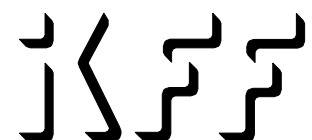


Universität Stuttgart

Jahresbericht IKFF 1999

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 64 02

Fax: 0711 / 685 63 56

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe

Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, Februar 2000

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, Konstruktion und Fertigung
 - 2.2.2 Aktorik in der Feinwerktechnik - Berechnung, Konstruktion und Anwendung
- 2.3 Prüfungen
- 2.4 Praktika
 - 2.4.1 Praktikum Feinwerktechnik
 - 2.4.2 Allgemeines Praktikum Maschinenbau (APMB)
- 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 MITARBEITER

- 4.1 Aktorik
- 4.2 Spritzgießen
- 4.3 Sonstige Arbeiten

5 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

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

6 TEILNAHME AN KONGRESSSEN, TAGUNGEN UND MESSEN

7 WERKSTATTBERICHT

8 ANHANG - wesentliche Veröffentlichungen 1999

1 DAS INSTITUT

1.1 Mitarbeiter

Institutsleitung:

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe

Emeritus:

Prof. Dipl.-Ing. Artur Jung

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. h.c. Heinrich Stabe

Sekretariat:

Margit Reinhardt

Herma Stängle

Unbefristeter wissenschaftlicher Mitarbeiter:

Akademischer Oberrat: Dr.-Ing. Peter Lindenmüller

Befristete wissenschaftliche Mitarbeiter:

Dipl.-Ing. Eberhard Burkard

Dipl.-Ing. Bernd Gundelsweiler

Dipl.-Ing. Ralf Hartrampf

Dipl.-Ing. Jens Haug

Dipl.-Ing. Rainer Pröger-Mühleck

Dipl.-Ing. Thomas Walther

Dipl.-Ing. Christian Welk

Technischer Angestellter:

Dipl.-Ing. (FH) Peter Bauer

Modellbau und Versuchswerkstatt:

Ralf Berwanger

Georg Diem

Wissenschaftliche Hilfskräfte:

| | |
|-----------------------|------------------------|
| Becker, Gisa | Müller, Alexander |
| Bubeck, Conrad | Negele, Tilmann |
| Dastmalchi, Fereidoun | Qi, Zhiliang |
| Göttsche, Thorsten | Rejmann, Marcin |
| Hippel, Holger | Schönberger, Philipp |
| Klauk, Frank-Dietrich | Spieth, Axel |
| Köder, Thilo | Stolzenburg, Christian |
| Kraus, Martin | Vasilev, Asen |
| Kujumjian, Alek | Weber, Andreas |
| Kummer, Stephan | Welk, Christian |
| Kurz, Hariolf | Welti, Stefan |
| Laubacher, Anton | |

1.2 Jahresrückblick**Personalia**

Zum 1. März des Jahres 1999 konnte ein neuer Mitarbeiter, Herr Welk, als wissenschaftlicher Mitarbeiter gewonnen und im Rahmen des neu installierten DFG-Projektes "Feinwerktechnische Lineardirektantriebe mit integriertem Wegmeßsystem" eingestellt werden. Im Drittmittelbereich gelangen zudem erfolgreiche Zwischenverteidigungen zweier laufender Themen und somit die Verlängerungen der entsprechenden Arbeitsverträge der Herren Pröger-Mühleck und Walther.

Herr Hartrampf wechselte planmäßig in die Industrie. Seine Haushaltstelle wurde ab 01.01.2000 mit Herrn Weber besetzt.

Aktivitäten in der Lehre

Die Anfängerzahlen im Maschinenbau insgesamt zeigen eine leicht steigende Tendenz. Im Hauptdiplom sind die Studentenzahlen gleichbleibend. Hier fand eine Institutsbesichtigung statt, um Studenten zu interessieren.

Die Vordiplom-Lehrveranstaltungen konzentrierten sich nach der Umstrukturierung in der Konstruktionslehre-Ausbildung und bedingt durch Deputatsminderung als Dekan auf die Konstruktionslehre Feinwerktechnik III und IV im dritten und vierten Semester. Erstmals wurde im Jahre 1999 mit dem dritten Semester gestartet, ohne zuvor das erste und zweite Semester zu betreuen. Es zeigte sich ein überraschend großes Interesse, mit dem wir nicht gerechnet hatten. Da die uns zugewiesenen

Hörsäle nicht derart viele Hörer aufnehmen können, mußten wir die Teilnehmerzahl auf 90 begrenzen.

Die Lehrveranstaltungen des Hauptdiploms konzentrieren sich auf die beiden Schwerpunkte Gerätekonstruktion als methodisch orientierte Linie und feinwerktechnische Aktorik als konkret forschungs- und entwicklungsorientierte Linie. Vorlesungen, Übungen und zugehörige Praktika wurden angepaßt angeboten und entsprechende Skripte als Lehrmaterialien erstellt und jährlich aktualisiert. Die Vorlesung 'Grundlagen der Feinwerktechnik - Konstruktion und Fertigung' behandelt Grundlagen der Entwicklung und Konstruktion feinwerktechnischer Systeme bzw. Geräte und betont dabei insbesondere den engen Zusammenhang zwischen konstruktiver Gestaltung und zugehöriger Fertigungstechnologie. Den Schwerpunkt bilden Themenkreise, wie methodische Ansätze zur kreativen Lösungsfindung, zuverlässigkeits- und sicherheitsgerechte Konstruktion, Genauigkeit und Fehlverhalten in Geräten, Schwingungsdämpfung und Lärminderung in der Feinwerktechnik, Beziehungen zwischen Gerät und Umwelt sowie die Kunststofftechnologie und -anwendung in der Feinwerktechnik (Werkstoff, Verfahren, Konstruktion, Werkzeugkonstruktion).

Die Vorlesung 'Aktorik in der Feinwerktechnik - Berechnung, Konstruktion und Anwendung' beleuchtet dagegen feinwerktechnische Antriebssysteme (Aktorik) unterschiedlichster Wirkprinzipien. Den Schwerpunkt bilden piezoelektrische und magnetostriktive Stelltechnik, elektromagnetische und elektrodynamische Stelltechnik, Magnettechnik und -technologie sowie Beispiele zur Realisierung feinwerktechnischer Antriebssysteme.

Die Hauptfachpraktika Ultraschallantriebe, Lineardirektantriebe, Koordinatenmeßtechnik, FEM-Berechnungen mit ANSYS und Spritzgießen sind in die Lehrveranstaltungen einbezogen. Das Praktikum Spritzgießen wurde erweitert.

Die Lehrinhalte zur Aktorik konnten in zwei Buchbeiträgen für das 'Handbuch Elektrische Kleinantriebe' (Erscheinungstermin 2000) bzw. das Lehrbuch 'Gerätekonstruktion in Feinwerktechnik und Elektronik' (bereits erschienen) einer größeren Verbreitung zugeführt werden.

Die Vermittlung von Absolventen verlief auch 1999 problemlos, es herrscht eine sehr große, nicht zu befriedigende Nachfrage nach Absolventen.

Aktivitäten in der Forschung

Das Thema ***Spritzgießtechnologie*** in der Feinwerktechnik stellte auch 1999 einen wichtigen Stützpfeiler des Instituts dar, der sich in Forschungsaktivitäten und intensiven Firmenkontakten niederschlägt. Im vergangenen Jahr wurden die Untersuchungen zur variothermen Prozeßführung mit Induktionserwärmung im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogrammes "Mikromechanische Produktionstechnik" abgeschlossen und diese Technologie auf größere Bauteile ausgeweitet und übertragen. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Anwendung der induktiven Werkzeugtemperierung für die Abformung auch konventioneller Strukturen, die sehr hohe Werkzeugtemperaturen erfordern oder besondere Anforderungen an den Temperaturgang stellen.

In einem weiteren Projekt 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.

Aus dem Arbeitsgebiet Spritzgießen heraus entstand auch die Beteiligung am Stuttgarter Kunststoff-Kolloquium, wo wir in diesem Jahr Mitveranstalter waren. In zwei Vorträgen, zwei Postern und einer weiteren Koautorenschaft haben die Herren Walther und Burkard oben genannten Themen vorgestellt und sind auf reges Interesse gestoßen.

Die Entwicklung alternativer Antriebssysteme für die Feinwerktechnik auf der Basis elektrodynamischer Kraftwirkung bzw. von Festkörpereffekten (Elektrodynamische Linearmotoren, Piezowanderwellenmotoren) steht im Mittelpunkt des Arbeitsgebietes ***Aktorik***. Die Forschungen zur Realisierung von Direktantrieben nach dem Prinzip des Wanderwellenmotors wurden 1999 weitergeführt. Als Schwerpunkt in der Nutzung elektrodynamischer Antriebsprinzipien werden derzeit die am Institut entwickelten verschiedenen Motoren auf der Basis bewegter Magnete als Läufer mit zusätzlich integrierter Wegsignalerfassung hinsichtlich der Genauigkeit und der Wechselwirkungen mit dem Motorstrom tiefgehend analysiert. Das Prinzip der integrierten Wegsignalerzeugung fand dabei außerordentliches Interesse, ebenso die zugehörigen Patente. Weitere Forschungsarbeiten galten in diesem Bereich der Entwicklung eines Versuchsstandes zur Mikroumformung mit erheblichen Forderungen an die eingesetzte Aktorik.

Zahlreiche Veröffentlichungen (siehe Abschnitte 5 und 8) in Zeitschriften und Büchern sowie Tagungsbeiträge zeugen von den in der Forschung erzielten Ergebnissen. Viele der Veröffentlichungen wurden im Volltext auf der Homepage

des Institutes zugänglich gemacht. Höhepunkt im Jahre 1999 war dabei die Ausgestaltung eines zweitägigen Weiterbildungslehrganges an der TA Esslingen zum Themengebiet "Antriebssysteme der Feinwerktechnik" unter Leitung von Prof. Schinköthe, wobei unter maßgeblicher Beteiligung des Institutes die ganze Antriebspalette vom rotatorischen Standardantrieb bis zu Lineardirektantrieben und unkonventioneller Aktorik einschließlich folgemechanischen Baugruppen angeboten wurde.

Im Rahmen der Forschungsprojekte wurde eine Reihe von Drittmittelaufträgen aus der Industrie eingeworben. Ebenfalls sei erwähnt, daß 1999 zwei DFG-Anträge und zwei SFB-Teilprojekt-Anträge erstellt wurden, von denen bereits ein DFG-Projekt und ein SFB-Teilprojekt die Genehmigung zum Start bzw. zur Weiterführung erhielten.

1.3 Wissenschaftliche Arbeitsgebiete

Am Institut werden vier Forschungsschwerpunkte bearbeitet.

Im Arbeitsgebiet **Aktorik** stehen feinwerktechnische Direktantriebe vorzugsweise für lineare Antriebsbewegungen im Mittelpunkt. Neben elektrodynamischen Systemen bilden piezoelektrische Wanderwellenmotoren einen 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 drei Spritzgießautomaten untersucht. Maßnahmen zur Verbesserung des Füllvorganges, wie die variotherme Prozeßführung durch induktive Formtemperierung sowie die Erfassung von Entformungskräften gehören ebenfalls zu diesem Schwerpunkt.

Im Arbeitsgebiet **optische und mechanische Sensorik** werden ausgewählte Sensoren, beispielsweise zur Abstandsmessung, zur Oberflächenerfassung und zur Erfassung des Fahrbahnzustandes untersucht.

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.

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, Simulation ihres dynamischen Verhaltens.
- Erarbeitung geeigneter Unterstützungsmittel und Methoden zur Entwicklung alternativer Antriebssysteme.
- Entwicklung ein- und mehrphasiger elektrodynamischer Lineardirektantriebe mit integrierten Wegmeßsystemen.
- Entwicklung geeigneter elektronischer Ansteuerungen unter Ausnutzung der integrierten Meßsysteme.
- Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten poröser Materialien für aerostatische Lagerungen 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.
- Dynamische Formtemperierung zur Verbesserung des Formfüllverhaltens, insbesondere in Hinblick auf die Abformung mikrotechnischer Strukturen.
- Optimierung von Bauteilen zur Materialeinsparung mittels FE-Analysen.
- Ermittlung von Entformungskräften.

Meßtechnik und Sensorik

Mit dem Ziel, vorhandene Sensoren zu verbessern oder bekannte Meßprinzipien technisch zu realisieren, wurden bzw. werden folgende Aufgaben bearbeitet:

- Sensoren zur vorausschauenden Messung von Wasserschichtdicken auf der Straße.
- Optische Sensoren zur Abstandsmessung auf der Basis des Triangulationsverfahrens.
- Faseroptische Sensoren für die energetische Abstandsmessung.
- Entwicklung luftgelagerter Miniatur-Linearachsen zur Profil- und Oberflächenanalyse, zur Mikro-Universalhärteprüfung sowie als Stoßantrieb zur Impulspositionierung.
- Entwicklung von integrierten Meßsystemen zur Läuferpositionsbestimmung in ein- und mehrphasigen elektrodynamischen Lineardirektantrieben.

Theorie des Konstruktionsprozesses

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

Einen Eindruck zu den aktuellen Arbeiten vermitteln die Fachbeiträge am Ende des Jahresberichts.

2 LEHRVERANSTALTUNGEN

2.1 Vorlesungen und Übungen für das Vordiplom

2.1.1 Konstruktionslehre III (Feinwerktechnik)

(Schinköthe/Lindenmüller)

Wintersemester 1998/99: 63 Studenten

Wintersemester 1999/00: 91 Studenten

16 Vorlesungen (à 2 SWS)

15 Vorlesungen (à 1 SWS)

15 Übungen (à 3 SWS)

Betreuer: Burkard/Gundelsweiler/Haug/Lindenmüller/Pröger-Mühleck/Walther/Welk

2.1.2 Konstruktionslehre IV (Feinwerktechnik)

(Schinköthe/Lindenmüller)

Sommersemester 99: 60 Studenten

13 Vorlesungen (à 2 SWS)

12 Vorlesungen (à 1 SWS)

12 Übungen (à 2 SWS)

Betreuer: Burkard/Gundelsweiler/Haug/Lindenmüller/Pröger-Mühleck/Walther/Welk

2.2 Vorlesungen und Übungen für das Hauptdiplom

2.2.1 Grundlagen der Feinwerktechnik, Konstruktion und Fertigung

(Schinköthe/Lindenmüller)

Wintersemester 1998/98: 12 Studenten

Wintersemester 1999/00: 13 Studenten

16 Vorlesungen (à 2 SWS)

13 Übungen (à 2 SWS)

2.2.2 Aktorik in der Feinwerktechnik - Berechnung, Konstruktion und Anwendung

(Schinköthe/Beisse/Gundelsweiler/Haug)

gemeinsam mit: Konstruktion elektrischer Maschinen und Geräte

(Inst. für elektr. Maschinen und Antriebe, Dr. Beisse)

Wintersemester 98/99: 10 Studenten

7 Vorlesungen (Schinköthe)

8 Vorlesungen (Beisse)

Sommersemester 99: 10 Studenten

5 Vorlesungen (Schinköthe)

8 Übungen (Gundelsweiler, Haug)

2.3 Prüfungen

| Fach | Termin | Kandidaten |
|---|--------|------------|
| KL I + II (FWT) | F 99 | 8 |
| | H 99 | 3 |
| KL III + IV (FWT) | F 99 | 11 |
| | H 99 | 36 |
| Grundlagen der Feinwerktechnik, Konstruktion und Fertigung (Pflichtfach, schriftlich) | F 99 | 9 |
| | H 99 | 0 |
| Grundlagen der Feinwerktechnik, Konstruktion und Fertigung (Kernfach, mündlich) | F 99 | 3 |
| | H 99 | 0 |
| Aktorik in der Feinwerktechnik - Berechnung, Konstruktion und Anwendung (Kernfach, mündlich) | F 99 | 2 |
| | H 99 | 6 |

2.4 Praktika

2.4.1 Praktikum Feinwerktechnik

(Für Studierende des Hauptfaches Feinwerktechnik)

Wintersemester 1998/99

Versuch 1: "Koordinatenmeßtechnik"
12 Teilnehmer 3 Termine
Betreuer: Lindenmüller

Versuch 2: "FEM-Kurs ANSYS"
16 Teilnehmer 5 Termine
Betreuer: Gundelsweiler, Haug, Pröger-Mühleck, Walther

Versuch 3: "Spritzgießen"
10 Teilnehmer 3 Termine
Betreuer: Walther

Sommersemester 1999

Versuch 3: "Piezoantriebe"
7 Teilnehmer 1 Termine
Betreuer: Haug

Versuch 4: "Lineardirektantriebe"
7 Teilnehmer 1 Termin
Betreuer: Gundelsweiler

2.4.2 Allgemeines Praktikum Maschinenbau (APMB)

(Für Studierende im zweiten Studienabschnitt Maschinenbau)

Sommersemester 1998

Versuch 1: "Rasterelektronenmikroskopie"
10 Teilnehmer 2 Termine
Betreuer: Bauer

2.5 Exkursion

Am 17. Juni 1999 besuchte das IKFF mit 25 Studenten und Mitarbeitern die Robert Bosch GmbH in Reutlingen. Wir erhielten Einblick in die Bereiche Kfz-Sensorik (Reinraum/Fertigung und Bonden von Multilayer-Leiterplatten) und Kfz-Lichttechnik (Simulation und Fertigung von Scheinwerfern sowie neue Entwicklungstrends). Im Rahmen der Exkursion wurde einem Absolventen des Instituts für Technische Optik von der Firma Bosch ein Preis für herausragende Leistungen bei der Diplomarbeit verliehen. Den Studenten wurden Einstiegsmöglichkeiten während und nach dem Studium aufgezeigt.

2.6 Seminar Feinwerktechnik

| | |
|------------------|--|
| Beck, Dieter | Neugestaltung einer aerostatischen Lagerung für einen Lineardirektantrieb |
| Droste, Ulrich | Konstruktion und Erprobung eines Prüfstandes zur Untersuchung der Tragfähigkeit und Steifigkeit kleiner aerostatischer Radiallager |
| Bührle, Ralf | Geschwindigkeitsmessung und -regelung eines Lineardirektantriebs |
| Grotz, Andreas | Konstruktion eines linearen Direktantriebes |
| Liang, Yongzheng | Konstruktion eines Versuchsstandes zur varioternen Prozeßführung mit Hilfe von elektrischen Heizpatronen und einer Intensivkühlung |
| Mochel, Frank | Konstruktion eines Lineardirektantriebes mit diametral magnetisierten Permanentmagnetsegmenten |
| Rau, Andreas | Die Simulation eines rotatorischen Wanderwellenmotors mit LS-DYNA |
| Henninger, Peter | Entwurf und Aufbau einer Leistungsendstufe für einen zweiphasigen linearen Direktantrieb |

3 WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN, STUDIEN- UND DIPLOMARBEITEN

3.1 Dissertationen

Im Jahre 1999 wurde keine Dissertation abgeschlossen, zwei Mitarbeiter sind in der Endphase des Zusammenschreibens.

3.2 Diplomarbeiten am IKFF

| | |
|-----------------------|--|
| 02/99 Welk, Christian | Entwicklung einer Regelelektronik mit Leistungsendstufe für die Ansteuerung eines mehrphasigen elektrodynamischen Lineardirektantriebs mit integriertem Wegmeßsystem Standort: 15.1.295 |
| 09/99 Yeh, Stefan | Konstruktion eines Kerns zur Messung der Schrumpfkkräfte für das Spritzgußwerkzeug zur Messung von Entformungskräften Standort: 15.1.296 |
| 10/99 Löhr, Markus | Untersuchungen zur Temperaturexpansion bei Piezoantrieben für direktgesteuerte Ventile Standort: 15.1.297 |
| 12/99 Bührlé, Ralf | Auslegung, Simulation und Applikation eines mechatronischen Aktuators für eine hydraulische Servolenkung Standort: 15.1.298 |
| 12/99 Rau, Andreas | Analyse des dynamischen Verhaltens von Piezoaktoren zur Ansteuerung von schnell schaltenden Ventilen Standort: 15.1.299 |

3.3 Studienarbeiten am IKFF

| | |
|------------------------|---|
| 12/98 Beck, Dieter | Neugestaltung einer aerostatischen Lagerung für einen Lineardirektantrieb Standort: 15.2.891 |
| 03/99 Bührlé, Ralf | Geschwindigkeitsmessung und -regelung eines Lineardirektantriebs Standort: 15.2.892 |
| 02/99 Droste, Ulrich | Konstruktion und Erprobung eines Prüfstandes zur Untersuchung der Tragfähigkeit und Steifigkeit kleiner aerostatischer Radiallager Standort 15.2.893 |
| 05/99 Grotz, Andreas | Konstruktion eines linearen Direktantriebes Standort: 15.2.894 |
| 03/99 Mochel, Frank | Konstruktion eines Lineardirektantriebs mit diametral magnetisierten Permanentmagnetsegmenten Standort: 15.2.895 |
| 04/99 Liang, Yongzheng | Konstruktion eines Versuchsstandes zur variothermen Prozeßführung mit Hilfe von elektrischen Heizpatronen und einer Intensivkühlung Standort: 15.2.896 |
| 09/99 Rau, Andreas | Simulation eines rotatorischen Wanderwellenmotors mit LS-Dyna Standort: 15.2.897 |
| 09/99 Henninger, Peter | Entwurf und Aufbau einer Leistungsendstufe für einen zweiphasigen linearen Direktantrieb Standort: 15.2.898 |

4 ARBEITSGEBIETE DER MITARBEITER

4.1 Aktorik

B. Gundelsweiler: Erstellung und Korrektur von Prüfungsaufgaben in KL 1/2. Betreuung der Vordiplomsübungen in KL 3/4: Vortrags- und Gruppenübungen, Ausarbeitung und Korrektur von Übungsaufgaben.

FEM-Praktikum: Elektromagnetische Berechnung eines Lineardirektantriebes.

Durchführung der Hauptfachübungen und des Praktikums: Lineare Direktantriebe.

Erstellung eines Skriptes: Aktorik in der Feinwerktechnik Teil 3/2.

Konstruktion, FEM-Simulation, Aufbau/Montage und Inbetriebnahme von elektrodynamischen Lineardirektantrieben.

Ermittlung der Motorparameter und Optimierung der Antriebe.

Konzeption, Konstruktion, Bestellung, Aufbau und Inbetriebnahme einer Umformvorrichtung für einen Industriepartner.

Abschluß des Projektes nach Einweisung und Erprobung durch Abnahme des Auftraggebers. Überführung und Endmontage der gesamten Anlage.

Soft- und Hardwarebeschaffung, Installation und Wartung der PC und Programme, Virusschutz / Sicherheitsrichtlinien der PC

Erstellung und Formatierung von CAD-Zeichnungen (2D / 3D) für Veröffentlichungen

Haug, J.: Betreuung der Vordiplomsübungen KL 3/4, Vortrags- und Gruppenübungen, Ausarbeitung von Aufgabenstellungen und Musterlösungen für Übungsaufgaben, Korrektur von Übungsaufgaben.

Betreuung der Hauptdiplomsvorlesung Aktorik, Vortragsübungen, Hauptfachpraktikum Ultraschallantriebe.

Hard- und Softwarewartung UNIX-Netzwerk.

Weiterentwicklung der Ansteuerelektronik und Verbesserung der piezoelektrischen Schwingungsanregung für einen linearen

Wanderwellenmotor. Entwurf eines Prüfstands für Linear-
motoren. Beschaffung eines Speicher-Oszilloskops.

- Hartrampf, R. FEM-Praktikum "Elektromagnetische Berechnungen" im
StutCAD.
Hard- und Softwarewartung PC-Netzwerk.
Entwicklung Lineardirektantriebe mit integriertem Meßsystem
auf induktiver Basis und neuer Meßverfahren für integrierte
Wegmeßsysteme. Entwicklung von Ansteuer-, Meß- und
Regelelektroniken für Lineardirektantriebe mit PIC-Microcon-
trollern unter Verwendung der integrierten Wegmeßsysteme.
Bearbeitung und Abschluß eines Industriauftrages zur
Entwicklung eines Schwenkantriebes für Viskositätsmeß-
geräte. Meßtechnische Untersuchungen an elektrodyna-
mischen Direktantrieben als Prototypaufbauten.
Bearbeitung und Abschluß eines Industriauftrages zur
Entwicklung eines mehrphasigen Lineardirektantriebes mit
neuem integrierten Wegmeßsystem als Ersatz für Pneumatik-
zylinder in integrierten Antriebseinheiten. Entwicklung der
Elektronik-Hard- und Software. Untersuchungen an Prototy-
pen.
Entwicklung mehrerer Prototypen von Lineardirekt- und
Drehschubantrieben mit integrierten Wegmeßsystemen.
Patent- und Gebrauchsmusterrecherchen, sowie Mitarbeit
bei der Erstellung von verschiedenen Anmeldeunterlagen.
Anmeldung von D- und US-Patenten.
- Pröger-Mühleck, R. Mitbetreuung der Übungen Konstruktionslehre III/IV (Übungs-
vorträge, Sprechstunde, Erstellung von Prüfungs- und
Übungsaufgaben, Musterlösungen und Manuskripten).
Entwicklung, Berechnung und Bau elektrodynamischer
Lineardirektantriebe sowie von zylindrischen aerostatischen
Lagerungen. Erprobung dieser Komponenten in verschiede-
nen Anwendungen.
Bearbeitung des DFG-Themas "Automatisierte Justage mit
aerostatisch gelagertem Impulsantrieb für die Feinwerk- und
Mikrotechnik".

Organisation der feierlichen Übergabe der Diplomurkunden des Studienganges Maschinenwesen.
 Beschaffung neuer Möbel für studentische Arbeitsräume.
 Organisation einer Exkursion zur Robert Bosch GmbH in Reutlingen.

Welk, C.:
 Bearbeitung des DFG Forschungsprojekts "Lineardirektantriebe mit integriertem Wegmeßsystem".
 Entwicklung von Elektronik Hard- und Software. Untersuchungen an Prototypen.
 Mitarbeit an einem Industriauftrag zur Entwicklung eines mehrphasigen elektrodynamischen Lineardirektantriebes mit integriertem Wegmeßsystem und Ansteuerelektronik als Ersatz für Pneumatikzylinder in integrierten Antriebseinheiten.
 Entwicklung und Aufbau eines zur integrierten Wegmessung geeigneten rotationssymmetrischen Asynchronmotors inkl. Leistungsendstufe.
 Hard- und Softwarewartung PC-Netzwerk.
 Patent- und Gebrauchsmusterrecherchen.
 Betreuung von Elektroniklabor und Ätzraum.
 Betreuung von Studentengruppen im Rahmen des Konstruktionswettbewerbes; Betreuung von Testatgruppen.

4.2 Spritzgießen

Burkard, E.
 Betreuung der Vordiplomsvorlesung Konstruktionslehre (Feinwerktechnik) III/IV.
 Untersuchung des Einflusses von Werkzeugbeschichtungen auf die Entformungskraft bei Spritzgußbauteilen aus Thermoplastwerkstoffen.
 Bearbeitung von Industriaufträgen zur Entformung von Spritzgußteilen.
 Organisation und Betreuung des Konstruktionslehre-wettbewerbs.
 Administration und Wartung der UNIX-Workstations.

- Walther, Th. FEM-Praktikum "Temperaturfelder" im StutCAD, Hauptfachpraktikum "Spritzgießen".
Bearbeitung und Abschluß des DFG-Projekts EPOK (Einfließen von Polymerschmelzen in kleine Kavitäten beim Spritzgießen mit induktiver Temperierung). Weiterentwicklung der induktiven Werkzeugtemperierung, Bearbeitung von Industrieaufträgen zur Werkzeugtemperierung.
Administration und Wartung der UNIX-Workstations am IKFF

4.3 Sonstige Arbeiten

- Bauer, P. Untersuchungen von Proben mit dem Rasterelektronenmikroskop. Erstellung der Arbeitsplatzgefährdungsanalyse für das gesamte Institut und das Dekanat entsprechend den Richtlinien des Arbeitsschutzes. Arbeiten zur Verbesserung und Erhaltung der Arbeitssicherheit am Institut. Reparatur und Pflegearbeiten an Geräten und Einrichtungen im Institut. Mitarbeit zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen durch Umgestaltung des Arbeitsraumes für die wissenschaftlichen Hilfskräfte mit neuer Ausgestaltung sowie Neueinrichtung des Seminar-Raumes. Mitarbeit bei der feierlichen Gestaltung zur Ausgabe der Diplomarbeiten.
- Berwanger, R. Fertigung von Spritzguß-Formen und Formeinsätzen.
Bauteile und Baugruppen für Versuche, wie Luftlager, Fasersensoren und Linearmotorprüfständen.
- Diem, G. Fertigung von Spritzguß-Formen auf der CNC-Fräsmaschine.

5 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

5.1 Veröffentlichungen

Burkard, E.; Walther, T.; Schinköthe, W.:

Einfluß von Werkzeugbeschichtungen auf das Entformungsverhalten beim Spritzgießen. 16. Stuttgarter Kunststoff-Kolloquium, Stuttgart, 10.-11.03.1999, Tagungsband 5.5.

Burkard, E.; Walther, T.; Schinköthe, W.:

Entformungskraft und Werkzeugoberfläche. Postervortrag 16. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, Stuttgart, 10.-11.03.99.

Burkard, E.:

Einfluß der Werkzeugbeschichtung auf das Entformverhalten beim Spritzgießen. Internationale Werkzeugbautagung 99, Bad Honnef, 27.-28.04.1999, Tagungsband.

Hartramph, R.; Schinköthe, W.:

US-Patent zu einem elektromagnetischen Antriebssystem mit integrierter Wegsignalerzeugung, (endgültiger englischer Titel und Nummer noch offen).

Hartramph, R.; Schinköthe, W.:

Lineardirektantriebe mit integriertem Wegmeßsystem. Beitrag zum Buch A&D Kompendium Automation & Drives 1999, S. 158-159.

Hartramph, R.; Schinköthe, W.; Welk, Ch.:

Elektrodynamische Lineardirektantriebe mit integriertem Wegmeßsystem. 44. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau 1999, Ilmenau 20.-23.09.1999, Reihe 6 Mechatronik, Tagungsband 2, S. 63-68.

Jung, A.:

Spielerisches Experimentieren führte zur Entdeckung eines Lackantriebseffektes - Analyse einer technischen Gestalt. 44. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau 1999, Ilmenau 20.-23.09.1999, Reihe 1 Konstruktionstechnik, Tagungsband.

Nguyen, T.; Geiger, K.; Walther, T.:

Das Fließverhalten von LCP-Schmelzen und seine Auswirkungen auf Morphologie und mechanische Eigenschaften von Spritzgießteilen. 16. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, Stuttgart, 10.-11.03.1999, Tagungsband 5.3.

Schinköthe, W.:

in Krause, W.: Gerätekonstruktion in Feinwerktechnik und Elektronik, 3. stark bearbeitete Auflage. München, Wien: Carl Hanser Verlag 2000. Abschnitt 6.2. Elektromechanische Funktionsgruppen - Gerätetechnische Aktorik (bereits erschienen).

Schinköthe, W.:

in Kallenbach, E.; Stölting, H.- D.: Handbuch Elektrische Kleinantriebe. Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag 2000. Abschnitt 4.2. Elektrodynamische Linear- und Mehrkoordinatenantriebe (erscheint 2000).

Schinköthe, W.:

Wanderwellenmotoren - Bauformen und Eigenschaften. 44. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau 1999, Ilmenau 20.-23.09.1999, Reihe 6 Mechatronik, Tagungsband S. 74-79.

Schinköthe, W.; Beisse, A.; Furchert, H.-J.; Hartramph, R.; Richer, C.:

Antriebssysteme der Feinwerktechnik. Zweitägiger Lehrgang, TA Esslingen, 01.-02.02.1999.

Walther, T.; Schinköthe, W.; Ehrfeld, W.; Schaumburg, C.; Weber, L.:

DFG-Forschungsvorhaben Einfließen von Polymerschmelzen in kleine Kavitäten beim Spritzgießen mit induktiver Werkzeugtemperierung. Abschlußbericht 1999.

Walther, T.; Schinköthe, W.; Ehrfeld, W.; Schaumburg, C.; Weber, L.:

Mikrospritzgießen mit induktiver Werkzeugtemperierung. Vortrag 16. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, Stuttgart, 10.-11.3.1999, Tagungsband 5.4.

Walther, T.; Schinköthe, W.:

Alternative Wege zur Werkzeugtemperierung. Postervortrag 16. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, Stuttgart, 10.-11.03.1999.

5.2 Gremienarbeit

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe:

Dekan der Fakultät Konstruktions- und Fertigungstechnik

Mitglied des Senats der Universität Stuttgart

Mitglied des großen Senats der Universität Stuttgart

Mitglied des Senatsausschusses Struktur

Mitglied des Prüfungsausschusses Maschinenwesen

stellvertretendes Mitglied der Studienkommission Maschinenwesen

Mitglied der Fachkommission Landesgraduierföderung

Mitglied der Auswahlkommission "Preise"

VDI/VDE-Fachausschuß 2.3 "Elektrische Geräte- und Stellantriebe"

VDI/VDE-Arbeitskreis "Universitätsprofessoren der Mikro- und Feinwerktechnik"

Berufungskommissionen "Nachfolge Prof. Pritschow" und "Nachfolge Prof. Lechner"

Vorsitzender der Berufungskommission "Nachfolge Prof. Tiziani"

5.3 Tag der offenen Tür

Seil - Schokolade - Batterie, wie paßt das zum Maschinenbaustudium?

Der nun schon zum siebten Mal durchgeführte Konstruktionswettbewerb des Instituts für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik (IKFF) der Universität Stuttgart zeigt durch seine hohe Teilnehmer- und Besucherzahl, daß auch im teilweise trockenen Lehrstoff des Vordiploms attraktive Bereiche stecken.

Dieses Jahr sollten die MaschinenbaustudentInnen der Vorlesung Konstruktionslehre IV (Feinwerktechnik) eine Maschine konstruieren und bauen, die sich und eine Last - 100g Schokolade - an einem freihängenden Seil von einer Tischplatte bis zur Hörsaaldecke und zurück bringt. Einschränkend vorgegeben waren das Seil und die Entfernung dazu beim Start der Maschine, die maximalen Abmessungen, die Schokolade und die Batterien.

Das größte Problem für einige Maschinen war die Aufgabe, das Seil und die Windenmechanik der Maschine zusammen zu bringen. Die Varianten gingen hierbei von klebebandbestückten Seiltrommeln auf fahrbaren Maschinen über lange drehende Fanghaken bis zu lassoartigen Einfädelmechanismen. Es überstanden aber nur sechs der 11 gemeldeten Maschinen die Vorrunde.

Im anschließenden Vergleich Maschine gegen Maschine kamen dann die Feinheiten der Konstruktionen zum tragen. So führten Leichtbauweise verbunden mit

einem zuverlässigen Seilfangmechanismus und einem gut ausgelegten Antrieb am Ende eindeutig zu einem Sieger. Der Wettbewerb zeigte auch dieses Jahr wieder, daß eine attraktive Aufgabe StudentInnen trotz zeitnah anstehender Klausuren motivieren kann. So wurden einige der Maschinen erst in den Morgenstunden des Wettkampftags fertig.

Im Anschluß an die Wettbewerbsaustragung fand in lockerer Atmosphäre ein Gedankenaustausch zwischen den Studenten, Professor Schinköthe und den Mitarbeitern des Instituts statt. In diesem Kreis wurden Fragen der Studenten zum weiteren Verlauf des Studiums im Hauptdiplom diskutiert.

5.4 Institutsbesichtigungen

Um den Studenten und Studentinnen nach dem ersten Studienabschnitt eine Hilfestellung bei der Wahl der Fächer im Hauptdiplom zu geben, wurde eine Institutsbesichtigung durchgeführt. Zunächst stellten einzelne Mitarbeiter kurz ihre Arbeitsgebiete vor, anschließend erfolgte im kleinen Kreis bei Bretzeln und Bier unter Anwesenheit des Institutsleiters und von Mitarbeitern eine Diskussion über Studienfragen, Wirtschaftsentwicklung und Entwicklung der Feinwerktechnik.

6 TEILNAHME AN KONGRESSSEN, TAGUNGEN UND MESSEN

Prof. Schinköthe, W.:

- 16. Stuttgarter Kunststoff-Kolloquium, 10.-11.03.1999.
- 3. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, Paderborn, 27.-28.05.1999
- 44. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau 1999, Ilmenau 20. - 23.09.1999
- VDI/VDE Arbeitskreis "Stellantriebe" Frankfurt, 19.11.1999
- VDI/VDE Arbeitskreis "Universitätsprofessoren der Mikro- und Feinwerktechnik" Ilmenau, 23.09.1999
- Lehrgang an der TAE Esslingen: Antriebssysteme der Feinwerktechnik. TA Esslingen, 01.-02.02.1999

Berwanger, R.:

- "Erste Hilfe Training", Stuttgart, 20.04.1999
- "Abfallentsorgungsseminar", Stuttgart, 19.10.1999

Burkard, E.:

- Messe "Domotechnika", Köln, 23.02.1999
- 16. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, Stuttgart, 10.-11.03.1999.
- "Internationale Werkzeugbautagung 99", Bad Honnef, 27.-28. April 1999
- "ARBURG Technologie Tage 99", Loßburg, 07.05.1999
- Lehrgang an der TA Esslingen: Antriebssysteme der Feinwerktechnik. TA Esslingen, 17. - 19.05.1999
- Hausmesse der Firma AGIE, Schorndorf, 09.06.1999
- Messe "Fakuma", Friedrichshafen, 20.10.1999

Gundelsweiler, B.:

- Hannover Messe "Industrie 99". Hannover 21.-22.04.99
- Messe "Control", Sinsheim, 05.05.99
- Seminar "Industrielle Linearmotoren; der Schlüssel zur Hochgeschwindigkeitsautomatisierung". Sulzer-Linmot, Filderstadt-Bonlanden, 22.06.99.
- 44. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau 1999, Ilmenau 20.-21.09.1999

Hartramph, R.:

- 44. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau 1999, Ilmenau 20.-23.09.1999
- Lehrgang an der TAE Esslingen: Antriebssysteme der Feinwerktechnik. TA Esslingen, 01.-02.02.1999

Haug, J.:

- TAE-Lehrgang "Piezokeramik", Techn. Akademie Esslingen, 08.-09.03.1999
- Messe "Control", Sinsheim, 05.05.1999
- 3. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, Paderborn, 27. - 28.05.1999
- Messe "micro-engineering", Stuttgart, 30.09.1999
- TAE-Lehrgang "Firewall- und Verschlüsselungssysteme", Esslingen, 17.09.1999

Pröger-Mühleck, R.:

- Messe "Control", Sinsheim, 05.05.1999
- Seminar "Industrielle Linearmotoren; der Schlüssel zur Hochgeschwindigkeitsautomatisierung". Sulzer-Linmot, Filderstadt-Bonlanden, 22.06.1999
- Messe "micro-engineering", Stuttgart, 30.09.1999

Walther, T.

- 16. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, Stuttgart, 10.-11.03.1999.
- Seminar "Versuche richtig planen aufgrund wirksamer Konzepte", TA Esslingen, 05.-06.05.1999
- "ARBURG Technologie Tage 99", Loßburg, 07.05.1999
- Hausmesse der Firma AGIE, Schorndorf, 09.06.1999
- Messe "Motek", Sinsheim, 23.09.1999
- Messe "Fakuma", Friedrichshafen, 20.10.1999.
- Seminar "Projektmanagement - Führungsmethoden", TA Esslingen, 22.11.-24.11.1999

Welk, Ch.

- Seminar "Antriebssysteme der Feinwerktechnik", TAE Esslingen, 01.03-02.03.1999
- Messe SPS/IPC/DRIVES 98, Nürnberg, 25.11.1999
- Messe "Control", Sinsheim, 05.05.1999

- Seminar "Industrielle Linearmotoren", Stuttgart, 22.06.1999
- 44. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau 1999, Ilmenau 20.-21.09.1999

7 WERKSTATTBERICHT

Durch die Fertigung von Modellen und Vorrichtungen im Rahmen von praktischen Studienarbeiten, Diplomarbeiten und Dissertationen war die Institutswerkstatt im Berichtsjahr vollständig ausgelastet.

Im Jahr 1999 wurden eine Säulenbohrmaschine und ein Universal-Teilapparat erworben. Leider konnten aber nicht alle dringend benötigten Anschaffungen, wie eine Bandsäge und Innen-Feinmeßschrauben, getätigt werden.

8 ANHANG - wesentliche Veröffentlichungen 1999

Elektrodynamische Direktantriebe mit integriertem Wegmeßsystem

44. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau 1999, Ilmenau
20.-23.09.1999

Wanderwellenmotoren - Bauformen und Eigenschaften

44. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau 1999, Ilmenau
20.-23.09.1999

Einfluß von Werkzeugbeschichtungen auf das Entformungsverhalten beim Spritzgießen

16. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, Stuttgart, 10.-11.03.1999.

Mikrospritzgießen mit induktiver Werkzeugtemperierung

16. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, Stuttgart, 10.-11.03.1999.

Elektrodynamische Direktantriebe mit integriertem Wegmeßsystem

R. Hartramph / W. Schinköthe / C. Welk

1 Einleitung

Spezielle Konstruktionen von permanentmagnetisch erregten elektrodynamischen Direktantrieben ermöglichen das direkte Ableiten eines Wegsignals für die Läuferposition ohne zusätzliche Meßeinrichtungen. Das Prinzip und geeignete Motorbauformen werden nachfolgend vorgestellt.

2 Motorkonzept

Der grundlegende Motorenaufbau für die hier beschriebenen Direktantriebe basiert auf dem Prinzip bewegter Permanentmagnetsysteme als Läufer. Das elektrodynamische Antriebsprinzip selbst ist hinlänglich bekannt. Der Aufbau und die duale Nutzung der Antriebsspulen zur Krafterzeugung und gleichzeitig als Wegmeßsystem stellen dagegen eine Innovation bei den Lineardirektantrieben dar, die deren Einsatzbereich erweitern kann und damit ein enormes Entwicklungspotential beinhaltet. Vom Aufbau als Hohläuferantrieb [1], über Bauformen ähnlich einem Pneumatikzylinder bis zu dem ungewöhnlichen Aufbau eines Dreh-Schub-Direktantriebes lassen sich viele weitere anwendungsspezifische Anordnungen realisieren. Allen Aufbauten gleich ist das Prinzip des bewegten Magneten, welches für die integrierte Wegsignalerzeugung notwendig ist. In der Abbildung 1 ist ein Prinzipaufbau dargestellt, der als Läufer einen hochpermeablen Kern mit aufgebrauchten radial magnetisierten Permanentmagneten besitzt. Dieser Aufbau erweist sich als optimal zur Erzeugung einer maximalen Induktion im Arbeitsluftspalt. Bei der Auslegung derartiger Aufbauten muß bei der Dimensionierung der Magnetlänge auf die maximalen Induktionen im Kern geachtet werden, um nicht zu hohe magnetische Verluste zu bekommen.

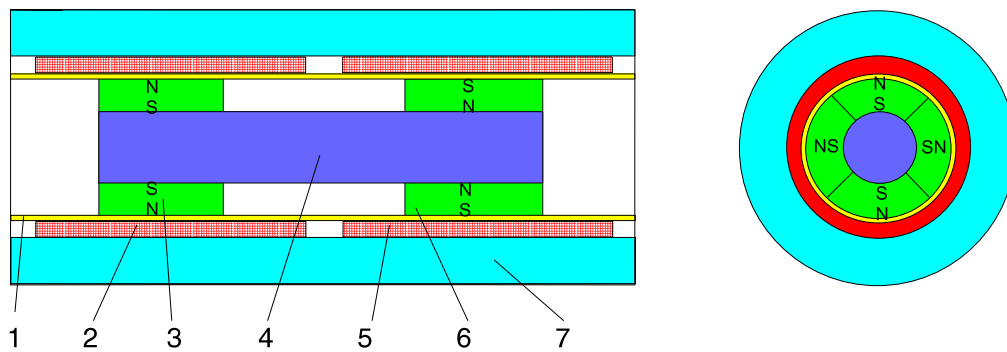


Abb. 1: Prinzipaufbau.

1 Lagerhülse, 2 Antriebspule, 3 Permanentmagnet, 4 Eisenkern,
5 Antriebspule, 6 Permanentmagnet, 7 Eisenrückschluß

3 Integriertes Wegmeßverfahren

Elektrodynamische Antriebsprinzipien benötigen für den positionsgeregelten Betrieb immer ein Wegmeßsystem, um die Istposition des Läufers zu bestimmen. Allgemein wird dazu eine separate Meßanordnung genutzt. Bei der hier vorgestellten Lösung ist eine interne Wegsignalerzeugung möglich.

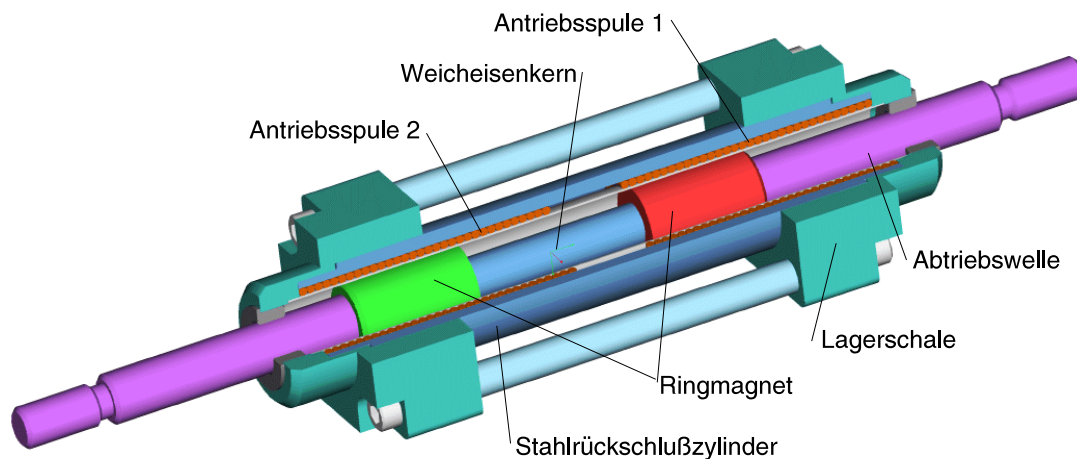


Abb. 2: Elektrodynamischer Lineardirektantrieb mit integriertem Wegmeßsystem in der Bauform eines Pneumatikzylinders

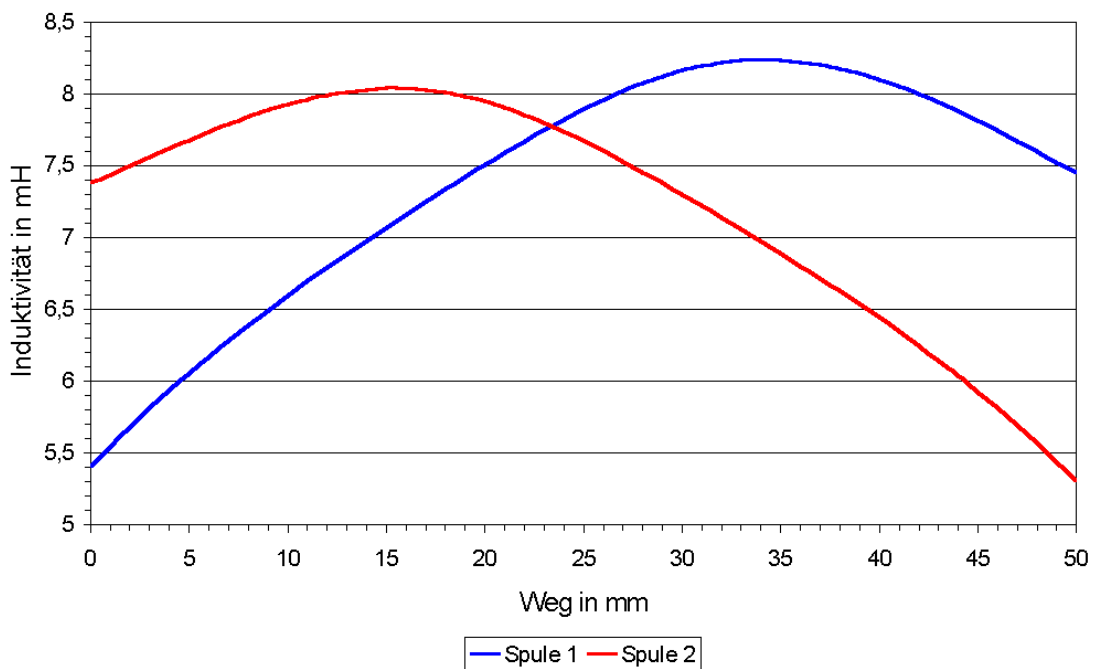


Abb. 3: Induktivitätsverlauf

Die Motorenkonstruktion, die beispielhaft in der Abbildung 2 zu sehen ist, wurde so ausgelegt, daß sich die Impedanzen im Spulensystem proportional zur Position des Läufers verhalten und deshalb zur Wegmessung herangezogen werden können. Nach einem zum Patent angemeldeten Verfahren ist es möglich, den Motor über einen pulswidenmodulierten Servoverstärker anzusteuern und dann über eine Abtastung der Spannungsflanken an den Antriebsspulen eine Positionsermittlung durchzuführen.

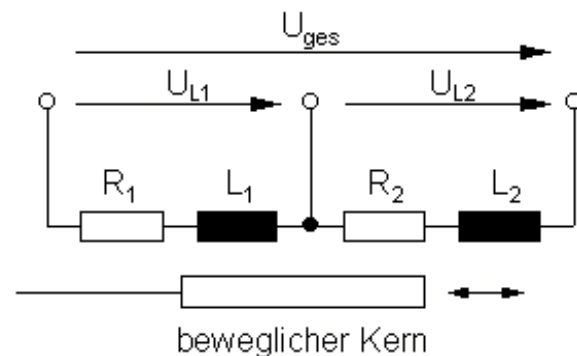


Abb. 4: Prinzipschaltbild

Um das Meßprinzip näher zu erläutern, soll die elektrische Ersatzschaltung des Motors, die in Abbildung 4 dargestellt ist, näher betrachtet werden.

Wie bereits erwähnt, wird der Motor mit einer rechteckförmigen Spannung aus einem pulswidenmodulierten Servoverstärker angesteuert. Die Rechteckspannung entspricht der Eingangsspannung U_{ges} des Motors. Die RL-Kombination der Serienschaltung der beiden Teilspulensysteme des Motors wirkt wie

ein Wechselspannungsteiler. Mit einer vereinfachten Betrachtung des Verhaltens dieser Anordnung über die Differentialgleichungen zu den Ausgleichsvorgängen bei Aufprägung einer Sprungfunktion als Näherung zum rechteckförmigen Spannungsverlauf lässt sich die Funktionsweise gut beschreiben. Die Differentialgleichung

$$U_{ges}(t) = L_1 \frac{di(t)}{dt} + L_2 \frac{di(t)}{dt} + 2R i(t) \quad \text{mit } R_1 = R_2 = R \quad (3.1)$$

lässt sich unter vereinfachten Bedingungen mit einer Sprungfunktion lösen und ergibt die folgenden Gleichungen:

$$U_{L_1}(t) = \frac{U_{ges}}{2} \left(1 + \frac{L_1 - L_2}{L_1 + L_2} e^{-\frac{2R}{L_1 + L_2} t} \right) \quad (3.2)$$

$$U_{L_2}(t) = \frac{U_{ges}}{2} \left(1 - \frac{L_1 - L_2}{L_1 + L_2} e^{-\frac{2R}{L_1 + L_2} t} \right)$$

Betrachtet man die Gleichungen näher, erkennt man eine induktivitätsabhängige e-Funktion in den Teilspannungsgrößen über den Teilsulen. Benutzt man in einer Beispielkonfiguration reale Kennwerte für die veränderlichen Induktivitäten und Widerstände und trägt die Funktionen in ein Diagramm ein, so erhält man eine Kurvenschar wie sie in Abbildung 5 dargestellt ist.

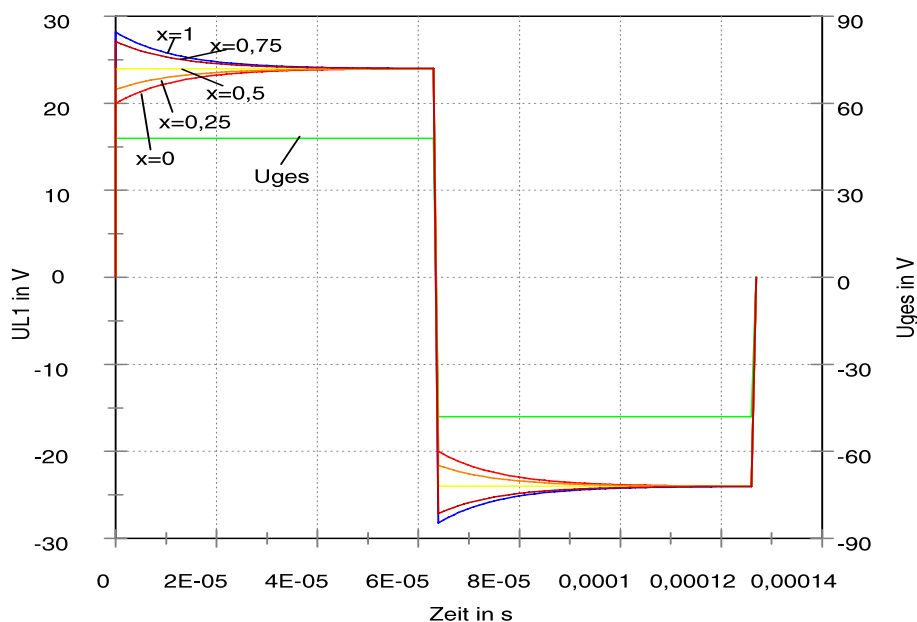


Abb. 5 Kurvenverlauf der Spulenspannungen über eine Taktperiode, Einschaltverhältnis 50%

Mit dem Parameter x wurde das Einschubverhältnis des Eisenkerns in eine der Teilspulen deutlich gemacht. Aus dem Diagramm wird die Wegabhängigkeit der Kurvensteigungen kurz nach dem Flankenwechsel deutlich, der zu einer absoluten Wegerfassung ausgenutzt werden kann. Hierfür wurde eine elektronische Schaltung entwickelt, deren Blockschaltbild in Abbildung 6 dargestellt ist.

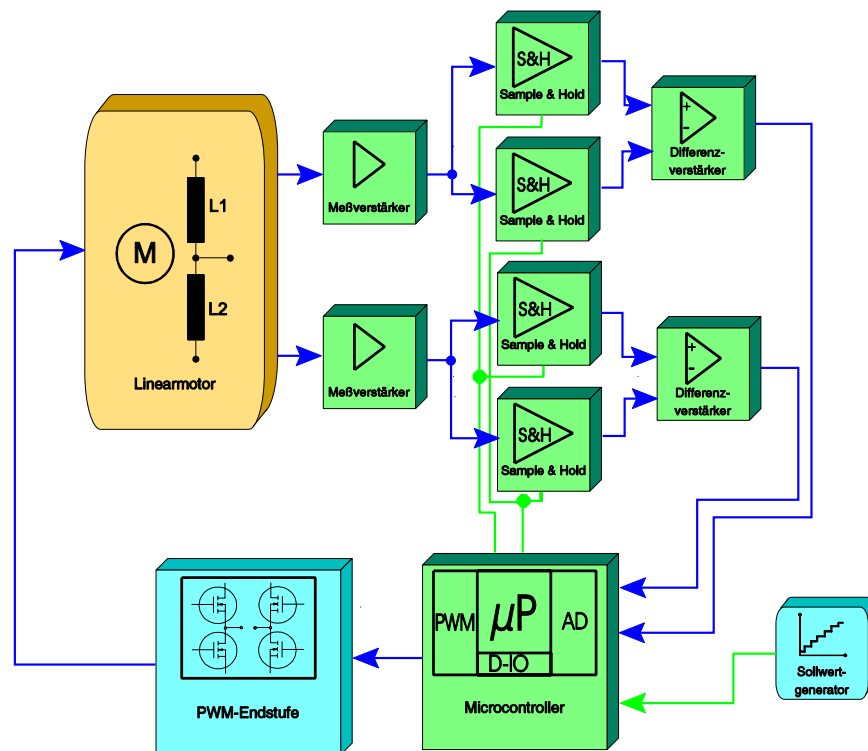


Abb. 6: Blockbild der elektronischen Ansteuer- und Meßschaltung

Zur elektronischen Ermittlung der Steigung hat sich eine digitale Zwei-Punkt-Differenzierung als günstigste Lösung herausgestellt, da analoge Differenzierer instabil sind und eine Linearisierung der Steigung zwischen beiden Abtastzeitpunkten zugelassen werden kann.

Das beschriebene Meßprinzip hat sich bewährt und läßt sich auch in mehrphasigen Antriebslösungen größerer Leistungen einsetzen. Beispielhaft sei hier auf einen zweiphasigen Antrieb in Abbildung 7 hingewiesen, der für einen industriellen Schlittenantrieb bestimmt ist.

Durch die hier vorgenommene Kaskadierung des Magnetsystems und die mehrphasige Spulenordnung lassen sich beträchtliche Antriebskraftsteigerungen und große Positionierwege unter Nutzung einer elektronischen Kommutierung erreichen.

4 Ergebnisse und Ausblick

Wie die bisherigen Untersuchungen zeigten, können mit den hier beschriebenen integrierten Wegmeßsystemen Auflösungen bis in den 1/10 mm Bereich erreicht werden. In derzeit laufenden Forschungsarbeiten werden die Einflüsse von elektrischem Strom, die Rückwirkungen durch Bewegungsinduktionen und thermische Einflüsse auf das Meßsystem untersucht, um über geeignete Kompensationsfunktionen höhere Auflösungen bis in den 1/100 mm Bereich zu erreichen.

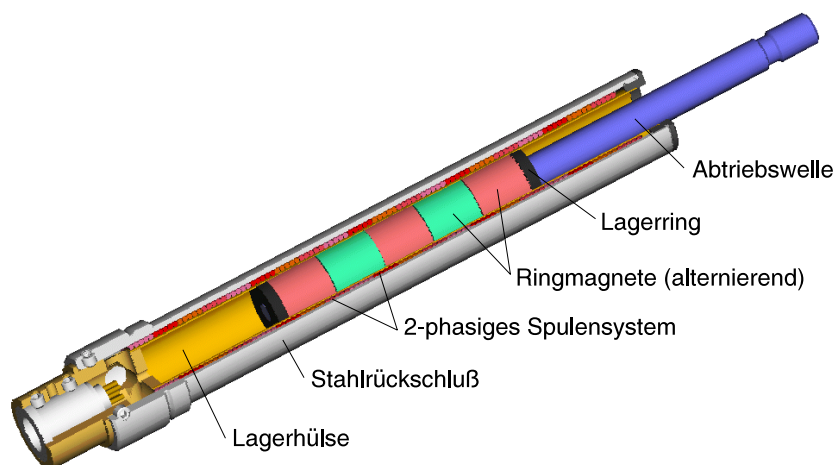


Abb. 7: Zweiphasiger elektronisch kommutierter Lineardirektantrieb mit integriertem Wegmeßsystem, $\varnothing 16\text{mm}$, Hub 50mm

Als besonders interessant hat sich der elektronisch kommutierte mehrphasige Antrieb (Abbildung 7) trotz des höheren Aufwandes für die Ansteuerelektronik erwiesen, da mit ihm relativ große Kräfte auf kleinem Bauraum erzielt werden können. Der sehr einfache Aufbau läßt eine kostengünstige Herstellung erwarten, so daß er in recht unterschiedlichen Applikationen Anwendung finden kann. Über eine spezielle Konstruktion mit einem kombinierten Spulensystem läßt sich der beschriebene mehrphasige Antrieb auch zu einem Dreh-Schub-Motor mit bewegtem Magnetsystem aufbauen, dessen Translationsbewegung mit einem integrierten Wegmeßsystem erfaßbar ist. Die Rotationsbewegung kann derzeit allerdings nur in einem Schritt- oder Synchronbetrieb mit elektronischer Kommutierung erfolgen, da noch kein ausreichend genaues statisches integrierbares Positionsmeßverfahren für die Rotation existiert. In Abbildung 8 ist ein Prototyp für einen Dreh-Schub-Motor zusehen, der auf einem Linearantrieb basiert.

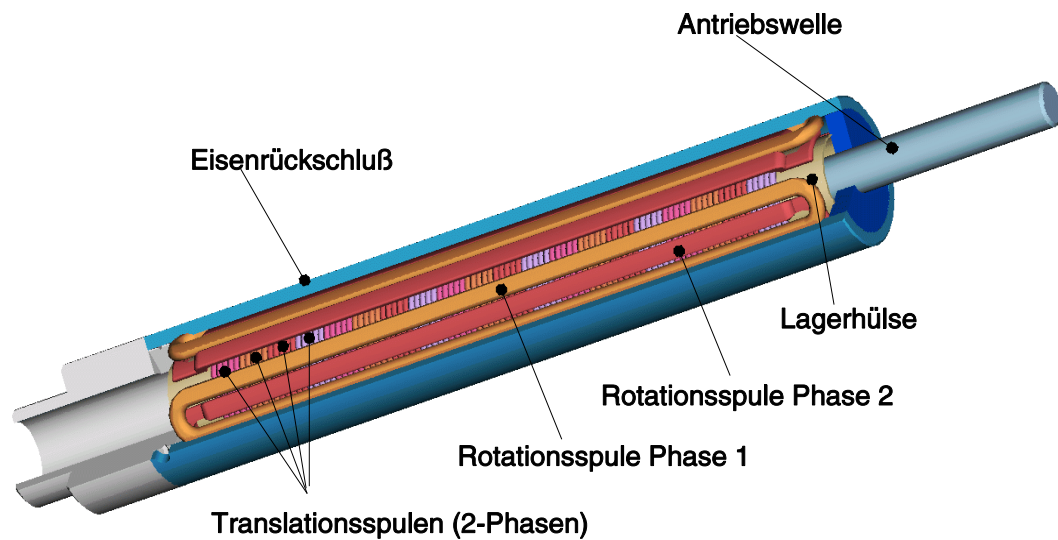


Abb. 8: Dreh-Schub-Motor

Literatur- bzw. Quellenhinweise:

- [1] Hartramph, R.: Elektrodynamische Lineardirektantriebe mit integriertem Wegmeßsystem
DRIVES 97 8. Int. Fachmesse und Kongreß für speicherprogrammierbare Steuerungen, Industrie-PCs und Elektrische Antriebstechnik Nürnberg, 25-27.11.1997, Tagungsband S.316 ff.
- [2] Hartramph, R.; Schinköthe, W.: Miniaturlinearantriebe mit integriertem Wegmeßsystem
F&M Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Mikroelektronik 104 (1997) 9, S. 634 ff.
- [3] Voss, M.; Schinköthe, W.: Miniaturisierte Linearantriebe - Konstruktive Gestaltung, FEM-Berechnung, Anwendung.
Tagung Innovative Kleinantriebe, Mainz 9./10.05.1996, VDI-Berichte 1269, S. 105-119.
- [4] Hartramph, R.; Schinköthe, W.: Elektromagnetisches Antriebssystem mit integrierter Wegsignalerzeugung
Patentanmeldung : OS DE 197 48 647 A1, 1997
- [5] Hartramph, R.; Voss, M.; Schinköthe, W.: Gleichstromlinearmotor mit integriertem Wegmeßsystem
Gebrauchsmuster DE 297 05 315.9, 1997

Wanderwellenmotoren - Bauformen und Eigenschaften

W. Schinköthe

Einleitung

In der Feinwerktechnik finden neben konventionellen Antrieben auch andere Wirkprinzipie Einsatz. Interessante Entwicklungen der jüngsten Zeit stellen Motoren dar, die piezoelektrisch generierte Wanderwellen zur Bewegungserzeugung nutzen. Erste kommerziell verfügbare Baureihen rotatorischer Motoren machen diese innovativen Antriebe insbesondere bei Forderungen nach hohem Drehmoment bei niedriger Drehzahl interessant, sie können als rotatorische Direktantriebe genutzt werden. Hinzu kommt die Eigenschaft der Selbsthemmung und damit das stromlose Halten einer Position.

1 Funktionsweise von Wanderwellenmotoren

In den Statorn von Wanderwellenmotoren werden resonante Schwingungen erregt, zu fortlaufenden Wellen überlagert und durch Reibschluß Bewegungen auf den Abtrieb übertragen. Dies ermöglicht die Realisierung kontinuierlich arbeitender Motoren. Man bezeichnet sie auch als Ultraschallmotoren, da Resonanzschwingungen bei Frequenzen zwischen 20 und 100 kHz, also im Ultraschallbereich, erregt werden.

Ein Charakteristikum der Wanderwellenantriebe besteht darin, daß die schwingenden Oberflächenpunkte, die in Kontakt mit dem Abtrieb stehen, sich auf elliptischen Trajektorien bewegen. Diese elliptischen Trajektorien erzielt man, indem zwei Eigenformen, die bei derselben Frequenz auftreten (degenerieren), im Schwinger überlagert werden. Die überlagerten Eigenformen sind stets orthogonale Eigenformen vom gleichen Typ und gleicher Ordnung. Durch Anregung der beiden Eigenformen mit einer räumlichen und zeitlichen Phasenverschiebung entsteht infolge der Überlagerung im Stator eine Welle [1]. Diese Welle beschreibt eine umlaufende Biegewelle, eine umlaufende Biegung oder eine Dehnungswelle. Der Kontakt zwischen Stator und Rotor bleibt ständig erhalten, d.h. zu jedem Zeitpunkt sind gleichviele Kontaktpunkte im Eingriff.

2 Motoren mit umlaufender Biegewelle

Erste marktreife Prototypen von Wanderwellenmotoren basierten auf Motoren mit Biegewellen [1], Abb. 1. Der Motor besteht aus Gehäuseteilen (1, 12), Lagerelementen (8, 9, 10, 11), der Abtriebswelle (7), dem Stator (3) und dem Rotor (4). Auf der Statorunterseite ist die Piezokeramik (2) zur Anregung der Wanderwelle aufgeklebt. Der Stator selbst ist an der am Rotor anliegenden Seite durch Einschnitte biegeweich gestaltet. Der Rotor trägt auf der Unterseite eine Reibschicht und wird über eine Gummischeibe (5) mit einer Tellerfedern (6) auf die Oberseite des Stator unter Vorspannung angedrückt.

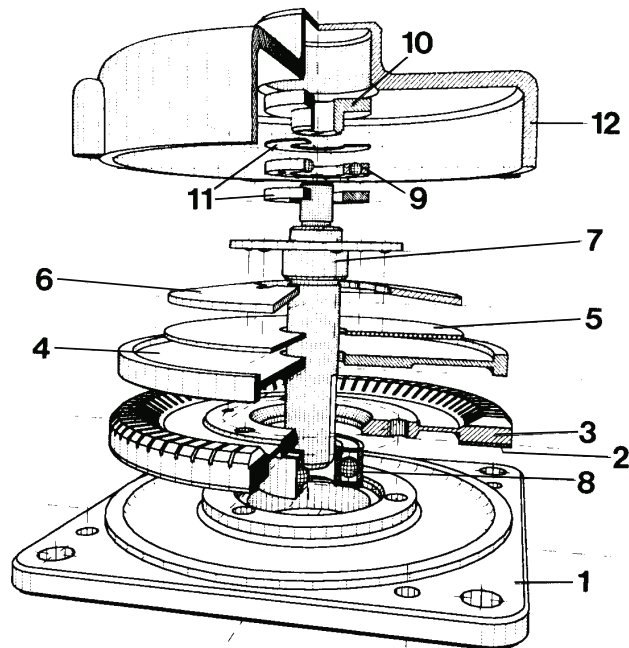


Abb.1: Explosionsdarstellung des Shinsei-Motors USR-60 [1]

Die Überlagerung zweier stehender Wellen erzeugt im Stator die gewünschte wandernde Biegewelle. Die Erregung erfolgt typischerweise mit einer Zwei-Phasen-Ansteuerung zweier Anregungsbereiche unter Einhaltung einer räumlichen Phasenbedingung von $x_0 = \lambda/4$ und einer zeitlichen Phasenbedingung von $\Phi_0 = \pi/2$. Abb. 2 zeigt die beiden Anregungsbereiche und die von der Wellenlänge abhängige Aufteilung und Polarisierung der Piezokeramik für den obigen Shinseimotor. Die räumliche Phasenbedingung wird durch einen Versatz der Anregungsbereiche um $\lambda/4$ realisiert, z.B. durch Einbringung eines Sensorfeldes. Durch Änderung des Vorzeichens der Phasenverschiebung kann die Drehrichtung umgeschaltet werden. Eine Momentaufnahme der umlaufenden Biegewelle zeigt Abb. 3.

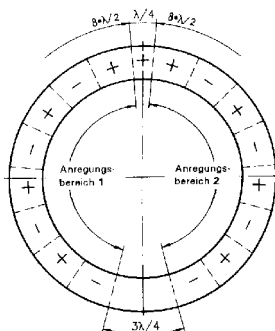


Abb. 2: Polarisierung der Piezokeramik des Shinsei-Motors

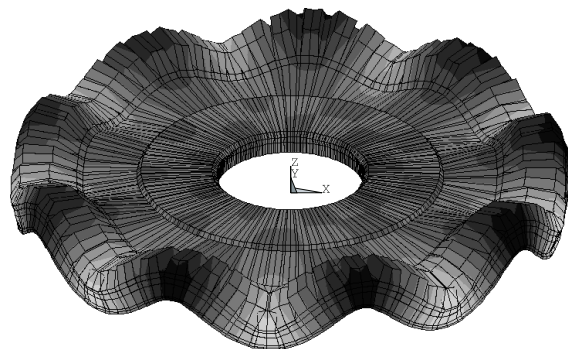


Abb. 3: Momentaufnahme der Wanderwelle (stark überhöht)

Die Oberflächenpunkte des Stators durchlaufen elliptische Trajektorien. Abb. 4 zeigt solche für Kontaktpunkte zwischen Stator und Rotor. Diese Trajektorien besitzen durch die eingebrachten Einschnitte eine ausreichend große Komponente in Abtriebsrichtung. Ohne Einschnitte hätten die Trajektorien eine elliptische Form mit senkrechter großer Halbachse.

Eine interessante Variante dieses Motors stellt auch ein Hohlläufermotor dar, um beispielsweise eine Optik aufnehmen zu können [2].

3 Motoren mit umlaufender Biegung

Eine zweite Bauform bilden Motoren mit Zylindergeometrie bei einem Länge/Durchmesser-Verhältnis deutlich größer eins. Aufbau und Funktion sind in [3] und [7] beschrieben. Abb. 5 zeigt eine Schnittdarstellung, Abb. 6 einen realen Aufbau. Die entscheidenden Baugruppen sind der Stator mit seinen Einzelteilen (1, 2, 3, 7, 8) sowie der Rotor (4, 5) mit dem Abtriebszahnrad (10). Am Flansch (12) wird der Motor am Gehäuse befestigt, so daß der Stator über die Achse (8) flexibel aufgehängt ist und unbehindert schwingen kann. Die Schwingungsanregung erfolgt durch die Piezokeramikscheiben (2). Kupferscheiben (7) dienen zur elektrischen Kontaktierung. Über eine Feder (9) wird der Rotor auf den Stator gedrückt. Das Lager (11) stützt den Rotor ab.

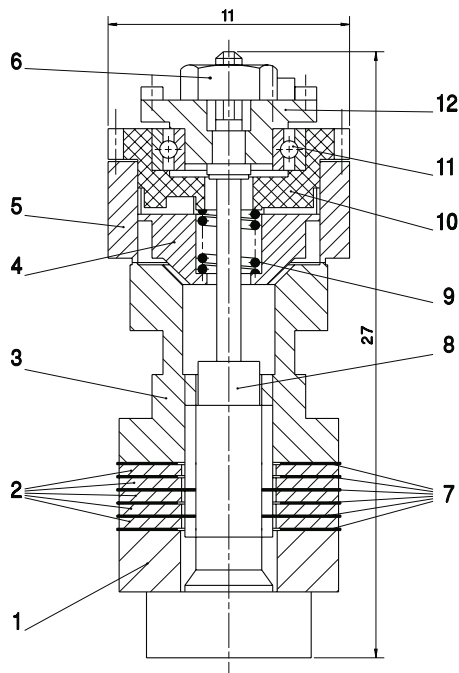


Abb. 5: Schnittdarstellung eines stabförmigen Wanderwellenmotors [3]



Abb. 6: Stabförmiger Wanderwellenmotor aus einem Objektiv von Canon

An der schmalen kreisringförmigen Reibfläche zwischen Stator (3) und Rotor (5) findet die Erzeugung der Drehbewegung statt. Die Auslenkungen verlaufen bei den degenerierten Biegeeigenformen in einer Ebene durch die Mittelachse des Stators. Für die beiden überlagerten Eigenformen stehen diese Ebenen senkrecht aufeinander, woraus ihre Orthogonalität folgt. Die Überlagerung der beiden orthogonalen Eigenformen, die ebenfalls mit einer Zwei-Phasen-Ansteuerung bei Einhaltung einer räumlichen und einer zeitlichen Phasenbedingung ($x_0 = \lambda/4$, $\Phi_0 = \pi/2$) erregt werden, bewirkt das Umlaufen der Biegung. Abb. 7 zeigt Momentaufnahmen der Wanderwelle. Ein Taumeln der Kontaktfläche mit dem Auflagepunkt zum Rotor wird deutlich.

4 Motoren mit Dehnungswelle

Die dritte Bauform nutzt Dehnungseigenformen eines Hohlzylinders. Während die zuvor erläuterten Bauformen Verbundschwinger aus Piezokeramik und Metall beinhalten, besteht hier der Stator nur aus Piezokeramik, Abb. 8. Es können Motoren mit sehr kleinen Durchmessern (ab ca. 3 mm) aber auch mit Durchmessern bis ca. 100 mm sowie Hohlläufer realisiert werden [4]. Der Stator (Piezokeramikzylinder) trägt an der oberen Stirnfläche eine Reibschicht. Damit das untere Befestigungsteil das Reaktionsmoment aufnehmen kann, wird zwischen den beiden Teilen eine elastische Schicht mit hohem Reibungskoeffizienten angebracht. Die Lagerung des Rotors (obere Scheibe in Abb. 8) kann über die Abtriebsachse erfolgen. Sie muß gleichzeitig die axiale Anpreßkraft zwischen Rotor und Stator und damit auch die Reaktionskraft zwischen Stator und Befestigungsteil aufbringen.

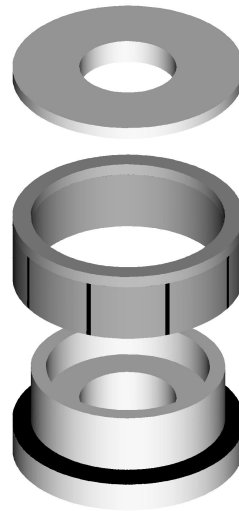


Abb. 8: Prinzipieller Aufbau eines Motors mit Dehnungswelle

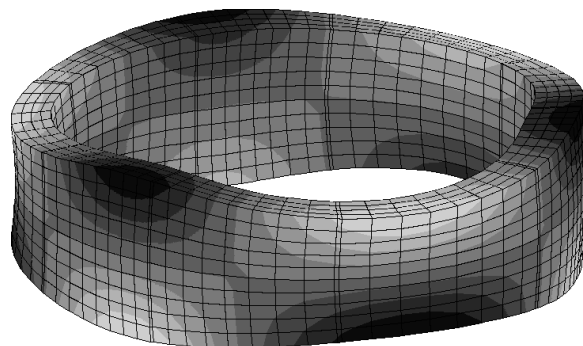


Abb. 9: Momentaufnahme der Dehnungswelle (stark überhöht)

Die Erzeugung der wandernden Dehnungswelle erfolgt bei diesem konkreten Motor durch Überlagerung von drei stehenden Wellen. Ähnlich einem Drehfeldmotor müssen drei zeitlich um $\Phi_0 = 2\pi/3$ bzw. $\Phi_1 = 4\pi/3$ phasenverschobene Ansteuersignale bereitgestellt werden. Dazu sind drei Anregungsbereiche für die Erregung der drei stehenden Wellen räumlich mit einer Phasenverschiebung von $x_0 = 2\lambda/3$ bzw. $x_1 = 4\lambda/3$ anzuordnen. Durch Vertauschen von zwei Ansteuersignalen wird die Drehrichtung umgeschaltet.

Eine Momentaufnahme der Dehnungswelle enthält Abb. 9. Die Oberflächenpunkte durchlaufen elliptische Trajektorien in der axial-tangentialen Ebene mit tangentialen Auslenkungen zwischen 0,4 und 1,5 μm .

Eine Übersicht der realisierbaren Parameter kommerziell eingesetzter rotatorischer Wanderwellenmotoren zeigt Abb. 10.

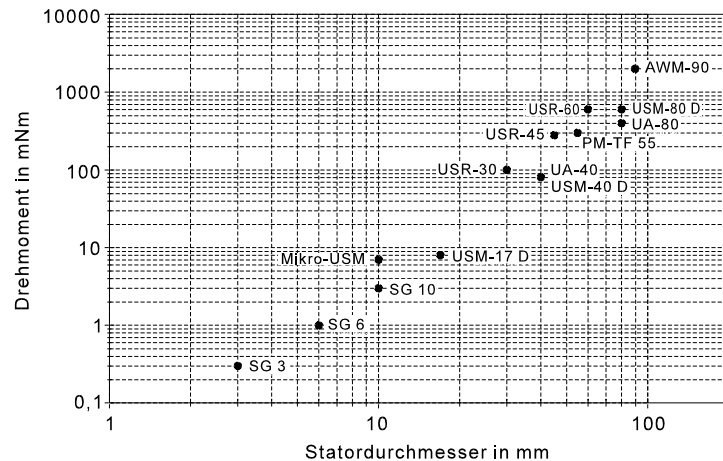


Abb. 10: Drehmoment in Abhängigkeit des Statordurchmessers, SG-, PM-Typen von PI Ceramic, UA von Canon, USM von Panasonic, USR von Shinsei

5 Lineare Wanderwellenmotoren

Bisher wurden Bauformen rotatorischer Motoren besprochen. Es ist naheliegend, die Umsetzung des Prinzipes auf lineare Bewegungen zu untersuchen, [7] bis [10]. Entgegen den rotatorischen Motoren ist es auf einem linearen Stator jedoch nicht ohne weiteres möglich, eine Wanderwelle zu erzeugen, da an den Enden Reflexionen auftreten, die sich letztlich zu einer stehenden Welle überlagern. Lineare Wanderwellenmotoren benötigen deshalb ebenfalls einen geschlossenen Wellenleiter.

Den am IKFF realisierten Motor zeigt Abb. 11. Er ist an die rotatorische Bauform mit umlaufender Biegewelle angelehnt. Der Ringstator besteht aus zwei geraden Abschnitten und zwei Halbkreisbögen. Die Innenseite des unteren Abschnittes trägt die Piezokeramik. Die Aufhängung des Stators erfolgt über zwei Membranen entlang beider Seiten des unteren geraden Abschnittes, so daß der Ring

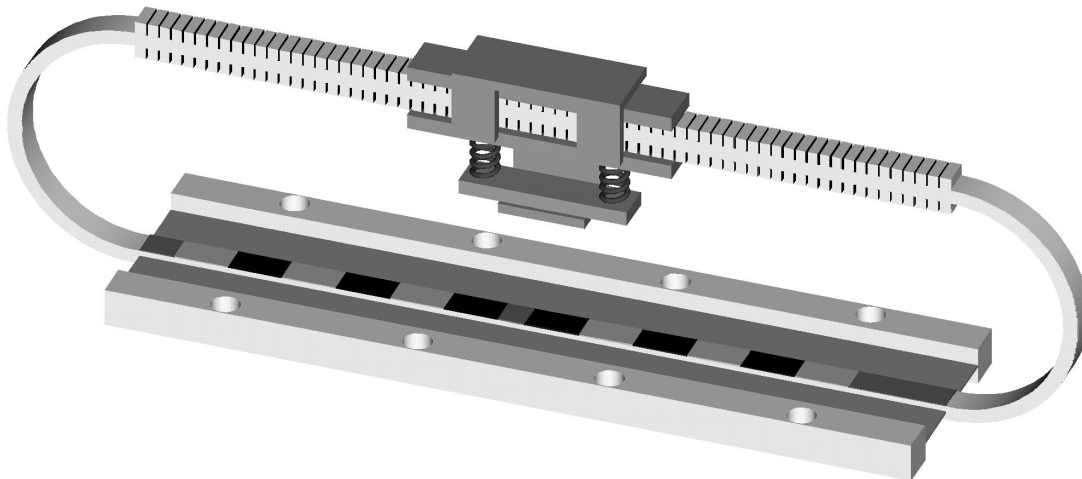


Abb. 11: Linearer Wanderwellenmotor mit Ringstator [7]

im Raum ortsfest gebunden ist, die Wanderwelle jedoch ungestört umlaufen kann. Auf dem oberen geraden Abschnitt sitzt der Läufer (Bewegungsabgriff). Zur Vergrößerung der Bewegungskomponente in Antriebsrichtung trägt er wieder Einschnitte.

Diese Anordnung besitzt einige Vorteile. Die geringe Läufermasse sichert eine hohe Dynamik. Der passive Läufer benötigt keine Zuleitungen. Der Läufer kann umfangreich gestaltet werden, um Ringdeformationen durch die Anpressung des Läufers zu vermeiden. Dies sichert gleichmäßigen Kontakt und durch die zwei Kontaktflächen eine höhere Motorkraft.

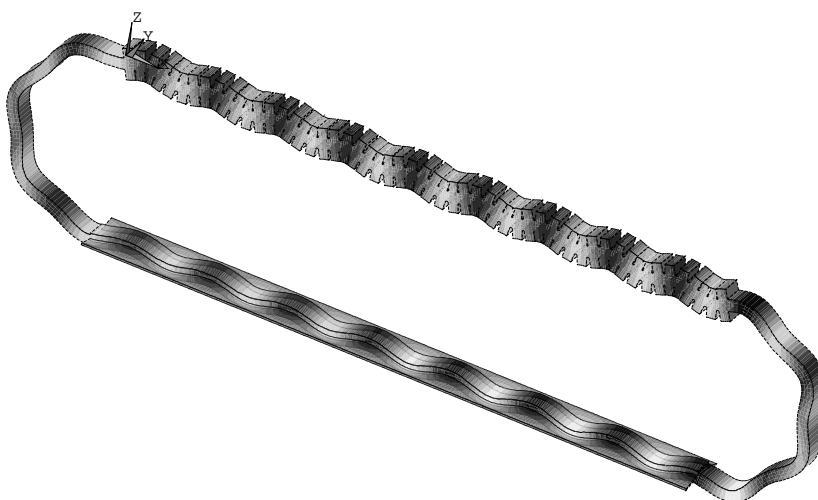


Abb. 12: Momentaufnahme der Biegewelle im Ringstator des linearen Wanderwellenmotors (stark überhöht) [7]

Die wandernde Biegewelle entsteht wieder aus den zwei stehenden Wellen mit den bekannten Phasenbedingungen ($x_0 = \lambda/4$, $\Phi_0 = \pi/2$). Durch Vertauschen der beiden Ansteuersignale kann die Bewegungsrichtung umgeschaltet werden. Eine Überlagerung zweier stehender Biegewellen erfordert die Existenz eines orthogonalen Eigenformpaares, welches idealerweise degeneriert. Für die Geometrie des Ringstators ist dies im Gegensatz zu den rotationssymmetrischen Motoren nicht selbstverständlich. In [7] wurde nachgewiesen, daß auch für den Ringstator orthogonale Biegeeigenformen existieren, die für bestimmte Geometrie-Verhältnisse auch dieselbe Eigenfrequenz besitzen. Eine Simulation für einen Ringstator mit optimierter Geometrie bestätigt die Anregung einer ideale Wanderwelle. Eine Momentaufnahme der Wanderwelle veranschaulicht Abb. 12. Es wurden mehrere Prototypen des linearen Wanderwellenmotors mit Ringstator realisiert, welche die Funktionsweise dieses Motorkonzeptes in der Praxis demonstrieren, Abb. 13.

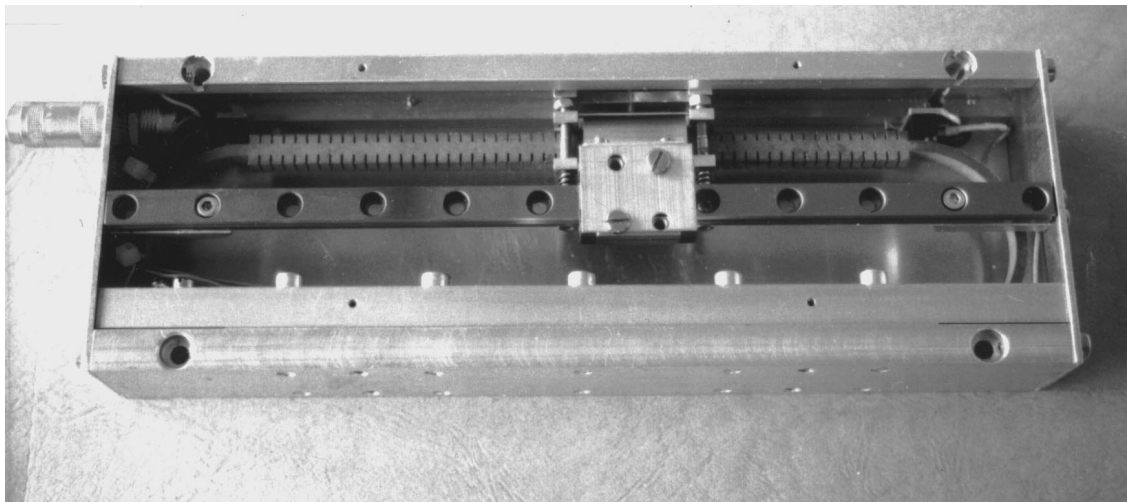


Abb. 13: Prototyp einer Achse mit linearem Wanderwellenmotor

Schlußfolgerungen

Wanderwellenmotoren stehen als rotatorische Motoren schon heute in verschiedensten Bauformen zur Verfügung. Sie sind als langsam laufende Direktantriebe ohne Getriebe einsetzbar. Vorteilhaft ist die Selbsthemmung. Lineare Wanderwellenmotoren stehen am Anfang ihrer Entwicklung. Da sie den Wellenleiter nicht vollständig umgreifen, sind ihre Parameter noch nicht zufriedenstellend.

Literatur bzw. Quellenhinweise:

- [1] Fröschle, A.: Analyse eines Piezo-Wanderwellenmotors. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF-Institutsbericht Nr. 10, 1992.
- [2] Canon Inc.: EF Objektive für EOS-Kameras. Firmenprospekt der Fa. Canon Euro-Photo GmbH, Willich 1996.
- [3] Hermann, M.: Berechnung eines stabförmigen Wanderwellenmotors mit ANSYS. Festschrift anlässlich der Emeritierung von Herrn Prof. Jung. IKFF, Universität Stuttgart, 1995, S. 25-29.
- [4] PI Ceramic: Piezoelektrischer Motor. DE 44 38 876 A1, 1995.
- [5] Herzog, B.: Entwicklungsgrundlagen für modulare Ultraschallantriebe - Meßtechnik, Regelungsprinzipien, Modelle. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF-Institutsbericht Nr. 11, 1993.
- [6] Schinköthe, W.; Hermann, M.; Voss, M.: Lineardirektantriebe erschließen neue Anwendungen. 41. IWK der TU Ilmenau 1996, Ilmenau 23.-26.09.96, Reihe Mechatronik, Tagungsband 2, S. 51 - 56.
- [7] Hermann, M.: Entwicklung und Untersuchung piezoelektrisch erregter Wanderwellenmotoren für lineare Bewegungen. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF-Institutsbericht Nr. 14, 1998.
- [8] Hermann, M.; Schinköthe, W.: Piezoelektrische Wanderwellenmotoren für lineare Bewegungen, Tagung Innovative Kleinantriebe, Mainz 09./10. 05.96, VDI-Berichte 1269, S. 301-314.
- [9] Hermann, M.; Schinköthe, W.: Piezoelectric Travelling Wave Motors Generating Direct Linear Motion. Conference Proceedings, Actuator '96, Bremen 26.- 28.06.96, Conference Proceedings, S. 200-203.
- [10] Hermann, M.; Schinköthe, W.; Haug, J.: Properties of a Piezoelectric Travelling Wave Motor Generating Direct Linear Motion. Actuator '98, Bremen 17.- 19.06.98, Conference Proceedings, S. 238-241.

Einfluß von Werkzeugbeschichtungen auf das Entformungsverhalten beim Spritzgießen

Influence of mold wall coatings while demoulding in the injection molding process.

E. Burkard, T. Walther, W. Schinköthe (IKFF)

Zusammenfassung

Am IKFF wurde in Zusammenarbeit mit den Firmen Balzers und Hasco ein Projekt gestartet, bei dem die Auswirkung von Beschichtungen bei Spritzgießwerkzeugen auf das Entformungsverhalten untersucht werden. Mit dem im Rahmen dieses Projekts aufgebauten Versuchswerkzeug können mit geringem Aufwand verschiedene Werkzeugbeschichtung-Kunststoff-Paarungen untersucht werden.

Durch die Vielzahl der beim Entformen wirksamen Parameter können aber zur Zeit nur für spezielle Werkzeugbeschichtung-Kunststoff-Paarungen Aussagen über die Entformungskraft gemacht werden. Eine allgemeingültige Regel für das Beschichten von Spritzgießwerkzeugen kann bisher nicht aufgestellt werden. Weitere Versuchsreihen zur Untersuchung der entformungsbeeinflussenden Parameter sind vorgesehen.

Abstract

In cooperation with Balzers and HASCO the IKFF started a project to test the influence of mold wall coating while demolding of the part. With the injection mold build for this project it is possible to test the influence between mould coatings and injection moulding compounds without a lot of effort.

While demolding there are a lot of parameters influencing the ejector force. At this time it is only possible to give rules for special combinations of mold coating and injection moulding compounds. So far it is not possible to give a universal rule for coating an injection mold.

The IKFF intends to perform more tests analysing the parameters while demolding injection molded parts.

1. Einführung

Wachsende Ansprüche an die Produktqualität, verbunden mit stetig steigendem Kostendruck sowie die Verarbeitung neuer, meist gefüllter Kunststoffe erfordern immer extremere Verarbeitungsbedingungen beim Spritzguß. Den dadurch steigenden Anforderungen sind die Formwerkzeuge teilweise nicht mehr zufriedenstellend gewachsen. Zunahme von Verschleiß und Belagbildung sowie ein schlechteres Entformungsverhalten sind die Folge. Als eine Lösungsmöglichkeit hat sich hier das Beschichten der Werkzeuge bewährt. Die Auswirkungen der einzelnen Beschichtungen auf den Spritzgießprozeß lassen sich aber meist nur schlecht vorhersagen. Bisher veröffentlichte Anwendungsbeispiele beziehen sich meist auf spezielle Probleme und lassen sich nur schlecht verallgemeinern.

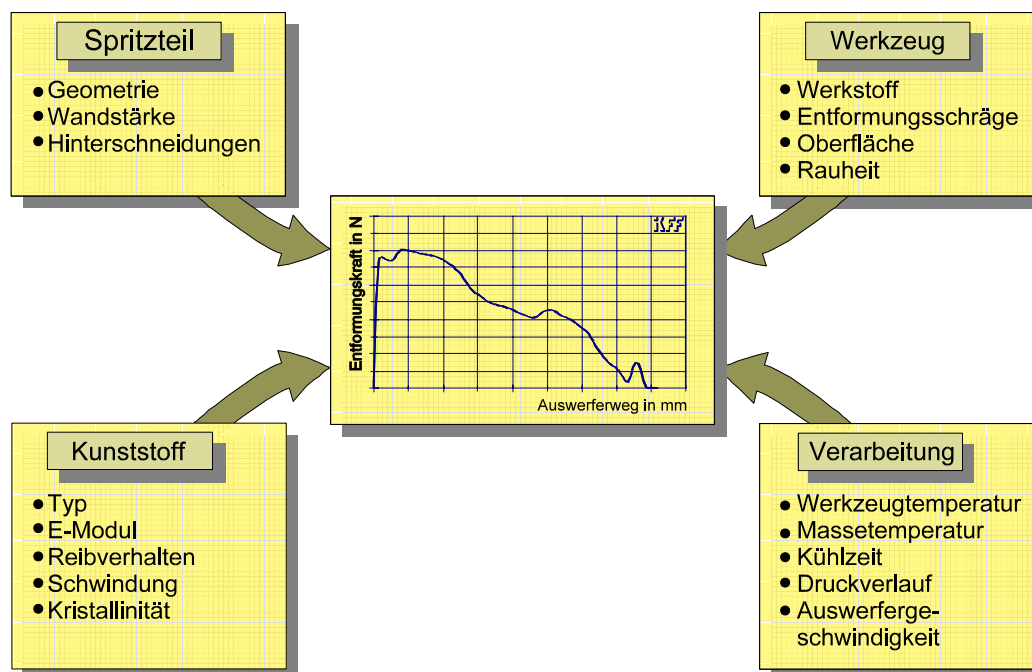


Bild 1 Einflußfaktoren auf die Entformung [1]

Das Entformungsverhalten des Spritzteils wird von vielen Faktoren bestimmt. Um diese Einflüsse zu untersuchen, wurde am IKFF ein Werkzeug entwickelt und aufgebaut, mit dem es möglich ist, verschiedene Werkzeugoberflächenrauheiten, Werkzeugbeschichtungen und Werkzeugwerkstoffe bei sonst gleichbleibenden Randbedingungen zu untersuchen.

2. Versuchsaufbau

Um möglichst allgemeingültige Ergebnisse zu erhalten, wurde als Probekörper eine zylindrische Hülse mit 20 mm Innendurchmesser und einer Länge von 40 mm mit Schirmanguß gewählt. Die Hülse schrumpft während der Kühlzeit auf einen Kern auf und löst sich dadurch von der angußseitigen Formhälfte. Das Abstreifen vom Kern erfolgt mit Hilfe eines Ringauswerfers.

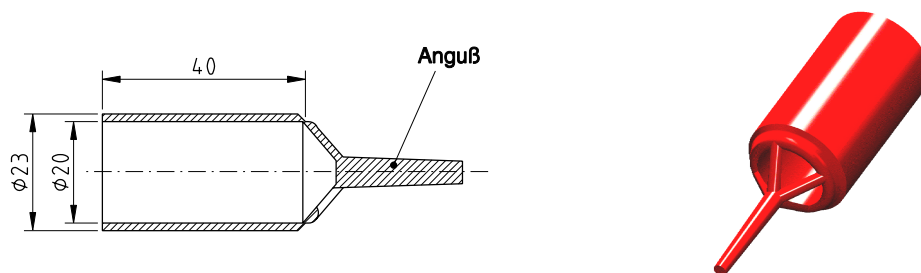


Bild 2 Probebauteil

Beim Auswerfen des Teils wird die Entformungskraft mit Hilfe einer Kraftmeßdose in der Auswerfermechanik und der Auswerferweg mit einem Wegaufnehmer gemessen. Durch den Aufbau des Werkzeugs ist ein einfacher Austausch der Kerne und somit die Auswahl von unterschiedlichen Werkstoffen, Werkzeugbeschichtungen und Oberflächenrauhtiefen möglich.

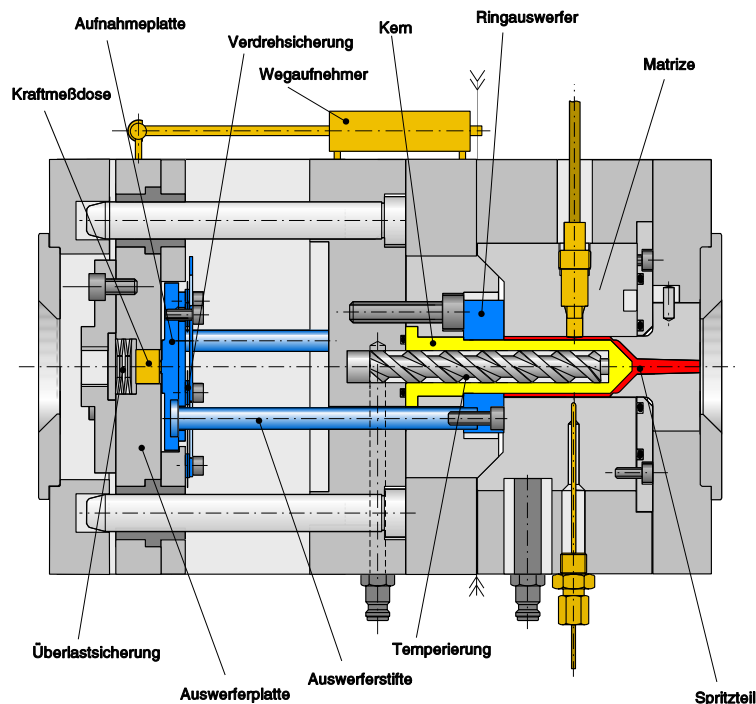


Bild 3 Versuchswerkzeug

Am IKFF sind zur Zeit Kerne mit verschiedenen Verschleißschutz- und Gleitschichten (z. B. TiN, TiAlN, CrN, WC/C) sowie mit unterschiedlichen Oberflächenrauhtiefen im Einsatz. Es ist auch der Einsatz von Kernen aus reibungsarmen Materialien (z. B. AMPCO-Metalle) vorgesehen.

3. Meßtechnik

Die von den einzelnen Sensoren kommenden Signale werden verstärkt, mit einer Analog-Digitalwandlerkarte in digitale Signale umgewandelt und dann mit einem PC weiter ausgewertet. Protokolliert werden u. a. Auswerferkraft, Auswerferweg und Auswerfarbeit.

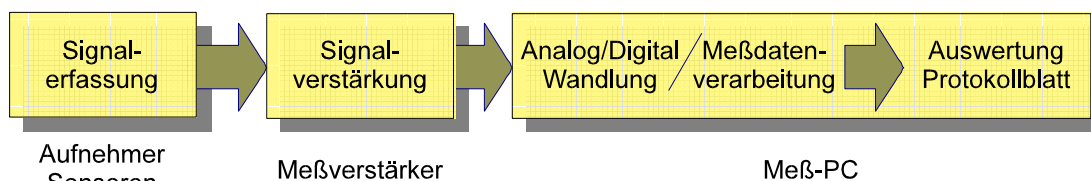


Bild 4 Meßkette

4 Einflüsse einzelner Parameter auf die Entformungskraft

4.1 Kunststoff

Da die Kunststoffe unterschiedliche Verarbeitungsbedingungen erfordern, können die notwendigen Entformungskräfte nicht direkt miteinander verglichen werden. Amorphe und teilkristalline Kunststoffe weisen jedoch jeweils in sich ähnliche Kraft-Weg-Verläufe auf. Bei der Vielzahl der zur Zeit auf dem Markt befindlichen Kunststoffe beschränken sich die Untersuchungen zuerst auf eine Auswahl an Standardtypen. Folgende Kunststoffe wurden für die Versuchsreihen ausgewählt:

- ABS Terluran 967K (BASF)
- PA Ultramid A3W (BASF)
- PC Makrolon 2800 (Bayer)
- POM Ultraform N2320 (BASF)

Zusätzlich werden aber auch verstärkt spezielle Kunststoff auf Kundenanfrage untersucht (vgl. Bild 6-8).

4.2 Oberflächenrauheit

Erwartungsgemäß sinkt bei besserer Oberflächengüte die zur Entformung notwendige Kraft. Dies gilt aber nur bis zu einem bestimmten, von der Art des Kunststoffes abhängigen Grenzwert. Bei einer weiteren Verbesserung der Oberflächenrauheit steigt dann die notwendige Entformungskraft wieder stark an. Ursache hierfür können unter anderem Adhäsionseffekte sein. Um dies zu untersuchen, wurde versucht, die Entformungskraft dadurch zu verringern, daß Trennmittel auf den Kern aufgetragen wurde. Dies hatte aber nur einen sehr geringen Einfluß auf die zur Entformung notwendigen Kraft [2]. Mit weiteren Untersuchungen sollen hierzu genauere Ergebnisse erzielt werden.

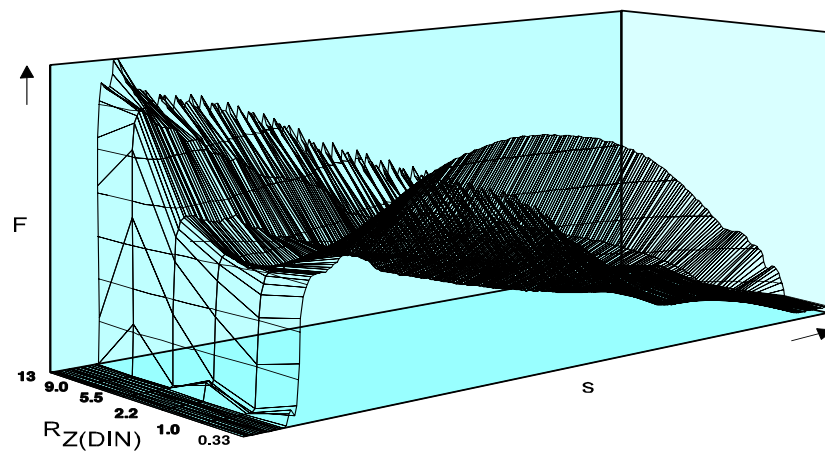


Bild 5 Einfluß der Oberflächenrauheit bei ABS

4.3 Beschichtung

Die bisherigen Untersuchungsergebnisse zeigen eine starke Abhängigkeit der notwendigen Entformungskraft von der Kombination aus Kunststoff und Beschichtung. Hierbei kann es vorkommen, daß eine Beschichtung bei einem Kunststoff zu einer starken Reduzierung der Entformungskraft führt, bei einem anderen Kunststoff aber eine Erhöhung der zum Entformen notwendigen Kraft bewirkt. Eine allgemeingültige Empfehlung für das Beschichten von Spritzgießwerkzeugen kann daher zum aktuellen Zeitpunkt der Untersuchungen nicht gegeben werden.

Der Einsatz von Verschleißschutzschichten, die für den Einsatz bei abrasivem und chemischen Verschleiß empfohlen werden, kann somit unerwünschte Nebeneffekte haben. Bei Versuchen mit glasfasergefülltem PPS ergab sich eine Erhöhung der notwendigen Entformungskraft beim Einsatz einer TiN-Verschleißschutzschicht. Der Vorteil der höheren Werkzeugstandzeit durch die Hartstoff-

beschichtung mit TiN ist hier gegenüber dem Nachteil der erhöhten Entformungskraft abzuwägen.

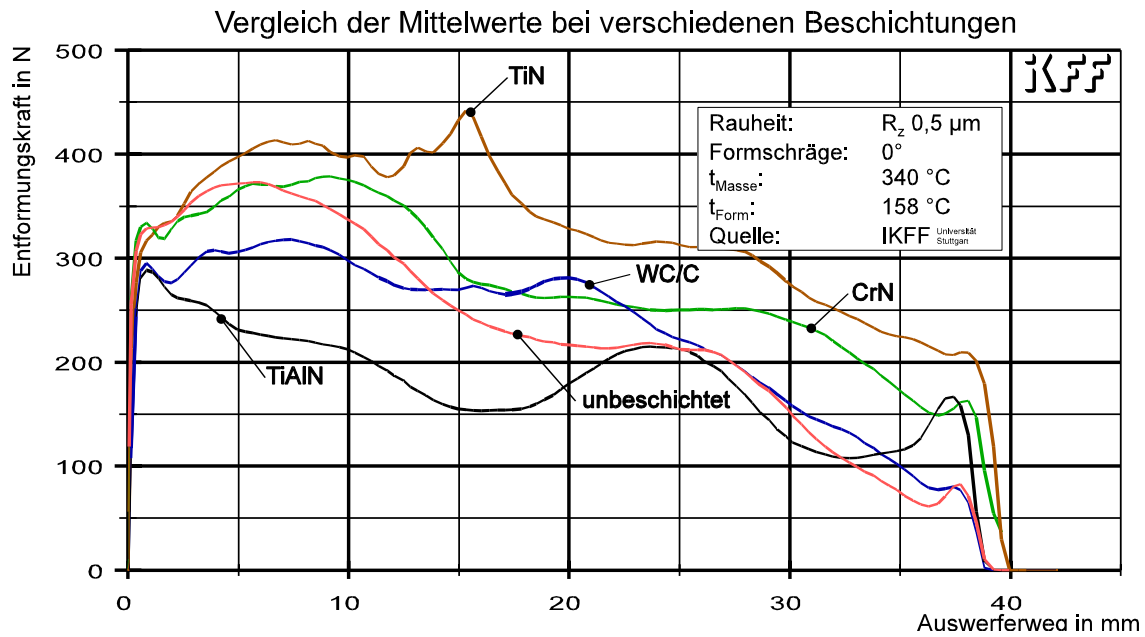


Bild 6 Einfluß von Werkzeugbeschichtungen bei Ryton (PPS 40%Glasfaser)

Bei anderen Kunststoff-Werkzeugbeschichtung-Paarungen können eindeutigere Vorteile beim Entformungsverhalten erreicht werden. Bei einer geeigneter Kombination kann eine Reduzierung der notwendigen Entformungskraft von bis zu 50% gegenüber einem unbeschichteten Werkzeug erzielt werden.

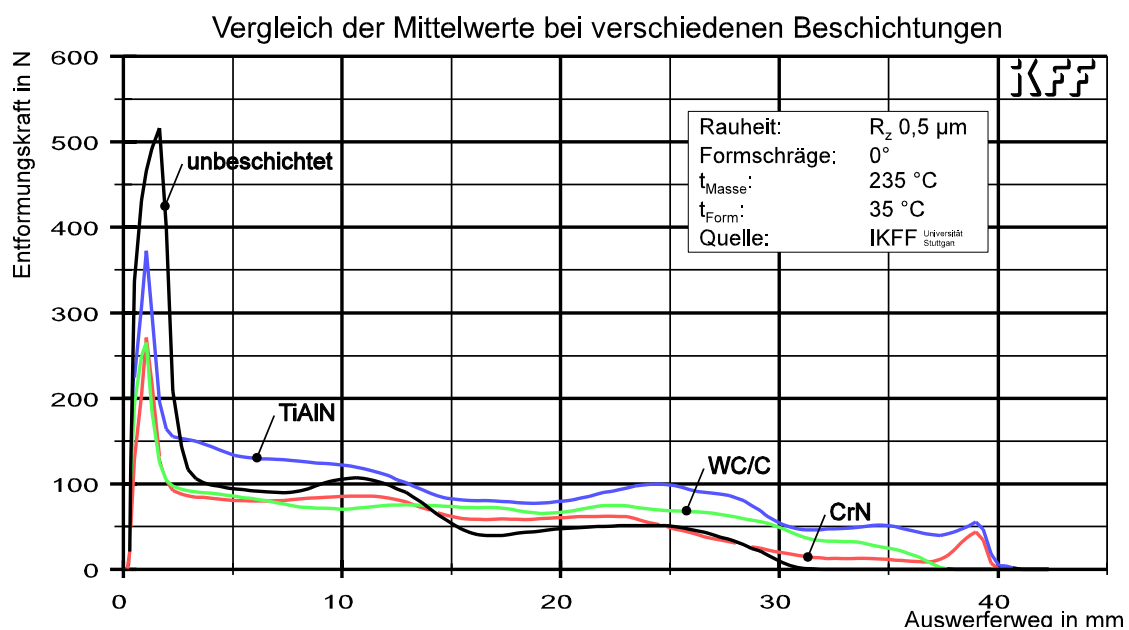


Bild 7 Einfluß von Werkzeugbeschichtungen bei Lupolen 1840H

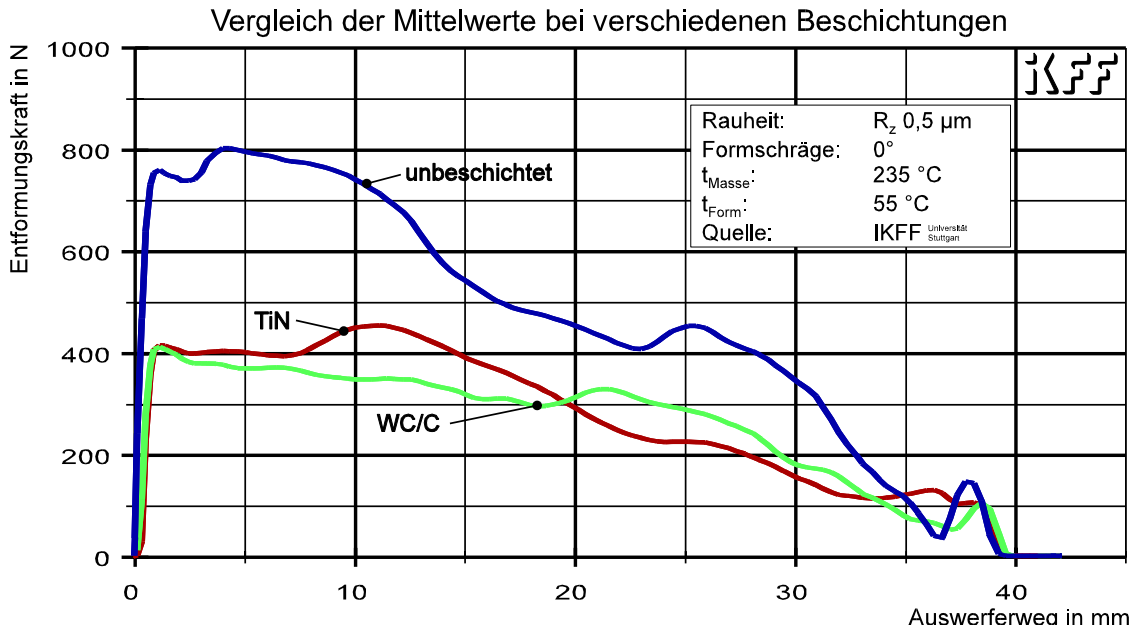


Bild 8 Einfluß von Werkzeugbeschichtungen bei PPU 1080 S1

Bisherige Erfahrungen zeigen, daß bei einigen Beschichtungen die im PVD (Plasma Vaporised Deposit)-Verfahren aufgebracht werden eine als Glänzen bezeichnete Nachbehandlung notwendig ist. Dabei werden die durch das Beschichten entstandenen Mikrorauheiten durch Abziehen der Werkzeugoberfläche eingebnet.

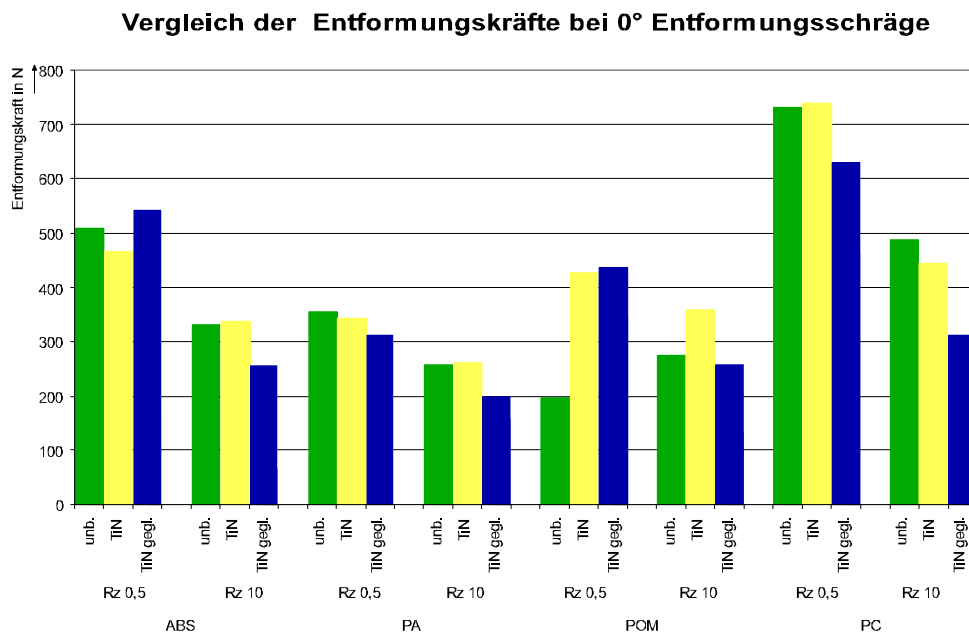


Bild 9 Einfluß des "Glänzens" der Beschichtung (R_z-Werte vor dem Beschichten gemessen)

5. Schlußfolgerung

Das Beschichten von Spritzgießwerkzeugen hat einen direkten Einfluß auf die Entformungskraft der Spritzlinge. Dabei kann durch eine geeignete Wahl der Werkzeugbeschichtung das Entformungsverhalten verbessert werden.

Leider ist es aber zur Zeit nicht möglich, eine allgemeingültige Regel für das Beschichten von Werkzeugen zur Reduzierung der Entformungskraft aufzustellen. Bei der Beschichtung aus anderen Gründen (Verschleißschutz, Belagreduzierung, ...) muß dies bedacht werden und gegebenenfalls eine Abwägung der Vor- und Nachteile erfolgen.

Literaturverzeichnis

- [1] Walther, T.: Einfluß von Verschleißschichten auf die Entformungskraft beim Spritzgießen, Diplomarbeit IKFF Stuttgart, 1996
- [2] Walther, T.: Durch Beschichtungen schneller aus der Form?, Plastverarbeiter Nr. 11, S. 78-83, 1997

Danksagung

Die Autoren danken den Firmen BASF, Balzers, BAYER, Dr. BOY und HASCO für die Unterstützung durch Kunststoffe, Beschichtungen, Spritzgießmaschine, Werkzeuge, Normalien und auch für die finanzielle Förderung der Untersuchungen.

Mikrospritzgießen mit induktiver Werkzeugtemperierung **Injection moulding of microstructures with inductive** **mould heating**

Th. Walther, IKFF; W. Schinköthe, IKFF; W. Ehrfeld, IMM Mainz; C. Schaumburg, IMM Mainz; L. Weber, IMM Mainz

Zusammenfassung

Der Mikrosystemtechnik wird ein ähnliches Wachstum vorausgesagt, wie der Mikroelektronik vor etwa 25 Jahren. Unterschiedlichste Anwendungen und Demonstratoren sind bereits entwickelt worden, jedoch verhindern die kostenintensiven Fertigungsverfahren bisher noch den Einsatz in Großserien. Für die Massenfertigung bietet sich die Kunststoffabformtechnik als wirtschaftliches Verfahren an. Um die erforderlichen Strukturen im Mikrometerbereich abformen zu können, ist neben speziellen Anforderungen an das Spritzgießwerkzeug eine variotherme Prozeßführung erforderlich. Stand der Technik ist ein Variothermverfahren mit unterschiedlich temperierten Ölkreisläufen. Nachteilig bei diesem Verfahren sind jedoch die teilweise im Minutenbereich liegenden Zykluszeiten, die zu einer thermischen Schädigung der Schmelze in der Plastifiziereinheit führen können. Eine Alternative bietet sich durch die induktive Werkzeugtemperierung an.

Abstract

For the microsystem technology a similar growth is predicted as for the microelectronic technology 25 years ago. Different applications and demonstrators have already been developed, but the high costs of the manufacturing processes still prevent the use in large series. For the mass fabrication the plastic moulding process offers an economical technique. In order to cast parts with micron dimensions special tools and process controls for varying the tool temperature - the variotherm process control - are required. State of the art is a variotherm process realised by two oil cycles with different temperature levels. The disadvantage of this method is the long cycle time of several minutes, that can lead to the thermal destruction of the melt in the plasticating unit. An alternative is the inductive heating of the mould insert.

Einleitung

Der Begriff "Mikrosystem" bezeichnet Sensoren, Signalverarbeitung und Aktoren die in miniaturisierter Bauform so zu einem Gesamtsystem verknüpft werden, daß sie "empfinden", "entscheiden" und gegebenenfalls auch "reagieren" können. Anwendungen finden sich in vielen Bereichen der Technik, wie z.B. faseroptische Schalter in der Informations- und Kommunikationstechnik, Mikropumpen oder Mikrodosiereinheiten in der Medizintechnik, verschiedenste Sensoren in der Verkehrs- und Fertigungstechnik und, Mikroreaktoren in der chemischen Verfahrenstechnik /1/. Auch im nichttechnischen Anwendungsbereich sind viele Einsatzfelder denkbar, beispielsweise bei Waschmaschinen, die nach einer Analyse des Wasserhärtegrades Enthärter und Waschpulver dosieren oder einem Haarfön, der die Hitze reguliert, wenn er der Kopfhaut zu nahe kommt /2/. Noch hindern die mit der hohen Bauteilpräzision verbundenen Fertigungskosten solcher Mikrosysteme den Einsatz in Massenprodukten. Neben anderen Fertigungsverfahren wie dem Spritzprägen und dem Reaktionsharzgießen bietet sich die Kunststoffabformung durch Spritzgießen als serientaugliches Produktionsverfahren für Komponenten der Mikrosystemtechnik an.

Anforderungen beim Spritzgießen von Mikrostrukturen

Basierend auf den Anforderungen der Abformung von Strukturen mit kleinsten Dimensionen im Mikrometerbereich in Verbindung mit teilweise hohen Aspektverhältnissen sind die Anforderungen an den Spritzgießprozeß im wesentlichen durch folgende Punkte gekennzeichnet /3/,/1/:

| | Anforderungen |
|-----------------|--|
| Maschine | <ul style="list-style-type: none"> • kleine Plastifiziereinheit zur Vermeidung längerer Verweilzeiten des Kunststoffes • lagegeregelte Schnecke, geregelter Spritzprozeß • langsame Verfahrensgeschwindigkeiten |
| Werkzeug | <ul style="list-style-type: none"> • evakuierbare Kavität • strukturierter Formeinsatz • versatz- und spielfreie Entformung • eng tolerierte Passungen |
| Prozeß | <ul style="list-style-type: none"> • variotherme Temperierung |
| Material | <ul style="list-style-type: none"> • niedrige Viskositätswerte für eine optimale Formfüllung |

Tabelle 1: Anforderungen an den Spritzgießprozeß

Für das Mikrospritzgießen ist eine reproduzierbare und damit vollgeregelter Prozeßführung notwendig. Dies gilt insbesondere für die Druckumschaltung, deren Regelung über den Werkzeuginnendruck erfolgt. Das Werkzeug ist mit entsprechenden Sensoren auszurüsten.

Erhöhte Anforderungen sind an den Entformungsvorgang zu stellen. Zum Schutz der Strukturen vor Deformation bzw. Zerstörung muß der Öffnungsvorgang spiel- und versatzfrei ablaufen, die Verfahrensgeschwindigkeit sollte so gering wie möglich sein.

In Abhängigkeit von den Genauigkeitsanforderungen und den Dimensionen der feinen Strukturen sowie den Abmessungen der strukturierten Bereiche werden für die Herstellung der Formeinsätze verschiedene Verfahren eingesetzt /1/. Neben konventionellen mechanischen Verfahren die für die Feinstbearbeitung modifiziert wurden, der sog. Ultrapräzisionstechnik /4/, steht neben weiteren Verfahren die LIGA-Technik im Vordergrund. Die LIGA-Technik besteht aus einer Verknüpfung der drei Verfahrensschritte Lithographie, Galvanoformung und Abformung. Die Form- und Maßgenauigkeit der Strukturen liegt unter $1 \mu\text{m}$, es können Aspektverhältnisse (Verhältnis von Höhe zu Breite) von bis zu 100 erreicht werden /5/.

Die Entlüftung der Kavität über die Trennebene oder über die Auswerfer ist nicht möglich, da die Mikrostrukturen im Prinzip Sacklöcher auf der Oberfläche des Formeinsatzes darstellen. Für eine vollständige Formfüllung bzw. zur Vermeidung des Dieseeffekts muß deshalb die Kavität vor dem Einspritzen evakuiert werden. Die in der Kavität eingeschlossene Luft wird dabei über eine Vakuumpumpe abgeführt.

Die konstante Werkzeugtemperierung beim herkömmlichen Spritzgießprozeß ermöglicht keine vollständige Abformung der Mikrostrukturen. Der Kontakt der heißen Kunststoffschmelze mit der kalten

Werkzeugwand führt zu der sofortigen Rand-

schichterstarrung des Schmelzestroms, wodurch die feinen Strukturen nicht oder nur unvollständig abgeformt werden. Erforderlich ist eine variotherme Werkzeugtemperierung. Durch die Erhöhung der Werkzeugwandtemperatur zum Einspritzzeitpunkt bis auf Höhe der Schmelztemperatur des Kunststoffes wird

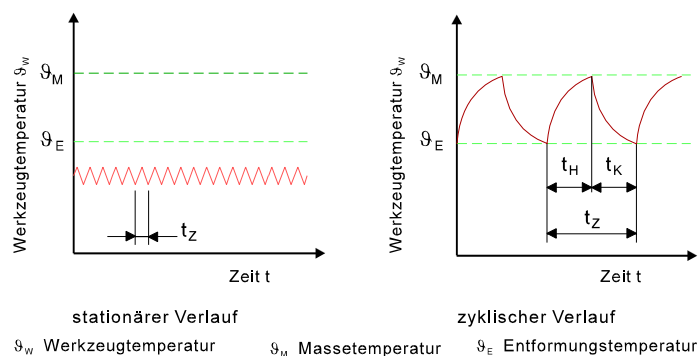


Bild 1: Variothermer Temperaturverlauf

dessen Viskositätszunahme beim Kontakt mit der Werkzeugwand verhindert und die vollständige Füllung der Kavität ermöglicht. Um eine ausreichende Entformungssteifigkeit zu erhalten, muß der Formeinsatz nach dem Einspritzen wieder unterhalb der Erstarrungstemperatur der Kunststoff abgekühlt werden.

Variotherme Prozeßführung

Beim klassischen Variothermverfahren werden die zwei geforderten Werkzeugtemperaturniveaus mittels zweier verschieden temperierter Ölkreisläufe erreicht. Das Stammwerkzeug wird über einen primären Ölkreislauf auf der Entformungstemperatur des verwendeten Kunststoff gehalten. Der Formeinsatz, der über konstruktive Maßnahmen soweit möglich thermisch isoliert ist, wird vor dem Einspritzvorgang über einen zweiten Ölkreislauf auf das geforderte Temperaturniveau der Schmelze aufgeheizt. Nach erfolgtem Einspritzen des Kunststoff wird auch der Formeinsatz mit dem primären Ölkreislauf gekoppelt und wieder auf Entformungstemperatur abgekühlt. Aufgrund der hohen Wärmekapazität des Formeinsatzes und dem nur mäßigen Wärmeübergang durch Konvektion ergeben sich lange Zykluszeiten, die im Bereich mehrerer Minuten liegen können.

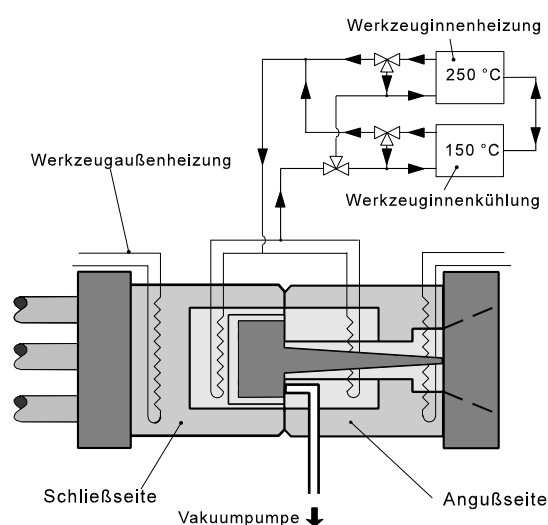


Bild 2: Variothermverfahren mit Öltemperierung

Am IKFF wird zur Zeit der Einsatz einer induktiven Werkzeugheizung untersucht. Die bei der Induktionserwärmung erzielbaren kurzen Aufheizzeiten können eine Zykluszeitverkürzung und dadurch eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit mit sich bringen.

Induktionserwärmung

Die Möglichkeit der Induktionserwärmung ist aus verschiedenen Bereichen der Technik bekannt. Als klassische Beispiele seien das Randschichthärten, Erwärmanlagen für Schmiedestücke sowie Induktionsschmelzöfen erwähnt.

Bei der induktiven Erwärmung wird die Energie transformatorisch auf das Werkstück übertragen. Eine von einem hochfrequentem Strom durchflossene Spule erzeugt ein elektromagnetisches Wechselfeld. Innerhalb des elektrisch leitenden Erwärmungsguts werden im Oberflächenbereich Wirbelströme erzeugt. Die Wirbelströme verursachen im Leiter aufgrund des spezifischen Widerstands eine Joulesche Erwärmung.

Die wesentlichen Bestandteile einer Anlage zur Induktionserwärmung sind die an die Geometrie des Bauteils angepaßte Induktionsspule (Induktor), die Zuleitungen für die Energiezuführung und der Induktionsgenerator für die Energieversorgung. Die Erwärmung des Formeinsatzes findet bei geöffnetem Werkzeug statt. Der Induktor muß sich hierzu in einem genau definierten Abstand vor dem Formeinsatz befinden. Die

eigentliche Induktionsspule besteht aus einem Kupferhohlleiter. Zur Abführung der in der Induktionsspule erzeugten Verlustwärme muß die Spule mit einem Kühlmittel, in der Regel Wasser, durchflossen werden.

Das Eindringverhalten des elektromagnetischen Feldes wird mit der Skintiefe δ_s beschrieben. Sie hängt ab von der elektrischen Leitfähigkeit κ , der Permeabilität μ und der Arbeitsfrequenz f und ergibt sich zu

$$\delta_s = \frac{1}{\sqrt{\pi f \kappa \mu}} \quad (2)$$

Da sich während des Aufheizvorgangs κ und μ ständig ändern, ist die Skintiefe nicht konstant, sie ändert sich mit zunehmender Temperatur. Bewußt beeinflussen läßt sich die Skintiefe durch die Variation der Arbeitsfrequenz des Wechselfeldes /6/.

Für den Einsatz des induktiven Erwärmungsprinzips für die variotherme Prozeßführung beim Spritzgießen spricht die sehr schnelle Erwärmung des Werkstücks und die direkte Generierung der Wärme im Metall, d.h. im Formeinsatz. Der zeitaufwendige Wärmetransport zur Kavität entfällt. Die Kühlzeit reduziert sich ebenfalls, da deutlich weniger Wärme ins Werkzeug eingebracht werden muß. Auf eine Öltemperierung für die Werkzeuggrundtemperierung kann jedoch nicht verzichtet werden.

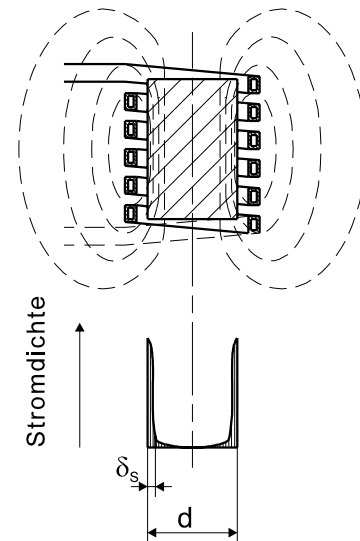


Bild 3: Spule mit Magnetfeld und Kern

Anwendung der induktiven Werkzeugtemperierung

Im Rahmen eines DFG-Projekts soll die induktive Werkzeugtemperierung zusammen mit dem Institut für Mikrotechnik Mainz GmbH (IMM) zum Abformen von Spritzgießteilen mit Mikrostrukturen angewandt werden. Dazu wurde gemäß den angesprochenen Anforderungen ein Spritzgießwerkzeug für mikrostrukturierte Formteile aufgebaut. Die Formeinsätze wurden im LIGA-Verfahren hergestellt und beinhalten Strukturen mit verschiedenen Strukturbreiten ($20\ \mu\text{m}$ bis $2,5\ \mu\text{m}$) und verschiedenen Aspektverhältnissen (5 bis 40) mit dem Ziel, die Leistungsfähigkeit des Verfahrens zu untersuchen. Die Geometrie des Induktors wurde den äußeren Abmaßen des LIGA-Formeinsatzes angepaßt. Über ein Handlinggerät, welches im Normalfall zur Entnahme von Bauteilen vorgesehen ist, wird die Induktorspule vor der Kavität positioniert. Die Ansteuerung des Induktionsgenerators erfolgt über frei-programmierbare Ausgänge der Spritzgießmaschine in Kombination mit einem Meß-PC, der Temperatur- und Druckverläufe während des gesamten Prozesses aufnimmt und dem Generator die benötigte Heizzeit bzw. die erforderliche Heizleistung vorgibt.

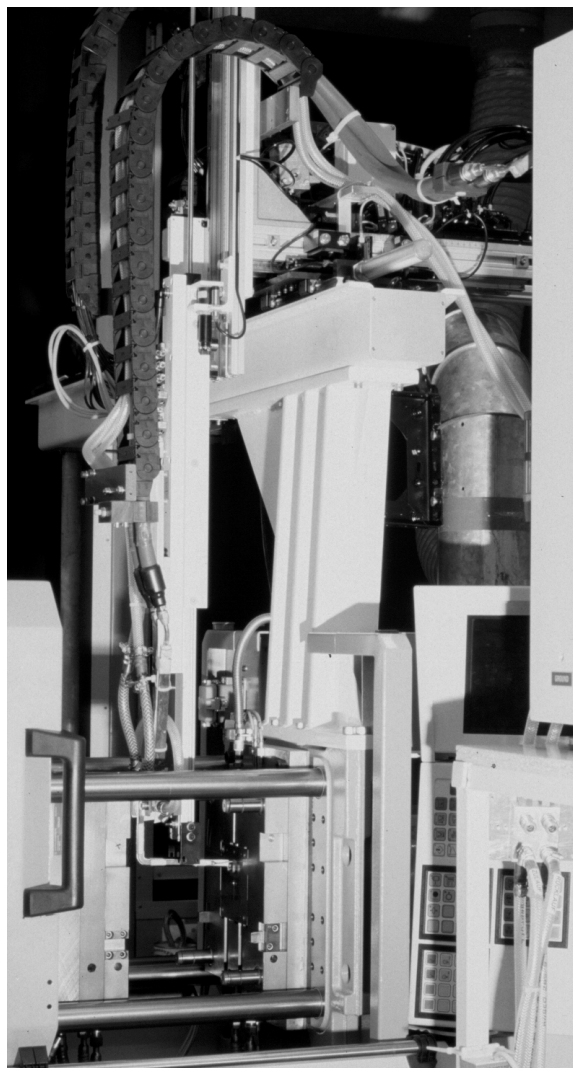


Bild 4: Gesamtanlage

In Bild 4 ist die aufgebaute Gesamtanlage dargestellt. Die Induktorspule ist in Heizstellung vor der Kavität positioniert. Über eine Kabelkette werden Energie- und Kühlwasserleitungen zum HF-Generator geführt, der am rechten Bildrand noch zu erkennen ist. Nach der Erwärmung fährt die Handlingachse in Ausgangsposition, die Form kann geschlossen und evakuiert werden und der Einspritzvorgang beginnt. Über den PC sind Maschinen- und Generatorsteuerung miteinander gekoppelt. Somit wird ein Serienbetrieb erreicht und damit reproduzierbare Prozeßbedingungen ermöglicht.

Erwärmungsergebnisse und Abformversuche

In vorausgegangenen Erwärmungsversuchen an einem Versuchsstand konnte die Leistungsfähigkeit des Verfahrens unter Beweis gestellt werden. Bild 5 zeigt den zeitlichen Werkzeugtemperaturverlauf eines Aufheiz-Abkühl-Zyklus auf die geforderte Werkzeugtemperatur von 200°C. Die Heizzeit von 5 s beim induk-

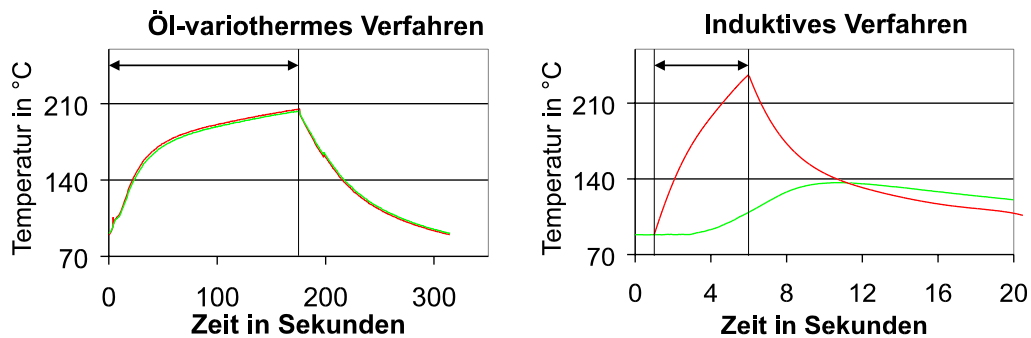


Bild 5: Temperaturverläufe in der Kavität

tiven Verfahren im Vergleich zu 180 s beim öl-variotherm Verfahren macht die Schnelligkeit der Induktionserwärmung deutlich. Da beim öltemperierten Verfahren bei geschlossenem Werkzeug erwärmt wird, kann unmittelbar nach Erreichen der gewünschten Temperatur eingespritzt werden. Beim induktiven Verfahren muß dieses Temperaturniveau bewußt überschritten werden, um die Wärmeverluste während des Werkzeugschließvorgangs kompensieren zu können. 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 der Werkzeugs und damit an der Oberfläche statt, der Wärmetransport in die tieferen Schichten über die Wärmeleitung des Materials findet erst verzögert statt.

Ersten Abformversuche wurden erfolgreich mit der leichtfließenden teilkristallinen Formmasse POM durchgeführt. Bei einer Strukturhöhe von 50 μm konnten Strukturen mit Wandstärken bis zu 10 μm abgeformt werden, was einem Aspektverhältnis von 5 entspricht. Die Zykluszeit betrug bei einem Formteil mit einer Gesamtmasse von 4 g etwa 50 s. Ziel der weiteren Versuche ist eine Verbesserung der Abformgenauigkeit sowie eine weitere Reduzierung der Zykluszeit.

Zusammenfassung und Ausblick

Die induktive Werkzeugtemperierung eignet sich als schnelles Temperierverfahren für die Massenproduktion von mikrostrukturierten Kunststoffbauteilen. Neben der kurzen Erwärmungszeit sind variable Einsatzgebiete weitere Vorteile dieses Verfahrens. Die Erwärmung mehrerer Kavitäten ist möglich wie auch die Temperierung großflächiger Strukturen (z.B. CD-Größe). Da die Kavität von außen beheizt wird sind keine aufwendigen Werkzeugmodifikationen notwendig.

Literatur

- /1/ Weber, L.; Ehrfeld, W.:
Mikroabformung - Verfahren, Werkzeuge, Anwendungen,
Kunststoffe 88 (1998) 10.
- /2/ N.N.:
Die Winzlinge kommen, Konstruktionspraxis Nr. 8, 1997.
- /3/ Tewald, A.:
Mikrospritzgießen - eine Übersicht, Festschrift 30 Jahre IKFF, Universität
Stuttgart, 1997
- /4/ Weck, M.; Fischer, S.:
Ultrapräzisionstechnik für die Werkzeugbearbeitung, IKV-Seminare zur
Kunststoffverarbeitung, Aachen, 1997.
- /5/ Ehrfeld, W.:
Mikrotechnische Produktionsmethoden auf der Basis der LIGA-Technik,
IKV-Seminare zur Kunststoffverarbeitung, Aachen, 1997.
- /6/ Tewald, A.:
Entwicklung und Untersuchung eines schnellen Verfahrens zur variothermen
Werkzeugtemperierung mittels induktiver Erwärmung, Dissertation am
IKFF der Universität Stuttgart, 1997.

Danksagung

Die Autoren danken der DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG) für die Förderung der Forschungsvorhabens "Einfließen von Polymerschmelzen in kleine Kavitäten beim Spritzgießen mit induktiver Werkzeugtemperierung" und der Firma Arburg GmbH für die Bereitstellung der Spritzgießmaschine ALL-ROUNDER 270 S.

Neue Telefon- und Telefaxnummer:

Telefon: +49 (0)711 685 – 6 6402

Telefax: +49 (0)711 685 – 6 6356

Neue E-Mail-Adressen:

ikff@ikff.uni-stuttgart.de

linearantriebe@ikff.uni-stuttgart.de

piezoantriebe@ikff.uni-stuttgart.de

spritzguss@ikff.uni-stuttgart.de

zuverlaessigkeit@ikff.uni-stuttgart.de