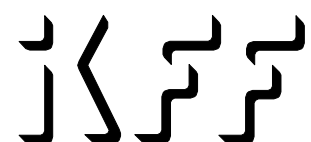


Universität Stuttgart

## **Jahresbericht IKFF 2006**

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 2007

## **1 DAS INSTITUT**

- 1.1 Mitarbeiter
- 1.2 Jahresrückblick
- 1.3 Wissenschaftliche Arbeitsgebiete

## **2 LEHRVERANSTALTUNGEN**

- 2.1 Vorlesungen und Übungen für das Vordiplom
  - 2.1.1 Konstruktionslehre III (Feinwerktechnik)
  - 2.1.2 Konstruktionslehre IV (Feinwerktechnik)
- 2.2 Vorlesungen und Übungen für das Hauptdiplom
  - 2.2.1 Grundlagen der Feinwerktechnik, Gerätekonstruktion und -fertigung
  - 2.2.2 Aktorik in der Feinwerktechnik, Berechnung, Konstruktion und Anwendung mechatronischer Komponenten
- 2.3 Prüfungen
- 2.4 Praktika
  - 2.4.1 Praktikum Feinwerktechnik
  - 2.4.2 Allgemeines Praktikum Maschinenbau (APMB)
- 2.5 Seminar Feinwerktechnik

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

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

## **4 ARBEITSGEBIETE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITER**

- 4.1 Aktorik
- 4.2 Spritzgießen
- 4.3 Zuverlässigkeitstechnik

## **5 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT**

- 5.1 Veröffentlichungen
- 5.2 Gremienarbeit
- 5.3 Tag der 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

Kornelia Wanner

### **Unbefristeter wissenschaftlicher Mitarbeiter:**

Akademischer Rat: Dipl.-Ing. Eberhard Burkard

### **Befristete wissenschaftliche Mitarbeiter:**

Dipl.-Ing. Michael Beier

Dipl.-Ing. Christin Clauß

Dipl.-Ing. Matthias Dannemann

Dipl.-Ing. Andreas Grotz

Dipl.-Ing. Philipp Joerges

Dipl.-Ing. Frank Mochel

Dipl.-Ing. Elmar Rothenhöfer

Dipl.-Ing. Michael Zülch

### **Modellbau und Versuchswerkstatt:**

Ralf Berwanger

Stefan Schneider

### **Stipendiaten/Gäste**

Jonathan D. Hiller DAAD-Rise-Stipendiat, USA

Christian Baijet Studentenaustausch, Spanien

**Wissenschaftliche Hilfskräfte:**

Christian Baijet

Ingmar Brandt

Axel Ege

Manfred Giljum

Johannes Götz

Andreas Maucher

Christoph Prüll

Manuel Rausch

Christian Scheu

Ignasi Selga

Vician Morales, Rafael

Marcus Weber

Nicolai Wengert

Till Zimmermann

Michael Zülch

**1.2 Jahresrückblick****Personalia**

Bereits zum Jahresende 2005 verließen zwei Mitarbeiter, Herr Köder und Herr Weber, planmäßig das IKFF. Während des Jahres 2006 wechselten dann auch Herr Grotz zum 31.04.2006 und Frau Clauß zum 31.05.2006 nach Abschluss ihrer Assistententätigkeit in die Industrie.

Zwei neue Mitarbeiter wurden im Laufe des Jahres 2006 eingestellt. Herr Joerges kam ab 01.01.2006 aus München zu uns und Herr Zülch ab 04.07.2006 aus Aachen.

Herr Joerges übernimmt Aufgaben im Bereich der Lineardirektantriebe und Herr Zülch bearbeitet ein DFG-Forschungsprojekt zur Induktionserwärmung. Damit werden zwei wichtige Forschungslinien des IKFF kontinuierlich weitergeführt, auch wenn der erhebliche personelle Wechsel mit Ablauf der befristeten Arbeitsverträge zu gewissen Brüchen und zu einem gewollten Know-How-Übergang in die Industrie führt. Wegen bestehender Stellenbesetzungssperren musste eine Haushaltsstelle im Jahr 2006 unbesetzt bleiben, die Aufgaben insbesondere in der Lehre mussten von anderen Mitarbeitern zusätzlich übernommen werden.

**Aktivitäten in der Lehre**

Die Anfängerzahlen im Maschinenbau im weiteren Sinn stabilisieren sich zwar, sind aber auf nicht mehr ganz so hohem Niveau wie noch vor zwei Jahren. Insgesamt liegen die regulären Anfängerzahlen aller maschinenbaulichen Studiengänge der Universität Stuttgart (ohne Luft- und Raumfahrttechnik) derzeit bei ca. 800 Studierenden. Im Studiengang Maschinenwesen selbst bewegen sich die Anfängerzahlen um 240 Studierende zuzüglich 60 Zeit-Studierende ohne konkretes Abschlussziel. Im Hauptdiplom kommt die starke Zunahme der Studierendenzahlen der letzten Jahre nun deutlich zum Tragen.

Bei den Lehrveranstaltungen des Instituts spiegelt sich dies wie folgt wieder. In den Vordiplom-Lehrveranstaltungen sind inzwischen regelmäßige Schwankungen zwischen großen und kleinen Zahlen zu verzeichnen. In der Konstruktionslehre Feinwerktechnik waren im Sommersemester 55 Studierende des letzten Jahrganges zu betreuen. Im Wintersemester des neuen Jahrganges sind dagegen seit Oktober 158 Studierende in der Konstruktionslehre eingeschrieben. Zwar haben die Technologiemanagement-Studierenden nun eigene Veranstaltungen erhalten, das IKFF hat sich jedoch bereit erklärt, auch Fahrzeugtechniker im Vordiplom in der Konstruktionslehre mit zu betreuen. Dadurch stiegen die Zahlen wieder stark an. Gegenwärtig sind etwa je 50 % der Vordiplom-Studierenden aus dem Studiengang Maschinenwesen und aus der Fahrzeug- und Motorentchnik. Die Vordiplom-Lehrveranstaltungen konzentrierten sich nach wie vor auf die Fächer Konstruktionslehre Feinwerktechnik III und IV im dritten und vierten Semester als Wahlmöglichkeit für die beiden o. g. Studiengänge. Ein Highlight ist dabei immer wieder der Konstruktionswettbewerb, auf den weiter hinten noch eingegangen wird.

Das Hauptfach Feinwerktechnik ist ebenfalls wieder gut besucht. Derzeit belegen 14 Studierende das Kernfach „Aktorik“ und 34 Studierende das Fach „Grundlagen der Feinwerktechnik - Gerätekonstruktion und -fertigung“ als Pflicht- oder Kernfach. Die Lehrveranstaltungen des Hauptdiploms konzentrieren sich auf die beiden Schwerpunkte Gerätekonstruktion als methodisch orientierte 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 Antriebssysteme unterschiedlichster Wirkprinzipien. Den Schwerpunkt bilden elek-

tromagnetische und elektrodynamische Stelltechnik, piezoelektrische und magnetostruktive Stelltechnik, Magnettechnik und -technologie sowie Beispiele zur Realisierung mechatronischer Lösungen in der Feinwerktechnik. Die Lehrinhalte zur Aktorik sind in zwei Buchbeiträgen für das „Handbuch Elektrische Kleinantriebe“ und für das Lehrbuch „Gerätekonstruktion in Feinwerktechnik und Elektronik“ enthalten und wurden 2006 ins Englische übersetzt, um eine englischsprachige Ausgabe des Handbuches Elektrische Kleinantriebe vorzubereiten.

Die Hauptfachpraktika Ultraschallantriebe, Lineardirektantriebe, Schrittmotoren, Koordinatenmesstechnik, FEM-Berechnung mit ANSYS sowie Maxwell, Spritzgießen, 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. Das FEM-Praktikum zu ANSYS und Maxwell geht dabei über eine Lehreinheit von fünf Terminen à zwei Doppelstunden. Im Jahr 2007 wird es als eigenständige Lehrveranstaltung aufbereitet, um dem großen Umfang Rechnung zu tragen.

Auch eine studentische **Exkursion** fand 2006 statt. Im Juli waren wir, organisiert durch Herrn Rothenhöfer, mit 13 Studierenden und 5 Mitarbeitern bei der Firma PI (Physik Instrumente) in Waldbronn zu Gast und konnten Piezoantriebe in der Entwicklung und in Aktion sehen.

Die Absolventen fanden 2006 wieder schnell einen Einstieg in die Industrie, der Bedarf kann derzeit nicht gedeckt werden. Selbst der Bedarf an eigenen Assistenten in der Fakultät Maschinenbau ist kaum noch abzudecken.

### **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 2006 die Untersuchungen zur integrierten Wegmessung in Lineardirektantrieben über interne sensorische Eigenschaften zu einem gewissen Abschluss gebracht. Im Rahmen eines DFG-Projektes konnten nun auch Motoren mit Kurzspulen und Motoren mit bewegten eisenlosen Wicklungen einbezogen werden. Das DFG-Projekt dazu wurde im März 2006 erfolgreich abgeschlossen. Die Ergebnisse werden 2007 auf der Kleinantriebstagung zusammengefasst vorgestellt.

In Industrieprojekten wurden darüber hinaus wieder diverse anwendungsspezifische elektrodynamische Linearmotoren entwickelt, berechnet und realisiert. Die Ergebnisse aus der praktischen Umsetzung werden derzeit als neue Vorgehensweise zur Dimensionierung von Linearmotoren aufbereitet. Gleichzeitig widmet sich ein weiteres Projekt der effizienten Realisierung von Kommutierung, Ansteuerung und Regelung über eine dSPACE-Umgebung.

Die Forschungen zur Entwicklung von neuartigen Direktantrieben mit piezoelektrischen Antrieben wurden 2006 ebenfalls fortgeführt und dazu auf der Actuator 2006 berichtet. Auch hier bildet neben der Motorentwicklung und durchgängigen Motorberechnung bzw. -simulation die Realisierung von Ansteuerung und Regelung über eine dSPACE-Umgebung 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 2006 wurden darüber hinaus die Arbeiten zur variothermen Prozessführung mit integrierten Induktoren und Impulskühlung im Rahmen eines neuen DFG-Projektes fortgeführt. Ergebnisse dazu wurden 2006 auf einer Tagung und werden 2007 auf dem 20. Stuttgarter Kunststoff-Kolloquium veröffentlicht. Das IKFF ist wieder Mitveranstalter des Kunststoff-Kolloquiums. Darüber hinaus gab es 2006 und gibt es auch bereits 2007 ein sehr reges Interesse aus der Industrie an der internen aber auch externen Induktionserwärmung als Problemlöser für schwierige Abformaufgaben. Oft übersteigen die Anfragen die Kapazitäten.

Das Arbeitsgebiet ***Zuverlässigkeit feinwerktechnischer Antriebe*** wurde inzwischen am IKFF weiter etabliert. Das IKFF ist mit einem Teilprojekt in der DFG-Forschergruppe „Systemzuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen“ auch in der zweiten Projektphase integriert. Das angestrebte Ziel der Forschergruppe ist die Entwicklung von Methoden zur Bestimmung der Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen. Durch die Einbeziehung der Zuverlässigkeitsuntersuchungen bereits in den frühen Entwicklungsphasen sollen neben zuverlässigeren Produkten mit geringeren Ausfallquoten auch ein schnellerer Entwicklungsprozess und die Integration aller am Produkt beteiligten Fachgebiete (Systemzuverlässigkeit) bei mechatronischen Systemen erreicht werden.



Die Forschergruppe vereint Kollegen aus den Fachgebieten Konstruktion, Mathematik, Elektrotechnik, Softwaretechnik sowie Feinwerktechnik. Durch die interdisziplinäre Zusammensetzung soll ein unmittelbarer Informationsaustausch über Fachgebietsgrenzen hinweg erreicht werden. Das IKFF bearbeitet in der Forschergruppe das Thema „Zuverlässigkeit von elektromechanischen /mechatronischen Systemen am Beispiel feinwerktechnischer Antriebe/Aktorik“.

2005 konnte die erste, dreijährige Projektphase der Forschergruppe erfolgreich abgeschlossen werden. Am IKFF stand in dieser Phase die Untersuchung der Zuverlässigkeit elektromechanischer Komponenten feinwerktechnischer Antriebe im Vordergrund. Die Ergebnisse dazu wurden in einer Dissertation zusammengefasst. Die nun laufende zweite, ebenfalls dreijährige Phase ist der Zuverlässigkeit mechanischer Komponenten feinwerktechnischer Antriebssysteme gewidmet. Die Dauerversuchsstände zur Ermittlung der Ausfalldaten werden nun vorzugsweise zur Untersuchung von Kleingetrieben genutzt.

### **Weitere Aktivitäten**

Ein DFG-Antrag zu grundlegenden Untersuchungen an Luftführungen in Lineardirektantrieben ist leider nicht bewilligt worden. Dieses sehr interessante Thema wird aber auf Basis von Instituts- bzw. Drittmitteln trotzdem aufgegriffen und derzeit vertieft bearbeitet.

Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden außerdem umfangreiche Drittmittelaufträge aus der Industrie eingeworben und realisiert. Einige Veröffentlichungen (siehe Abschnitte 5 und 8) zeugen von den in der Forschung erzielten Ergebnissen. Die Veröffentlichungen sind i. Allg. im Volltext auch auf der Homepage des Instituts zugänglich ([www.uni-stuttgart.de/ikff](http://www.uni-stuttgart.de/ikff)).

### **Vorbereitung des 40. Jahrestages der Gründung des IKFF**

Ende 2006 begann die Vorbereitung zum 40. Jahrestag der Gründung des IKFF. Es soll eine Festschrift zur Institutsgeschichte, zum gegenwärtigen Stand, zu Lehr- und Forschungsaktivitäten erstellt werden. Diese wird durch Fachbeiträge der Mitarbeiter ergänzt. Diese Fachbeiträge entstammen Vorträgen, die im Rahmen des internen Doktorandenkolloquiums gehalten werden, das ab Ende 2006 wiederbelebt wurde. Die Doktoranden stellen hier den Stand ihrer Arbeit beziehungsweise interessante Inhalte daraus den Mitarbeitern des Institutes, interessierten Studenten sowie gezielt eingeladenen Mitarbeitern anderer Institute vor. Die Beiträge werden diskutiert und Anregungen zur weiteren Arbeit gegeben. 2006 fanden drei Doktorandenkolloquien statt, deren Themen unter den Veröffentlichungen benannt sind. Die Aktivitäten gehen 2007 weiter.

### 1.3 Wissenschaftliche Arbeitsgebiete

Am Institut werden vier Forschungsschwerpunkte bearbeitet:

Im Arbeitsgebiet **Aktorik** stehen feinwerktechnische Direktantriebe, vorzugsweise für lineare Antriebsbewegungen, im Mittelpunkt. Einen Schwerpunkt bilden elektrodynamische Linearantriebe, deren Berechnung, Simulation und die integrierte Wegsignalerfassung darin. Gegenwärtig werden die Aktivitäten auch auf die Entwicklung von Luftführungen für Linearantriebe erweitert. Neben den elektrodynamischen Systemen bilden piezoelektrische Antriebe, insbesondere Wanderwellenmotoren, 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 für Linearantriebe oder die FEM-Analyse von piezoelektrischen Antrieben.

Auch das Arbeitsgebiet **Zuverlässigkeit feinwerktechnischer Antriebe** lässt sich in diesen Problembereich einordnen. Im Rahmen der DFG-Forschergruppe „Systemzuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen“ bearbeitet das Institut das Thema „Zuverlässigkeit von elektromechanischen/mechatronischen Systemen am Beispiel feinwerktechnischer Antriebe/Aktorik“. Dadurch wird Kompetenz in der Zuverlässigkeitstechnik, speziell zur Zuverlässigkeit feinwerktechnischer Antriebe aufgebaut werden. 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, Piezowanderwellenmotoren).
- Berechnung derartiger Antriebe und Simulation ihres dynamischen Verhaltens.
- Erarbeitung geeigneter Unterstützungsmittel und Methoden zur Entwicklung derartiger Antriebssysteme.
- Entwicklung ein- und mehrsträngiger elektrodynamischer Lineardirektantriebe mit integrierten Wegmesssystemen.
- Entwicklung geeigneter elektronischer Ansteuerungen unter Ausnutzung der integrierten Messsysteme.
- 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.

### **Messtechnik und Sensorik**

- Entwicklung von integrierten Messsystemen zur Läuferpositionsbestimmung in ein- und mehrsträngigen elektrodynamischen Lineardirektantrieben mit dem Ziel, zusätzliche Sensoren bzw. Wegmesssysteme entbehrlich zu machen.

### **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, insbesondere Antriebe und Aktorik.
- Datensammlung.
- Experimentelle Untersuchungen, Aufbau von Dauerlauf-Versuchsständen für Kleinstmotoren und Getriebe.
- Vorausberechnung der Zuverlässigkeit von Systemen aus verschiedenartigsten Bestandteilen und Fachgebieten in der Entwurfsphase.
- Erarbeitung von Ansätzen für die Ermittlung der Systemzuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen (Konzeptphase).

## 2 LEHRVERANSTALTUNGEN

### 2.1 Vorlesungen und Übungen für das Vordiplom

#### 2.1.1 Konstruktionslehre III (Feinwerktechnik)

(Schinköthe, Burkard)

Wintersemester 2005/2006:

55 Studenten (mach)

Wintersemester 2006/2007:

158 Studenten (mach + famo)

16 Vorlesungen à 2 SWS

16 Vorlesungen à 1 SWS

15 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Burkard, Beier, Dannemann, Joerges, Mochel, Rothenhöfer, Zülch

#### 2.1.2 Konstruktionslehre IV (Feinwerktechnik)

(Schinköthe, Burkard)

Sommersemester 2006:

55 Studenten (mach)

14 Vorlesungen à 2 SWS

12 Vorlesungen à 1 SWS

12 Übungen à 1 SWS

Betreuer: Burkard, Beier, Dannemann, Joeges, Mochel, Rothenhöfer

### 2.2 Vorlesungen und Übungen für das Hauptdiplom

#### 2.2.1 Grundlagen der Feinwerktechnik, Gerätekonstruktion und -fertigung

(Schinköthe, Burkard)

Wintersemester 2005/2006:

24 Studenten

Wintersemester 2006/2007:

34 Studenten

20 Vorlesungen à 2 SWS

9 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Burkard, Beier

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

Wintersemester 2005/2006: 21 Studenten

Wintersemester 2006/2007: 14 Studenten

14 Vorlesungen à 2 SWS

Sommersemester 2006: 21 Studenten

5 Vorlesungen à 2 SWS

8 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Dannemann, Joerges, Rothenhöfer

## 2.3 Prüfungen

Fach	Termin	Kandidaten
KL III + IV (FWT)	F 2006	38
	H 2006	47
Grundlagen der Feinwerktechnik; Gerätekonstruktion und -fertigung (Pflichtfach, schriftlich)	F 2006	12
	H 2006	2
Grundlagen der Feinwerktechnik; Gerätekonstruktion und -fertigung (Kernfach oder Ergänzungsfach, mündlich)	F 2006	2
	H 2006	3
Aktorik in der Feinwerktechnik - Berechnung, Konstruktion und Anwendung mechatronischer Komponenten (Kernfach oder Ergänzungsfach, mündlich)	F 2006	1
	H 2006	16

## 2.4 Praktika

### 2.4.1 Praktikum Feinwerktechnik

(Für Studierende des Hauptfachs Feinwerktechnik)

#### Wintersemester 2005/2006

Versuch 1: „FEM-ANSYS“  
 28 Teilnehmer 5 Termine  
 Betreuer: Dannemann, Rothenhöfer

Versuch 2: „Koordinatenmesstechnik“  
 14 Teilnehmer 3 Termine  
 Betreuer: Burkard

Versuch 3: „Spritzgießen“  
 18 Teilnehmer 3 Termine  
 Betreuer: Burkard

#### Sommersemester 2006

Versuch 1: „Ultraschallantriebe“  
 21 Teilnehmer 5 Termine  
 Betreuer: Rothenhöfer

Versuch 2: „Lineardirektantriebe“  
 22 Teilnehmer 5 Termine  
 Betreuer: Dannemann

### 2.4.2 Allgemeines Praktikum Maschinenbau (APMB)

(Für Studierende im zweiten Studienabschnitt Maschinenbau)

#### Sommersemester 2006

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

Versuch 2: „Schrittmotoren“  
 22 Teilnehmer 5 Termine  
 Betreuer: Dannemann

## 2.5 Seminar Feinwerktechnik

09.02.2006	Voelz, Karsten	Design of a Flexure Microstage
09.02.2006	Wiedenhöfer, Markus	Abbildung der Bedienoberfläche eines FEM-Programms in HTML
26.09.2006	Baijet, Cristian	Finite Element Analysis of a Twist-Connector Type Ultrasonic Motor
16.11.2006	Zhang, Jian	Konstruktion einer Lineardirektantriebs-Baureihe mit asymmetrischem Magnetsystem



## 3 WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN, STUDIEN- UND DIPLOMARBEITEN

### 3.1 Dissertationen

Haug, Jens                      Optimierung eines piezoelektrisch erregten linearen  
Wanderwellenmotors

Köder, Thilo                    Zuverlässigkeit von mechatronischen Systemen am  
Beispiel feinwerktechnischer Antriebe

#### Mitberichte

Kauffmann, Axel                Rechnergestützte Prozessoptimierung für Formteile aus  
autoklavgeschäumten Polypropylen-Partikelschaumstoffen

Otte, Björn                      Strukturierung und Bewertung von Eingangsdaten für  
Zuverlässigkeitsanalysen

### 3.2 Diplomarbeiten am IKFF

03/2006    Bittner, Max                    Lebensdauerberechnung von Planetenradge-  
trieben mit Kunststoffzahnradern

05/2006    Hamed, Abdul R.                Einsatz der Submodelltechnik in der FEM-  
Simulation mit ANSYS bei der induktiven  
Erwärmung eines Werkstücks

09/2006    Baijet, Cristian                 Finite Element Analysis of a Twist-Connector  
Type Ultrasonic Motor

### 3.3 Studienarbeiten am IKFF

02/2006	Voelz, Karsten	Design of a Flexure Microstage
02/2006	Wiedenhöfer, Markus	Abbildung der Bedienoberfläche eines FEM-Programms in HTML
11/2006	Zhang, Jian	Konstruktion einer Lineardirektantrieb-Baureihe mit asymmetrischem Magnet-system

### 3.4 Preise

Dr.-Ing. Thilo Köder	Gisbert-Lechner-Preis
----------------------	-----------------------

## 4 ARBEITSGEBIETE DER WISSENSCHAFTLICHEN MITARBEITER

### 4.1 Aktorik

- Clauß, C.                      Bearbeitung des DFG-Forschungsprojekts „Integrierte Wegmessung in feinwerktechnischen Lineardirektantrieben durch Detektion der Flussdichte im flussführenden Eisen“. Entwicklung und Aufbau elektronischer Schaltungen, Programmierung von Mikrocontrollern und DSPs. Betreuung von Gruppenübungen im Vordiplom; Betreuung von Elektroniklabor und Ätzraum. Unterstützung bei der Softwarewartung PC-Netzwerk.
- Dannemann, M.              Lehre:  
Betreuung der Vordiplomsübungen in KL 3/4 in Form von Vortrags- und Gruppenübungen; Ausarbeitung von Aufgabenstellungen und Musterlösungen für Übungsaufgaben, Korrektur von Übungsaufgaben.  
Durchführung des FEM-Praktikums.  
Durchführung der Hauptfachübungen und des zugehörigen Hauptfachpraktikums „Lineardirektantriebe“.  
Durchführung und Weiterentwicklung des APMB-Praktikums „Schrittmotoren“.  
Betreuung der Internet-Lern-Plattform ILIAS.
- Industrieprojekte:  
Entwicklung verschiedener Lineardirektantriebe zur Unterstützung von Führungssystemen.
- Sonstiges:  
Betreuung des UNIX-Netzwerkes und der Netzwerksicherheit am Institut.

Grotz, A.

Lehre:

Betreuung der Vordiplomsübungen Konstruktionslehre 3/4.  
Betreuung des Übungskomplexes „Lagerungen und Wellen“  
innerhalb der Vordiplomsübungen Konstruktionslehre 3/4.

Industrieprojekte:

Machbarkeitsstudie zu einem Direktantriebssystem zur  
Handkraftunterstützung für Linearverstellungen.  
Konstruktion, Fertigung und Montage dieses Systems.

Sonstiges:

PC-Administration.

Joerges, P.

Lehre:

Betreuung der Vordiplomsübungen in KL 3/4, Vortrags-  
und Gruppenübungen; Ausarbeitung von Aufgabenstel-  
lungen und Musterlösungen für Übungsaufgaben, Korrektur  
von Übungsaufgaben, Erstellung von Prüfungsaufgaben;  
Vortragsübungen im Hauptdiplom (Aktorik) „Lineardirekt-  
antriebe“ (Schwerpunkt Regelung).

Industrieprojekte:

Nachrechnung des Magnetkreises eines Direktantriebes,  
Berechnung modifizierter und optimierter Magnetkreise  
dazu.

Realisierung einer Sinus-Kommutierung für einen zwei-  
strängigen Flachspulmotor.

Sonstiges:

PC-Administration. Mitarbeit bei der „Graduate School“  
und dem Exzellenz-Cluster „SCoPE“.

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.

Forschung:

Entwicklung und Untersuchung aerostatischer Führungen für Ein- und Mehrkoordinatenantriebe.

Aufbau eines computergesteuerten Prüfstandes zur Vermessung von Luftlagern und -führungen.

Industrieprojekte:

Mitarbeit an mehreren Projektphasen eines Industrieauftrags zur Untersuchung und Fertigung spezieller Spulensysteme für einen Lineardirektantrieb sowie zur Integration eines Wegmesssystems.

Rothenhöfer, E.

Lehre:

Betreuung von Vordiplomsübungen in KL 3/4 sowie Gruppenübungen.

Erstellung von Prüfungsaufgaben.

Neugestaltung und Durchführung des FEM-Praktikums in ANSYS.

Durchführung des Praktikums Ultraschallantriebe.

Betreuung der Studienarbeit „Aufbau und Inbetriebnahme eines linearen Ultraschallmotors mit orthogonal angeordneten Langevin-Vibratoren“.

Betreuung der Studienarbeit „Ersatzschaltbildbestimmung und Analyse von Anpassungsnetzwerken für die optimale Leistungseinkopplung in piezoelektrischen Ultraschallmotoren“.

Betreuung der Studienarbeit „Aufbau einer analogen Endstufe mit Frequenzverfolgung für den Antrieb zweiphasiger Ultraschallmotoren“.

Betreuung der Studienarbeit „Aufbau und Inbetriebnahme eines linearen Ultraschallmotors mit metallischem Bimoden-Resonator und integrierter Piezokeramik“.

Betreuung der Studienarbeit „Aufbau und Inbetriebnahme eines linearen Ultraschallmotors mit metallischem Bimoden-Resonator und aufgeklebter Piezokeramik“.  
 Betreuung eines amerikanischen Praktikanten im Rahmen eines Austauschprogramms mit dem DAAD.

Forschung:

Entwicklung piezoelektrischer Motoren. Ersatzschaltbildmodellierung für Schwingkreissynthese. Elektronikentwicklung.

Sonstiges:

PC-Administration.

## 4.2 Spritzgießen

Burkard, E.

Untersuchung des Einflusses von Werkzeugbeschichtungen auf die Entformungskraft bei Spritzgussbauteilen aus Thermoplastwerkstoffen.

Bearbeitung von Industrieaufträgen 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.

Zülch, M.  
(seit 06/06)

Forschung:

Bearbeitung des DFG-Forschungsprojektes „Temperierung von Spritzgusswerkzeugen durch vollständig integrierte induktive Beheizung“. Aufbau eines modularen Simulationsmodells zur energetischen Auslegung sowohl externer als auch interner induktiver Erwärmungskonzepte. Aufbau einer neu konzipierten Mess- und Steuerungsinfrastruktur. Betreuung der Studienarbeit „Untersuchung der magnetischen Eigenschaften von Kunststoffformenstahl“.

Industrieprojekte:

Betreuung eines Industrieprojektes zur simulationsgestützten Auslegung einer externen induktiven Temperierung.

Sonstiges:

Betreuung von Gruppenübungen im Vordiplom  
Betreuung des Ätzlabors.

### 4.3 Zuverlässigkeitstechnik

Beier, M.

Mitarbeit in der DFG-Forschergruppe zum Thema „Systemzuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen“ mit dem Arbeitsschwerpunkt auf dem Teilprojekt „Zuverlässigkeit von elektromechanischen/mechatronischen Systemen am Beispiel feinwerktechnischer Antriebe/Aktorik“.

Begleitender Aufbau des neuen Arbeitsgebiets der Zuverlässigkeit von Antriebssystemen am Institut. Diese Aufgabe umfasst neben der reinen Forschungstätigkeit auch den Aufbau und die Betreuung von Dauerlaufprüfständen für Systeme, bestehend aus rotatorischen Kleinantrieben mit angeflanschten Planetenradgetrieben.

Ansprechpartner für Literaturrecherchen.

Durchführung der Zuverlässigkeitsübungen im Hauptdiplom.

Mitbetreuung der Gruppenübungen KL 3/4, Korrektur von Übungsaufgaben.

## 5 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

### 5.1 Veröffentlichungen

Burkard, E.; Schinköthe, W.

Induktive Beheizung von Spritzgießwerkzeugen - eine Übersicht. SKZ-Fachtagung Spritzgießen von Elastomeren. Würzburg, 8.-9.3.2006.

Clauß, C.; Schinköthe, W.

DFG-Forschungsvorhaben Integrierte Wegmessung in feinwerktechnischen Lineardirektantrieben durch Detektion der Flusssdichte im flussführenden Eisen. Abschlussbericht April 2006, Schi 457/8.

Rothenhöfer, E.; Giljum, M.; Schinköthe, W.; Vyshnevskyy, O.; Wischnewskiy, W. Optimization of a Two-Contact Linear Ultrasonic Motor Using FEM Analysis. Postervortrag Actuator 2006, Bremen.

Schinköthe, W.

Abschnitt 4.2. Elektrodynamische Linear- und Mehrkoordinatenantriebe in Kallenbach, E.; Stölting, H.- D. Handbuch Elektrische Kleinantriebe, 3. überarbeitete Auflage. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag 2006.

Schinköthe, W. u. a.

Das Cluster Mikro- und Gerätetechnik an der Fakultät Maschinenbau. Transmitter 01/2006, S. 5-19.

### Vorträge anlässlich des Doktoranden-Kolloquiums

Beier, M.

Zuverlässigkeitsbetrachtungen von mechatronischen Systemen am Beispiel von Kleinplanetenradgetrieben mit Kunststoffverzahnung. IKFF, 19.10.2006.

Mochel, F.

Aerostatische Führungen mit statorseitiger Druckluftversorgung für Ein- und Mehrkoordinatenantriebe zur Realisierung freier Läuferbewegungen. IKFF, 16.11.2006.



Dannemann, M.

Dimensionierung von Lineardirektantrieben. IKFF, 07.12.2006.

Zusätzlich diverse Forschungsberichte für industriefinanzierte Drittmittelprojekte und jährliche Überarbeitung der Vorlesungsskripte.

## 5.2 Gremienarbeit

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe:

Mitglied des Universitätsrats der Universität Stuttgart bis 09/2006

Mitglied des Wissenschaftlichen Beirates des Interuniversitären Zentrums für Medizinische Technologie Stuttgart-Tübingen (IZST)

Mitglied des Wissenschaftlichen Beirates der Zeitschrift Mechatronik F&M

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

Wissenschaftlicher Tagungsleiter und Leiter des Programmausschusses der Tagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Augsburg 2007

Innerhalb 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.

## 5.3 Tag der offenen Tür

**„Einen Elfmeter auf ein Tor ohne Torwart zu schießen, sollte eigentlich wenig Probleme bereiten“**

Ganz so einfach war die Aufgabe beim 14. Konstruktionswettbewerb am Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik dann aber doch nicht. Die Elfmeter-Schützen mussten einigen Vorgaben entsprechen. Die Maschinen sollten die Aufgabe ohne Hilfe eines menschlichen Bedieners ausführen, durften keine den Rasen berührenden Räder oder Raupenketten haben und sie hatten enge Vorgaben bei der Energieversorgung und Größe. Wie auch beim „richtigen“ Fußballspiel wurden Regelverstöße mit gelben und roten Karten bestraft.

Trotz aller Einschränkungen gab es dann doch ganz unterschiedliche Lösungen, zuerst an den Schuh zu kommen und mit diesem dann den Ball in das Tor zu spielen. Manche „Spieler“ blieben am Platz stehen und streckten nur das Bein, andere legten sich einen eigenen Plattenweg auf den Rasen, um dann auf diesem zu fahren. Auch die übliche, klassische Bewegung der Fußballer, Laufen, wurde von einem Teil der Teams zur Fortbewegung der Maschinen gewählt.

Wie bei den spannenden Elfmeterschießen der Fußballweltmeisterschaft 2006 gab es auch beim Konstruktionswettbewerb hart in die Ecken des Tors gezielte Schüsse, knappe Pfofentrefner und auch vergebene Chancen. Als zusätzliche Varianten gab es auch Schüsse, die kurz vor dem Tor verhungerten, und eine Maschine, die wohl nicht so ganz wusste, was mit Schuh und Ball zu tun ist und im großen Bogen um beide herum lief.

Am Schluss entschieden nur wenige Zehntelsekunden darüber, welche Maschine am schnellsten einen Elfmeter verwandeln konnte.

Für die elf teilnehmenden studentischen Teams war auch dieses Jahr der Wettkampf wieder eine Gelegenheit, gelerntes Wissen im spannenden Vergleich zu erproben, und für das begeisterte Publikum war es wie in den letzten Jahren wieder ein unterhaltsamer Wettbewerb.

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

Altenburger Brauerei GmbH, Arburg GmbH & Co., AUDI AG, Bilz Werkzeugfabrik GmbH & Co. KG, Carl Hanser Verlag GmbH & Co., Dr. Boy GmbH & Co. KG, Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG, Dr.-Ing. Paul Christiani GmbH & Co. KG, Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG, Kendrion Binder Magnete GmbH, Robert Bosch GmbH und Springer Verlag GmbH.

### **Ergebnisse:**

1. Platz: Georg Brüning, Matthias Häusler, Emrah Karadag, Sava Marjanov
2. Platz: Julia Rommel, Alexander Burth, Tobias Kupke, Oliver Miedaner
3. Platz: Steffen Ried, Matthias Ritter, Christian Rüter, Frederik Schaal.

## 6 KONGRESSE, TAGUNGEN UND MESSEN

Prof. Schinköthe, W.:

- VDI/VDE Arbeitskreis „Stellantriebe“, München, 14.11.2006 und Frankfurt, 5.4.2006
- Workshop „Systemzuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen“, Freudenstadt, 16./17.2.2006

Beier, M.:

- Workshop „Systemzuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen“, Freudenstadt, 16./17.2.2006
- Seminar der Forschergruppe DFG 460 „Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau“, Universität Stuttgart, 4./5.5.2006

Burkard, E.:

- SKZ Fachtagung „Spritzgießen von Elastomeren“, Würzburg, 8.-9.3.2006.
- ARBURG Technologietage, Loßburg, 30.3.2006
- FAKUMA, Friedrichshafen, 18.10.2006.

Rothenhöfer, E.:

- Actuator 2006, Bremen, 14.-16.6.2006.

## **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 stellen wir exemplarisch je eine Veröffentlichung aus dem Bereich Spritzgießen und dem Bereich Piezoaktorik vor:

Burkard, E.; Schinköthe, W.

Induktive Beheizung von Spritzgießwerkzeugen - eine Übersicht. Vortrag zur SKZ-Fachtagung Spritzgießen von Elastomeren, Würzburg, 8.-9.3.2006.

Rothenhöfer, E.; Giljum, M.; Schinköthe, W.; Vyshnevskyy, O.; Wischnewskiy, W. Optimization of a Two-Contact Linear Ultrasonic Motor Using FEM Analysis, Postervortrag Actuator 2006, Bremen.

# INDUKTIVE BEHEIZUNG VON SPRITZGIESSWERKZEUGEN – EINE ÜBERSICHT

Dipl.-Ing. E. Burkard<sup>1</sup> und Prof. Dr.-Ing. W. Schinköthe<sup>2</sup>

<sup>1</sup> IKFF, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9; 70550 Stuttgart  
Tel.: + 49 (0) 711 685 6403, Fax: + 49 (0) 711 685 6356, email: spritzguss@ikff.uni-stuttgart.de

<sup>2</sup> IKFF, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9; 70550 Stuttgart  
Tel.: + 49 (0) 711 685 6402, Fax: + 49 (0) 711 685 6356, email: schinkoethe@ikff.uni-stuttgart.de

**Kurzfassung:** Beim Spritzgießen von Thermoplasten, aber auch bei einigen anderen technischen Verfahren zur Formgebung von Kunststoffen werden zunehmend Ansprüche an die Temperatur der Werkzeuge gestellt, die sich wirtschaftlich nur mit einer sehr schnellen Aufheizung, kombiniert mit einer ebenso schnellen Kühlung erfüllen lassen.

Sehr hohe Aufheizgeschwindigkeiten lassen sich bei metallischen Formen durch Wärmeerzeugung nach dem induktiven Prinzip erreichen. Dabei kann eine induktive Beheizung extern oder integriert im Werkzeug erfolgen. Eine Übersicht soll die Möglichkeiten dazu verdeutlichen.

## 1 Motivation

Wenn im Zusammenhang mit Spritzgusswerkzeugen zur Verarbeitung thermoplastischer Formmassen von Temperierung die Rede ist, so ist damit in erster Linie die Kühlung gemeint, die von ganz seltenen Ausnahmen abgesehen bei allen diesen Spritzgusswerkzeugen notwendig ist. Die aufgeschmolzene Kunststoffmasse, die im Werkzeug ihre Wärme abgibt und erstarrt, bewirkt bei jedem Zyklus einen Wärmeeintrag, der abgeführt werden muss, um die Werkzeugtemperatur im Mittel konstant zu halten. Zunehmend werden aber an Spritzgusswerkzeuge Anforderungen gestellt, die eine variotherme Temperierung notwendig machen. Variotherm bedeutet, dass die Werkzeugtemperatur nicht mehr annähernd konstant gehalten, sondern gezielt ein Temperaturprofil gefahren wird, um die einzelnen Abschnitte der Teilebildung optimal zu unterstützen. In der Regel wird dabei zur Zeit des Einspritzens und der Formfüllung eine höhere Temperatur der Form angestrebt (bis hin zur Massetemperatur), während nach Abschluss der Formfüllung die Temperatur des Werkzeugs wieder rapide gesenkt wird, um eine schnelle Erstarrung der Masse zu gewährleisten.

Eine nahezu konstant gehaltene Werkzeugtemperatur ist bei der Verarbeitung von Thermoplasten immer ein Kompromiss zwischen den Ansprüchen einer fehlerfreien Füllung der Form und optimaler Oberflächenqualität des abgeformten Teils einerseits und wirtschaftlichen Überlegungen mit der Bedingung einer möglichst kurzen Kühlzeit andererseits. Variotherme Temperierung bietet sich immer dann an, wenn zur fehlerfreien Formfüllung eine deutlich höhere Formtemperatur notwendig oder wünschenswert wäre, als im Interesse einer kurzen Zykluszeit während der Erstarrung des Formteils annehmbar.

Typische Problemteile sind zum Beispiel:

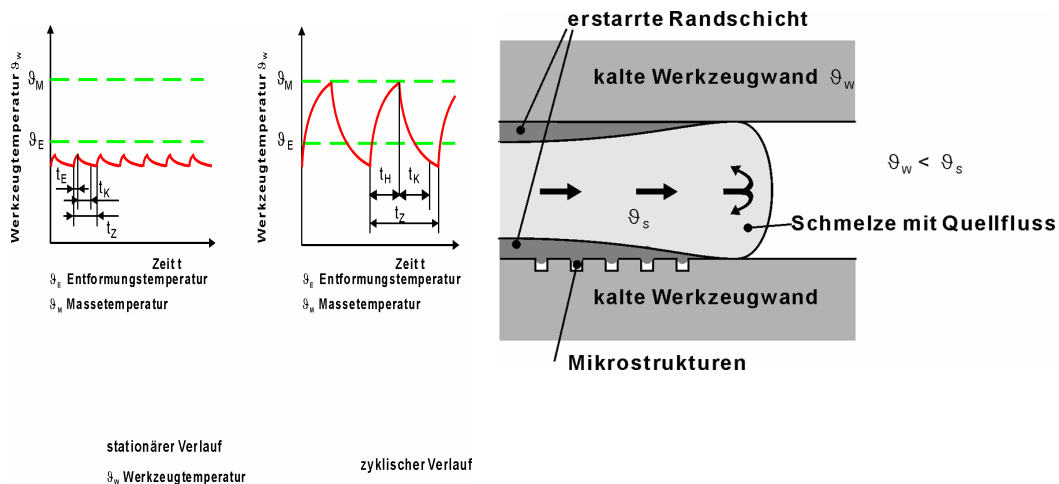
- dünnwandige Teile mit langen Fließwegen (hohen Aspektverhältnissen) und Teile mit mikrostrukturierten Oberflächen  
In beiden Fällen besteht das Problem darin, dass die Masse beim Kontakt mit der kalten Kavitätswand schnell über den gesamten Querschnitt erstarrt und keine plastische Seele verbleibt, durch die weitere Masse in weiter entfernte Bereiche gelangen könnte. Unterhalb einer gewissen Querschnittsfläche dringt der Kunststoff bei konventioneller Temperierung, also vergleichsweise „kaltem“ Werkzeug nicht mehr ein. Üblicherweise wird zum Beispiel angenommen, dass Spalte von weniger als 0,02 mm Breite an Auswerfern und Kavitätsfugen nicht gefüllt werden.
- dickwandige Teile mit hohen Anforderungen an die Oberflächenqualität

Hier sind die widersprüchlichen Anforderungen während der Formfüllung und der Kühlzeit am deutlichsten ausgeprägt. Um den beträchtlichen Wärmehalt des Teils zügig abführen zu können, muss die Kavitätswand nach Abschluss des Einspritzvorgangs eine möglichst niedrige Temperatur haben und halten. Dickwandige Teile können zwar auch bei sehr niedriger Formtem-

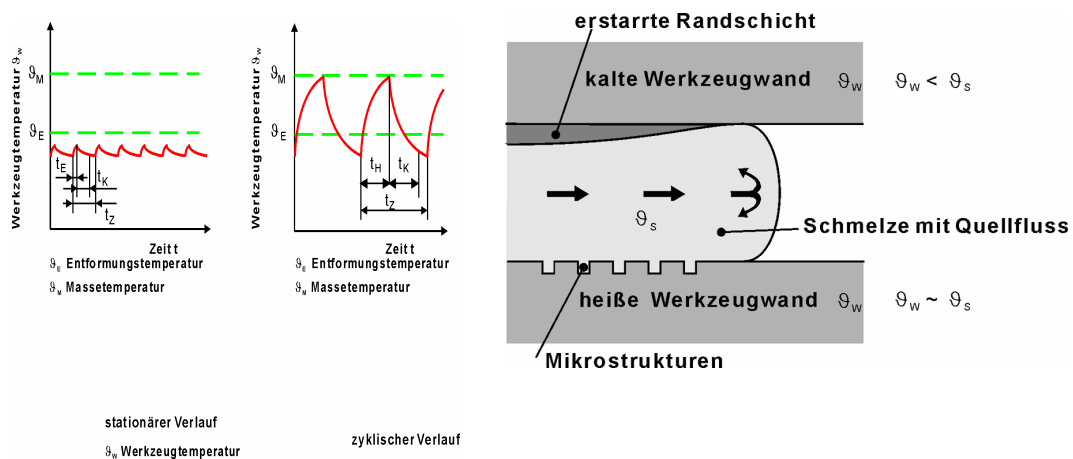
peratur abgeformt werden, die Oberflächenqualität leidet aber dabei. Daher kommt ein dauerhaft extrem niedriges Temperaturniveau nicht für Teile in Betracht, deren Funktion von der Oberflächenqualität bestimmt wird (zum Beispiel optische Systeme) oder bei denen ein hoher Wertigkeitseindruck angestrebt wird (hochwertige Verbrauchsgüter). Interessanterweise kann dieser Aspekt gerade auch bei sehr billigen Artikeln zum Tragen kommen.

Die Abbildungen 1 und 2 zeigen diese Problematik beispielhaft bei der Abformung von mikrostrukturierten Oberflächen auf. Bei isothermer Temperierung füllt der Kunststoff die mikrostrukturierte Oberfläche des vergleichsweise „kalten“ Werkzeuges nicht mehr vollständig aus.

Schnelles Aufheizen und Abkühlen ist aber nicht nur für den Spritzguss von thermoplastischen Formmassen von Interesse, auch andere Verfahren zur Verarbeitung von Kunststoffen haben Bedarf an schnellen Temperaturwechseln, zum Beispiel das Heißprägen von Mikrostrukturen [8, 10].



**Abb. 1:** Randschichterstarrung beim Spritzgießen mit isothermer Temperierung [4]



**Abb. 2:** Spritzgießen mit variothermer Prozessführung [4]

## 2 Einführung in die variotherme Prozessführung

Gängige Verfahren zur variothermen Temperierung verwenden zwei Flüssigkeitskreisläufe mit Medien auf unterschiedlichen Temperaturniveaus oder widerstandselektrische Heizelemente, gepaart mit Flüssigkeitskühlung. Schließlich ist auch eine induktive Heizung in verschiedensten Ausprägungen mit Flüssigkeitskühlung möglich.

Zunächst bietet sich eine öl-variotherme Prozessführung mittels zweier unterschiedlich temperierter Ölkreisläufe im Werkzeug an [2], Abb. 3. Der Werkzeugrahmen wird durch einen primären Ölkreislauf mit einem „kalten“ Temperiermedium durchströmt und so auf Entformungstemperatur gehalten. Im thermisch weitgehend isolierten Kavitätsbereich wird je nach Prozessphase zwischen einem heißen und einem kalten Temperiermedium umgeschaltet (Abb. 4), was die Erwärmung bzw. die sich an das Einspritzen anschließende Abkühlung der Kavität bewirkt. Aufgrund der hohen Wärmekapazität des Formeinsatzes und des nur mäßigen Wärmeüberganges ergeben sich lange Zykluszeiten im Bereich mehrerer Minuten. Der Temperaturwechsel ist vergleichsweise langsam, große Werkzeugbereiche werden geheizt bzw. wieder abgekühlt.

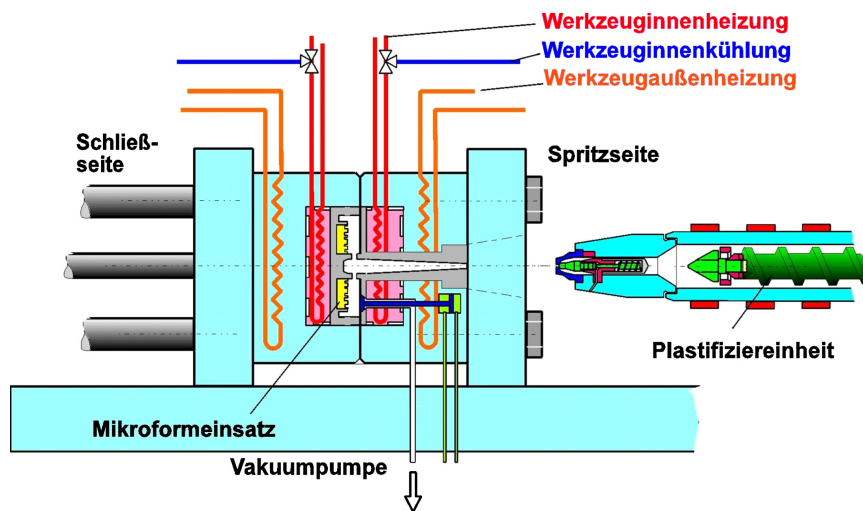


Abb. 3: Spritzgießwerkzeug für öl-variotherme Prozessführung [2]

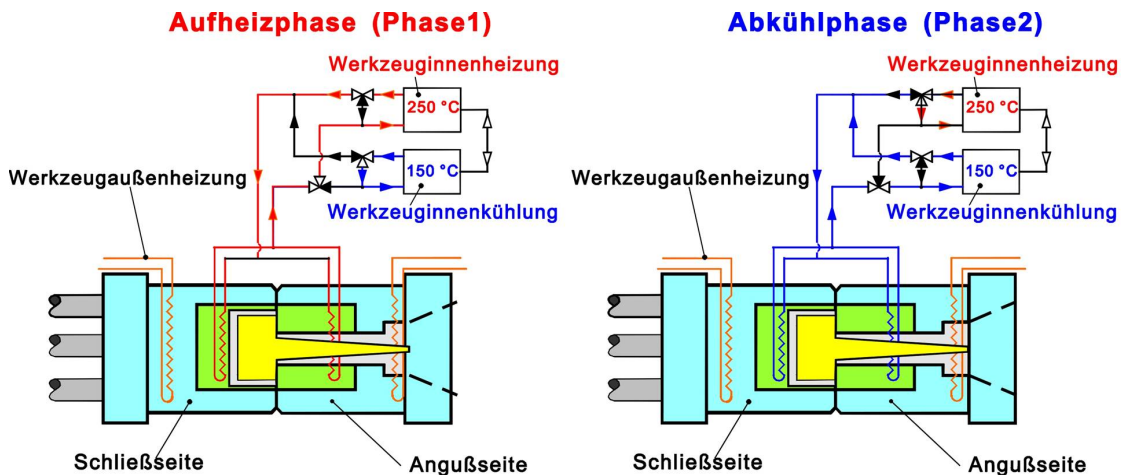


Abb. 4: Öl-variotherme Prozessführung [2]

Nahe liegend ist als zweite Methode die Zuhilfenahme von elektrischen Widerstands-Heizelementen [7]. Das Werkzeug wird wiederum zunächst mit einem flüssigen Temperiermedium auf konstanter Temperatur gehalten. Vor dem Einspritzen erwärmen gezielt platzierte Heizelemente die komplette Kavität oder nur bestimmte Bereiche der Kavität auf die gewünschte Temperatur. Vor allem bei niedrigen Temperaturen ist eine schnelle Aufheizung durch kavitätsnah platzierte Heizelemente möglich. Die Kühlung muss räumlich getrennt erfolgen.

Beide Methoden haben sich bereits etabliert und werden unter Produktionsbedingungen eingesetzt. Verbesserungsbedarf gibt es jedoch bei den erreichbaren Zykluszeiten, die diejenigen des Standard-

spritzgießens bis zum Zehnfachen übersteigen und durch die lange Verweildauer des Kunststoffes in der Schnecke zu thermischen Schädigungen der Formmasse führen können. Andererseits stoßen die Verfahren auch an Grenzen hinsichtlich des Temperatur-Offsets für Hochtemperaturkunststoffe. Am IKFF wird deshalb der Einsatz einer dritten Erwärmungsmethode untersucht, die auf dem **induktiven Erwärmungsprinzip** beruht [1 - 6].

### 3 Prinzip der induktiven Beheizung

#### 3.1 Induktive Erwärmung

Im technischen Bereich kennt man die Wärmeerzeugung nach dem induktiven Prinzip hauptsächlich aus den Bereichen der Wärmebehandlung von Metallen und der Gießerei, sie wird aber auch noch für zahlreiche andere Anwendungen eingesetzt. Auch in Küchenherden wird das Verfahren schon länger genutzt. Am IKFF wird nun bereits seit geraumer Zeit daran gearbeitet, die beträchtlichen Vorteile, die der Einsatz der induktiven Beheizung zur variothermen Temperierung von Spritzgusswerkzeugen eröffnet, nutzbar zu machen [1 - 6].

Die induktive Wärmeerzeugung beruht auf dem Transformatorprinzip, Abb. 5. Ein von hochfrequentem (ca. 10 kHz bis 500 kHz) Wechselstrom hoher Stromstärke durchflossener Leiter, der Induktor, ist von einem elektromagnetischen Wechselfeld gleicher Frequenz umgeben. Wird ein leitfähiges Material in dieses Wechselfeld eingebracht, so werden in einer dünnen Oberflächenschicht wiederum kurzgeschlossene elektrische Ströme induziert. Durch die Verlustleistung dieser Ströme am ohmschen Widerstand des Materials entsteht Wärme. Um die Erwärmung des Induktors selbst beherrschbar zu halten, wird dieser meistens als Hohlleiter ausgeführt und mit Wasser durchströmt.

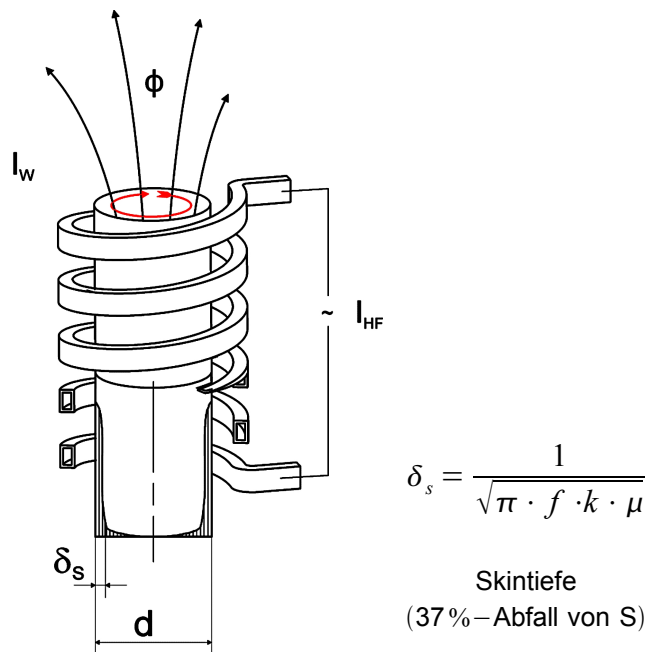


Abb. 5: Prinzip der Induktionserwärmung [4]

Vorteilhaft gegenüber anderen Methoden, Metalle zu erhitzen, ist vor allem die sehr hohe erzielbare Erwärmungsgeschwindigkeit. Dies beruht einerseits darauf, dass die Wärme direkt im Material des zu erwärmenden Gegenstands entsteht, andererseits aber insbesondere auch auf der sehr hohen Leistung, die durch eine gegebene Oberfläche eingebracht werden kann.

#### 3.2 Impulskühlung

Die Wärmeabfuhr erfolgt bei Spritzgusswerkzeugen am häufigsten durch eine Flüssigkeitskühlung in Form einer konstanten Durchströmung der Werkzeuggrundplatten mit einem Medium, das dann außerhalb des Werkzeugs wieder zurückgekühlt wird. Teilweise werden zusätzlich, selten auch

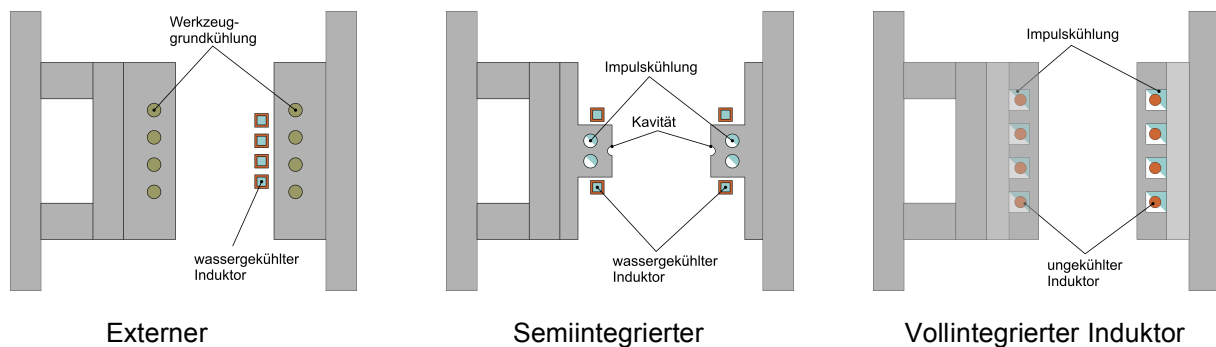


ersatzweise Verfahren mit noch höherem abführbarem Wärmestrom eingesetzt, wie elektrothermische Verfahren (Peltier-Elemente), Wärmerohre oder die Expansion von flüssigem Kohlendioxid.

Da der Wärmeeintrag ins Werkzeug nicht kontinuierlich erfolgt, sondern zyklisch zwischen Null und einem Maximalwert pendelt, ist eine Kühlung mit nahezu konstanter Wärmeabfuhr zwar normalerweise ausreichend, aber für problematische Teile nicht optimal [10]. Impulskühlung heißt, dass die Wärmeabfuhr nur während der Zeiten erfolgt, in denen das durch den Wärmeeintrag erforderlich ist. Dies verhindert insbesondere bei hohen Kühlleistungen die Abkühlung des Werkzeugs auf zu niedrige Temperatur in Phasen geringen Wärmeeintrags und die damit verbundene schlechtere Teilequalität. Bei vollständig variothermem Betrieb – also mit Heizung und Kühlung im Wechsel – entsteht zwangsläufig eine Impulskühlung.

## 4 Umsetzung der induktive Werkzeugtemperierung

Die Umsetzung der induktiven Erwärmung ist vom Werkzeug abhängig. Sie kann extern erfolgen bei Abkühlung in den grundtemperierten Werkzeugrahmen, halb-intern mit Impulskühlung der Form oder vollständig integriert ebenfalls mit Impulskühlung realisiert werden, Abb. 6.



**Abb. 6:** Anordnungsvarianten eines Induktors für eine Induktionserwärmung

### 4.1 Externer Induktor

Bei annähernd planen Kavitäten und Teilen, die eine hohe Temperatur nur kurzzeitig beim Einspritzen benötigen, kann der Induktor ins geöffnete Werkzeug eingefahren werden und direkt die Trennebene aufheizen, Abb. 7, 8, 9. Die Abkühlung erfolgt ins Material hinein, wie zum Beispiel auch vom induktiven Härten bekannt. Der Werkzeuggrundkörper wird dazu konventionell temperiert. Da die Abkühlung der Formoberfläche bereits einsetzt, während das Werkzeug geschlossen wird, muss auf eine höhere Temperatur erwärmt werden, als eigentlich zum Einspritzzeitpunkt notwendig [1-4].

Kennzeichnend sind:

- konstruktiv einfacher Aufbau, aber Handlingsystem zum Einfahren des Induktors nötig
- bei geeigneter Kavitätsgeometrie oft ohne Neukonstruktion des Werkzeugs nachrüstbar
- schnellste Aufheizung, weil direkt die Kavitätsoberfläche erwärmt wird und schnellste Abkühlung durch geringste eingebrachte Wärmemenge.

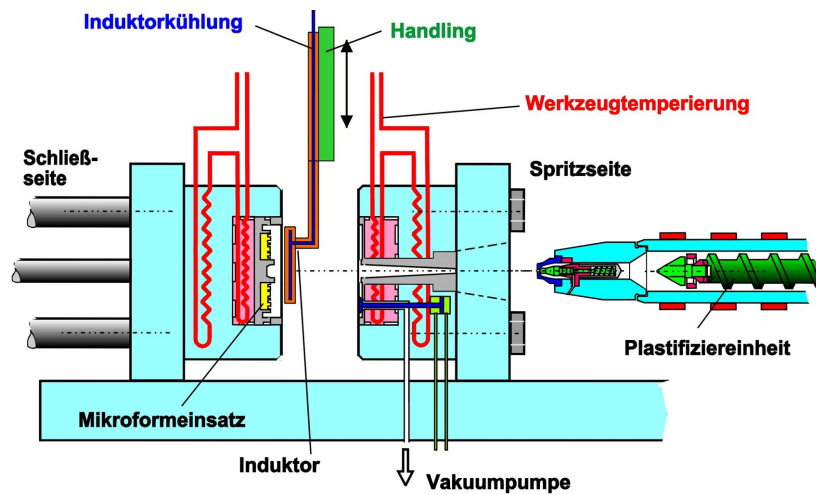


Abb. 7: Induktive Werkzeugtemperierung mit externem Induktor [2, 4]

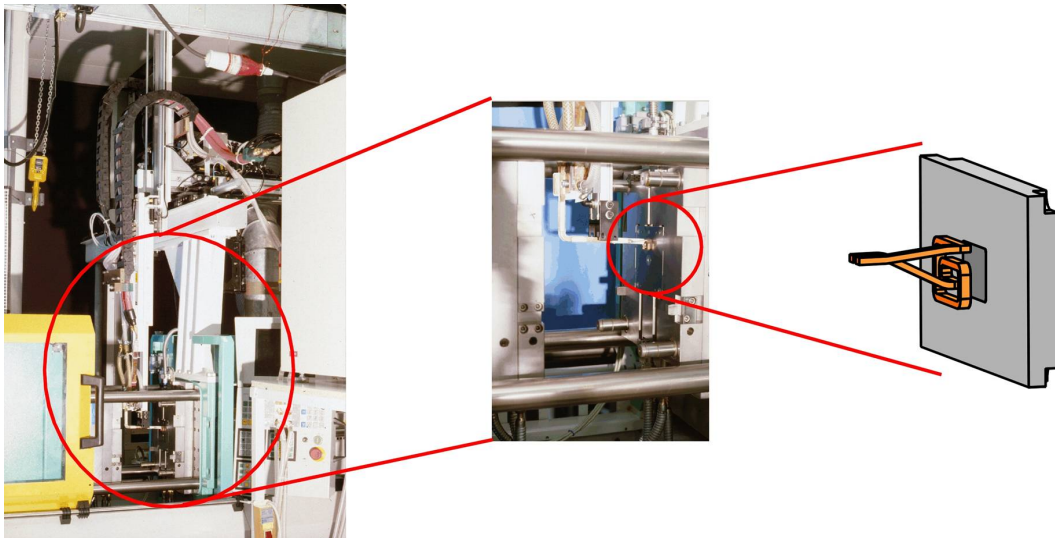


Abb. 8: Anordnung eines externen Induktors zur Abformung von Mikrostrukturen [4]

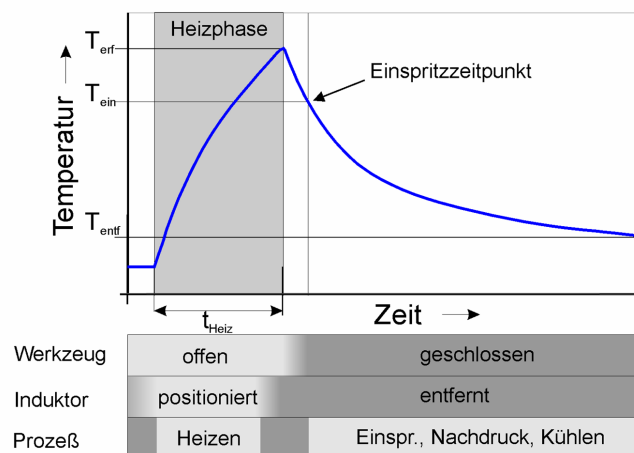


Abb. 9: Typischer Temperaturverlauf mit externem Induktor [4]

## 4.2 Integrierter Induktor

Da ein in das Werkzeug integrierter Induktor nicht mehr entfernt wird, kann während der Schließbewegung und bei geschlossenem Werkzeug weiter geheizt werden. In der Regel muss allerdings die Werkzeugkonstruktion bereits den Einsatz des Induktors vorsehen, ein nachträglicher Einbau ist kaum denkbar. Das den Induktor umgebende elektromagnetische Wechselfeld induziert Wirbelströme in allen leitfähigen Materialien in Induktornähe, so dass diese gegebenenfalls ebenfalls erwärmt werden. Um dies zu vermeiden, sind entweder ausreichende Luftspalte, Bereiche aus anderen Nichtleitern oder Abschirmungen vorzusehen. Als Abschirmung eignen sich nicht-ferromagnetische Metalle hoher Leitfähigkeit, da in diesen zwar Wirbelströme entstehen, aber aufgrund des geringen Widerstands die ohmsche Verlustleistung sehr viel geringer ist als in Eisenwerkstoffen. Damit erwärmen sich diese Materialien erheblich langsamer.

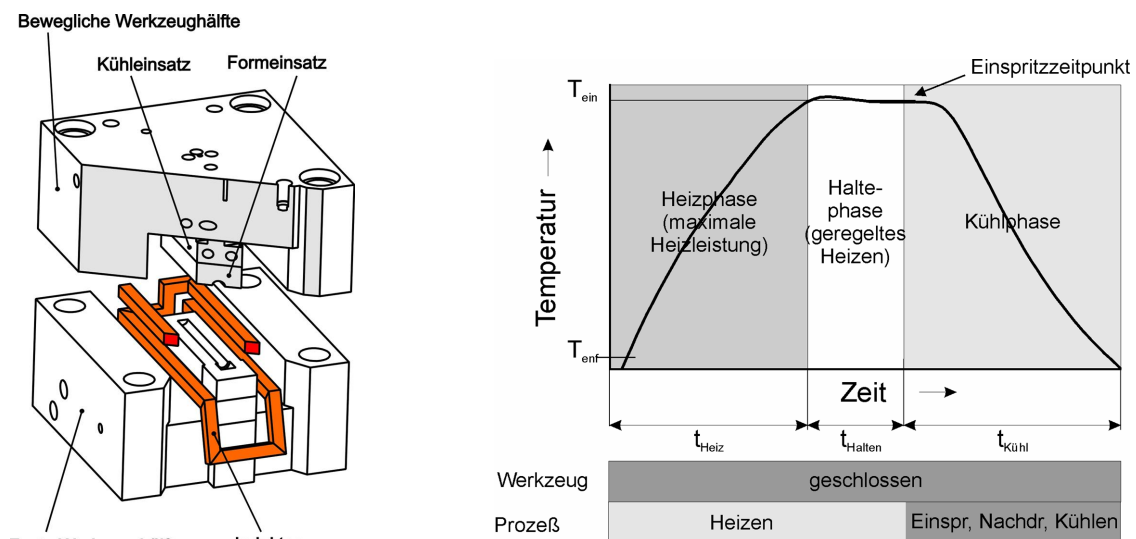
Kennzeichnend sind hier:

- Keine Bewegungen im Werkzeugraum nötig, vorteilhaft bei Einsatz eines Entnahmehandlings
- Temperaturmessung vergleichsweise einfach
- Temperatur kann geregelt und gehalten werden.

### 4.2.1 Semiintegrierter Induktor

Für stabförmige Kavitätsbereiche kann ein Aufbau gewählt werden, bei dem ein haarnadelförmiger Induktor einen langgestreckten Kavitätsbereich parallel zur Trennebene umschließt, während eine konventionelle oder auch Impulskühlung unterhalb der Kavität verläuft, Abb. 10. Der Werkzeugaufbau ist weitgehend konventionell, die induktive Erwärmung ist in einzelnen Fällen nachrüstbar.

In der Regel ist einer Impulskühlung der Vorzug zu geben, da die Kühlkanäle noch im Erwärmungsbereich der Heizung liegen, was bei kontinuierlicher Kühlung die Heizleistung reduzieren und das Kühlmittel unnötig erwärmen würde. Die Erwärmung kann gegebenenfalls auch zur Verdampfung des Kühlmediums führen. Um die Leistung der Heizung zu optimieren, sollte das Kühlmedium vor der Heizphase aus den Kühlkanälen ausgeblasen werden.



**Abb. 10:** Anordnung eines semiintegrierten Induktors und typischer Temperaturverlauf [4]

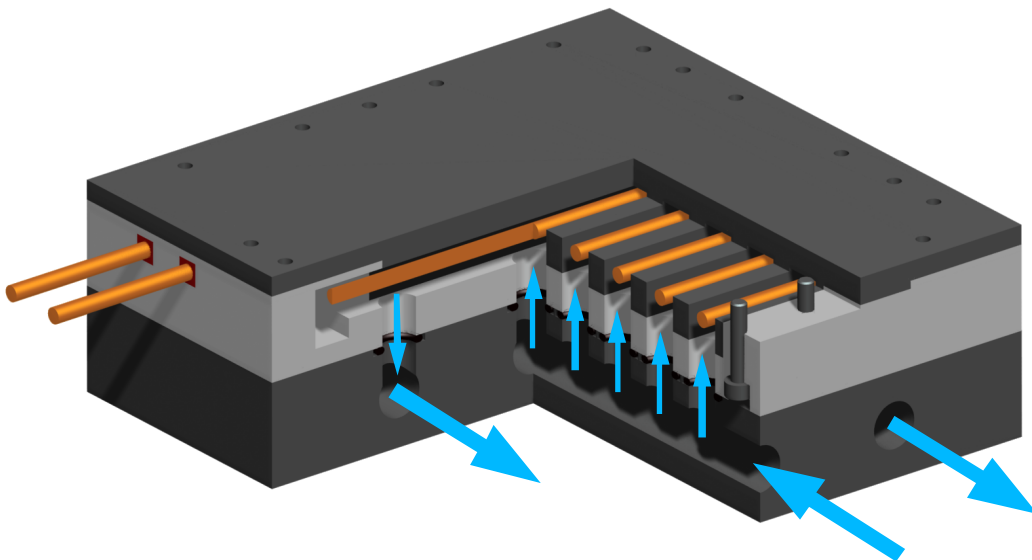
#### 4.2.2 Vollintegrierter Induktor

Weitgehend universell einsetzbar wird die induktive Beheizung, wenn es gelingt, sie vollständig unterhalb der Kavität in einer Formplatte einzubauen, Abb. 11. Der Induktor wird dabei in einen Bereich verlegt, in dem auch eine konventionelle Temperierung, sei es mit flüssigen Medien oder widerstandselektrisch, angeordnet würde. Da die gleichen Kanäle sowohl den Induktor als auch das Kühlmedium führen, kann auf eine Innenkühlung des Induktors im Allgemeinen verzichtet werden.

Bei dieser Bauform wird der Impulsbetrieb der Kühlung obligatorisch, da die Kühlung auf die gleichen Oberflächen wirkt wie die Heizung und da an den direkt induktiv beheizten Oberflächen regelmäßig Temperaturen erreicht werden, die alle gängigen Temperiermedien zum Sieden oder gar zur Zersetzung bringen. Auch das Ausblasen des Kühlmediums vor Heizungsstart wird damit zwangsläufig erforderlich, da die Energie um die Kanäle „freizukochen“ schnell die zur eigentlichen Erwärmung der Form notwendige übersteigt. Ein Verzicht auf das Ausblasen wäre nicht nur Energieverschwendung, sondern würde natürlich auch die Heizzeit entsprechend in die Höhe treiben.

Kennzeichnend sind hier:

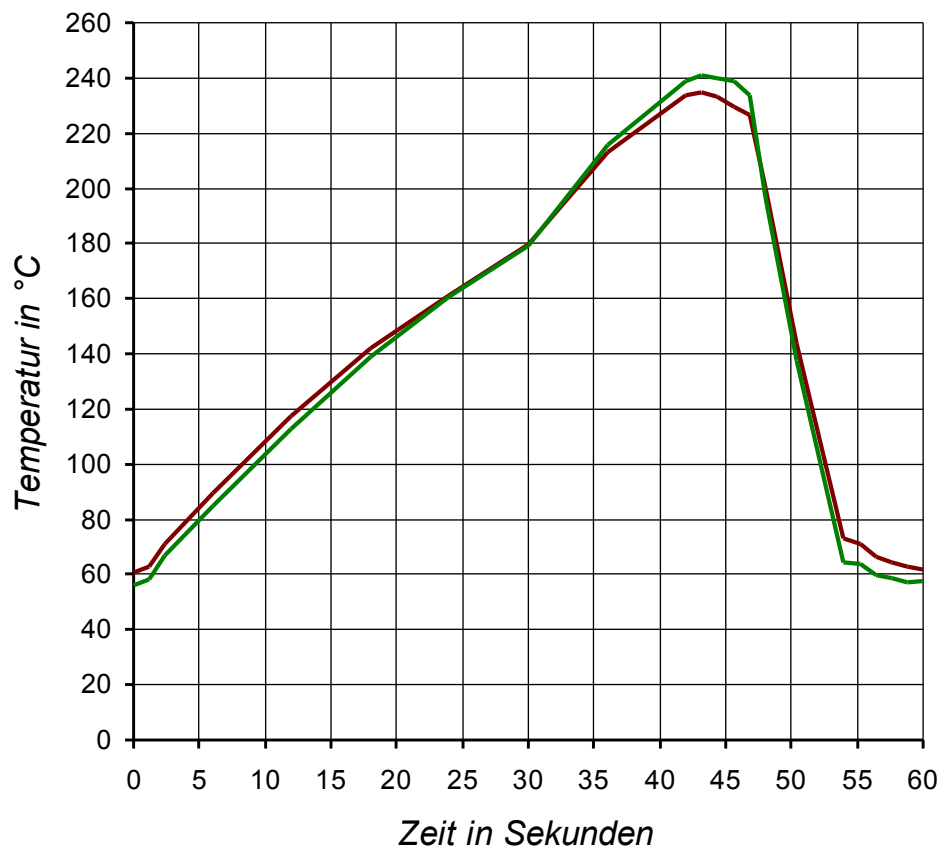
- Da der Induktor in der Regel ungekühlt betrieben werden kann, wird eine einfache Herstellung aus gebogenem Vollmaterial möglich.
- Vielfältige Kavitätsgeometrien sind beheizbar.



**Abb. 11:** Versuchsformplatte 156 mm × 156 mm mit vollständig integriertem Induktor, für Messzwecke ohne eigentliche Kavität ausgeführt; die Pfeile kennzeichnen den Kühlwasserfluss in der Kühlphase

Der Induktor ist in gefrästen Nuten auf der Unterseite der eigentlichen Kavitätsplatte verlegt, die zusammen mit einer abschließenden Unterplatte aus Aluminium auch die Kühlkanäle bilden. Das Kühlwasser wird durch eine dritte, noch tiefer liegende Platte zugeführt, fließt durch senkrechte Bohrungen zur Mitte der Kühlkanäle, von dort nach außen und wieder von der Kavitätsplatte weg. Damit wird ein Bereich um die Mitte der Kavitätsplatte nicht nur schnell aufgeheizt, sondern auch überaus schnell wieder abgekühlt.

Für die mit der beschriebenen Formplatte durchgeführten Versuche wurde ein Prozess angenommen, der eine Temperaturführung zwischen den Grenztemperaturen 240°C (als typischer Massetemperatur eines technischen Thermoplasts) und 60°C (als Entformungstemperatur) erfordert. Aufheizung und Abkühlung wurden unmittelbar aufeinander folgend zyklisch gefahren, um einen quasistationären, eingeschwungenen Zustand der äußeren Plattenbereiche zu erzielen, Abb. 12.

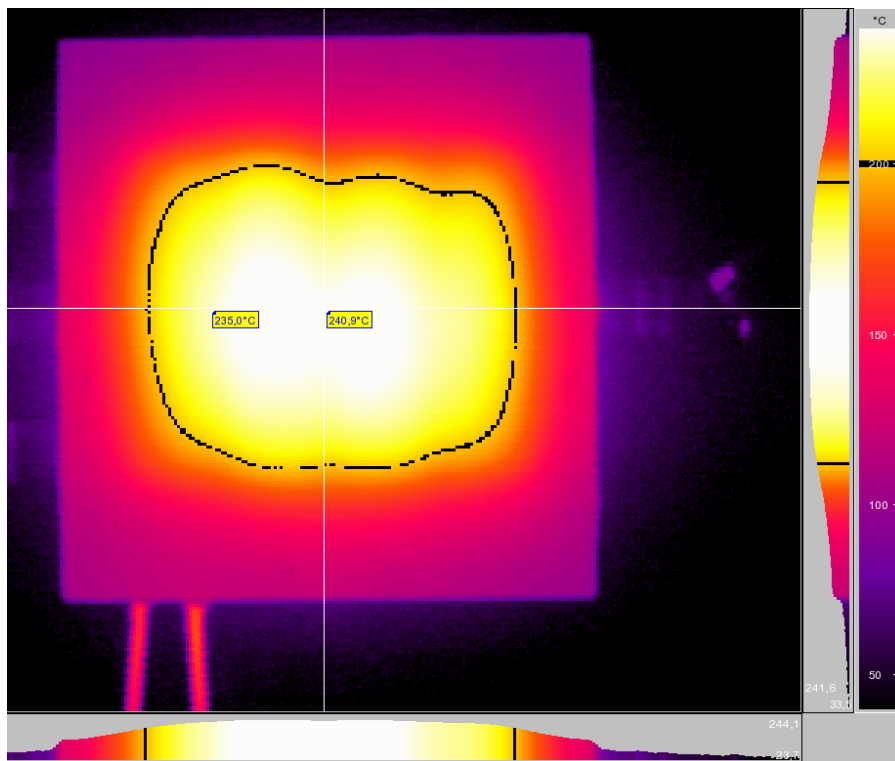


**Abb. 12:** Temperaturverlauf an zwei Punkten der fiktiven Kavität (siehe auch die Markierungen in Abb. 13); die Ungleichförmigkeit im Bereich 30 s/180°C ist vermutlich ein Artefakt der Messbereichsumschaltung des eingesetzten Thermografiesystems

Bei diesen Versuchen betrug die Leistungsaufnahme des Induktionsgenerators während der Heizphase konstant ca. 3,5 kW. Mit dieser Heizleistung wurde die obere Zieltemperatur von 240°C innerhalb von ca. 43 Sekunden erreicht. Daraufhin wurde die Heizung abgeschaltet und eine Sekunde später mit der Kühlung begonnen. Als Kühlmedium diente Leitungswasser mit ca. 15°C Temperatur im Zulauf. Kurz vor Erreichen der unteren Grenztemperatur von 60°C wurde die Wasserzufuhr wieder unterbrochen, und die Kühlkanäle wurden 5 Sekunden lang mit Druckluft ausgeblasen. Mit dieser Kühlung wurde die Ausgangstemperatur von 60°C in 17 Sekunden wieder erreicht, 60 Sekunden nach Beginn der Heizphase.

Wie eine Thermografie-Aufnahme in Abb. 13 zeigt, ergibt sich bei Erreichen der Zieltemperatur von 240°C an der heißesten Stelle der Oberfläche eine weitgehend gleichmäßige Temperaturverteilung in einem mittleren Bereich der Kavitätsplatte. Der Rand der Platte konnte der schnellen Erwärmung nicht folgen, dort stellt sich über mehrere gefahrene Zyklen eine nahezu konstante Temperatur von ca. 100 bis 120°C ein. Der Temperaturwechsel und damit auch die Energiezu- und -abfuhr beschränken sich also auf den Bereich der Kavität, während der Werkzeugrahmen kaum beteiligt ist.

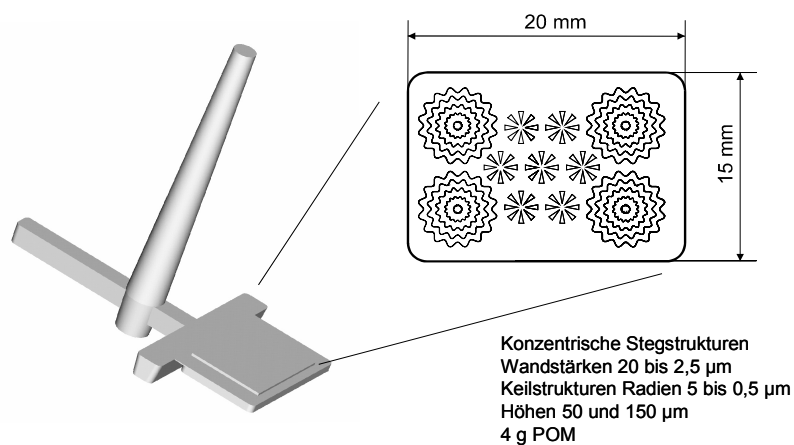
Unten links sind in der Thermografie in Abb. 13 die Induktorzuleitungen zu sehen. Deren Temperatur bewegt sich zwischen ca. 80°C am Ende der Kühlphase und ca. 150°C am Ende der Heizphase. Die Impulskühlung der Induktorstränge im Inneren der Versuchsplatte reicht also aus, um durch Wärmeleitung auch den ungekühlten Zuleitungsbereich zwischen den gekühlten Anschlussklemmen des Generators und dem geheizten Bereich in einem sicheren Temperaturbereich zu halten.



**Abb. 13:** Thermografie-Aufnahme nach ca. 43 s Erwärmungszeit mit Isotherme bei 200°C

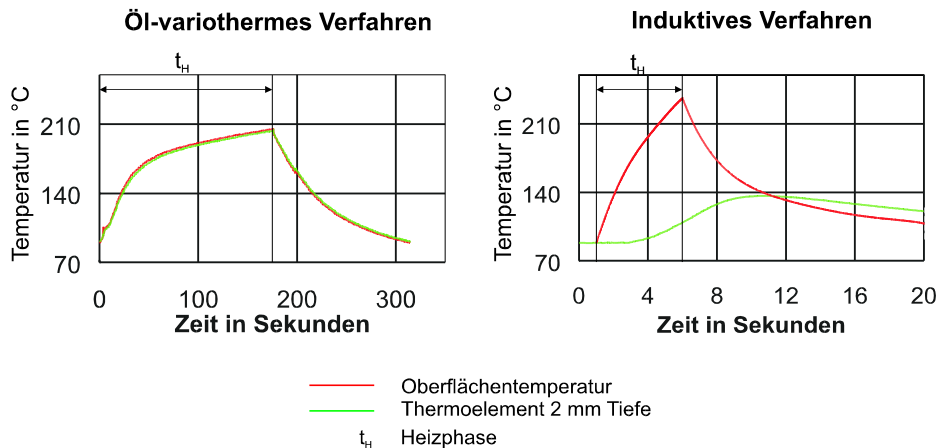
## 5 Ergebnisse, Anwendungsgebiete

Zur Untersuchung des Potenzials der induktiven Werkzeugtemperierung wurden zusammen mit dem Institut für Mikrotechnik Mainz GmbH (IMM) Induktionsanlagen mit externem Induktor in den Spritzgießprozess integriert und Abformversuche von Mikrostrukturen vorgenommen [2, 3, 4]. Die Formeinsätze wurden im LIGA-Verfahren hergestellt und beinhalten konzentrische Stege mit Wandstärken von 20, 15, 10, 5 und 2,5  $\mu\text{m}$  und Keile verschiedener Spitzenradien mit Aspektverhältnissen von 5 bis 40, Abb. 14. Die Gestaltung erfolgte mit dem Ziel, die Leistungsgrenzen des Verfahrens zu ermitteln. Die Geometrie des Induktors wurde den äußeren Abmaßen des LIGA-Formeinsatzes angepasst. Über ein zwangläufiges Kniehebelgetriebe wurde die Induktorspule vor der Kavität positioniert.



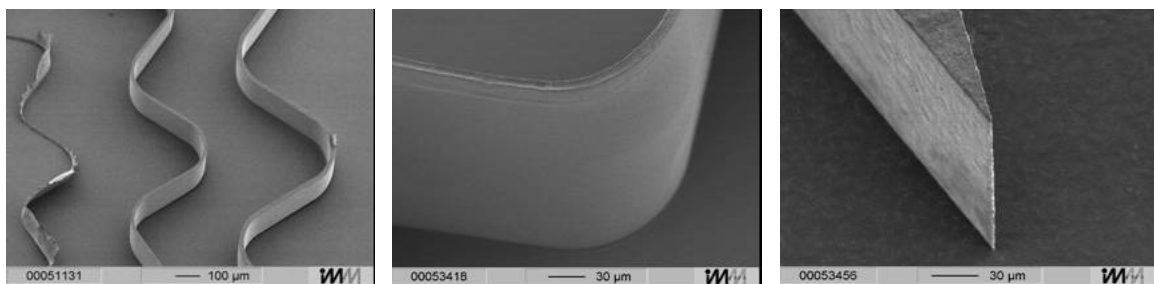
**Abb. 14:** Formteil mit konzentrischen Steg- und Keil-Mikrostrukturen [2]

In vorausgegangenen Erwärmungsversuchen an einem Versuchsstand konnte die Leistungsfähigkeit des Verfahrens im Vergleich zum öl-variothermen Verfahren unter Beweis gestellt werden, Abb. 15. Aufgeheizt wurde auf eine geforderte Werkzeugtemperatur von 200 °C. Die Heizzeit von 5 s beim induktiven Verfahren im Vergleich zu 180 s beim öl-variothermen Verfahren macht die Schnelligkeit der Induktionserwärmung deutlich (Gesamtzykluszeiten waren hier 25 s gegenüber 240 s). Gemessen wurde die Temperatur an zwei Stellen im Werkzeug, direkt an der Formoberfläche und 2 mm unter der Oberfläche. Während sich die Kurven im linken Bild fast überdecken ist im rechten Bild die Auswirkung der Induktionserwärmung zu sehen. Die Erwärmung findet primär in der Randschicht des Werkzeugs an der Oberfläche statt, der Wärmetransport in die tieferen Schichten erfolgt verzögert.



**Abb. 15:** Öl-variotherme und induktive Temperierung im Vergleich [4]

Das Versuchsbauteil mit den einseitig angeordneten Mikrostrukturen und einer Gesamtmasse von 4 g POM konnte mit einer Zykluszeit von 50 s gefertigt werden, wobei die Kavitätstemperatur zum Einspritzzeitpunkt ca. 190 °C betrug. Die Mikrostrukturen waren bei einer Wandstärke von 5 µm noch bis zu Strukturhöhen von 150 µm abformbar und entformbar, was einem Aspektverhältnis von 30 entspricht. Stege mit einer Wandstärke von 2,5 µm waren zwar abformbar, aber nicht mehr zu entformen. An den Keilstrukturen waren Keilradien bis 0,5 µm bei Strukturhöhen von 150 µm abform- und entformbar, was sogar Aspektverhältnissen von 150 entspricht, Abb. 16. In [2, 3, 4] sind weitere Abformungsbeispiele dargestellt, auf die hier aus Platzgründen nicht eingegangen werden kann.



Abriß 2,5 µm Steg, 150 µm hoch  
Vollständige Füllung bei 5 µm Steg

Ausschnitt Stegstruktur 10 µm,  
150 µm hoch

Ausschnitt Keilstruktur  
Radius 0,5 µm, 150 µm hoch

**Abb. 16:** Details abgeformter Teststrukturen (DFG-Projekt mit IMM Mainz [2, 4, 5])

## 6 Zusammenfassung, Ausblick

Die induktive Werkzeugtemperierung eignet sich als schnelles variothermes Temperierverfahren für die Massenproduktion beispielsweise von mikrostrukturierten Bauteilen. Kurze Erwärmungszeiten und hohe Temperaturniveaus erlauben eine dynamische Werkzeugtemperierung für verschiedenartigste Anwendungsfälle mit kurzen Zykluszeiten. Die Erwärmung planarer Strukturen beispielsweise der Mikrotechnik ist ebenso möglich wie die Temperierung echter dreidimensionaler Strukturen durch eine Integration des Induktors in das Werkzeug. Eine schnelle, nur partielle Erwärmung von Teilbereichen der Kavität ermöglicht darüber hinaus den Einsatz zur Steigerung der Teilequalität in weiteren Bereichen. Einsatzgebiete sind neben dem Spritzgießen auch Heißpräge-Verfahren und Sonderverfahren (z.B. Transferpressen).

Bei integriertem Induktor ist ein geregelter Temperaturverlauf auch auf hohem Temperaturniveau für größere Kavitätsbereiche realisierbar. Probleme bei der Anwendung sind aber bei großflächigen Konturen bzw. großer Kavitätsanzahl bei Mehrfachwerkzeugen zu erwarten.

Die Arbeiten hierzu wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens "Einfließen von Polymer-schmelzen in kleine Kavitäten beim Spritzgießen mit induktiver Werkzeugtemperierung" durch die DFG unterstützt.

### Literatur

- [1] Tewald, A.: Entwicklung und Untersuchung eines schnellen Verfahrens zur variothermen Werkzeugtemperierung mittels induktiver Erwärmung. Diss. Universität Stuttgart IKFF, Institutsbericht 13, 1997.
- [2] Schaumburg, C.: Mikrospritzgießen mit induktiver Werkzeugtemperierung. Diss. Universität Stuttgart IKFF, Institutsbericht 17, 2001.
- [3] Kemmann, O.: Untersuchungen zum Füllverhalten von mikrostrukturierten Formteilen beim Mikrospritzgießen von Polymerschmelzen. Diss. Universität Stuttgart IKFF, Institutsbericht 19, 2002.
- [4] Walther, T.: Geräte und Verfahrenstechnik zur induktiven Werkzeugtemperierung beim Mikrospritzgießen. Diss. Universität Stuttgart IKFF, Institutsbericht 20, 2003.
- [5] Ehrfeld, W.; Schinköthe, W.; Weber, L.: Einfließen von Polymerschmelzen in kleine Kavitäten beim Spritzgießen mit induktiver Werkzeugtemperierung. DFG-Bericht, 1999.
- [6] Schinköthe, W.; Walther, T.: Zykluszeiten verringern - Eine alternative Werkzeugtemperierung beim Mikrospritzgießen. Kunststoffe 90(2000)5, S. 62-68.
- [7] Michaeli, W.; Rogalla, A.; Ziegmann, C.: Mikrostrukturen in Serie fertigen. Kunststoffe 89(1999)9, S. 80-82.
- [8] Hecke, M.; Bacher, W.; Blum, H.; Müller, L.; Ünal, N.: Heißprägen von Mikrostrukturen als Fertigungsprozess. F&M 105(1997)9, S. 598-602.
- [9] Radke, R.; Dzuban, R.: Weniger ist mehr – Dynamische Temperiersysteme im Spritzgießprozess. Plastverarbeiter 55(2004)4.
- [10] Herzinger, S.: Hochpräzises Heißprägen. Kunststoffe 94(2004)10, 151–154.



# Optimization of a Two-Contact Linear Ultrasonic Motor Using FEM Analysis

E. Rothenhöfer, M. Giljum, W. Schinköthe Universität Stuttgart, Germany; O. Vyshnevskyy, W. Wischnewskiy Physik Instrumente GmbH & Co. KG, Karlsruhe, Germany

## Abstract:

A linear ultrasonic motor with dual mechanical contacts using a bulk piezoceramic block was studied for application in a linear positioning stage. The functional principle is based on the phase-shifted excitation of the 1st longitudinal and the 2nd bending oscillation mode. The longitudinal mode generates forces in the driving direction and the bending mode controls the normal force in the contact areas. Resonant frequencies of both modes are matched using FEM simulation to generate high-amplitude vibration and high mechanical output. The no-load velocity of the motor is 225 mm/s and a blocking force of 13 N is achieved.

Keywords: dual mode vibrator, ultrasonic motor, bulk ceramic

## Introduction

The output power of linear ultrasonic motors strongly depends on the number of frictional contacts involved in driving the slider. Parallel operation of several motors is thus a legitimate approach to generate higher output forces. The operation of each motor, however, depends on vibrator dimensions and mounting conditions, so that identical behavior may not be achieved. Higher wear and a more complex mechanical design have to be accepted. Another approach is to use a single motor like the one presented, featuring multiple frictional contacts. Operation of the two-contact motor studied is also challenging, as optimum mechanical output can be expected only if the frictional contacts engage simultaneously or alternately and with equal speed and trajectories during the contact phase. A major benefit, however, will be the reduced unit cost resulting from a highly simplified design and a smaller-size package.

## Vibrator Design

Figure 1 shows the stator vibrator with two friction tips and a central pin mount. The vibrator consists of a solid block of high-performance piezoceramic material. Vibrator length is 60 mm, width is 16 mm. A thickness of 5 mm allows high preloading for good frictional contact. Two identical electrode patterns and two centered mounting pins to counter motor forces are bonded symmetrically on the top and bottom faces of the vibrator as shown in Fig 1. Preload is applied using rubber blocks on the side opposite the friction tips. The functional principle is based on the simultaneous excitation of the 2nd bending and the 1st longitudinal mode. The bending mode generates the normal forces at the tips. The

longitudinal mode drives the slider (not shown). Excitation of the longitudinal mode is with the centered, yellow electrode pair. Bending mode excitation is achieved using a diagonal connection of the green electrodes and linking the front electrode group to the back electrode group to generate mutually opposing contraction and expansion of the four corner volumes at the frequency of the 2nd bending mode. Both electrode groups are driven at a phase angle of 90 degrees. Motor direction can be reversed by changing the phase angle by +180 degrees. Mechanical engagement with the slider by the two friction tips occurs with a 180-degree phase shift.

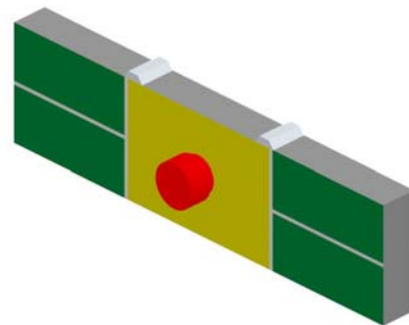
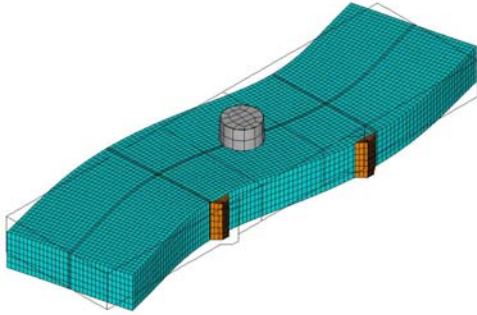


Fig 1: Vibrator (one of two mounting pins visible)

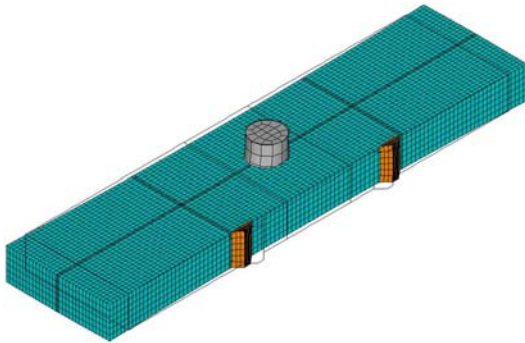
## Simulation

Optimum motor performance requires tuning both modes to operate at the same frequency. Almost equal frequencies can be obtained using the B2 mode's strong frequency dependence of the width. Modal analysis of the assembly results in 27440 Hz

for the longitudinal mode and 27420 Hz for the bending mode respectively. The friction tips exert a decisive influence on motor performance; hence their positioning and shape are crucial for optimization. The friction tips are positioned at points where the bending mode generates purely orthogonal displacements relative to their mounting surface. Fig 2 and Fig 3 show analysis results of the second bending and first longitudinal mode respectively.

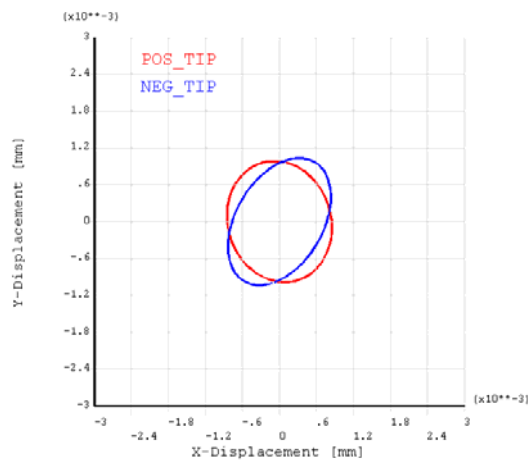


**Fig 2:** Second bending mode



**Fig 3:** First longitudinal mode

Fig 4 shows the trajectories of the tips for 60 V excitation, with a damping ratio of 0.5 % and the modes excited with a phase difference of 90 degrees.



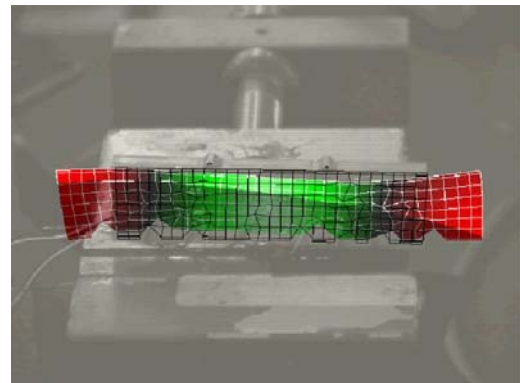
**Fig 4:** Elliptical trajectories

The trajectories have been computed for two center points on the surface of the friction tips. The small

rotation of the trajectories is due to lateral contraction of the vibrator that causes an angled displacement trajectory when only longitudinal excitation is considered. This effect cannot be avoided. Positioning of the friction pieces at the end of the vibrator would produce strongly angled trajectories in the bending mode. The chosen position is considered to be more beneficial, as contact will be established at maximum bending amplitude when the longitudinal vibration goes through the zero displacement position. Based on this consideration, the influence of the mutual rotation can be considered marginal.

### Verification

Verification of mode shapes is difficult to obtain due to the extremely small amplitudes and high frequencies. It is highly desirable to perform a non-contact measurement, such as that conducted with a 3D scanning vibrometer. For the motor stator vibrator, such a scanning analysis was performed. Fig 5 presents vibrometer results of a two-phase excitation of the stator vibrator.



**Fig 5:** 3D scanning vibrometer analysis

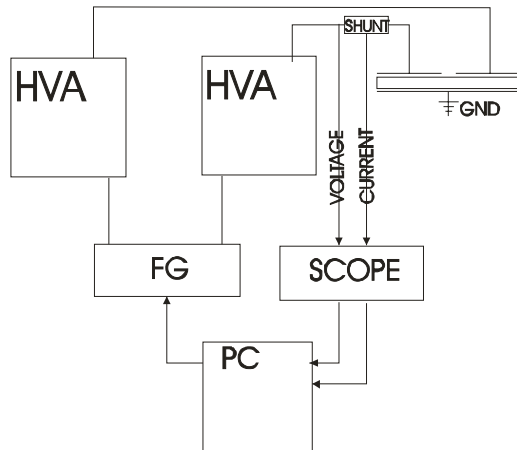
In the slider setup presented in Fig 6 the motor achieves a no-load speed of 225 mm/s and generates a blocking force of 13 N.



**Fig 6:** Linear stage

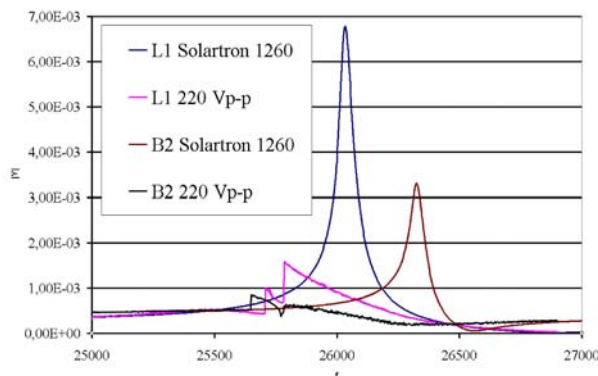
To get a deeper understanding of the electrical behavior, however, the test bench shown in Fig 7 can be used. The two-phase drive is implemented using high-voltage amplifiers (HVA) and a two-

channel frequency generator (FG). A personal computer controls the system using LABVIEW.



**Fig 7:** Impedance testbench

For current measurement a precision shunt resistor is included in the circuit. Measurement data from the scope is sent to LABVIEW and thereafter analyzed for phase and magnitude values. Analysis may be carried out at up to 300 V<sub>p-p</sub> during motor operation. To obtain a continuous operating state, the motor is set up to drive two separate wheel assemblies; it produces the highest constant no-load speed and low noise at 26000 Hz. Results are presented in Fig 8. For comparison, results data from a network analyzer are shown that exhibit the two higher peaks. The distinct frequency shift of the 2<sup>nd</sup> bending mode represented by the graph with the lowest amplitude is due to preloading that has a strong influence on the bending mode vibration.



**Fig 8:** Admittance vs. frequency

Increasing the preload shifted the operating point to lower frequency values. Motor operation close to the breakover point at 25900 Hz produced unstable motor operation with a high noise level. Under optimum operating conditions the shafts achieved a rotational speed of 240 min<sup>-1</sup> and 300 min<sup>-1</sup> respectively. Further improvements in speed equality are expected as a result of using precision-ground wheels and an improved preload mechanism.

## Conclusion

A dual-mode bulk ceramic vibrator using the 1<sup>st</sup> longitudinal and 2<sup>nd</sup> bending mode was studied theoretically and experimentally for use in a precision linear stage.

The motor was equipped with two friction tips allowing high output forces with a single vibrator. Position and shape of the friction elements as well as the fixture of the vibrator have been optimized and resonance frequencies of both modes have been matched based on simulation.

Electrical motor parameters were measured at operating voltage using a LABVIEW setup and an appropriate test bench. The motor achieved a maximum output force of 13 N and a no-load velocity of 225 mm/s based on a vibrator of 60 mm length, 16 mm width and 5 mm thickness.

## References

- [1] K. Ragulskis, R. Bansevicius, R. Barauskas, G. Kulvietis, Vibromotors for Precision Microrobots (1988)
- [2] T. Sashida, T. Kenjo, An Introduction to Ultrasonic Motors, (1993)
- [3] S. Ueha, Y. Tomikawa, Ultrasonic Motors – Theory and Application (1993)