. in Loßburg.

Auf dem Programm standen Vorführungen von Sonderverfahren des Spritzgießens. Ferner fand eine Führung durch die Anwendungstechnik und eine Besichtigung der Produktionseinrichtungen statt.

Beeindruckend war die hohe Fertigungstiefe in der Produktion und ein offenbar sehr angenehmes Betriebsklima.

Die Exkursion wurde von unserem ehemaligen Mitarbeiter Herr Dr.-Ing. Thomas Walther, Leiter der Anwendungstechnik bei der Firma ARBURG, betreut.

2.6 Seminar Feinwerktechnik

15.01.2009	Prüll, Christoph	Optimierung eines zweiphasigen Frequenzgenerators für die Ansteuerung von Vierquadrantenverstärkern mit dSPACE
22.01.2009	Keller, Bastian	Aufbau einer dSPACE-gestützten Entwicklungsumgebung für die Steuerung und Regelung zweiphasiger Ultraschallmotoren
22.01.2009	Keck, Alexander	Aufbau einer zweiphasigen Leistungselektronik für die Ansteuerung von Ultraschallmotoren durch dSPACE
22.01.2009	Keinert, Matthias	Entwicklung einer mikrocontrollerbasierten Leistungselektronik für die Ansteuerung zweiphasiger Ultraschallmotoren mit dSPACE

29.01.2009	Reutzsch, Benjamin	Aufbau einer Regelungsstruktur zur Verminderung der Rastkräfte eines Lineardirektantriebes
29.01.2009	Lutz, Jochen	Optimierung der Läufergeometrie eines elektrodynamischen Lineardirektantriebs zur Reduzierung von Rastkräften
05.02.2009	Mahlert, Stephan	Untersuchung der Messabweichung an Kunststoffmessschiebern
26.03.2009	Wengert, Nicolai	Untersuchung der Energieeffizienz vari- oothermer Prozessführung in der Spritzguss- technik
07.05.2009	Wang, Jing	Transiente Simulation eines Lineardirekt- antriebs mit ANSYS Workbench
13.05.2009	Lang, Christian	Weiterentwicklung eines Motorprüfstandes zur Aufnahme und Verifikation von Motor- kennlinien
13.05.2009	Maier, Matthias	Entwicklung und Aufbau eines Systems zur Messung der Oberflächentemperatur von Spritzgusswerkzeugen mit Hilfe von Lab- VIEW™
13.05.2009	Horneff, Daniel	Entwicklung und Programmierung einer Datenbank zur Organisation von Dauerlauf- prüfstandsdaten
18.06.2009	Nguyen, Minh	Strukturmechanische FEM Simulation an Spritzgusswerkzeugen

- 09.07.2009 Kasum, Mathias Simulation zur Untersuchung und Vermeidung von Rastkräften zweier elektrodynamischer Lineardirektantriebe
- 12.11.2009 Nguyen, Minh Entwicklung eines Simulationssystems zur Untersuchung der Aufmagnetisierung kunststoffgebundener Dauermagnete

3 WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN, STUDIEN- UND DIPLOMARBEITEN

3.1 Dissertationen

Beier, Michael	Lebensdaueruntersuchungen an feinwerktechnischen Planetenradgetrieben mit Kunststoffverzahnung (eingereicht)
Rothenhöfer, Elmar	Entwicklungsgrundlagen für piezoelektrische Ultraschallmotoren am Beispiel eines linearen Antriebs mit gekoppelten Moden (eingereicht)

3.2 Diplomarbeiten am IKFF

05/2009	Keller, Bastian	Aufbau einer dSPACE-gestützten Entwicklungsumgebung für die Steuerung und Regelung zweiphasiger Ultraschallmotoren
07/2009	Blum, Gerald	Echtzeit-Bildverarbeitung durch Online-Analyse von Videosignalen (Technikpädagogik, Anerkennung)

3.3 Studienarbeiten am IKFF

01/2009	Götz, Johannes	Aufbau und Inbetriebnahme eines linearen Ultraschallmotors mit orthogonal angeordneten Langevin-Vibratoren
---------	----------------	--

02/2009	Lutz, Jochen	Optimierung der Läufergeometrie eines elektrodynamischen Lineardirektantriebes zur Reduzierung von Rastkräften
02/2009	Reutzsch, Benjamin	Aufbau einer Regelungsstruktur zur Verminderung der Rastkräfte eines Lineardirektantriebes
02/2009	Mahlert, Stephan	Untersuchung zur Genauigkeit von Kunststoffmessschiebern
03/2009	Prüll, Christoph	Optimierung eines zweiphasigen Frequenzgenerators für die Ansteuerung von Vierquadrantenverstärkern mit dSPACE
03/2009	Wengert, Nicolai	Untersuchung der Energieeffizienz variothermer Prozessführung in der Spritzgusstechnik
04/2009	Retzbach, Adrian	Entwicklung und Aufbau eines zweiphasigen Frequenzgenerators für die Ansteuerung von Vierquadrantenverstärkern mit dSPACE
04/2009	Keinert, Matthias	Entwicklung einer mikrocontrollerbasierten Leistungselektronik für die Ansteuerung zweiphasiger Ultraschallmotoren mit dSPACE
04/2009	Wang, Jing	Transiente Simulation eines Lineardirektantriebs mit ANSYS Workbench
05/2009	Lang, Christian	Weiterentwicklung eines Motorprüfstandes zur Aufnahme und Verifikation von Motorkennlinien
05/2009	Horneff, Daniel	Entwicklung und Programmierung einer Datenbank zur Organisation von Dauerlaufprüfstandsdaten

05/2009	Maier, Mathias	Entwicklung und Aufbau eines Systems zur Messung der Oberflächentemperatur von Spritzgusswerkzeugen mit Hilfe von LABView™
06/2009	Nguyen, Minh	Strukturmechanische FEM-Simulation an Spritzgusswerkzeugen
08/2009	Keck, Alexander	Aufbau einer zweiphasigen Leistungselektronik für die Ansteuerung von Ultraschallmotoren durch dSPACE
08/2009	Kasum, Mathias	Simulation zur Untersuchung und Vermeidung von Rastkräften zweier elektrodynamischer Lineardirektantriebe

4 ARBEITSGEBIETE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITER

4.1 Aktorik

Engel, M.

Lehre:

Betreuung der Gruppenübungen in KL 3/4.

Aufbau und Skripterstellung des Hauptfach-Praktikums „Gleichstrommotoren“.

Durchführung des Praktikums „Gleichstrommotoren“ in Kooperation mit Herrn Bobrowski.

Forschung:

Recherche zu Wirbelstrom- und Hystereseverlusten in der Elektrotechnik. Literatursammlung zum Stand der Forschung zu Wirbelstrom- und Hystereseverlusten.

Marktstudie Lineardirektantriebe.

Versuch und Simulation von Wirbelstromverlusten in Rückschlussmaterialien mit Ansoft MAXWELL.

Konzipierung von Prüfständen zur Verlustmessung bei Lineardirektantrieben.

Sonstiges:

Teilnahme an Vorträgen, Workshops und Kongressen im Rahmen der GSaME Graduate School of advanced Manufacturing Engineering.

Arbeit zum Thema „Mobile Lasermikrobearbeitung - Production on demand“ im Rahmen des GSaME-Kernprogramms, zusammen mit Fr. Stefanica, Fr. Wentsch und Hr. Wolynski, Veröffentlichung für 2010 geplant.

Dokumentation des IKFF-Konstruktionslehre-Wettbewerbs.

Joerges, P.

Lehre:

Betreuung der Vordiplomsübungen in KL 3/4, Vortrags- und Gruppenübungen; Betreuung der Übungskomplexe „Achsen-Wellen“ und „Kupplungen“ (KL 3/4); Ausarbeitung von Aufgabenstellungen und Musterlösungen für Übungsaufgaben, Korrektur von Übungsaufgaben, Erstellung von Prüfungsaufgaben und Musterlösungen; Prüfungsbeisitz Aktorik, Durchführung des FEM-Praktikums mit MAXWELL, Durchführung des APMB-Praktikums „Schrittmotoren“, Durchführung der Hauptfachübungen (Aktorik) „Lineardirektantriebe“ (Schwerpunkt Regelung) und des zugehörigen Hauptfachpraktikums „Lineardirektantriebe“. Betreuung von Studien- und Diplomarbeiten.

Forschung:

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

Industrieprojekte:

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

Sonstiges: PC-Administration.

Keller, B.

Lehre:

Betreuung der Vordiplomsübungen in KL 3/4.

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

Vorbereitung und Durchführung der Vortragsübung „Ultraschallantriebe“ im Hauptfach Aktorik und Erstellung eines dazugehörigen Skriptes. Vorbereitung und Durchführung des Praktikums „Ultraschallantriebe“.

Forschung:

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

Sonstiges:

PC Administration.

Bearbeitung von Industrieaufträgen.

Mochel, F.

Lehre:

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

Organisation des Konstruktionslehrewettbewerbs.

Durchführung des Hauptfach-Praktikums „Koordinatenmesstechnik“.

Durchführung des APMB-Praktikums „Schrittmotoren“.

Betreuung von Studien- und Diplomarbeiten. Betreuung einer Gruppenstudienarbeit (3 Studenten): „Untersuchung aerostatisch geführter Linearantriebe mit passiven Läufern“.

Forschung:

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

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

Sonstiges: Betreuung der 3D-Koordinatenmessmaschine.

Ulmer, M.

Lehre:

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

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

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

Betreuung der Internet-Lern-Plattform ILIAS.

Industrieprojekte:

Simulative Untersuchungen zu bürstenbehafteten Gleichstrommotoren mit Matlab/Simulink.

Sonstiges:

Betreuung des UNIX-Netzwerkes und der Netzwerksicherheit am Institut.

4.2 Spritzgießen

- Burkard, E. Untersuchung des Einflusses von Werkzeugbeschichtungen auf die Entformungskraft bei Spritzgussbauteilen aus Thermoplastwerkstoffen.
- Bearbeitung von Industriaufträgen zur Entformung von Spritzgussteilen.
- Betreuung der Studenten im Vor- und Hauptdiplom.
- Betreuung von Vorlesungen und Übungen im Vor- und Hauptdiplom.
- Organisation des Konstruktionslehrewettbewerbs.
- Betreuung des Rasterelektronenmikroskops und Untersuchung von Proben, APMB-Versuch „Rasterelektronenmikroskopie“.
- Betreuung der Koordinatenmessmaschine und Vermessung von Werkstücken, Hauptfach-Versuch „Koordinatenmesstechnik“.
- Administration und Wartung der UNIX-Rechner und des Institutsnetzes.
-
- Zimmermann, T. Lehre:
- Betreuung der Vordiplomsübungen in KL 3/4 in Form von Gruppenübungen.
- Betreuung der FEM-Testate.
- Durchführung Praktikum „Spritzgießsimulation mit Moldflow“ und „Spritzgießen“.
- Betreuung von Studien- und Diplomarbeiten.
- Exkursion zur Fa. ARBURG.
- Industrieprojekt:
- Auslegung und Simulation einer induktiv beheizten Spritzgussform für Bipolarplatten (AiF-Projekt).
-
- Zülch, M. Lehre:
- Betreuung der Vordiplomsübungen in KL 3/4 (Gruppenübungen), Korrektur von Übungsaufgaben.

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

Praktikum „Spritzgießen“ im Hauptdiplom.

Betreuung von Studien- und Diplomarbeiten.

Forschung:

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

Unterstützende Arbeiten zu dem AiF-Projekt "Variotherme Prozessgestaltung mittels Induktionstemperierung zur spritzgusstechnischen Verarbeitung hochgefüllter Thermoplaste in Brennstoffzellenanwendungen".

Industrieprojekte:

Bearbeitung eines öffentlich geförderten industriellen Forschungsprojektes zur Herstellung kunststoffgebundener Dauermagnete.

Verschiedene beratende Tätigkeiten zu Potential und Auslegung induktiver Werkzeugheizsysteme.

4.3 Zuverlässigkeitstechnik

Bobrowski, S. Lehre:

Durchführung der Vortragsübungen „Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme“ im Rahmen der Hauptdiplomsvorlesung Grundlagen der Feinwerktechnik; Gerätekonstruktion und -fertigung.

Durchführung des Praktikums „Gleichstrommotoren“ (in Kooperation mit Herrn Engel).

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

Forschung:

Mitarbeit in der DFG-Forschergruppe zum Thema „Systemzuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen“ mit dem Arbeitsschwerpunkt „Zuverlässigkeit von elektromechanischen/

mechatronischen Systemen am Beispiel feinwerktechnischer Antriebe/Aktorik" (Vorbereitungen für neuen SFB-Projekt-Antrag).

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

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

Kooperation mit Industriepartnern.

Sonstiges:

Bearbeitung von Industrieaufträgen.

Ansprechpartner für Literaturrecherchen.

5 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

5.1 Veröffentlichungen

Bücher:

Bertsche, B.; Göhner, P.; Jensen, U.; Schinköthe, W.; Wunderlich, H.-J.: Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme - Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 2009.

Darin Schinköthe, W.; Beier, M.; Köder, T.: Abschnitt 6 Systemzuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen am Beispiel feinwerktechnischer mechatronischer Systeme.

In Schätzing, W.; Ulmer, M.; Schliesch, T.; Müller, G.: FEM für Praktiker, Band 4, 2. Auflage. Renningen: Expert Verlag 2009.

Darin Ulmer, M.: Teil 2 Kapitel 1.2; 1.3; Teil 3 Kapitel 2.8.4; 3.1.5; 3.4.2.

Artikel oder Tagungsbeiträge:

Schinköthe, W.; Preißner, L.; Witt, G.; Zimmermann, T.; Zülch, M.: Nutzung der variothermen Prozessführung bei der Herstellung von Bipolarplatten. 2. Workshop AiF-Brennstoffzellenallianz. Zentrum für Brennstoffzellentechnik Duisburg, Duisburg, 17.02.2009.

Schinköthe, W.; Zimmermann, T.; Zülch, M.: Anwendungsgebiete der induktiven Erwärmung im Bereich der Kunststoffverarbeitung. Vortrag 21. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 18./19.03.2009. Tagungsband.

Rothenhöfer, E.; Schinköthe, W.; Keck, A.; Keller, B.; Retzbach, A.; Pruell, C.: Control and Excitation of Ultrasonic Motors Using a Test-Bench with Dedicated Electronic Circuits. Proceedings of the euspenn International Conference – San Sebastian - June 2009.

Schinköthe, W.; Zülch, M.: DFG-Forschungsvorhaben Temperierung von Spritzgusswerkzeugen durch vollständig integrierte induktive Beheizung. Abschlussbericht, SCHI 457/9.

Schinköthe, W.; Zimmermann, T.: Induktion und Spritzguss - Neue Möglichkeiten.
1. Produktionstechnisches Kolloquium Brennstoffzelle, Duisburg, 01.10.2009.

Hausmann, U. P.; Joerges, P.; Heinzl, J.; Talke, F. E.: Nano-texturing of magnetic recording sliders via laser ablation. Microsystem Technologies, Volume 15, Numbers 10-11, Oktober 2009.

Ulmer, M.; Schinköthe, W.: Thermische Analyse der Antriebsspulen von Lineardirektantrieben mit MAXWELL und ANSYS. ANSYS Conference and 27. CADFEM Users Meeting, Leipzig, 18.-20.11.2009.

Patente:

Clauß, C.; Schinköthe, W.; Welk, C.: Elektrischer Antrieb. OS DE 10 2006 042 707 A1 vom 12.09.2006, offengelegt 27.03.2008, jetzt erschienen.

5.2 Gremienarbeit

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe:

Mitglied des Wissenschaftlichen Beirates der Zeitschrift Mechatronik F&M

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

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

Mitglied des Beirats der GMM

Fachbereichsleiter Fachbereich 3 Feinwerktechnik und Mechatronik

Mitglied des Fachausschusses 3.3 Elektrische Geräte- und Stellantriebe

Mitglied im Arbeitskreis Universitätsprofessoren der Mikro- und Feinwerktechnik.

Ulmer, M.:

Leitung des Arbeitskreises für Elektromechanische Simulation mit ANSYS und MAXWELL.

5.3 Tag der offenen Tür

Schatz - Graben - Höhle? Ali Baba versucht einen Schatz in seiner Höhle zu verstecken. Auf der Flucht muss er aber den Graben vor seiner Höhle überqueren. Wie viel vom Schatz wohl im Graben landet? Schafft er es, die Höhle vor den Verfolgern zu verschließen?

So lautete die umgangssprachliche Formulierung der Aufgabenstellung beim 17. Konstruktionswettbewerb des Instituts für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik am Tag der Wissenschaft der Universität Stuttgart. Was aber mussten die Maschinen der Teilnehmergruppen nun wirklich tun?

Sie sollten eine Maschine entwickeln, die Kugeln, die sich in einem Behälter auf der Fläche A befinden, in einen Behälter auf der Fläche B transportieren. So klingt das Ganze dann doch etwas technischer und passender für Studierende des Maschinenbaus und der Fahrzeug- und Motorentchnik.

Zwischen den beiden „Flächen“ war ein Abstand von einem Meter, den es mittels verschiedener Hilfen zu überwinden galt. Zur Verfügung standen ein vertieft angebrachter Steg, ein engmaschiges Netz, ein Rohr und eine Leiter. Als weitere Herausforderungen waren die Größe, das Gewicht und die Energieversorgung der kleinen Maschinen eingeschränkt, die die Aufgabe vollkommen selbständig, ohne Eingriff eines Bedieners, lösen mussten.

Für die Studierenden im vierten Semester stellte sich bei der Entwicklung der Maschinen zuerst die Frage, welche Hilfe sie zum sicheren Überwinden des Grabens verwenden sollten. Es musste entschieden werden, ob es zum Beispiel einfacher ist, durch ein enges Rohr zu fahren, zwischen Netz und Rohr mit einem breiten Fahrwerk zu balancieren oder lieber über das Netz zu fahren und vor der Höhle dann noch einen scharfen Haken zu schlagen.

Diese Varianten wurden auch von den drei schnellsten Teams der 23 Teilnehmergruppen gewählt und alle drei Maschinen waren beinahe gleichwertig. Zwischen dem ersten und dem dritten Platz lag ein Zeitunterschied von nur zwei Sekunden.

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

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

ARBURG GmbH & Co, Audi AG, BILZ Werkzeugfabrik GmbH & Co. KG, Carl Hanser Verlag GmbH & Co, Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG, Dr. Ing. Paul Christiani GmbH & Co KG, G. Ulmer Automation GmbH, HAHN+KOLB Werkzeuge GmbH, H. Stoll GmbH & Co. KG, JOOLA Tischtennis GmbH & Co. KG, Kendrion Binder Magnete GmbH, KEYENCE DEUTSCHLAND GmbH, Springer Verlag GmbH und WEILER Werkzeugmaschinen GmbH.

Ergebnisse:

1. Platz: Axel Holzwarth, Felix Keck, Axel Maier, Martin Werz
2. Platz: Hans Christof, Waldemar Kreis, Sebastian Thiemt, Johannes Thumm
3. Platz: Andreas Bürkle, Marius Langenkamp, Martin Radtke-Gaeta, Felix Schmidt.

6 KONGRESSE, TAGUNGEN UND MESSEN

Prof. Schinköthe, W.:

- 2. AiF Workshop Brennstoffzellenallianz, Duisburg, 17.02.2009
- „Zukunft der Produktentwicklung“. Jahrestagung des Berliner Kreises, Ulm, 13.11.2009
- Fertigungstechnisches Kolloquium Stuttgart, 10./11.09.2008

Bobrowski, S.:

- Schulung Technische Akademie Esslingen „Zahnräder aus Kunststoff“, 24./25.09.2009
- Schulung National Instruments „Application sucht Bus“, Stuttgart, 11.11.2009

Burkard, E.:

- ARBURG Technologietage, Loßburg, 19.03.2009
- FAKUMA, Friedrichshafen, 15.10.2009

Engel, M.:

- GSaME-Jahrestagung, Friedrichshafen, 24./25.09.2009
- „Wirtschaftspartner Korea“, Börse Stuttgart, 12.11.2009
- Matlab-Schulung Statistik, Stuttgart, 03.12.2009

Joerges, P.:

- Kleinmaschinen-Kolloquium, Ilmenau, 19./20.03.2009
- ANSYS/Ansoft Informationstage: Entwicklung elektromagnetischer Komponenten und Systeme, Stuttgart, 16.09.2009
- Fachmesse Productronica 2009, München, 13.11.2009

Keller, B.:

- CADFEM Seminar „Strukturdynamische Berechnungen mit ANSYS“, Grafing, 01.09.-04.09.2009

Ulmer, M.:

- „Labview Einführung“, TAE Esslingen, 09./10.02.2009
- „Labview Messtechnik Praktikum“, TAE Esslingen, 05./06.03.2009
- Kleinmaschinen-Kolloquium, Ilmenau, 19./20.03.2009
- ANSYS V12 UPDATE, Stuttgart, 19.06.2009

- CADFEM Seminar „Elektrisch-thermisch-mechanische Kopplung“, Grafing, 25./26.06.2009
- Infotag MAXWELL, Stuttgart, 16.09.2009
- ANSYS Conference & 27. CADFEM Users Meeting, Leipzig, 18.-20.11.2009

Zimmermann, T.:

- 2. AiF Workshop Brennstoffzellenallianz, Duisburg, 17.02.2009
- ARBURG Technologietage, Loßburg, 19.03.2009
- CADFEM Seminar „Elektrisch-thermisch-mechanische Kopplung“, Grafing, 25./26.06.2009
- 13. Engelskirchener Kunststofftechnologietage, Engelskirchen, 18.09.2009

Zülch, M.:

- ARBURG Technologietage, Loßburg, 19.03.2009
- 13. Engelskirchener Kunststofftechnologietage, Engelskirchen, 18.09.2009
- Fachmesse Productronica 2009, München, 13.11.2009

7 WERKSTATTBERICHT

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

8 ANHANG - Ausgewählte Veröffentlichungen

In diesem Jahr hängen wir exemplarisch eine Veröffentlichung aus dem Bereich Linearantriebe sowie eine Veröffentlichung aus dem Bereich Spritzgießen an.

Schinköthe, W.; Zimmermann, T.; Zülch, M.: Anwendungsgebiete der induktiven Erwärmung im Bereich der Kunststoffverarbeitung. Vortrag 21. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 18./19.03.2009. Tagungsband.

Ulmer, M.; Schinköthe, W.: Thermische Analyse der Antriebsspulen von Lineardirektantrieben mit MAXWELL und ANSYS. ANSYS Conference and 27. CADFEM Users Meeting, Leipzig, 18.-20.11.2009.

ANWENDUNGSGEBIETE DER INDUKTIVEN ERWÄRMUNG IM BEREICH DER KUNSTSTOFFVERARBEITUNG

ANWENDUNGSGEBIETE DER INDUKTIVEN ERWÄRMUNG IM BEREICH DER KUNSTSTOFFVERARBEITUNG

M. Zülch¹, T. Zimmermann¹ und W. Schinköthe¹

¹ IKFF, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9; 70569 Stuttgart
Tel.: + 49 (0) 711 685 66402, Fax: + 49 (0) 711 685 56402, email: spritzguss@ikff.uni-stuttgart.de

Kurzfassung: In Untersuchungen am Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik (IKFF) konnte das Potential einer variothermen Werkzeugtemperierung im Spritzguss nachgewiesen werden. Durch die induktiv variotherme Werkzeugtemperierung ist die Herstellung von Kunststoffformteilen, welche mit den Standardverfahren nicht oder nur mit erheblichen Qualitätsverlusten herstellbar sind, mit der für die Massenfertigung erforderlichen Zykluszeit und Qualität möglich.

Darüber hinaus eröffnet die große Variabilität dieses Verfahrens eine Vielzahl möglicher neuer Anwendungsgebiete im Bereich des Kunststoffspritzguss bei der Verarbeitung neuer, hochgefüllter Kunststoffe wie z.B. CIM, MIM oder grafitgefüllte Polymere.

Ebenfalls denkbar ist ein Einsatz dieses Verfahren bei der Herstellung geschäumter Kunststoffteile. Darüber hinaus ist ein möglicher Einsatz der induktiven Erwärmung als ein Mittel zur Verkürzung der Rüstzeiten bei Großwerkzeugen zu untersuchen.

Weitere denkbare Anwendungsgebiete der induktiven Temperierung für andere, urformende Verfahren der Kunststoffverarbeitung sind im Bereich der Duroplast- bzw. Elastomerverarbeitung, dem Spritzprägen, dem Folienprägen, dem Heißpressen und dem Laminieren von Faserverbundbauteilen zu suchen.

Abstract: In Untersuchungen am Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik (IKFF) konnte das Potential einer variothermen Werkzeugtemperierung im Spritzguss nachgewiesen werden. Durch die induktiv variotherme Werkzeugtemperierung ist die Herstellung von Kunststoffformteilen, welche mit den Standardverfahren nicht oder nur mit erheblichen Qualitätsverlusten herstellbar sind, mit der für die Massenfertigung erforderlichen Zykluszeit und Qualität möglich.

Darüber hinaus eröffnet die große Variabilität dieses Verfahrens eine Vielzahl möglicher neuer Anwendungsgebiete im Bereich des Kunststoffspritzguss bei der Verarbeitung neuer, hochgefüllter Kunststoffe wie z.B. CIM, MIM oder grafitgefüllte Polymere.

Ebenfalls denkbar ist ein Einsatz dieses Verfahren bei der Herstellung geschäumter Kunststoffteile. Darüber hinaus ist ein möglicher Einsatz der induktiven Erwärmung als ein Mittel zur Verkürzung der Rüstzeiten bei Großwerkzeugen zu untersuchen.

Weitere denkbare Anwendungsgebiete der induktiven Temperierung für andere, urformende Verfahren der Kunststoffverarbeitung sind im Bereich der Duroplast- bzw. Elastomerverarbeitung, dem Spritzprägen, dem Folienprägen, dem Heißpressen und dem Laminieren von Faserverbundbauteilen zu suchen.

Schlagwörter: Induktive Erwärmung, Variothermprozess, Spritzgießen, Kunststoffverarbeitung

Keywords: Inductive Heating, variothermal processing, injection moulding, plastics processing

1 Einleitung

Die induktive Zusatztemperierung zur Realisierung einer variothermen Prozessführung im Kunststoffspritzguss ist zentrales Thema der Forschung am Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart. Bereits seit Mitte der 90er-Jahre wird ihr Einsatz gezielt untersucht und weiterentwickelt [1].

Im Rahmen dieser Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass diese Form der Zusatztemperierung entscheidend zu einer drastischen Verkürzung der Zykluszeiten gegenüber anderer Verfahren wie der Öltemperierung beitragen kann und somit die kostenbewusste Fertigung auch hochkomplexer und anspruchsvoller Formteile, wie zum Beispiel Mikrobauteile und mikrostrukturierter Oberflächen im industriellen Umfeld, überhaupt erst ermöglicht. Zentrale Fragestellungen, wie die Integration eines induktiven Temperiersystems sowohl in einen bestehenden Prozess als auch in die Neukonstruktion eines Werkzeugs, konnten durch die zum Teil öffentlich geförderten Projekte zu diesem Thema aufgeklärt werden [2]. Auch die elektromagnetische und thermische Auslegung des Gesamtsystems konnte durch Einsatz rechnergestützter Simulationsverfahren optimiert werden [3].

Auf Grund der so gebildeten Wissensbasis wurden vielfältige weitere Anfragen an das IKFF gestellt und konnten im Rahmen akademischer bzw. industriell geförderter Forschung bearbeitet werden. Diese Projekte und weitere Voruntersuchungen konnten vielfältige Anwendungsbereiche dieses hochdynamischen Temperierungsverfahrens für die Kunststoffverarbeitung im Allgemeinen eröffnen.

2 Grundlagen der induktiven Erwärmung

Der Vorteil der induktiven Temperierung im Vergleich zu alternativen Verfahren ergibt sich im Wesentlichen durch die hohe Energiedichte, die mit ihrer Hilfe erzeugt werden kann (Tabelle 1).

Tabelle 1: Leistungübertragung im Vergleich [4]

Erwärmungsart	Wärmestromdichte in W/m ²
Konvektion	0,5
Strahlung (Elektroofen)	8
Wärmeleitung	20
Infrarot-Punktstrahler	200
Flamme (Brenner)	1.000
Dielektrische Erwärmung	ca. 25.000
Mikrowelle	ca. 35.000
Induktionserwärmung	ca. 30.000
Laser (CO ₂)	10 ⁸
Elektronenstrahl	10 ¹⁰

Realisiert wird diese hohe übertragbare Energiedichte durch das Transformatorprinzip, bei dem in ein Werkstück ein elektromagnetisches Feld mit der Erregungsfrequenz f_{err} eingebracht wird. Ist das Werkstück elektrisch leitfähig (κ), werden in diesem hierdurch Wirbelströme I_w erzeugt, die auf Grund des Skin效ektes in die Randschichten verdrängt werden (Abb. 1).

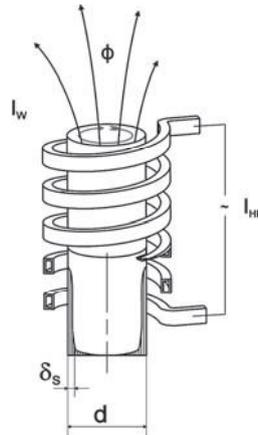


Abb. 1: Prinzip der induktiven Erwärmung

Die gesamte Stromtragfähigkeit des Werkstücks kann hierbei in die Skintiefe δ_s konzentriert aufgefasst werden.

$$\delta_s = \frac{1}{\sqrt{\pi k \mu_0 \mu_r f_{err}}} \quad (1)$$

Diese Wirbelströme leisten am Ohm'schen Widerstand R_Ω des Werkstücks eine Leistung, die in Form von Wärme P_J frei wird.

$$P_J = I_W^2 R_\Omega \quad (2)$$

Eine weitere Verstärkung der Wärmestromdichte ist durch die Verwendung ferromagnetischer Werkstoffe ($\mu_r \gg 1$) möglich. Der Ferromagnetismus führt gemäß Formel 1 dazu, dass ein durchdringendes elektromagnetisches Feld noch weiter in die Oberfläche des Werkstücks verdrängt und dort konzentriert wird, was nach Formel 2 eine Erhöhung der erzeugten Wärmeleistung zur Folge hat.

Die Wärme wird also direkt in den Volumina erzeugt, die von dem elektromagnetischen Feld durchdrungen werden. Dies hat zur Folge, dass im Gegensatz zu anderen bereits etablierten Heizverfahren nicht das gesamte Werkzeug auf ein höheres Temperaturniveau gebracht werden muss, um einen Temperaturhub auf der Oberfläche zu realisieren, sondern nur eine Randschicht von wenigen Millimetern. Dies hat eine starke Reduktion der Zykluszeiten zur Folge. Auch kann die einzubringende Energiemenge hierdurch reduziert werden, was neben wirtschaftlichen Aspekten auch zur Folge hat, dass die insbesondere in variothermen Prozessen notwendige Kühlzeit auf Ausgangstemperatur reduziert werden kann.

3 Induktive Zusatztemperierung im Kunststoffspritzguss

Bezogen auf die variotherme Prozessführung im Kunststoffspritzguss konnte im Rahmen mehrerer Forschungsvorhaben das Potential induktiver Zusatztemperierung weitgehend aufgeklärt werden.

Bei dieser Verfahrensvariante des Standardspritzgussprozesses wird durch eine Zusatztemperierung die Kavität eines Spritzgusswerkzeugs vor dem Einspritzen des Kunststoffs auf ein erhöhtes Temperaturniveau zumeist weit oberhalb der Entformungstemperatur gebracht, der Kunststoff eingespritzt und im Anschluss daran das Werkzeug mit dem Formteil wieder auf die Entformungstemperatur abgekühlt. Durch diese Vorgehensweise ist es möglich, auch feinstrukturierte Formteile mit höchsten Fließweg-Schichtdickenverhältnissen, wie sie insbesondere im Mikrospritzguss vorkommen, geometriehaltend abzuformen, was durch eine vorzeitige Erstarrung der Randschicht der Schmelze im Standardprozess nicht möglich ist (Abb. 2).

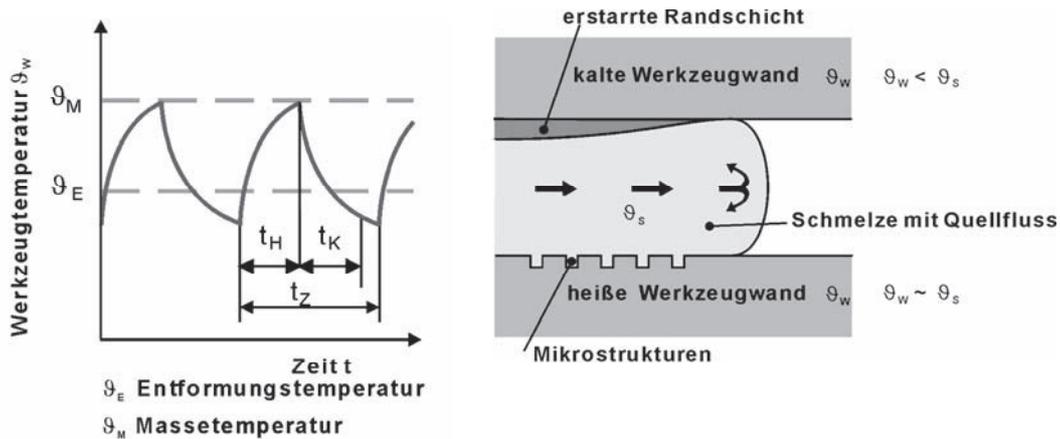


Abb. 2: Einfluss der variothermen Prozessführung auf die Abformung

Auch konnte nachgewiesen werden, dass der gezielte Einsatz einer variothermen Prozessführung Bindekräfte im Bereich von Ausbrüchen im Formteil reduzieren kann.

Grundsätzlich lassen sich bei der Umsetzung induktiver Systeme zwei Vorgehensweisen unterscheiden, die zum einen abhängig sind von der zu erwärmenden Geometrie oder Kavität, zum anderen jedoch auch von dem Zeitpunkt der Werkzeugentwicklung, bei dem die Entscheidung für eine induktive Zusatztemperierung gefallen ist.

3.1 Externe Zusatztemperierung

Bei der extern realisierten Zusatztemperierung wird ein der Kavitätsgeometrie angepasster Induktor durch ein mechanisch, pneumatisch oder hydraulisch ausgeführtes Handlingsystem in die Trennebene eines geöffneten Spritzgusswerkzeugs eingefahren. Der Induktor kann so gezielt die Oberfläche der Kavität erwärmen (Abb. 3).

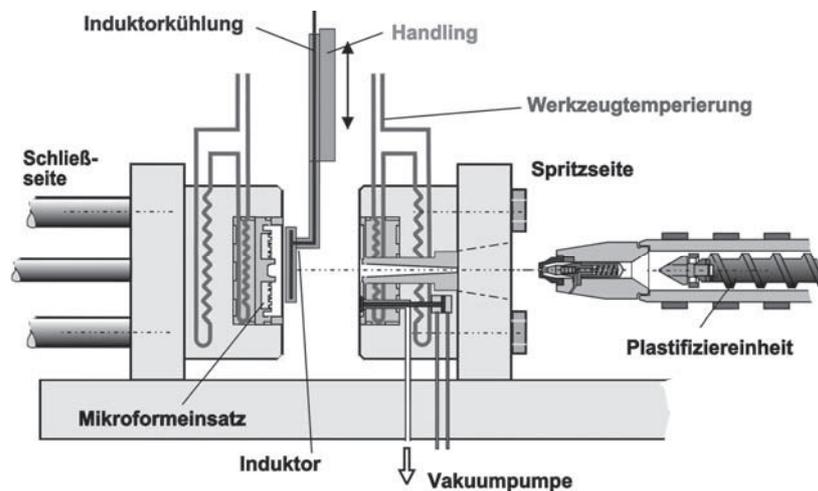


Abb. 3: Externe Zusatztemperierung

Dieses Verfahren bietet sich in erster Linie bei einer Implementierung des induktiven Systems nach Inbetriebnahme eines Werkzeugs sowie zu Voruntersuchungen zum Effekt der variothermen Prozessführung an, da keine Eingriffe in das Werkzeug notwendig sind und die erforderlichen Komponenten Induktor, Handling und Generator auch nachträglich hinzugefügt werden können.

Auch bietet sich das externe System grundsätzlich für großflächige Formteile mit nur schwach ausgeprägter Topologie an, wie sie zum Beispiel im Automobil-Bereich, aber auch bei mikrostrukturierten

Formteilen zu finden sind. Dabei lassen sich mit dem System die höchsten Temperaturgradienten aller untersuchten induktiven Systeme erreichen, was sich positiv auf die erreichbare Zykluszeit auswirkt.

Bei der Erwärmung komplex strukturierter Kavitäten mit ausgeprägter Topologie lassen sich diese Systeme nur beschränkt anwenden, da durch den Aufbau des Induktors aus Rohmaterial zur Realisierung der Innenkühlung der Induktor nicht ausreichend nah an die Kavität geführt werden kann. Auch muss die Temperatur, auf die das Werkzeug erwärmt wird, sehr hoch gewählt werden, da bereits während des Schließens des Werkzeugs Wärme in den hinteren Bereich des Werkzeugs abfließt und nicht mehr für den zu erzielenden Temperaturhub zur Verfügung steht. Hierdurch kann es, gegebenenfalls verstärkt durch die thermische Trennung einzelner Erwärmungszonen durch eine ausgeprägte Topologie, zu einer starken Überhitzung des Werkzeugs bis über die Belastungsgrenze des Materials kommen.

3.2 Vollständig integrierte Zusatztemperierung

Für Abhilfe kann hier die vollständig integriert realisierte Bauform sorgen. Hierbei wird der Induktor in das Werkzeug selbst integriert und erwärmt die Kavität von hinten (Abb. 4).

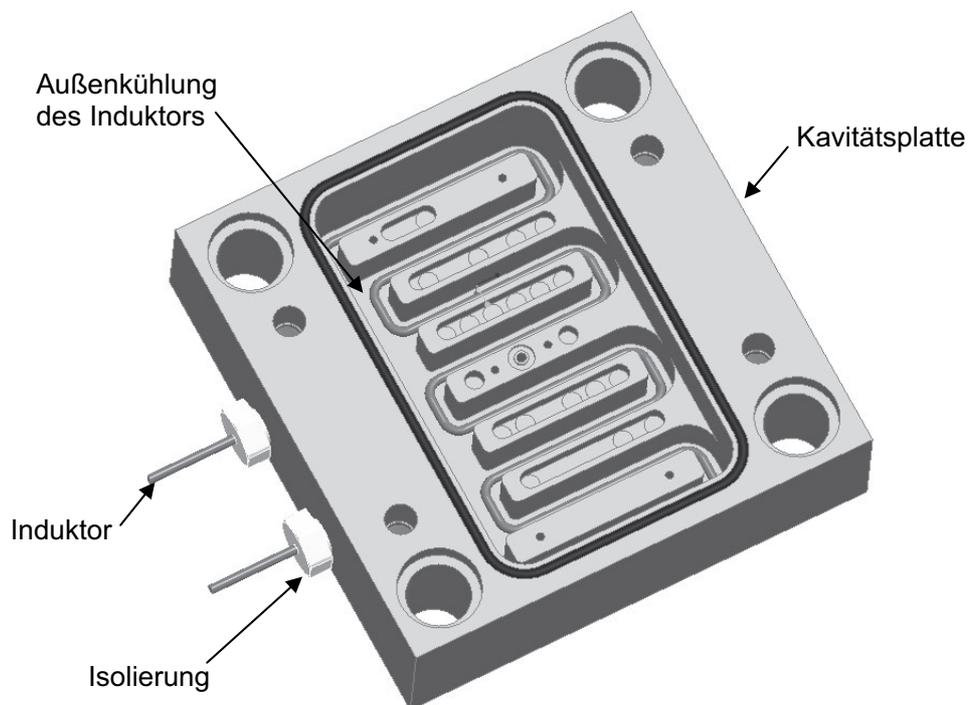


Abb. 4: Vollständig integrierte Zusatztemperierung (Rückseitige Ansicht)

Als Vorteil dieser Erwärmungsmethode ist die weitgehend freie Gestaltbarkeit der zu erwärmenden Kavität zu sehen. Durch den Wegfall der Innenkühlung des Induktors ist der Induktordurchmesser nur noch von der Stromtragfähigkeit des Induktormaterials eingeschränkt und kann somit gezielter an die Geometrie angepasst werden. Da die Erwärmung der Kavität durch Wärmeleitung über eine kurze Strecke erfolgt, können die bei der externen Erwärmung von Überhitzung gefährdeten Bereiche schonender erwärmt werden.

Als weiterer Vorteil des Verfahrens ist die Möglichkeit anzusehen, die Erwärmung bereits bei noch geschlossenem Werkzeug zu starten und bis in die Nachdruckzeit aufrecht zu erhalten. Somit ist es denkbar, Angüsse und Fließwege in der Kavität gezielt länger offen zu halten, was beispielsweise zur Bekämpfung von Einfallstellen in dickwandigen Formteilen wie optischen Linsen herangezogen werden kann.

Im Rahmen eines aktuellen Forschungsvorhabens konnten jedoch auch die Nachteile des vollständig integrierten Systems aufgezeigt werden. So lässt sich eine Integration des Systems in ein bestehendes Werkzeug nur selten durchführen und muss daher bereits in der Entwurfsphase berücksichtigt werden. Auch steigt die zur Erwärmung der Kavität notwendige Zeit durch die verzögernde Wärmeleitung stark an, was nur beschränkt durch den frühen Beginn der Erwärmung ausgeglichen werden kann und somit zu einer Verlängerung der Zykluszeit führt. Die Integration der vielfältigen Funktions-träger, wie Auswerfer, Temperierkanäle, Induktor und Induktoraußenkühlung bzw. Blitzkühlung, stellt den Werkzeugbau außerdem vor große Herausforderungen.

4 Verfahrenserweiterung im Bereich des Kunststoffspritzguss durch den Einsatz der induktiven Temperierung

Die induktive Erwärmung bietet vielfältige Möglichkeiten die bereits etablierten Spritzgussverfahren in vielerlei Bereichen zu erweitern.

4.1 Erweiterung der Materialpalette

Neben der Verfahrenserweiterung ermöglicht die induktive Werkzeugtemperierung auch die Verarbeitung neuartiger Polymere mit speziellen Materialeigenschaften.

4.1.1 Glasfaserverstärkte Polymere

Durch die induktiv-variotherme Prozessführung wird beispielsweise die Verarbeitung sowohl von lang- als auch von kurz-glasfaserverstärkten Kunststoffen zu Bauteilen mit ungünstigen Bauteildicke/Fließweglängen-Verhältnissen oder Bauteilen mit mikrostrukturierten Oberflächen ermöglicht. Einerseits kann durch den Einsatz der induktiven Erwärmung die Schmelze in der Kavität länger flüssig gehalten werden, was wesentlich längere Fließwege erlaubt. Andererseits ermöglicht dieses Verfahren bei Anwendung der integrierten induktiven Werkzeugtemperierung ein Heizen der Kavität bis hinein in die Nachdruckphase, so dass eine kontrolliertes Abkühlen des Bauteiles realisierbar wird. Durch eine erhöhte Werkzeugwandtemperatur kann ein Verarmen der Randschichten an Füllstoff verhindert werden, was bei faserverstärkten Bauteilen zu homogeneren Materialeigenschaften führt.

4.1.2 Innovative Polymere mit neuartigen Materialeigenschaften

Am Institut wird derzeit das Potential der induktiven Werkzeugtemperierung bei der Verarbeitung neuartiger, elektrisch leitfähiger Polymere mit einem Füllstoffanteil von mehr als 80% Graphit untersucht. Hauptproblem bei der Verarbeitung solch hochgefüllter Kunststoffe ist die hohe Viskosität der Schmelze und die in diesem Fall durch den hohen Graphitanteil hervorgerufene sehr gute Wärmeleitfähigkeit des Materials, welche zu einer schnellen Wärmeabfuhr aus dem Bauteil in das Werkzeug und damit zum Einfrieren des Anguss führt. Hier bietet die induktive Werkzeugtemperierung die Möglichkeit des gezielten Aufheizens der Kavitätswand, wodurch eine vollständige Formfüllung und eine zuverlässige Abformung mikrostrukturierter Bereiche des Bauteils sichergestellt werden kann.

4.1.3 MIM/CIM

Die Problematik der Verarbeitung einer hochviskosen Kunststoffschmelze mit extrem hohem Füllstoffanteil stellt sich auch beim CIM-(Ceramic Injection Moulding) bzw. MIM-Verfahren (Metal Injection Moulding). Beim MIM kommt zudem die Problematik der hohen Wärmeabfuhr aus der Schmelze in das Werkzeug zum tragen.

Mit diesen beiden Sonderverfahren des Kunststoffspritzguss werden Sinter-Grünlinge aus Keramik bzw. Metall hergestellt. Dabei dient das Polymer lediglich als Bindemittel und wird vor dem Sinterprozess chemisch oder physikalisch aus dem Grünling entfernt.

Auch hier lässt sich die induktiv-variotherme Werkzeugtemperierung zur Verbesserung des Formfüllverhaltens der Polymerschmelze einsetzen. Damit sind längere Fließwege und eine genauere Abformung von mikrostrukturierten Bauteiloberflächen möglich, was die Produktpalette für dieses Verfahren deutlich erweitern dürfte.

4.1.4 Variothermprozesse bei Hochtemperaturpolymeren

Ein weiteres Anwendungsgebiet ist die Verarbeitung von Hochtemperaturpolymeren, wie z.B. PEEK, PPS, LCP. Diese Polymere benötigen aufgrund ihres hohen Schmelzpunktes für die zuverlässige Verarbeitung im Großserienprozess eine sehr hohe Werkzeuggrundtemperatur. Im Variothermprozess besteht die Gefahr der Schädigung des Werkzeugs durch Überhitzung. Hier bietet die induktive Werkzeugtemperierung durch die Möglichkeit, der gezielten Aufheizung nur des Kavitätsbereichs und nicht des kompletten Werkzeuges eine Möglichkeit diese Schädigung zu vermeiden. Darüber hinaus ist durch eine Absenkung der Werkzeuggrundtemperatur eine energetische Optimierung bei der Verarbeitung derartiger Kunststoffe möglich. Dieses Potential ist bei allen hier angesprochenen Beispielen vorhanden.

4.2 Verfahrensalternativen

Neben der Anwendung im Kunststoffspritzguss ist auch ein Einsatz der induktiven Erwärmung in alternativen urformenden Verfahren vorstellbar.

4.2.1 Spritzprägen

Eine Alternative bei der Herstellung von Kunststoffbauteilen mit mikrostrukturierten Oberflächen zum klassischen Spritzguss stellt das Spritzprägen dar. Dieses Verfahren kommt beispielsweise bei Herstellung von CDs zur Anwendung.

Dabei wird die Kunststoffschmelze in das nicht vollständig geschlossene Werkzeug eingespritzt und dieses während des Einspritzvorgangs geschlossen. Die bewegliche Werkzeugplatte dient dabei als Prägestempel, welcher das Schmelzekissen gleichmäßig in der Kavität verteilt und die Mikrostruktur in die Bauteiloberfläche einprägt. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Verwendung eines beheizten Prägestempels die Abformung der Mikrostrukturen verbessert und den Weg für die Anwendung neuer Polymere für das Spritzprägen ebnet.

4.2.2 Chemisches bzw. physikalisches Schäumen von Kunststoffen

Ein mögliches Einsatzgebiet der induktiven Werkzeugtemperierung im Kunststoffspritzguss neben dem klassischen Spritzguss im Bereich der Sonderverfahren des chemischen bzw. physikalischen Schäumens von Kunststoffen.

Beim chemischen Schäumen wird dem Granulat ein Treibmittel zugesetzt, welches sich bei der Plastifizierung unter Abgabe von Gas (meist CO₂ oder N₂) zersetzt. Beim physikalischen Schäumen wird das Treibgas in der Plastifiziereinheit direkt in die Polymerschmelze injiziert und dort gelöst (Mucell). Während des Einspritzvorgangs perlt das Gas aufgrund des Druckabfalls aus und die Polymerschmelze wird aufgeschäumt. Das Resultat ist ein Bauteil mit einer schaumartigen Kernstruktur und einer kompakten Randschicht. Diese kommt aufgrund der schnellen Abkühlung der Schmelze an der Werkzeugwand zustande.

Durch eine gezielte Erwärmung der Werkzeugwand lässt sich die Bildung dieser Randschicht beeinflussen. Die induktive Werkzeugtemperierung bietet den Vorteil einer definierten Steuerung des Abkühlvorgangs und somit einer direkten Beeinflussung der Struktur der Randschicht bei geschäumten Bauteilen. Denkbar ist auch die Erwärmung lediglich einzelner Kavitätsbereiche und somit die Herstellung von Bauteilen mit unterschiedlich kompakten Randschichten.

5 Anwendungen in anderen Bereichen der Kunststoffverarbeitung

Über diese durchaus vielversprechenden Anwendungen des induktiven Zusatztemperierens im Kunststoffspritzguss hinaus lassen sich auch Anwendungen in anderen Verfahren der Kunststoffverarbeitung denken.

So ist durch einen Einsatz der Technik im Bereich der Elastomer- und Duroplastverarbeitung eine mit dem Kunststoffspritzguss vergleichbare Verfahrenserweiterung zu erwarten, da zum Beispiel durch gezielte verstärkte Vernetzung im Werkzeug Formteile mit unterschiedlichen mechanischen Verhalten aus einem Material hergestellt werden könnten. Auch sind verschiedene Anwendungen im Bereich Heiß- und Folienprägen sowie beim Laminieren großformatiger Formteile denkbar.

Eine weitere denkbare Anwendung der induktiven Erwärmung in der Kunststoffverarbeitung liegt im Bereich des Vorwärmens von Großwerkzeugen auf Betriebstemperatur als Alternative zu den bisher eingesetzten Heizpatronen. Die schnelle und großflächige Erwärmung des kompletten Werkzeuges mit Hilfe eines geeigneten Induktors erlaubt eine Verkürzung der Rüstzeiten und damit eine Steigerung der Produktivität.

6 Implementierung der induktiven Beheizung in Prozesse der Kunststoffverarbeitung

Die Implementierung der induktiven Beheizung stellt auf Grund der gegenseitigen Abhängigkeit von Geometrie, elektromagnetischen Feldern und thermischen Phänomenen hohe Anforderungen an den Auslegungsprozess. Im Rahmen der am Institut durchgeführten Forschungsvorhaben konnten Auslegungsalgorithmen entwickelt werden, die sich in weiten Teilen auch auf alternative Anwendungen der induktiven Beheizung übertragen lassen. So konnten die zur Auslegung notwendigen Entwicklungsschritte durch rechnergestützte Simulation stark reduziert werden. Durch diese Simulationen ist es möglich, neben der Optimierung der thermischen Parameter auch Aussagen über die erforderlichen Generatorleistungen und Anpassbereiche zu treffen, ohne diese durch langwierige Versuche ermitteln zu müssen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die induktive Beheizung stellt über die Grenzen des Sonderverfahrens Mikro- und Ultrapräzisions-spritzguss hinaus eine vielversprechende Möglichkeit dar, schwer oder nicht zu fertigende Formteile in Massenfertigungsverfahren beziehungsweise Formteile mit neuen Materialeigenschaften herzustellen.

Im Vorfeld der eingehenden Untersuchung dieser neuen Potentiale konnten bereits mehrere Projekte erfolgreich durchgeführt werden, die eine weitergehende wissenschaftliche Beschäftigung mit diesen Themen rechtfertigen. Das Grundlagenwissen, dass im Bereich Spritzguss aufgebaut wurde, muss hierfür auf seine Übertragbarkeit auf die neuen Verfahren untersucht werden und gegebenenfalls neu gebildet werden. Eine Weiterführung des Themas konnte bereits mit einem AIF-geförderten Projekt zur induktiven Erwärmung bei der Abformung hoch graphitgefüllter Polymere erreicht werden.

Literatur

- [1] TEWALD, A.: *Entwicklung und Untersuchung eines schnellen Verfahrens zur variothermen Werkzeugtemperierung mittels induktiver Erwärmung*. Universität Stuttgart, IKFF, Dissertation, 1996.
- [2] WALTHER, T.: *Geräte- und Verfahrenstechnik zur induktiven Werkzeugtemperierung beim Mikrospritzgießen*. Universität Stuttgart, IKFF, Dissertation, 2003.
- [3] ZÜLCH, M., BURKARD, E., SCHINKÖTHE, W.: Optimierter Energieeinsatz durch induktive Erwärmung von Spritzgießwerkzeugen – FEM unterstützte Auslegung von induktiven Heizungssystemen. In: *Beiträge zum 20. Stuttgarter Kunststoff-Kolloquium*, 14.-15. März 2007. Stuttgart, 2007.
- [4] BENKOWSKY, G.: *Induktionserwärmung*. Berlin: Verlag Technik GmbH, 1990.

Thermische Analyse der Antriebsspulen von Lineardirektantrieben mit MAXWELL und ANSYS

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe, Dipl.-Ing. Matthias Ulmer

Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik (IKFF)

Stuttgart, Deutschland

Summary

Ein elektrischer Antrieb kann in vier unterschiedliche physikalische Teilsysteme aufgeteilt werden: das mechanische, das elektrische, das magnetische und das thermische. Bei der Simulation eines Antriebs genügt es oft nicht, nur die einzelnen Teilsysteme separat voneinander zu untersuchen, da diese sich auch gegenseitig beeinflussen. Daher ist oftmals eine gekoppelte Simulation von mehreren physikalischen Teilsystemen miteinander notwendig.

In diesem Beitrag wird die Simulation des Antriebssystems von einem Lineardirektantrieb behandelt. Es wird mit der Software MAXWELL eine magnetische Analyse durchgeführt und diese Ergebnisse an ANSYS zur thermischen Betrachtung weitergegeben. Dies erfolgt mit Hilfe einer Kopplung zwischen diesen beiden Programmen. Der primäre Fokus hierbei liegt auf dem Wärmeübergang zwischen Antriebsspulen und Eisenrückschluss. Dazu werden verschiedene Übergangsmaterialien mit unterschiedlichen thermischen Eigenschaften untersucht.

Im Rahmen der magnetischen Simulation wird zunächst eine konstante Stromvorgabe für die Spule definiert. In der thermischen Betrachtung wird die Grenztemperatur in einer statischen Betrachtung ermittelt. Anschließend wird der Erwärmungs- und Abkühlvorgang transient betrachtet.

Mit Hilfe von Simulationen mit unterschiedlichen Zwischenmaterialien und Schichtdicken zwischen Spule und Rückschluss konnte der Einfluss auf das thermische Verhalten des Systems aufgezeigt werden. Gut wärmeleitende Übergänge zwischen Spulen und Rückschluss ermöglichen eine Leistungssteigerung, je nach Schichtdicke von über 20% bei Konvektionsrandbedingungen für ein stehendes System.

Keywords

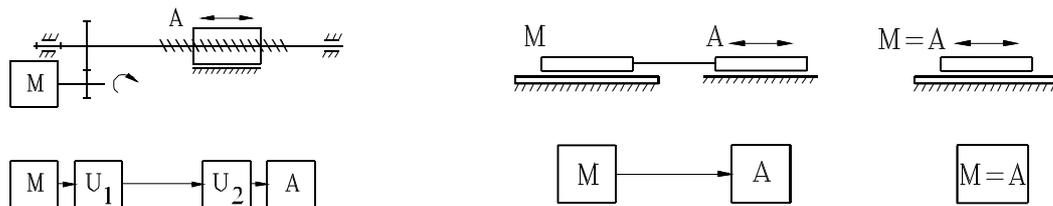
ANSYS, MAXWELL, FEM, MAGNETOSTATISCH, STEADY-STATE, TRANSIENT, THERMISCH, LINEARDIREKTANTRIEB

1. Einleitung und Motivation

Das Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart beschäftigt sich im Bereich der Antriebstechnik insbesondere mit der Auslegung und Dimensionierung von Lineardirektantrieben [1],[2]. Die Nachfrage am Markt für Lineardirektantriebe steigt durch höhere Anforderungen an die Positioniergenauigkeit und Dynamik bei linearen Bewegungen. Oftmals können rotatorische Antriebe mit Rotations-Translations-Umformern die geforderten Geschwindigkeiten und Beschleunigungen bei gleichzeitig hoher Positioniergenauigkeit nicht mehr erreichen.

Dagegen besitzen Lineardirektantriebe neben diesen hohen dynamischen Eigenschaften auch hohe strukturelle Steifigkeiten, eine geringe Geräuschentwicklung und eine hohe Lebenserwartungen aufgrund geringer Verschleißerscheinungen.

Nachteilig zu nennen sind hier die fehlende Selbsthemmung im unbestromten Zustand, sowie eine geringere Kraftkonstante gegenüber rotatorischen Motoren. Fig.1 zeigt schematisch den Vergleich zwischen rotatorischen Motoren mit Rotations-Translations-Umformern (a) und Lineardirektantrieben (b) [3].

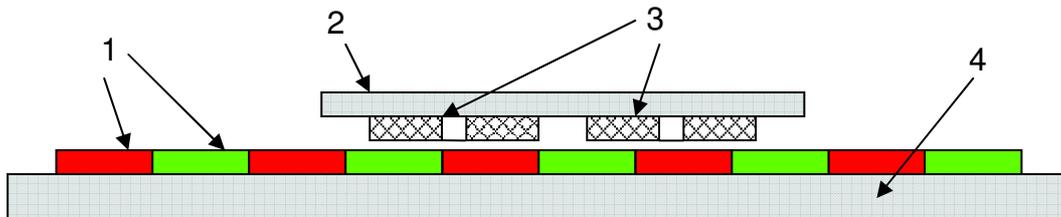


(a) Spindel-Mutter-System

(b) Lineardirektantrieb

Fig.1: Schematische Abbildung, M Motor, A Antrieb, U Umformer (Getriebe) [3]

Da Lineardirektantriebe im feinwerktechnischen Bereich meist an individuelle Bedürfnisse angepasst werden müssen, ist eine Auslegung der Antriebe im Vorfeld nötig. Dazu ist die Simulation mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode (FEM) sehr gut geeignet und findet auch in Entwicklungsabteilungen einen immer stärkeren Einzug. Damit können zum einen in sehr frühen Phasen der Produktentwicklung Aussagen bezüglich den erreichbaren Motorparametern gefunden und zum anderen Optimierungspotential hinsichtlich Geometrie und Aufbau aufgezeigt werden. In Fig. 2 ist eine schematische Abbildung eines zweisträngigen Lineardirektantriebs in Flachspulbauweise aufgezeigt.



- 1: Magnete gegenseitig polarisiert
- 2: Magnetrückschluss der Primärseite
- 3: Spulen des zweisträngigen Systems
- 4: Magnetrückschluss der Sekundärseite

Fig.2: Gesamtmodell eines zweisträngigen Lineardirektantriebs in Flachspulbauform

Der Fokus in diesem Beitrag liegt auf der Untersuchung des Wärmeübergangs zwischen Spule (3) und Rückschluss (2). Dazu wird zunächst mit einer magnetischen Analyse in MAXWELL die Verlustleistung in der Spule berechnet und anschließend in einer thermischen Betrachtung mit ANSYS die daraus resultierende Wärmeentwicklung betrachtet.

2. Modellerstellung

Die Modellerstellung erfolgt mit dem DesignModeler der ANSYS Workbench. Als Modell wird nur eine Spule mit dem dazugehörigen Rückschluss modelliert. Um den Wärmeübergang zwischen Spule und Rückschluss zu betrachten, werden zwischen den beiden Spulenschenkeln und dem Rückschluss zwei weitere Objekte als Zwischenschicht erstellt. Diese werden für die Simulation benötigt, damit unterschiedliche Wärmeübergänge mit Hilfe von Materialparametern untersucht werden können. In Fig. 3 ist das untersuchte Modell im Zwei- und Dreidimensionalen dargestellt.

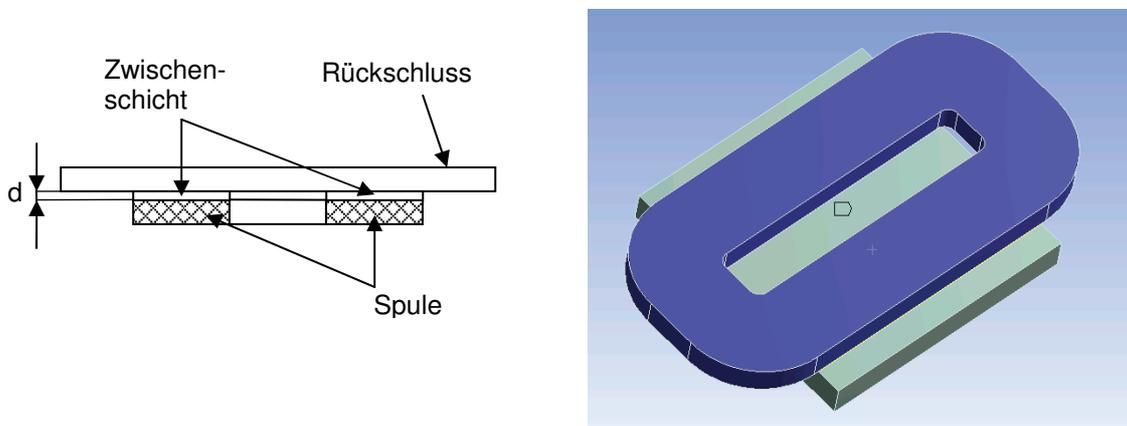


Fig.3: Simulationsmodell mit Spule und Rückschluss

Für die Modellvariationen werden folgende Parameter der Zwischenschicht festgelegt:

Schichtdicke:	d=0.1	d=0.2	d=0.3
---------------	-------	-------	-------

Materialien:	Stahl	Luft	Wärmeleitpaste
--------------	-------	------	----------------

Die Analyse mit den Materialparametern für Stahl sollen als ideale Vergleichsbedingungen gegenüber Luft und Wärmeleitpaste dienen.

3. Magnetische Analyse mit Maxwell

Für die Simulation in MAXWELL wird das Geometriemodell aus dem DesignModeler über einen CAD-Export-Import geladen. Für die Durchführung einer magnetische Analyse sind jedoch einige Anpassungen am Modell notwendig. Zum einen wird ein Hüllkörper benötigt, der alle Körper umschließt und die magnetische Feldausbreitung außerhalb der modellierten Körper ermöglicht. Zum anderen wird in der Spule ein Terminal für die Stromeinprägung implementiert. Auf diese Terminal-Fläche wird ein konstanter Strom für die magnetostatische Simulation aufgeprägt. Der Strom wird hier in Windungsampere vorgegeben. In Fig. 4 ist das modifizierte Modell mit dem Hüllkörper und dem Terminal für die Stromeinprägung dargestellt.

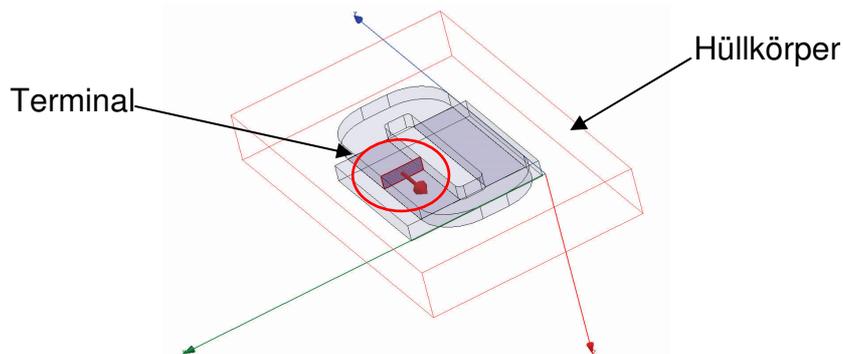


Fig.4: Modell in MAXWELL mit Terminal und Hüllkörper

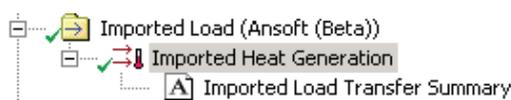
4. Kopplung von MAXWELL nach ANSYS

Die Kopplung von MAXWELL nach ANSYS für eine magnetisch-thermische Betrachtung ist ab den Versionen 12.2 bei MAXWELL und 12.01 bei ANSYS mit Aktivierung der Beta-Optionen möglich. Nach dem Lösungsprozess in MAXWELL wird eine XML-Datei exportiert. In ANSYS kann dann die Verlinkung zu MAXWELL aus dieser Datei geladen werden. Die Ergebnisse werden dann aus dem MAXWELL-Modell über die „Import-Load-Funktion“ als Last für die Thermische Analyse in ANSYS importiert.



Fig.5: Kopplung von MAXWELL nach ANSYS

Da beide Programme mit unterschiedlichen Netzen arbeiten, werden die Ergebnisse zwischen diesen beiden Netzen interpoliert. Wichtig dabei ist, dass die Gesamtenergie des Systems immer erhalten bleibt. In ANSYS gibt der Kopplungsfaktor nach dem Import der Ergebnisse aus MAXWELL die Qualität der Interpolation an.



Object	Total Ansoft Loss	Scaling Factor
Spule	4.18054	0.997297
Region 0		0

Fig.6: Kopplungsfaktor in ANSYS

5. Thermische Analyse mit ANSYS Workbench 2.0

Als Randbedingung wird für die Thermische Simulation auf die äußeren Flächen des Modells eine Konvektionsbedingung festgelegt. Die Höhe des Konvektionskoeffizienten variiert über die Lage der Fläche im Raum sowie über die Anströmgeschwindigkeit der Umgebungsluft. Das vorliegende Modell wird auf eine ruhende Umgebungsluft beschränkt. In Fig. 7 sind die Konvektionsbedingungen grafisch dargestellt. Hier wird nach seitlichen und oben liegenden Flächen unterschieden.

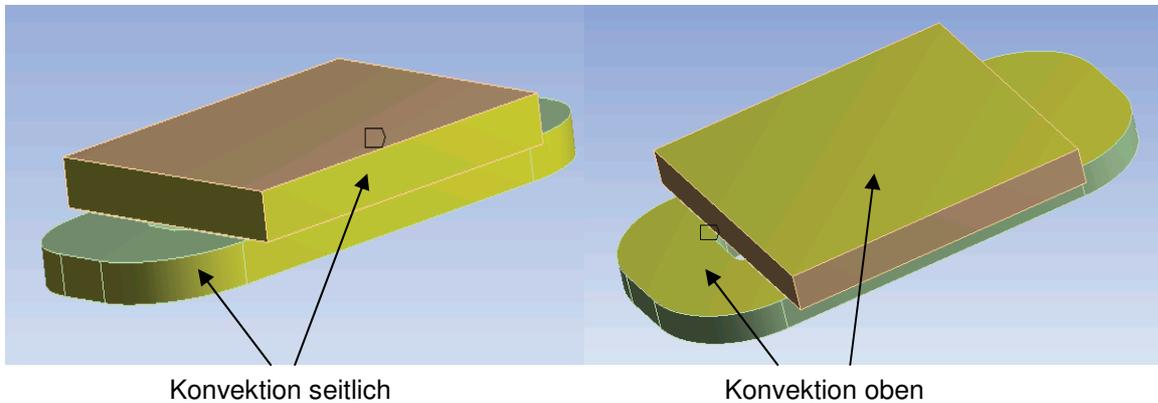


Fig.7: Randbedingungen für die Thermische Analyse

In einem ersten Schritt soll in der thermischen Analyse die thermische Dauerfestigkeit der Spule untersucht werden. Dazu wird eine thermische steady-state Analyse in ANSYS Workbench gestartet. Damit kann die Temperatur der Spule im Dauerbetrieb aufgrund der zugeführten elektrischen Energie ermittelt werden.

In einem weiteren Schritt wird eine transiente Analyse durchgeführt. Damit kann zum einen der Erwärmungsvorgang zu unterschiedlichen Zeitpunkten betrachtet werden und zum anderen auch die thermische Zeitkonstante des Systems ermittelt werden. Weiterhin können Betriebsarten wie Kurzzeit- und Aussetzbetrieb untersucht werden [4].

In Fig. 8 ist der vollständige Erwärmungs- und Abkühlvorgang des untersuchten Systems bei einem Luftspalt von $d=0.1\text{mm}$ in der blauen Kurve dargestellt. Die rote Kurve zeigt die ermittelte Temperatur aus der Steady-State-Analyse.

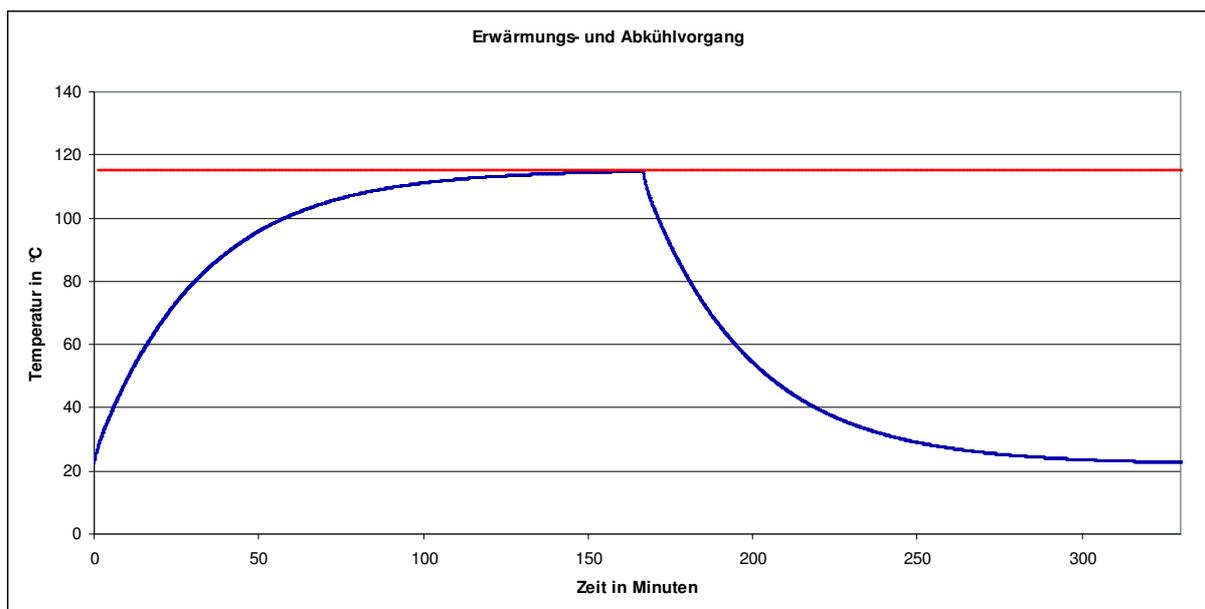


Fig.8: Erwärmungs- und Abkühlvorgang des Systems

Bei der importierten Last aus Maxwell können im Gegensatz zu anderen Randbedingungen nicht verschiedene Lastfälle tabellarisch vorgegeben werden. Um auch den Abkühlvorgang des Systems als zweiten Lastschritt zu berücksichtigen, wird ein zusätzliches Command-Objekt benötigt. Dabei werden über die zwei Eingabeparameter „ARG1“ und „ARG2“ die Zeiten für die beiden Lastschritte übergeben. Für den Abkühlvorgang wird aus allen Elemente der Spule die Wärmeenergie „HGEN“ gelöscht. Zum Schluss wird für das SOLVE-Command eine Abkürzung definiert, da ansonsten die Workbench nochmals ein Solve auslöst und dadurch ein Fehler im Lösungsprozess auftritt. Nachfolgend ist das Command-Objekt mit den benötigten Befehlen dargestellt:

```

/solu
time,ARG1
solve

!Abkuehlung
cmsel,s,spule
*get,anzahl,elem,,count
*dowhile,anzahl
  *get,e1,elem,,num,min
  BFE,e1,HGEN,,0
  esel,u,elem,,e1
  *get,anzahl,elem,,count
*enddo
allsel,all
time,ARG2
solve

*abbr,solve,alls

```

In Fig. 9 sind nun verschiedene Erwärmungskurven des Systems mit unterschiedlichen Materialien der Zwischenschicht dargestellt. Jeweils in derselben Farbe jeder Kurve ist die Temperatur der statischen Analyse eingezeichnet. Es ist deutlich zu erkennen, dass nach circa 140 Minuten die Temperatur auf Ihren Endwert konvergiert. Die beiden Kurven für Stahl und Wärmeleitpaste fallen fast zusammen und sind dadurch im Diagramm kaum zu unterscheiden.

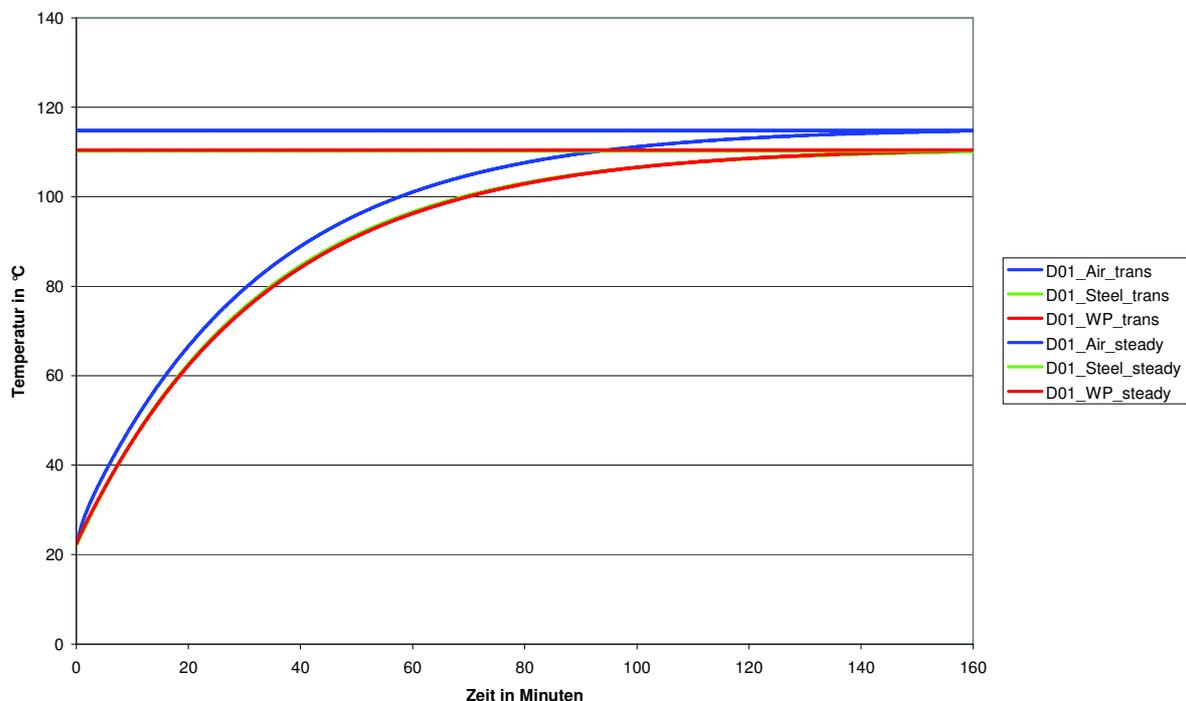


Fig.9: Temperaturverlauf für d=0,1 mm bei unterschiedlichen Materialien

Mit Hilfe dieser Abbildung kann nun die thermische Zeitkonstante und damit die Wärmekapazität des Systems bei unterschiedlichen Zwischenmaterialien ermittelt werden. Die Thermische Zeitkonstante wird anhand des Temperaturverlaufs bei 63% der Endtemperatur ermittelt. Sie beträgt bei den unterschiedlichen Materialien $\tau_{\text{Air}}=24$ Minuten, $\tau_{\text{Steel}}=25$ Minuten und $\tau_{\text{Wärmeleitpaste}}=25,5$ Minuten. Aus der Abbildung ist weiterhin zu entnehmen, dass bei Verwendung von Wärmeleitpaste kaum eine Differenz zu dem idealen Wärmeübergang bei Stahl entsteht. Im Vergleich zur Luft ist allerdings ein Unterschied in der Erwärmung und auch der Endtemperatur zu erkennen.

Im Folgenden wird nun der Einfluss der Schichtdicke mit den Materialparametern von Luft bei gleicher Verlustleistung dargestellt. Aus Fig. 10 ist zu erkennen, dass die Vergrößerung der Schichtdicke eine Erhöhung der Temperatur im System bewirkt.

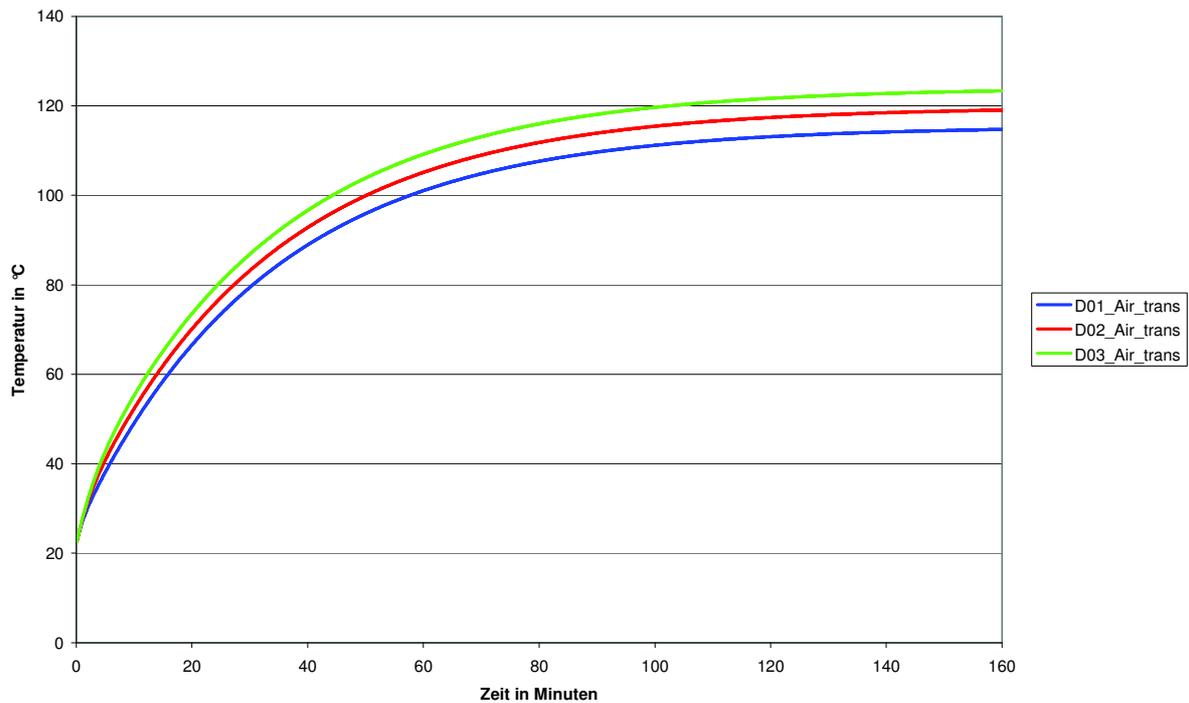


Fig.10: Temperaturverlauf bei unterschiedlichen Dicken der Zwischenschicht

Wird hierbei die maximale prozentuale Abweichung gegenüber Wärmeleitpaste berechnet, so ergeben sich für die unterschiedlichen Schichtdicken folgende Werte:

Schichtdicke	Max. Abweichung
d=0.1mm	10.7%
d=0.2mm	17.8%
d=0.3mm	23.4%

6. Ausblick

Das hier erstellte Simulationsmodell bietet nun Grundlage für weiterführende Untersuchungen bei der Dimensionierung und Auslegung von Antrieben unter Berücksichtigung des thermischen Verhaltens. Weitere Untersuchungen im Kurzzeit- und Aussetzbetrieb sowie die Anpassung der Konvektionskoeffizienten für ein bewegtes System und der Transfer des Teilmodells in ein vollständiges Motormodell bieten weiteres Potential.

Ebenfalls interessant wäre der Einfluss unterschiedlicher Ansteuerkonzepte in der magnetischen Simulation und deren Auswirkung auf das Thermische Verhalten. Dazu sind Analysen mit Spannungsvorgabe oder pulsweitenmodulierter Ansteuerung zu betrachten.

7. References

- [1] Dannemann, M.: Dimensionierung und Optimierung feinwerktechnischer Lineardirektantriebe unter Beachtung parasitärer Effekte am Beispiel von Flach- und Tauchspulantrieben, Dissertation, 2008
- [2] Gundelsweiler, B.: Dimensionierung und Konstruktion von feinwerktechnischen elektrodynamischen Lineardirektantrieben, Dissertation, 2003
- [3] Schinköthe, W.: Aktorik in der Feinwerktechnik, Skript zur Vorlesung, 2009
- [4] Kallenbach, E.: Der Gleichstrommagnet, Leipzig, 1969