

UNIVERSITÄT STUTTGART

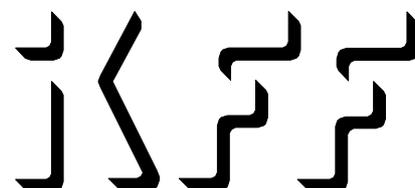
Festschrift

40 Jahre IKFF

mit

Jahresbericht 2007

**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
E-Mail: ikff@ikff.uni-stuttgart.de
Internet: <http://www.uni-stuttgart.de/ikff/>

Redaktion:

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe
Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, Februar 2008

Inhaltsverzeichnis:

1	Vorwort	1
2	Historie des Institutes	2
3	Forschung und Lehre heute	12
3.1	Forschung am IKFF	12
3.2	Lehre am IKFF.	17
3.3	Habilitationen/Dissertationen.	23
3.4	Ausgewählte Publikationen.	24
3.5	Institutsmitarbeiter 2007	31
3.6	Institutsausstattung	31
4	Wissenschaftliche Beiträge	32
4.1	Beier, M.: Zuverlässigkeitsbetrachtungen von mechatronischen Systemen	33
4.2	Burkard, E.: Entformungskräfte und Entformungskraftmessungen im Kunststoffspritzguss	41
4.3	Clauß,C.; Schinköthe, W.: Integrierte Wegmessung in Lineardirektantrieben - Eine Zusammenfassung der Arbeiten am IKFF	47
4.4	Dannemann, M.: Vorabschätzungen zur Dimensionierung von Lineardirektantrieben unter Berücksichtigung dynamischer Einflüsse	57
4.5	Joerges, P.: Dynamische Untersuchungen an Linearantrieben, speziell Rastkraftuntersuchungen	63
4.6	Mochel, F.: Aerostatische Führungen in Direktantrieben	67
4.7	Rothenhöfer, E.: Dimensionierung und Analyse eines linearen Ultraschallmotors mit zwei Reibkontakten	75
4.8	Zülch, M.: Simulativ gestützte Auslegung von induktiven Werkzeugheizsystemen im Kunststoffspritzguss	79
4.9	Jung, A.: Zur Ausbildung im Konstruieren	87

1 Vorwort

40 Jahre „Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik“ sind Anlass für eine kurze Rückschau, für eine Standortbestimmung, für die Vorstellung aktueller Forschungsprojekte und für einen Ausblick auf zukünftige Aufgaben.

40 Jahre Forschung und Lehre auf den Gebieten von Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik sind geprägt von dem Bemühen nun mittlerweile dreier Lehrstuhlinhaber und Institutsdirektoren sowie ihrer Mitarbeiter, die Feinwerktechnik und die Studien- sowie Forschungsmöglichkeiten in diesem Bereich zusammen mit anderen benachbarten Instituten auf- und auszubauen. Aus einer anfangs eher noch auf Uhren, Waagen und Optik eingeeengten Feinwerktechnik entwickelte sich ein breiter Schwerpunkt, der heute sogar Schlüsseltechnologien hervorbringt, z. B. die Mikrosystemtechnik oder die Mechatronik.

Wir wollen unser Institut dabei nicht losgelöst betrachten von unserem Umfeld, von den benachbarten Instituten. Stand zur Zeit der Gründung des IKFF das Bemühen im Vordergrund, zusammen mit dem seit 1944 bestehenden Uhreninstitut (heute Institut für Zeitmesstechnik, Fein- und Mikrotechnik) und dem 1960 gegründeten Institut für Technische Optik einen feinwerktechnischen Schwerpunkt zu bilden, können wir heute in den Fakultäten des Stuttgarter Maschinenbaus gleich sechs Institute und Aninstitute benennen, die feinwerk- und mikrotechnischen Problemen gewidmet sind, z. B. der Mikrosystemtechnik, der Mikroelektronik, der Biomedizinischen Technik und der Technischen Optik. Diese Schwerpunktbildung wurde in der Etablie-

rung eines Clusters Mikrotechnik, Geräte-technik und Technische Optik fortgeführt. Derzeit bauen diese Institute ausgehend von einer eigenen Studienrichtung im Studiengang Maschinenwesen einen Masterstudiengang auf.

Wo hat sich das IKFF in diesen Schwerpunkt eingebracht? Zunächst ist hier sicherlich die Lehre zu nennen, im Vordiplom die jährlich startende Konstruktionslehre Feinwerktechnik und früher zusätzlich die Konstruktionslehre für Elektrotechniker sowie im Hauptdiplom die Vorlesungen zur Geräteentwicklung und Aktorik.

In der Forschung bringt der Institutsname, der sehr weitsichtig vom Gründer Herrn Prof. Stabe gewählt wurde, Ziele und Richtungen zum Ausdruck. Die Verbindung von konstruktionsmethodischen Aspekten, angewandt auf ganz spezifische Produkte der Feinwerktechnik gepaart mit fertigungstechnischen Aspekten der Umsetzung gab stets genügend Stoff.

So wurden schwerpunktmäßig

- methodische Aspekte beim Entwickeln feinwerktechnischer Produkte behandelt,
- die Umsetzung in Messtechnik und in Aktorik als Schwerpunkt betrieben,
- der Fertigungsschwerpunkt Spritzgießen in der Feinwerktechnik geschaffen.

Dies ist nur eine grobe Klassifizierung von 40 Jahren Lehre und Forschung am IKFF, betrachten wir deshalb die Institutsentwicklung im Einzelnen.

2 Historie des Institutes

Am **1. April 1967** wurde mit der Berufung von Herrn Dr.- Ing. Heinrich Stabe als Professor auf den „Konstruktionslehrstuhl C“ an der Universität Stuttgart der Grundstein für das heutige Institut gelegt.

Vorausgegangen waren viele Überlegungen und Planungen, die etwa im Mai 1962 mit der Zielsetzung begannen, in Stuttgart einen feinwerktechnischen Schwerpunkt zu bilden, bestehend aus dem seit 1944 existierenden **Uhreninstitut**, heute **Institut für Zeitmesstechnik, Fein- und Mikrotechnik**, dem **Institut für Technische Optik** (seit 1960) und dem neu zu gründenden **Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik - IKFF**.

Dadurch entstand eine gute Basis für Studium und Forschung im Bereich der Feinwerktechnik, der Mikrotechnik und der Technischen Optik in Stuttgart.

Das erste Jahrzehnt - die Aufbauphase 1967 - 1976

Die Aufbauphase des IKFF begann im Kollegiengebäude II (K II) in der Keplerstraße 17 im 8. Obergeschoss auf einer Fläche von ca. 500 m². Am Ende dieser Phase etwa im Jahre 1971 standen am Institut folgende Planstellen zur Verfügung: eine Oberassistenten-Stelle, vier Assistenten-Stellen, ein Mechaniker, ein Techniker, eine Verwaltungsangestellten-Stelle für das Sekretariat und eine Fachhochschulingenieur-Stelle. Dies war eine bessere Ausstattung (an Haushaltsstellen) als sie sich heute bietet, sieht man von den selbst eingeworbenen Drittmittelstellen ab.

Die Lehrbelastungen der Institutsmitarbeiter waren unmittelbar nach Institutsgründung naturgemäß noch relativ gering, nach abgeschlossener Aufbauphase erreichten sie hauptsächlich im Vordiplom jedoch schnell enorme Ausmaße und wurden überproportional groß.

Die Jahresberichte aus den ersten 10 Jahren des Institutes lassen erkennen, dass infolge der wachsenden Lehrverpflichtungen in diesem Zeitraum nur äußerst bescheidene Möglichkeiten zur Forschung bestanden.

Erst die ab 1973 beginnende Mitwirkung im **Sonderforschungsbereich „Flexible Fertigungssysteme“** ermöglichte dann die Realisierung größerer ingenieurmäßiger Forschungsprojekte auf den Arbeitsgebieten des Institutes. Es konnten Drittmittel-Mitarbeiter eingestellt werden, die im Wesentlichen auf den Gebieten der Messwerterfassung, der Messwertübertragung und der Objekterkennung arbeiteten. In der Endstufe dieser Arbeiten gelang es, einen Kleinroboter mit einem Objekterkennungssystem auszustatten, so dass Objekte auf einem Transportband automatisch erkannt, zugeordnet, erfasst und definiert wieder abgelegt werden konnten.

Eine Habilitation /1/ und eine Dissertation /2/ fallen in diese Phase, die Belastungen beim Aufbau des Institutes und in der Lehre waren doch recht hoch. Das Themengebiet der Habilitation zielte dabei auf den Entscheidungsprozess beim methodischen Konstruieren, ein Startpunkt für die methodischen Arbeiten am Institut.

Emeritierung von Herrn Prof. Stabe und Berufung von Herrn Prof. Jung - die zweite Phase der Institutsgeschichte 1977 - 1995

Herr Prof. Stabe war bereits ein halbes Jahr emeritiert (ab 30.09.76) als Herr Dipl.-Ing. Jung als Professor berufen wurde und am 01.03.77 das Institut übernahm. Die Arbeitsziele, die Herr Jung sich damals stellte, beinhalteten folgende Aspekte:

- Problemstellungen zur Konstruktions-
theorie mechanischer / elektromecha-
nischer Funktionsgruppen und Geräte,
- die optische Bearbeitung,
- die Sensorik, insbesondere die Objekt-
und Lageerkennung von Werkstücken,
- die Prüfung feinmechanischer Bauele-
mente, z. B. des Schwingverhaltens,
- die korrosionsschutzgerechte Konstruk-
tion in Feinwerk- und Elektrotechnik,
- sowie die Spritzgießtechnologie für
feinmechanische Bauelemente.

Weitergeführt wurde der Sonderfor-
schungsbereich (SFB 155) „flexible Ferti-
gungssysteme“, insbesondere das Teilpro-
jekt „Entwicklung spezieller Sensoren zur
Identifizierung und Lageerkennung von
Werkstücken und Werkzeugen“.

Im Juni/Juli 1977 folgte der Umzug von der
Keplerstraße (K II), in der die Mitarbeiter
bisher recht verstreut saßen, in den Neu-
bau im Pfaffenwaldring 9 nach Vaihingen.
Damit waren von der räumlichen Seite her
sehr gute Voraussetzungen erreicht. Erst-
mals in seiner Geschichte war das Institut
geschlossen auf einer Etage untergebracht
und damit eigenständig.

In den Jahren 1979/80 kamen recht schnell
interessante Industrieaufträge ins Haus, so
die Neukonstruktion eines Goniometerti-
sches für die Rasterelektronenmikroskopie
und die Konstruktion eines Oberflächenta-
sters. Ein BMFT-Projekt zum Korrosions-
schutz in der Elektrotechnik (Laufzeit 2
Jahre) wurde gestartet.

Die Institutsausstattung wurde erheblich
verbessert, durch Anschaffung einer Spritz-
gießmaschine, eines Rasterelektronenmi-
kroskopes, eines Tastschnittgerätes und
des ersten Rechners PDP 11. Die Haupt-
speicherkapazität dieses Rechners lag
übrigens bei 64 KByte, die Wechselpatten-
kapazität bei 10 MByte, unvorstellbar klein
gegenüber heutigen Rechnern.

In das Jahr 1979 fiel auch die Auslobung
eines Preises für ein Instituts-Logo. Ein
Vorschlag von Prof. Seeger wurde ausge-
wählt. Das Institut bekam ein heute noch
sehr prägnantes Symbol. Das Technische
Design wurde zur damaligen Zeit noch von
drei Instituten, dem Institut für Maschinen-
konstruktion und Getriebebau, dem Institut
für Maschinenelemente und dem IKFF
getragen und war in der Keplerstraße
räumlich noch im IKFF integriert.

Großen Anklang fanden 1980 auch die Ar-
beiten am Rasterelektronenmikroskop.
Weiterentwicklungen sowie zusätzliche
eigene apparative Ausstattungen ermög-
lichten erstmalig in Europa REM-Aufnah-
men von unpräparierten, nichtmetallischen
Oberflächen, so war im Institutsbericht
1980 zu lesen. Dadurch konnten beispie-
lsweise Kunststoffe in realer Oberflächen-
gestalt ohne Besputtern betrachtet werden.

Ab 1981 stieg die Lehrbelastung des In-
stitutes stark an. Gleichzeitig kam es infol-

ge des Auslaufens des Sonderforschungsbereichs SFB 155 zu erheblichen Stellenreduzierungen (30 % Personalreduzierung allein 1981), so dass es äußerster Anstrengungen bedurfte, die Lehre zu sichern und wieder neue Drittmittelprojekte einzuwerben. Ein DFG-Projekt „Objekterkennung“ konnte Ende 1981 eingeworben werden, brachte personell jedoch nur wenig Entlastung für das Institut.

Es folgte eine gewisse Umorientierung des Institutes hin zu Industriaufträgen. Neben den Forschungsschwerpunkten Rasterelektronenmikroskopie, Oberflächenabtastung und Spritzgießen kamen Projekte aus der Medizintechnik hinzu. Aufgenommen wurden Arbeiten zur mechanischen und optischen Sensorik als weiterer Schwerpunkt des Institutes, beispielsweise die Entwicklung eines berührungslosen schaltenden 1D-Tasters für Messmaschinen.

Unaufhaltsam wuchsen jedoch auch die Lehrbelastungen immer weiter an. Dies betraf Studierende des Maschinenwesens

und benachbarter Studiengänge mit Vorlesungen im Vor- und Hauptdiplom (Abb.1) und auch Studierende der Elektrotechnik in der Konstruktionstechnik-Vorlesung des IKFF (Abb. 2).

Hauptlast stellte die Konstruktionstechnik-Vorlesung für Elektrotechniker dar, die parallel zur Konstruktionslehre Feinwerktechnik im Vordiplom gehalten werden musste. Die Vorlesung Konstruktionslehre Feinwerktechnik wiederum stand parallel als KL I und III im Wintersemester und als KL II und IV im Sommersemester an. 1987 konnte die Vorlesung Konstruktionstechnik für Elektrotechniker schließlich abgegeben werden, was zu einer ersten deutlichen Entspannung für das IKFF führte.

Die Doppelbelastung mit KL I und III im Wintersemester und KL II und IV im Sommersemester blieb jedoch zunächst erhalten. Vergleichbare Institute mit Konstruktionslehre im Vordiplom haben diese Lehrveranstaltungen jeweils nacheinander im Zweijahreszyklus und nicht parallel.

Studierendenzahlen am IKFF bis 1995:

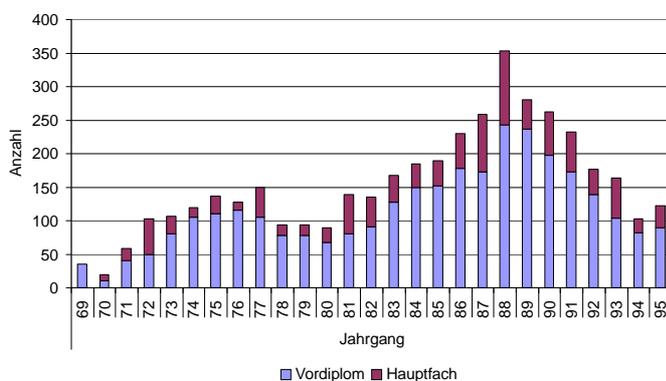


Abb. 1: Studierende des SG Maschinenwesen am IKFF

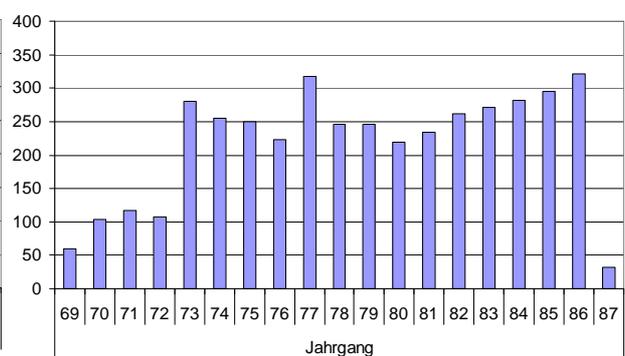


Abb. 2: Studierende des SG Elektrotechnik am IKFF (Konstruktionstechnik-Vorlesung)

Zwangsläufig war der Zeitfonds für Forschung in diesen Jahren noch stark eingengt. Nach Abgabe der Konstruktionstechnik für Elektrotechniker musste man die Hoffnung auf nun zumutbare Lehrbelastung allerdings trotzdem schnell wieder begraben, da im WS 1987/88 statt der sonst üblichen ca. 80 Studenten in der Konstruktionslehre Feinwerktechnik nun 150 Studenten im Hörsaal saßen. Ein Versuch, diese ständige Überlast im Rahmen einer C4-Fiebiger-Stelle zu mindern, scheiterte 1989 zunächst durch Absage des Kandidaten.

In das Jahr 1987 fiel auch das 20. Jubiläum des Institutes, das festlich begangen wurde. Die Institutsausstattung wurde durch eine CNC-Fräsmaschine ergänzt. Damit war nun für die Herstellung von Spritzgussformen am IKFF eine durchgehende Kette vom CAD-Entwurf über eine CNC-Herstellung, das Ausmessen und Überprüfen auf der Koordinatenmessmaschine und das Abspritzen realisierbar. Viele Studenten wurden im Hauptdiplom damit vertraut gemacht.

Der Schwerpunkt Spritzgießen entwickelte sich sehr stark, auch Optikteile konnten gespritzt werden. Die systematische Untersuchung des Formfüllvorganges begann, insbesondere der Temperaturverlauf im Formnest wurde untersucht. Eine Vielzahl von Werkzeugen wurde erstellt.

Andere, neu hinzu kommende Forschungsschwerpunkte waren im Jahre 1985 die Arbeiten im Rahmen des EG-finanzierten Projektes Prometheus sowie Arbeiten zu Ultraschall-Aktoren. Für „Prometheus“ stand zunächst die Erfassung der Fahrbahnfeuchte über die Messung des Wasserfilmes auf dem Fahrzeugreifen, später

jedoch die berührungslose Wasserschichtdickenmessung und als Option die Eisdetektion im Vordergrund. Ein interessanter Sensor entstand, der auf großes Interesse bei Fahrzeugherstellern als auch bei Winterdienstfahrzeugen stieß.

Im Schwerpunkt Sensorik wurde ein Triangulationssensor entwickelt und grundlegende Versuche zur taktilen Erfassung von Größen vorgenommen, die den manuellen Greifvorgang charakterisieren. Ziel war letztlich ein Erkenntnisgewinn für die Auslegung technischer Miniaturgreifer.

Ab 1991/92 wurden mit der Bereitstellung von Workstations und geeigneter Software Voraussetzungen geschaffen, Formfüllvorgänge sowie Temperatur- und Druckverläufe beim Spritzgießen auch über Simulationen zu untersuchen. Der Spritzgussbereich entwickelte sich nun zu einem breiten Arbeitsgebiet, von der Simulation über praktische Untersuchungen bis zur Beeinflussung des Formfüllvorganges. Ergebnisse wurden in zwei Arbeitskreisen zusammen mit dem Institut von Prof. Aßmus in die Praxis getragen.

Das 25-jährige Institutsjubiläum 1992 bildete einen würdigen Rahmen, um all die bisher erreichten Forschungsergebnisse vorzustellen. Durch Spendenmittel gelang es, ein neues Rasterelektronenmikroskop (REM) zu beschaffen.

Parallel bildete natürlich immer das Bemühen des Institutsleiters und der Mitarbeiter um die Verbesserung der Ausbildung einen permanenten Arbeitsschwerpunkt. Neben Skripten wurden auf der methodischen Seite beispielsweise Lehrmaterialien in Form der beiden Bücher „Funktionale Gestaltbildung“ und „Technologische Gestaltbildung“

(Springer Verlag) aber auch in weiteren Lehrbüchern zum Entwurf von Vorrichtungen „Vorrichtungen I“ und „Genauere Maschinen, Geräte und Instrumente“ erarbeitet.

Beginnend im Jahre 1993 wurde am Institut auch eine neue Initiative ergriffen, um die Vordiplom-Lehrveranstaltungen für die Studenten noch attraktiver zu gestalten. Durch einen zunächst außerhalb der Lehrveranstaltungen angeordneten Konstruktionswettbewerb zum Tag der offenen Tür konnten Studenten die Probleme der praktischen Umsetzung einer konstruktiven Lösung am eigenen Leibe erfahren.

Schließlich sei auch die Gründung von Firmen durch Institutsmitarbeiter und damit der direkte Wissenstransfer erwähnt (Firma Wolf & Beck GmbH und Firma melab GmbH).

Emeritierung von Herrn Prof. Jung und Berufung von Herrn Prof. Schinköthe - das Institut heute

Im Jahre 1993 gelang schließlich die schon Jahre zuvor angestrebte Verstärkung des Institutes durch eine C4-Fiebiger-Stelle (vorgezogene Nachfolge) mit der Berufung von Herrn Dr.- Ing. Wolfgang Schinköthe als Professor und seinem Dienstantritt am 1.05.1993. Zwar war der Zeitraum der Parallelbesetzung bis zur Emeritierung von Herrn Prof. Jung im März 1995 nur recht kurz in Relation zu den eigentlichen Zielen des Fiebiger-Programms, ermöglichte aber einen kontinuierlichen Übergang in der Institutsleitung und in den Lehr- und Forschungsarbeiten des Institutes ohne den sonst üblichen Einbruch. Am 1. April 1994 hat Prof. Schinköthe die Institutsleitung geschäftsführend übernommen.

Am 29. März 1995 verabschiedete das Institut Herrn Prof. Jung nach 18 Jahren Tätigkeit als Universitätsprofessor, Lehrstuhlleiter und Institutsdirektor in seinen wohlverdienten Ruhestand. Anlässlich der Emeritierung von Herrn Prof. Jung fand am Institut ein festliches Kolloquium „Feinwerktechnik“ statt, zu dem Kollegen von feinwerktechnischen Lehrstühlen der Bundesrepublik, ehemalige Doktoranden, Industrievertreter und die Professoren unserer Fakultät eingeladen waren. In einem Festvortrag von Prof. Schinköthe wurde das Wirken von Herrn Prof. Jung am Institut, sein wissenschaftlicher Werdegang sowie die Institutsentwicklung unter seiner Leitung dargestellt und gewürdigt. In fünf wissenschaftlichen Beiträgen stellten wissenschaftliche Mitarbeiter des Institutes Forschungsergebnisse vor.

In der Lehre wurden die Vorlesungen und Übungen des Vordiploms überarbeitet und aktualisiert. Insbesondere wurden Freiräume im vierten Semester geschaffen, um einerseits zusätzlich zu den bisher behandelten mechanischen Komponenten auch elektromechanische Baugruppen der Antriebstechnik und Aktorik bereits im Vordiplom ansprechen zu können. Andererseits fand auch ein relativ großer Block beispielorientierte Konstruktionsmethodik in das vierte Semester Eingang.

So wurden schließlich auch die Konstruktionswettbewerbe in die Übungen zur Konstruktionslehre vollständig integriert. An einer unkonventionellen Aufgabenstellung erfolgt das Üben eines kompletten Entwicklungsablaufes vom Lastenheft über die Konzept- und Entwurfsphase bis zur Ausarbeitung. Eine bewusst gewählte unkonventionelle Aufgabenstellung erlaubt

dabei einerseits das Trainieren einer völligen Neuentwicklung, ohne von ähnlichen Erzeugnissen in der Ideenfindung eingengt zu werden. Andererseits besteht dabei auch die Möglichkeit, publikumswirksame Wettbewerbe um die besten Lösungen zu kreieren.

Die Studenten bauen nach dem Entwicklungsprozess und dem Abschluss der eigentlichen Methodikübung auf freiwilliger Basis einen Prototyp ihres Entwurfes und treten mit diesem im Wettbewerb am Tag der offenen Tür gegen ihre Kommilitonen an. Gruppen von bis zu fünf Studierenden organisieren sich selbst und bauen ihre Prototypen, zum Teil auch in der Diplomanwerkstatt des Institutes. Sie kämpfen um die beste Lösung, um den Sieg im Wettkampf aber auch um attraktive Preise, die von der Industrie dafür eingeworben werden. Oft wird die Umsetzung ihrer Lösungen im Rahmen des Konstruktionswettbewerbes auch zum heilsamen Kriterium der Wahrheit.

Die Monate vor dem Wettbewerb sind dabei eine Herausforderung für das Institut hinsichtlich des doch beachtlichen Organisationsaufwandes, die letzte Woche vor dem Wettkampf herrscht Ausnahmezustand.

Im Hauptdiplom erfolgte eine Neuprofilierung der Lehrveranstaltungen mit zwei Schwerpunkten, der Gerätekonstruktion als methodisch orientierten Linie einerseits und der feinwerktechnischen Aktorik als konkret forschungs- und entwicklungsorientierten Linie andererseits.

Die Vorlesung „Grundlagen der Feinwerktechnik - Gerätekonstruktion und -fertigung“ behandelt Grundlagen der Entwick-

lung und Konstruktion feinwerktechnischer Systeme bzw. Geräte und betont dabei insbesondere den engen Zusammenhang zwischen konstruktiver Gestaltung und zugehöriger Fertigungstechnologie.

Die Vorlesung „Aktorik in der Feinwerktechnik - Berechnung, Konstruktion und Anwendung mechatronischer Komponenten“ beleuchtet feinwerktechnische Antriebssysteme und Aktorik unterschiedlichster Wirkprinzipien.

Vorlesungen, Übungen und Praktika wurden neu aufgebaut und entsprechende Lehrmaterialien erstellt. Es wurden ergänzende Übungen sowie umfangreiche Skripte erarbeitet. Dies führte zu einer wesentlichen Aufwertung der Lehrveranstaltungen.

Die Lehrinhalte zur Aktorik konnten in Buchbeiträgen für das „Handbuch Elektrische Kleinantriebe“ in deutscher und in englischer Sprache sowie für das Lehrbuch „Gerätekonstruktion in Feinwerktechnik und Elektronik“ einer größeren Verbreitung zugeführt werden.

Die Hauptfachpraktika Ultraschallantriebe, Lineardirektantriebe, Schrittmotoren, Koordinatenmesstechnik, Spritzgießen und FEM-Berechnungen mit ANSYS und MAXWELL sind in die Lehrveranstaltungen einbezogen. Völlig neu ist dabei ein FEM-Kurs, der aus insgesamt 10 Doppelstunden besteht. Er soll Hauptfachstudenten einen schnelleren Zugriff zu rechnergestützten Methoden beim Entwerfen und Gestalten feinwerktechnischer Systeme ermöglichen. Der FEM-Kurs wurde zwischenzeitlich zu einer eigenen Lehrveranstaltung ausgebaut.

Im Vordiplom fanden die Vorlesungen und Übungen zur Konstruktionslehre Feinwerk-

technik bis zum Sommersemester 1998 jeweils parallel im Wintersemester (KL I und III für die ersten und dritten Semester) und im Sommersemester (KL II und IV für die zweiten und vierten Semester) statt. Nach Umstrukturierungen in der Konstruktionslehre-Ausbildung und bedingt durch Deputatsminderungen als Dekan sowie infolge von Differenzierungen in den Studiengängen des Maschinenbaus wurde ab Wintersemester 1998 jedoch kein neuer Konstruktionslehrezyklus im ersten Semester mehr begonnen.

Die Vordiploms-Lehrveranstaltungen des IKFF konzentrierten sich nun auf die Fächer Konstruktionslehre Feinwerktechnik III und IV für die dritten und vierten Semester als Wahlmöglichkeit zunächst nur für den Studiengang Maschinenwesen und ab dem Jahr 2002 auch zusätzlich als Wahlmöglichkeit für den Studiengang Technologiemanagement. Für die Studierenden des Technologiemanagements wurde dabei ein modifiziertes Programm für KL IV angeboten. Ab 2005 hat das Technologiemanagement eine eigene Veranstaltung, das IKFF betreut deshalb seit 2006 nun auch Fahrzeug- und Motorentechniker im Vordiplom.

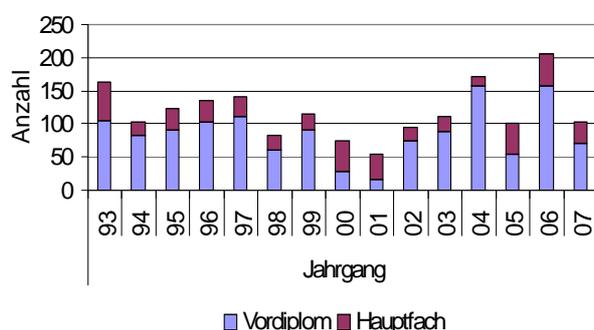


Abb. 3: Studierende am IKFF ab 1993

Die dadurch stark schwankenden Studierendenzahlen zeigt Abb. 3, wobei ab 1998 keine Doppelbelastung durch zwei parallele

Jahrgänge mehr enthalten ist. Das IKFF erreichte damit endlich eine der Ausstattung angepasste Belastung in der Lehre, zumal im Rahmen des Solidarpaktes von 1996 bis 2006 eine Personalreduzierung bei den Haushaltsstellen um 17 % erfolgte.

Im Jahrgang 2002 lagen die Anfängerzahlen aller maschinenbaulichen Studiengänge der Fakultät Maschinenbau der Universität Stuttgart (ohne Luft- und Raumfahrttechnik) auf einem Spitzenwert von ca. 1.100 Studierenden, dies war das Doppelte gegenüber den Spitzenzeiten Ende der 80er und zu Beginn der 90er Jahre. Derzeit stabilisieren sich die Anfängerzahlen im Maschinenbau im weiteren Sinne auf ca. 800 Studierende und sind damit auf nicht mehr ganz so hohem Niveau wie noch vor vier Jahren. Im Studiengang Maschinenwesen selbst bewegen sich die Anfängerzahlen um 240...300 Studierende.

An den Zahlen des IKFF sind diese erheblichen Änderungen in Abb. 4 ablesbar, wobei hier die Entwicklung durch o. g. Wegfall der parallelen Betreuung zweier Jahrgänge überlagert ist. Insgesamt waren 2006 im Wintersemester in KL III 158 Studierende eingeschrieben, 2007 sind es 70. Gegenwärtig sind dabei etwa je 50 % der Vordiplom-Studierenden aus den Studiengängen Maschinenwesen und Fahrzeug- und Motorentchnik.

Im Hauptdiplom kommt die starke Zunahme der Studierendenzahlen der letzten Jahre erst langsam zum Tragen. Im Wintersemester 2006/2007 belegten 14 Studierende das Kernfach „Aktorik“ und 34 das Fach „Grundlagen der Feinwerktechnik - Gerätekonstruktion und -fertigung“ als Pflicht- oder Kernfach, im Wintersemester 2007/2008 waren es 13 bzw. 19.

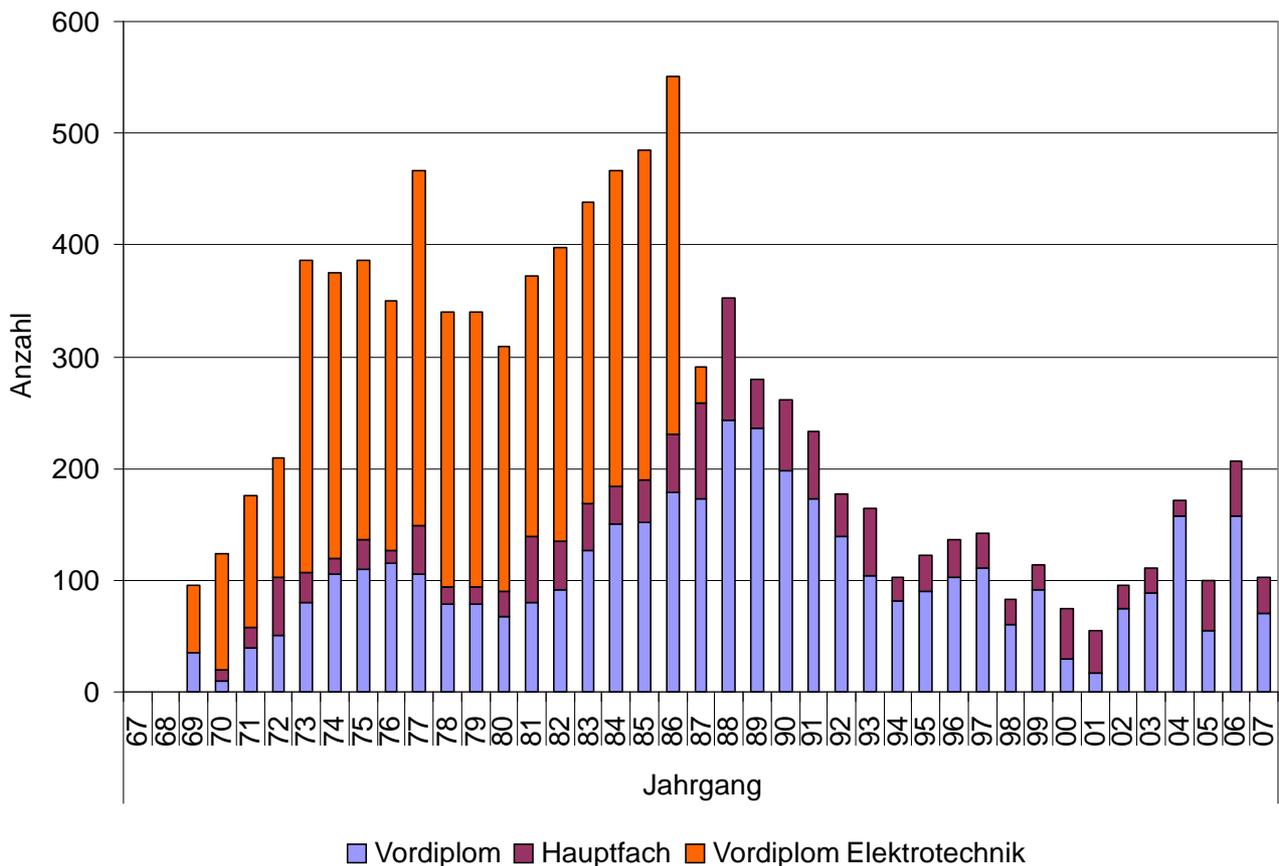


Abb. 4: Studierendenzahlen am IKFF insgesamt seit der Institutsgründung

Im Rahmen der Aktion „self-study online“ erarbeitete unser Institut zusätzlich einen Selbstlern-Modul für den FEM-Kurs ANSYS/ MAXWELL. Ziel war eine schnellere Einarbeitung der Studierenden in ANSYS, die Bereitstellung einer Möglichkeit zur effizienten Vorbereitung auf das Praktikum oder die Lehrveranstaltung selbst und auch eine Unterstützung für Studierende, die unsere Kurse nicht belegt haben, in Studien- und Diplomarbeiten aber FEM-Rechnungen mit ANSYS vornehmen.

Die Internetseiten werden durch interne Zugriffe von Studierenden, aber auch durch sehr viele externe Zugriffe stark frequentiert. In den nächsten Jahren sollen weitere Vorlesungen und Übungen in dieser Art aufbereitet werden. Insgesamt verfügt das Institut heute über einen umfang-

reichen Online-Auftritt in Lehre und Forschung.

Letztlich verläuft auch die Vermittlung unserer Absolventen sehr gut. Allerdings sind eine Vielzahl der Einstellungen im Anschluss an eine Diplomarbeit im jeweiligen Betrieb erfolgt. Das bereitet insofern Sorge, da bereits sehr viele Diplomarbeiten in die Industrie vergeben werden und damit Forschungskapazität für das Institut in erheblichem Maße verloren geht.

Das IKFF beging auch einige Jubiläen in dieser Zeit. Anlässlich des Jubiläums „30 Jahre IKFF“ fand am 10. April 1997 ein festliches Symposium statt, wozu Kollegen feinwerktechnischer Lehrstühle der Bundesrepublik, ehemalige Doktoranden, Industrievertreter und die Professoren unserer Fakultät eingeladen waren.

In ihren Begrüßungen ordneten der Dekan Prof. Siegert und der Institutsleiter Prof. Schinköthe die 30 Jahre Forschung und Lehre auf den Gebieten von Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik in das Gesamtumfeld feinwerktechnischer Institute ein. Aus einer anfangs doch noch sehr auf Feinmechanik eingeeengten Disziplin entwickelte sich ein breiter Schwerpunkt.

Herr Dr. Lindenmüller umriss die Instituts-geschichte und das Bemühen nun mittlerweile dreier Lehrstuhlinhaber und Institutsdirektoren und ihrer Mitarbeiter, die Feinwerktechnik und die Studien- sowie Forschungsmöglichkeiten in diesem Bereich mit anderen benachbarten Instituten zusammen auf- und auszubauen.

Quasi als eine kleine Zusammenfassung aus 18 Jahren Lehre an diesem Institut hielt Prof. Jung einen Festvortrag zur gestaltbildenden Konstruktion in der Feinwerktechnik aus der Sicht der langjährigen Auseinandersetzung mit dem methodischen Herangehen in der Entwicklung und Konstruktion.

Anschließend stellte Prof. Schinköthe die gegenwärtigen Arbeitsschwerpunkte des Institutes vor. In drei Beiträgen von Institutsmitarbeitern, den Herren Tewald, Hermann und Hartrampf, wurden einige Forschungsarbeiten punktuell vertieft und damit eine Momentaufnahme laufender Arbeiten am Institut vermittelt. Weitere Beiträge zu aktuellen Forschungsarbeiten des Institutes wurden in einer Festschrift zusammengestellt.

Zum 70. Geburtstag von Prof. Jung veranstaltete das Institut ein Kolloquium mit gemütlichem Beisammensein und Treffen

mit Ehemaligen. Zum Kolloquium stellten die wissenschaftlichen Mitarbeiter den Stand ihrer Forschungsarbeiten vor.

Zum Institutsjubiläum „35 Jahre IKFF“ fand am 16. Mai 2002 ebenfalls ein festliches Kolloquium am Institut statt. Ziel dieser Veranstaltung war es, die Mitarbeiter des Instituts gegenseitig über laufende aktuelle Arbeiten zu informieren und so einen Erfahrungs- und Informationsaustausch sowie eine interne Bestandsaufnahme über die unterschiedlichen fachlichen Ebenen des Instituts hinweg zu ermöglichen. Da eine Reihe der Themen am Institut aus industriefinanzierter Forschung stammen, wählten wir diesen internen Rahmen, um ohne Einschränkungen detailliert in die Fachthemen eindringen zu können.

Professor Schinköthe stellte die Arbeiten des Instituts zu Temperierkonzepten beim Mikrospritzgießen vor. Herr Welk berichtete über neue Konzepte linearer Asynchronmotoren. Herr Gundelsweiler gab eine Übersicht zu seinen bisherigen Entwicklungen von elektrodynamischen Lineardirektantrieben. Herr Haug vermittelte Erkenntnisse zur Simulation, dem Aufbau und der Erprobung einer Scannerführung und Herr Grotz zu Miniaturantrieben und deren Anwendungen in Miniaturfestplattenlaufwerken. Zum Abschluss stellte Herr Pröger-Mühleck schließlich die Ergebnisse des DFG-Projektes „Automatisierte Impulsjustage“ vor.

Anlässlich des 35. Jubiläums wurde auch ein Institutsprospekt (farbiger mehrseitiger Prospekt mit inhaltlicher Darstellung zu den Institutsaktivitäten) erarbeitet.

Ende 2006 begann die Vorbereitung zum 40. Jahrestag der Gründung des IKFF. Neben der hier vorliegenden Festschrift wurden aus diesem Anlass eine Exkursion gestaltet und das interne Doktorandenkolloquium wiederbelebt. 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, 2007 und Anfang 2008 fanden Doktorandenkolloquien zu allen in der Festschrift enthaltenen Fachbeiträgen statt.

In der Forschung konzentrieren sich die Arbeiten am Institut heute auf vier Gebiete:

- Aktorik (piezoelektrische und elektrodynamische Antriebe, vorwiegend Lineardirektantriebe),
- Präzisionsspritzgießtechnologie,
- optische und mechanische Sensorik,
- und Konstruktionsmethodik,
- hinzu kam ab 2002 neu das Arbeitsgebiet Zuverlässigkeit feinwerktechnischer Antriebe, das auch unter letztgenannten Konstruktionsaspekten einzuordnen ist.

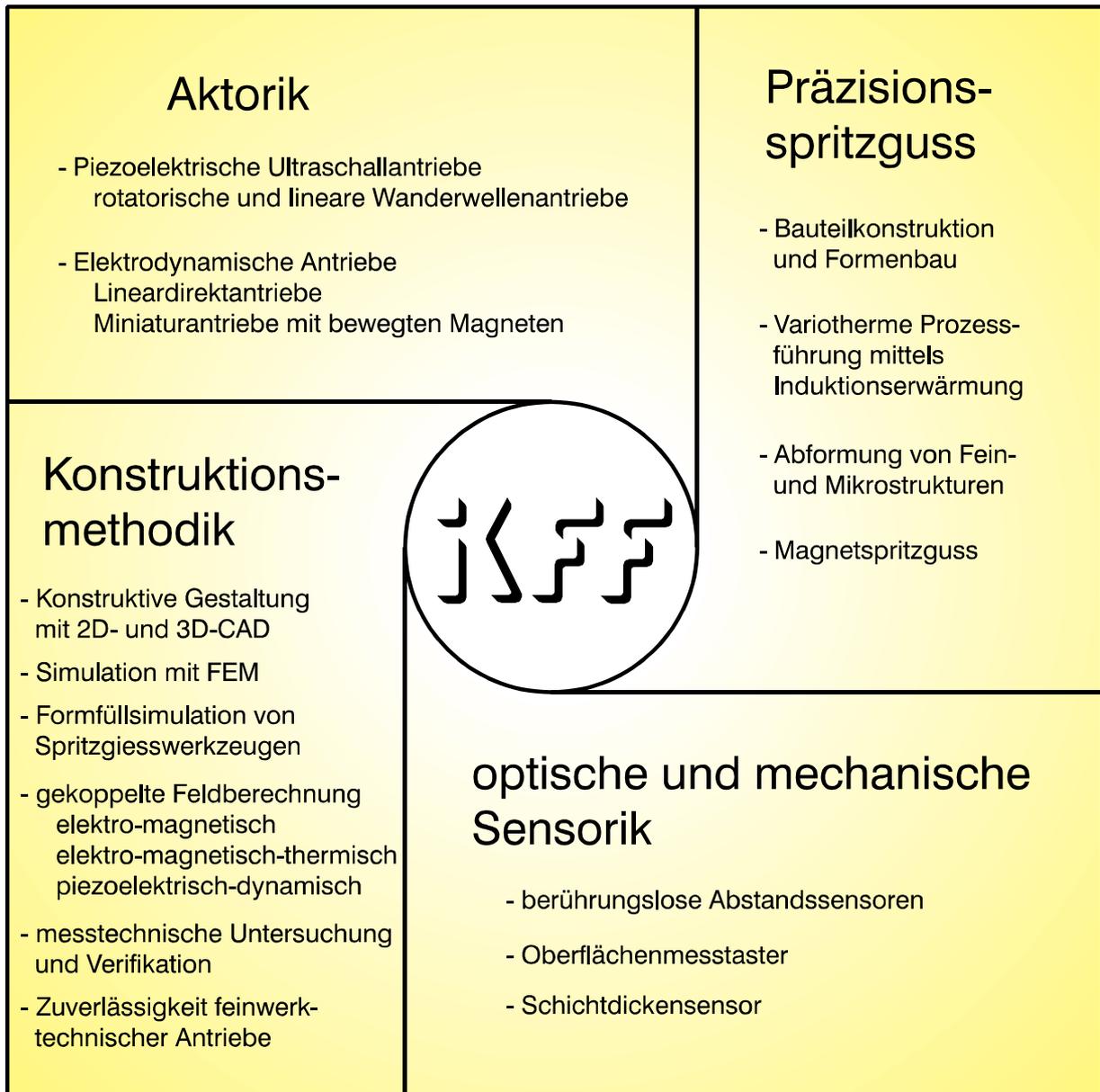
Im Rahmen der DFG-Forschergruppe „Systemzuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen“ bearbeitet das Institut das Thema „Zuverlässigkeit von elektromechanischen/mechatronischen Systemen am Beispiel feinwerktechnischer Antriebe/Aktorik“.

Die Forschungsaspekte sollen nachfolgend noch ausführlich vorgestellt und zum Teil beispielhaft verdeutlicht werden.

Eine Übersicht zu den Inhalten und Umfängen der einzelnen Lehrveranstaltungen enthält Abschnitt 3.2.

3 Forschung und Lehre heute

3.1 Forschung am IKFF



Am Institut werden vier Forschungsschwerpunkte bearbeitet. Im Arbeitsgebiet **Aktorik** stehen feinwerktechnische Direktantriebe im Mittelpunkt. Die Entwicklung alternativer Antriebssysteme für die Feinwerktechnik auf der Basis elektrodynamischer Kraftwirkung bzw. von Festkörpereffekten (Elektrodynamische Linear-

motoren, Piezo-Wanderwellenmotoren) steht im Mittelpunkt dieses Arbeitsgebietes. Ausgangspunkt bildete die Tatsache, dass neben rotatorischen Antrieben zunehmend Lineardirektantriebe in verschiedenste Anwendungsfelder der Feinwerktechnik vordringen. Initiiert beispielsweise durch die Verfügbarkeit neuer Magnet-

werkstoffe oder durch die systematische Untersuchung neuer Wirkprinzipie können bekannte Bauformen miniaturisiert neue Anwendungsfelder erschließen oder auch völlig neue Motorbauformen zum Einsatz kommen.

Grundsätzlich bieten sich dabei als Wirkprinzipie die Ausnutzung elektro-magneto-mechanischer und elektrodynamischer Kraftwirkungen, wie bei klassischen rotatorischen Motoren, sowie die verschiedensten Festkörpereffekte an. Für Positionieraufgaben in mm-Bereich bei kleinen Kräften können insbesondere **elektrodynamische Lineardirektantriebe** vorteilhaft sein. Die Analyse, Synthese, Dimensionierung und Konstruktion derartiger Antriebe bildet deshalb einen Schwerpunkt am Institut /20//24//32//33/. Dem sind im Abschnitt 4 zwei Beiträge (4.4 und 4.5) gewidmet.

Elektrodynamische Linearmotoren besitzen zunächst keine internen Maßverkörperungen und benötigen deshalb externe Wegmesssysteme zum Betrieb im geschlossenen Regelkreis oder zur Kommuntierung. Es stellt sich deshalb die Frage, ob ausgewählte Motorparameter als inhärente sensorische Eigenschaften genutzt bzw. auch gezielt eingebracht werden können. In den zurückliegenden Jahren wurden am Institut mit Unterstützung durch die DFG deshalb auch umfangreiche Untersuchungen vorgenommen, um diese Frage für verschiedene Antriebsbauformen zu untersuchen /26//29/. 2006 wurden die Untersuchungen zur integrierten Wegmessung in Lineardirektantrieben über interne sensorische Eigenschaften zu einem gewissen Abschluss gebracht. Nach zwei DFG-Projekten können nun

sowohl Motoren mit bewegten Magnet-systemen als auch Motoren mit Kurzspulen und bewegten eisenlosen Wicklungen dafür genutzt werden. Die Ergebnisse werden 2007 auf der Kleinantriebstagung zusammengefasst vorgestellt und sind in einem Fachbeitrag im Abschnitt 4.3 dargestellt. Diese Arbeiten ermöglichen mechanisch einfache, weniger komplexe und kostengünstige Antriebe, in denen ein Wegmesssignal auf rein elektronischem Wege ohne zusätzliche externe Messsysteme generiert werden kann.

In diversen Industrieprojekten wurden darüber hinaus viele anwendungsspezifische elektrodynamische Linearmotoren entwickelt, berechnet und realisiert. Die Ergebnisse aus den praktischen Umsetzungen wurden und werden als neue Vorgehensweisen zur Dimensionierung von Linearmotoren in Dissertationen aufbereitet /32//33/.

Die Ansteuerung und Regelung von Antrieben, sowohl elektrodynamischen Lineardirektantrieben als auch piezoelektrischen Antrieben kann zwischenzeitlich am Institut effizient über drei dSPACE-Arbeitsplätze realisiert werden.

Ganz andere interessante Entwicklungen der jüngsten Vergangenheit stellen **piezoelektrische Antriebe** dar, die piezoelektrisch erzeugte Wanderwellen oder elliptische Trajektorien auf Oberflächenpunkten zur Bewegungserzeugung nutzen. Diese sogenannten Wanderwellenmotoren bzw. Bimodenantriebe besitzen vielversprechende Eigenschaften, wie hohes Antriebsmoment bei kleiner Baugröße, kleine Anlaufzeitkonstanten und ein großes Haltemoment im stromlosen Zustand.

Die Forschungen zur Entwicklung von neuartigen piezoelektrischen Direktantrieben werden ebenfalls seit Jahren am Institut fortgeführt und dazu auf Tagungen wie der Actuator 2006 oder der Kleinantriebstagung 2007 berichtet, siehe auch /16//28//31/ und den Fachbeitrag im Abschnitt 4.7 dazu. 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.

Einen weiteren Arbeitsgegenstand in der Aktorik bilden neuerdings am IKFF auch grundlegende Untersuchungen an **Luftlagern und Luftführungen** in Linearantrieben. Nach Abschluss der Dissertation /25/ zu Lineardirektantrieben für die Stoßjustierung feinwerk- und mikrotechnischer Baugruppen mit aerostatischen Führungen wurde dieses sehr interessante Thema 2006 mit Arbeiten zu kommutierten **Luftführungen** in Lineardirekt- und Mehrkoordinatenantrieben wieder aufgegriffen und derzeit vertieft, Fachbeitrag Abschnitt 4.6.

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.

In den letzten Jahren wurden umfangreiche Untersuchungen zur variothermen Prozessführung beim Präzisionsspritzgießen und beim Mikrospritzgießen am IKFF vorgenommen. Das Spritzgießen mikrotechnischer Bauteile und feinwerktechnischer Präzisionsteile erfordert häufig spezielle Temperaturgänge in der Kavität, da die Schmelzen in den sehr kleinen Kavitäten sonst vor deren vollständiger Füllung erstarren. Die Dissertation /15/ bildete den Auftakt dieser Arbeiten, es folgten gemeinsame Forschungsarbeiten am IKFF und am IMM in Mainz in den Jahren 1997 bis 1999 im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms Mikromechanische Produktionstechnik /19//21//22/ und weiterer Arbeiten am IKFF. Dabei wurden die Einsatzpotenziale verschiedener induktiver Temperierverfahren untersucht und anwendungsgerecht aufbereitet.

Beim klassischen Variothermverfahren sichern zwei verschieden temperierte Ölkreisläufe die geforderten Werkzeugtemperaturniveaus. Bei der induktiven Erwärmung wird die Energie transformatorisch auf das Werkstück übertragen. Dabei kann ein externer oder ein integrierter Induktor zum Einsatz kommen. Die Einsatzpotenziale wurden durch Abformergebnisse an Teststrukturen deutlich gemacht.

Im Rahmen eines neuen DFG-Projektes werden die Arbeiten derzeit mit integrierten Induktoren und Impulskühlung fortgeführt, siehe Abschnitt 4.8. Ergebnisse dazu wurden u. a. 2007 auf dem 20. Stuttgarter Kunststoff-Kolloquium veröffentlicht. Das IKFF war dabei wie stets in den letzten Jahren Mitveranstalter des Kunststoff-Kolloquiums. Zu diesem Themenfeld gibt

es auch ein sehr reges Interesse aus der Industrie. Die interne aber auch externe Induktionserwärmung wird als Problemlöser für schwierige Abformaufgaben gesehen. Oft übersteigen die Anfragen unsere Kapazitäten.

In einem weiteren Projekt werden am IKFF die Entformungskräfte beim Spritzgießen in Abhängigkeit von Oberflächenrauheit und Beschichtung sowie vom eingesetzten Kunststoff untersucht. Gemeinsam mit Firmen stehen hier zunächst Untersuchungen an Thermoplasten im Mittelpunkt, siehe Abschnitt 4.2. Eine Erweiterung auf Duroplaste ist vorgesehen.

Durch den Einsatz der wissenschaftlichen Mitarbeiter aus dem Bereich Spritzguss gelang es, leihweise als Dauerleihgabe zwei hochwertige Spritzgießautomaten der Firmen Arburg und Boy langfristig am Institut nutzen zu können. Es handelt sich dabei um die Spritzgießmaschinen Arburg 270 S/250-60 und Dr. Boy 22A.

Im Arbeitsgebiet **optische und mechanische Sensorik** wurden nach Abschluss der Dissertationen /14//17//18/ keine eigenständigen Themen mehr bearbeitet. Vielmehr ging dieses Gebiet in den letzten Jahren in das Arbeitsgebiet Aktorik und dort insbesondere in die Verfahren zur integrierten Wegsignalerfassung in elektrodynamischen Linearmotoren mit bewegten Magneten oder auch bewegten Spulen ein.

Übergreifend bildet die 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 seit 2002 das Thema „Zuverlässigkeit von elektromechanischen / mechatronischen Systemen am Beispiel feinwerktechnischer Antriebe/Aktorik“. Dadurch wird Kompetenz in der Zuverlässigkeitstechnik, speziell zur Zuverlässigkeit feinwerktechnischer Antriebe aufgebaut. Dies betrifft sowohl elektromechanische als auch mechanische Komponenten derartiger Antriebe. Das angestrebte Ziel der Forschergruppe ist die Entwicklung von Methoden zur Bestimmung der Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen. 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.

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 wurden in einer Dissertation zusammengefasst /27/, weitere externe Ergebnisse gingen in /30/ ein. 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.

Im Detail sind nachfolgend einige konkrete Arbeitsgebiete stichpunktartig aufgeführt:

Feinwerktechnische Aktorik

- Entwicklung alternativer Antriebssysteme auf Basis elektrodynamischer Kraftwirkung bzw. Festkörpereffekten.
- Berechnung derartiger Antriebe, Simulation ihres dynamischen Verhaltens.
- Erarbeitung geeigneter Methoden zur Antriebsentwicklung.
- Entwicklung ein- und mehrsträngiger elektrodynamischer Lineardirektantriebe mit integrierten Wegmesssystemen.
- Entwicklung geeigneter elektronischer Ansteuerungen unter Ausnutzung der integrierten Messsysteme.
- Entwicklung von Luftführungen für Linearantriebe.

Präzisions-Spritzgießtechnologie

- Herstellung von Präzisionsbauteilen und feinen Strukturen bis hin zur Verbindung mit mikromechanischen Bauelementen.
- Ermittlung von Entformungskräften in Abhängigkeit von Oberflächenrauheit, Beschichtung und Kunststoff.
- Untersuchung spezieller Werkstoffe und Beschichtungen im Werkzeugbau.

- Dynamische Formtemperierung durch induktive Beheizung mit externem oder internem Induktor zur Verbesserung des Formfüllverhaltens.

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, elektromagnetisch, elektromagnetisch-thermisch, piezoelektrisch-dynamisch.

Zuverlässigkeit feinwerktechnischer Antriebe

- Übertragung und Verifizierung bekannter Zuverlässigkeitstechniken auf feinwerktechnische Antriebe und Aktorik.
- Datensammlung, Dauerlauf-Versuche für Kleinstmotoren und Getriebe.
- Vorausberechnung der Zuverlässigkeit von Systemen aus verschiedenartigsten Bestandteilen und Fachgebieten.
- Erarbeitung von Ansätzen für die Ermittlung der Systemzuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen (Konzeptphase).

3.2 Lehre am IKFF

An dieser Stelle soll eine kurze Übersicht zu den Lehrveranstaltungen des IKFF allgemein und als Teil des Jahresberichtes speziell im Jahre 2007 gegeben werden.

Lehrveranstaltungen im Vordiplom:

Konstruktionslehre (FWT) III

(Schinköthe / Burkard; V 3 / UE 2 im WS)

Mechanische Funktionsgruppen: Achsen und Wellen, Lager, Wälzlager, Gleitlager, Sonderlager, Getriebe, Zahnradgetriebe, Koppelgetriebe, Zugmittelgetriebe, Schraubgetriebe. Gestaltung ausgewählter Funktionsgruppen.

Konstruktionslehre (FWT) IV

(Schinköthe / Burkard; V 3 / UE 1 im SS)

Mechanische Funktionsgruppen: KuppelungsbaufORMen und -berechnung; Elektromechanische Funktionsgruppen; Funktionsgruppen der Messtechnik; Optische Funktionsgruppen; Geräteentwicklung und Konstruktionsmethodik.

Zur Konstruktionsmethodik wird eine umfangreiche Baugruppen- bzw. Geräteentwicklung an einer etwas ausgefallenen Aufgabenstellung geübt und die Lösung in Form eines in die Lehrveranstaltung integrierten Konstruktionswettbewerbes auch praktisch umgesetzt und im Wettkampf mit anderen studentischen Lösungen auch erprobt.

Lehrveranstaltungen im Hauptdiplom:

Hauptfach Feinwerktechnik

Das Hauptfach Feinwerktechnik wird aus den Kernfächern

- Grundlagen der Feinwerktechnik; Gerätekonstruktion und -fertigung und
- Aktorik in der Feinwerktechnik; Konstruktion, Berechnung und Anwendung mechatronischer Komponenten

gebildet und durch diverse Ergänzungsfächer auf einen Umfang von 10 Semesterwochenstunden erweitert.

Kernfächer

Grundlagen der Feinwerktechnik; Gerätekonstruktion und -fertigung

(Schinköthe / Burkard; V 3 / UE 1 im WS)

Die Vorlesung „Grundlagen der Feinwerktechnik - Gerätekonstruktion und -fertigung“ behandelt Grundlagen für die 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, Fehlerverhalten 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). Beispielhafte Vertiefung erfolgen in Übungen und Praktika, s. u.

Aktorik in der Feinwerktechnik; Konstruktion, Berechnung und Anwendung mechatronischer Komponenten

(Schinköthe; V 3 / UE 1 im WS und SS)

Die Vorlesung „Aktorik in der Feinwerktechnik - Konstruktion, Berechnung und Anwendung mechatronischer Komponenten

ten" beleuchtet ausgewählte Aspekte der Entwicklung und Konstruktion mechatronischer Komponenten und Systeme der Feinwerktechnik. Behandelt werden feinerwerktechnische Antriebssysteme unterschiedlichster Wirkprinzipien. Den Schwerpunkt bilden elektromagnetische und elektrodynamische Stelltechnik, piezoelektrische und magnetostruktive Stelltechnik, Magnettechnik und -technologie sowie Beispiele zur Realisierung mechatronischer Lösungen in der Feinwerktechnik. 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.

In sehr umfangreich angelegten Übungsblöcken zu elektrodynamischen Linearantrieben und zu piezoelektrischen Wanderwellenmotoren sowie zugehörigen Hauptfachpraktika erfolgt eine beispielhafte Vertiefung dazu.

Ergänzungsfächer

Ergänzend für beide Schwerpunkte, also Aktorik und Gerätetechnik, werden zwei weitere Lehrveranstaltungen mit hohem eigenständigen Übungsanteil und FEM-Praktikum angeboten.

Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL

(Schinköthe / Rothenhöfer / Joerges u. a.; V 1 / UE 1 im SS)

Einführung in die praktische Nutzung der FEM-Programme ANSYS und MAXWELL zur Berechnung von Strukturmechanik-

Aufgaben, thermischen Problemen, Magnetfeldern und Antrieben (Lineardirektantriebe und piezoelektrische Antriebe).

Praxis des Spritzgießens in der Gerätetechnik; Verfahren, Prozesskette, Simulation

(Schinköthe / Burkard; V 1 / UE 1 im SS)

Spritzgießverfahren der Mikro- und Gerätetechnik, Sonderverfahren, Prozesskette, Bauteil-, Werkzeugkonstruktion, Nutzung von Simulationstechniken zur effizienten Entwicklung; mit Praktika am Spritzgießautomaten und am Programm Moldflow.

Praktika:

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. 2007 wurde es als eigenständige Lehrveranstaltung aufbereitet.

Exkursion

Jährlich wird eine Exkursion in feinwerktechnische Firmen für die Hauptfachstudenten organisiert (2007 Ittersbach).

Seminar Feinwerktechnik

Im Rahmen des Seminars Feinwerktechnik stellen Studenten die Ergebnisse ihrer Studien- und Diplomarbeiten vor.

Weiterbildung

Regelmäßig wird auch ein zweitägiger Weiterbildungslehrgang an der TA Esslingen zum Themengebiet „Antriebssysteme der Feinwerktechnik“ unter Leitung von Professor Schinköthe angeboten.

LEHRVERANSTALTUNGEN 2007

Lehrveranstaltungen im Vordiplom

Konstruktionslehre (FWT) III

(Schinköthe, Burkard)

WS 2006/2007: 158 Studenten

WS 2007/2008: 70 Studenten

16 Vorlesungen à 2 SWS

16 Vorlesungen à 1 SWS

16 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Burkard, Dannemann,
Joerges, Mochel,
Rothenhöfer

Konstruktionslehre (FWT) IV

(Schinköthe, Burkard)

SS 2007: 145 Studenten

12 Vorlesungen à 2 SWS

13 Vorlesungen à 1 SWS

13 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Burkard, Dannemann, Joerges,
Mochel, Rothenhöfer

Lehrveranstaltungen im Hauptdiplom

Grundlagen der Feinwerktechnik, Gerätekonstruktion und -fertigung

(Schinköthe, Burkard, Beier)

WS 2006/2007: 30 Studenten

WS 2007/2008: 17 Studenten

20 Vorlesungen à 2 SWS

9 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Burkard, Beier

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

WS 2006/2007: 19 Studenten

WS 2007/2008: 11 Studenten

14 Vorlesungen à 2 SWS

SS 2007: 19 Studenten

5 Vorlesungen à 2 SWS

8 Übungen à 2 SWS

Betreuer: Dannemann, Joerges,
Rothenhöfer

Praktische FEM-Simulation mit ANSYS und MAXWELL

(Schinköthe, Rothenhöfer, Dannemann)

SS 2007: 9 Studenten

10 Vorlesungen à x 2 SWS

10 Übungen à x 2 SWS

Betreuer: Dannemann, Rothenhöfer

Prüfungen 2007

Fach	Termin	Kandidaten
KL III + IV FWT (schriftlich)	F 2007	10
	H 2007	124
GFGF Pflichtfach (schriftlich)	F 2007	12
	H 2007	3
GFGF Kernfach (mündlich)	F 2007	13
	H 2007	3
Aktorik Kernfach (mündlich)	F 2007	5
	H 2007	9

Praktika 2007

Wintersemester 2006/2007

Versuch Koordinatenmesstechnik:
36 Teilnehmer / 7 Termine
Betreuer: Burkard

Versuch Spritzgusssimulation:
19 Teilnehmer / 2 Termine
Betreuer: Burkard

Sommersemester 2007

Versuch Ultraschallantriebe:
10 Teilnehmer / 2 Termine
Betreuer: Rothenhöfer

Versuch Lineardirektantriebe:
14 Teilnehmer / 3 Termine
Betreuer: Dannemann

Versuch Rasterelektronenmikroskopie:
18 Teilnehmer / 4 Termine
Betreuer: Burkard

Versuch Schrittmotoren:
19 Teilnehmer / 4 Termine
Betreuer: Dannemann

Lehrmaterialien am IKFF

Siehe Abschnitt 3.4.

Seminare Feinwerktechnik und Studienarbeiten 2007

Rupp, Jochen: Aufbau eines Versuchstandes zur Bestimmung von thermischen Eigenschaften eines Lineardirektantriebes

Giljum, Manfred: Optimization, Modeling and Practical Realization of a Linear Ultrasonic Motor

Keller, Bastian: Entwicklung eines Wechselrichters für den Betrieb zweiphasiger Ultraschallmotoren

Reiber, Dirk: Theoretische Untersuchungen zu Rastkräften und deren Vermeidung

Hämmerle, Moritz: Simulative Untersuchungen zu Rastkräften in elektrodynamischen Linearantrieben

Zeile, Christian: Experimentelle Untersuchungen zu Rastkräften in elektrodynamischen Linearmotoren

Gallenmüller, Robert: Aufbau eines Wechselrichters für eine leistungsgeregelte Anregung piezoelektrischer Ultraschallmotoren

Schupp, Tobias: Untersuchung der elektromagnetischen Eigenschaften von Kunststoffformenstahl

Ben Hassine, Ilyes: Aufbau eines universellen Versuchstandes zur Bestimmung von dynamischen und statischen Eigenschaften eines Lineardirektantriebes

Rausch, Manuel: Aufbau einer universellen Ansteuerung und Regelung von Lineardirektantrieben mit dSpace und Matlab/Simulink

Mathuni, Stefan: Aufbau und Inbetriebnahme eines linearen Ultraschallmotors mit metallischem Bimoden-Resonator und aufgeklebter Piezokeramik

Georg, Johannes: Entwurf und Aufbau eines Temperiergeräts für den Einsatz bei Spritzgießwerkzeugen mit integrierten Induktoren

Heer, Stefan: Untersuchung eines linearen Ultraschallmotors mit metallischem Bimoden-Resonator und integrierter Piezokeramik

Ulmer, Matthias: Konzeption und Konstruktion einer intern induktiv beheizten

Werkzeugplatte

Grabert, Falk: Ersatzschaltbestimmung und Analyse von Anpassungsnetzwerken für die optimale Leistungseinkopplung in piezoelektrische Ultraschallmotoren

Diplomarbeiten am IKFF 2007

Voelz, Karsten: Auslegung und Konstruktion eines kurzhubigen Linearmotors zur Ansteuerung von direkt gesteuerten Servo- und Proportionalventilen

Dissertationen am IKFF 2007

Clauß, C.: Sensorische Eigenschaften elektrodynamischer Lineardirektantriebe mit Kurzspulsystemen. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 26, 2007.

Engelbreit, M.: Finite Schadensakkumulation und Toleranzanalyse zur Zuverlässigkeitsuntersuchung und Leistungssteigerung. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 27, 2007.

Wischnewskij, A.: Reversierbare piezoelektrische Ultraschallmotoren auf Basis einphasig angeregter stehender Wellen. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, (eingereicht).

Dannemann, M.: Dimensionierung und Optimierung feinwerktechnischer Lineardirektantriebe unter Beachtung parasitärer Effekte am Beispiel von Flach- und Tauchspulantrieben. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, (eingereicht).

Preise am IKFF 2007

Südwestmetall-Preis 2007: Frau Dr.-Ing. Christin Clauß für ihre Dissertation.

Preise der Gustav-Magenwirth-Stiftung 2007: Moritz Hämmerle, Christian Zeile und Dirk Reiber für ihre Studienarbeiten.

Tag der offenen Tür 2007 - „So nah und doch so fern...“

Für einen Menschen ist es meistens nicht schwer, einen Schalter in zwei Meter Höhe zu betätigen. Aber wie macht das eine kleine Maschine?

Es sollte eine Maschine entwickelt werden, die von einem Startbereich aus einen von sechs erhöht angebrachten Schaltern betätigt. Eigentlich wirkt die Aufgabenstellung doch ganz einfach. Insbesondere dann, wenn zu den verschiedenen Schaltern auch noch diverse Hilfen hinführen, wie z. B. eine Leiter, ein Seil oder ein dickes Rohr.

Wenn man aber noch verschiedene Randbedingungen einhalten muss, wird das Ganze deutlich schwieriger. So mussten die Maschinen beim Start einen vorgegebenen Bauraum einhalten, ein maximales Gewicht durfte nicht überschritten werden und als Energiequellen waren nur vier Mignonzellen und die aus dem Eigengewicht der Maschine resultierende potentielle Energie zulässig. Des Weiteren mussten die Maschinen die Aufgabe ohne Eingriff des Bedieners erledigen.

All dies zusammen machte es dann doch für so eine kleine Maschine ziemlich schwierig, einen Schalter in zwei Meter Höhe zu betätigen.

So unterschiedlich wie die angebotenen Hilfen waren auch die Lösungen der 25 studentischen Teams. Es gab Maschinen, die am Seil zu dem darüber angebrachten

Schalter kletterten, und andere, die versuchten, mit Hilfe der Leiter einen Schalter zu erreichen. Ein paar Konstruktionen umgriffen das Rohr und fuhren an diesem hinauf. Auch Tennisbälle, Holzkugeln, Plastikflugzeuge und andere Gegenstände wurden nach oben geschossen. Andere Maschinen entfalteten lange Scherengitter, die dann einen der Schalter betätigten.

Dass nicht alle Konstruktionen dabei zum gewünschten Erfolg führten, tat der Stimmung beim sehr gut besuchten 15. Konstruktionswettbewerb des Institutes für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart keinen Abbruch.

Nicht nur der Sieg war hier das Ziel, sondern auch die Möglichkeit, die eigene, aufgebaute Konstruktion im direkten Vergleich zu anderen studentischen Lösungen zu sehen. Beispielsweise gab es auch eine „etwas“ übergewichtige Maschine, die die Aufgabe nur sehr, sehr bedächtig löste - aber Dabeisein ist (doch) alles...

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

ANSOFT Corporation, Arburg GmbH & Co., 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, Springer Verlag GmbH und WERMA Signaltechnik GmbH + Co. KG.

Ergebnisse 2007:

1. Platz: Celine Geiger, Henning Dohrmann, Marius Gemeinhardt, Marcus Helmke, Alexander Zöllner.
2. Platz: Rim Zerriaa, Sebastian Attinger, Matthias Maier, Matthias Simon Maier, Kesra Mohsen Nezhad.
3. Platz: Jing Zhou, Moritz Baber, Marcel Bauer, Hannes Günther, Alexander Riebel.

3.3 Habilitationen/Dissertationen

Habilitationen seit Institutsgründung:

- /1/ Gerhard, E.: Einflussfaktoren auf den Entscheidungsprozess beim wissenschaftlichen Konstruieren. Dissertation, Universität Stuttgart 1975.

Dissertationen seit Institutsgründung:

- /2/ Büchel, H.: Beitrag zur Lagerung von Hebel-feinwaagen - ein Vergleich von Schneiden-lager, Kreuzfedergelenk und Gaslager. Dis-sertation, Universität Stuttgart, IKFF, 1977.
- /3/ Lindenmüller, P.: Längenmessungen mit elektrischen Kontaktfühlern dargestellt am Beispiel der Messung von Bohrungen mit weniger als einem Millimeter Durchmesser. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, In-stitutsbericht Nr. 1, 1979.
- /4/ Wolf, H.: Ein Beitrag zur Objekterkennung und Formprüfung in drei räumlichen Achsen. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, In-stitutsbericht Nr. 2, 1983.
- /5/ Kurth, H.: Verbesserung der Sicherheit und der Umweltfreundlichkeit von PKW-Seiten-türschlössern. Ein Beitrag zur methodischen Konstruktion. Dissertation, Universität Stutt-gart, IKFF, Institutsbericht Nr. 3, 1984.
- /6/ Maier, H.-O.: Kontrastierungsverfahren in der Ophthalmologie - Neue Möglichkeit zur Ge-räteentwicklung. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 4, 1985.
- /7/ Haynold, G.: Untersuchung von Oberflächen-messtastern mit einem Beitrag zur konstruk-tiven Weiterentwicklung. Dissertation, Uni-versität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 5, 1985.
- /8/ Gäng, L.-A.: Präzisionsspritzteile durch rechnerunterstütztes Optimieren der Prozesspa-rameter basierend auf der gleichzeitigen Temperatur- und Druckmessung im Werk-zeug. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 6, 1986.
- /9/ Sawilla, E.: Geometriestruktur technischer Produkte und ihr Informationsgehalt. Disser-tation, Universität Stuttgart, IKFF, Instituts-bericht Nr. 7, 1988.

- /10/ Dagenbach, S.: Konstruktion von Kompo-nenten für miniaturisierte Koordinatenmess-taster - Ein Beitrag zum methodisch unter-stützten Konstruieren. Dissertation, Universi-tät Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 8, 1991.
- /11/ Kinast, P.: Entwicklung und Herstellung medizinischer Kanülen unter Berücksichti-gung des Traumas bei der Punktion. Disser-tation, Universität Stuttgart, IKFF, Instituts-bericht Nr. 9, 1991.
- /12/ Fröschle, A.: Analyse eines Piezo-Wander-wellenmotors. Dissertation, Universität Stutt-gart, IKFF, Institutsbericht Nr. 10, 1992.
- /13/ Herzog, B.: Entwicklungsgrundlagen für mo-dulare Ultraschallantriebe - Messtechnik, Regelungsprinzipien, Modelle. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 11, 1993.
- /14/ Holzwarth, F.: Entwicklung eines Verfahrens zur berührungslosen Messung der Wasser-filmdicke auf Fahrbahnen. Dissertation, Uni-versität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 12, 1996.
- /15/ Tewald, A.: Entwicklung und Untersuchung eines schnellen Verfahrens zur variothermen Werkzeugtemperierung mittels induktiver Erwärmung. Dissertation, Universität Stutt-gart, IKFF, Institutsbericht Nr. 13, 1997.
- /16/ Hermann, M.: Entwicklung und Untersu-chung piezoelektrisch erregter Wanderwel-lenmotoren für lineare Bewegungen. Disser-tation, Universität Stuttgart, IKFF, Instituts-bericht Nr. 14, 1998.
- /17/ Langheinrich, P.: Messapparatur zur Bestim-mung des Längenausdehnungskoeffizienten von hochschmelzenden Metallen bis zum Schmelzpunkt sowie der Gleichgewichtskon-zentration von Eigenfehlstellen. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 15, 1998.
- /18/ Klaiber, J.-A.: Methoden zur Reduzierung der Messobjekteinflüsse bei der Abstandsmes-sung mit faseroptischen Streulichtsensoren. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, In-stitutsbericht Nr. 16, 1998.

- /19/ Schaumburg, C.: Mikrospritzgießen mit induktiver Werkzeugtemperierung. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 17, 2001.
- /20/ Hartrampf, R.: Integrierte Wegmessung in feinwerktechnischen elektrodynamischen Lineardirektantrieben. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 18, 2001.
- /21/ Kemmann, O.: Untersuchungen zum Füllverhalten von mikrostrukturierten Formteilen beim Mikrospritzgießen von Polymerschmelzen. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 19, 2002.
- /22/ Walther, T.: Geräte- und Verfahrenstechnik zur induktiven Werkzeugtemperierung beim Mikrospritzgießen. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 20, 2002.
- /23/ Hess, A.: Piezo-hydraulischer Aktor für die Mikrobearbeitung von Metallen. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 21, 2002.
- /24/ Gundelsweiler, B.: Dimensionierung und Konstruktion von feinwerktechnischen elektrodynamischen Lineardirektantrieben. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 22, 2003.
- /25/ Pröger-Mühleck, R.: Lineardirektantriebe für die Stoßjustierung feinwerk- und mikrotechnischer Baugruppen. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 23, 2004.
- /26/ Welk, C.: Detektion interner sensorischer Eigenschaften von elektrodynamischen Lineardirektantrieben. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 24, 2004.
- /27/ Köder, T.: Zuverlässigkeit von mechatronischen Systemen am Beispiel feinwerktechnischer Antriebe. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 25, 2006.
- /28/ Haug, J.: Optimierung eines piezoelektrisch erregten Wanderwellenmotors. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Elektronische Hochschulschriften der Universität Stuttgart, 2006.
- /29/ Clauß, C.: Sensorische Eigenschaften elektrodynamischer Lineardirektantriebe mit Kurzspulsystemen. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 26, 2007.
- /30/ Engelbreit, M.: Finite Schadensakkumulation und Toleranzanalyse zur Zuverlässigkeitsuntersuchung und Leistungssteigerung. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 27, 2007.
- /31/ Wischnewskij, A.: Reversierbare piezoelektrische Ultraschallmotoren auf Basis einphasig angeregter stehender Wellen. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, 2008 (eingereicht).
- /32/ Dannemann, M.: Dimensionierung und Optimierung feinwerktechnischer Lineardirektantriebe unter Beachtung parasitärer Effekte am Beispiel von Flach- und Tauchspulantrieben. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, 2008 (eingereicht).
- /33/ Grotz, Andreas: Vergleichende Untersuchungen hochdynamischer, feinwerktechnischer, elektrodynamischer Lineardirektantriebe mit bewegtem Spulensystem und bewegtem Magnetsystem. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, 2008 (eingereicht).

3.4 Ausgewählte Publikationen

Veröffentlichungen im Arbeitsgebiet Konstruktionsmethodik und zum IKFF (Auswahl)

- /34/ Schinköthe, W. : Abschnitt 3.5. Festigkeitslehre und Abschnitt 11 Kupplungen, in Krause, W.: Konstruktionselemente der Feinmechanik, 2. und 3. stark bearbeitete Auflage. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1993 und 2004.
- /35/ Schinköthe, W. (Hrsg.): Festschrift anlässlich der Emeritierung von Herrn Prof. Artur Jung. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, Stuttgart, März 1995.
- /36/ Jung, A.: Die Gestalttheorie und der kreative Denkprozess beim Konstruieren. 41. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau 1996, Ilmenau 23.-26.09.1996,

Reihe Konstruktionstechnik, Tagungsband 2, S. 327-334.

- /37/ Schinköthe, W. (Hrsg.): Festschrift 30 Jahre Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, Stuttgart April 1997.
- /38/ Schinköthe, W.: Feinwerktechnik in Stuttgart - Studienmöglichkeiten unter dem Dach des Maschinenwesens. 16. Internationales Kolloquium Feinwerktechnik, Budapest, 1.-3.10.97, Tagungsband.
- /39/ Jung, A.: Spielerisches Experimentieren führte zur Entdeckung eines Lackantriebs-effektes - Analyse einer technischen Gestalt. 41. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau 1999, Ilmenau 20.-23.09.1999, Reihe 1 Konstruktionstechnik, Tagungsband.
- /40/ Schinköthe, W. u. a.: Das Cluster Mikro- und Gerätetechnik an der Fakultät Maschinenbau. Transmitter 01/2006, S. 5-19.

Veröffentlichungen im Arbeitsgebiet Aktorik (Auswahl)

- /41/ Schinköthe, W. : Abschnitt 6.2. Elektromechanische Funktionsgruppen - Gerätetechnische Aktorik, in Krause, W.: Gerätekonstruktion in Feinwerktechnik und Elektronik, 3. Auflage, München, Wien: Carl Hanser Verlag 2000.
- /42/ Schinköthe, W. : Abschnitt 4.2. Elektrodynamische Linear- und Mehrkoordinatenantriebe, in Kallenbach, E.; Stölting, H.- D.: Handbuch Elektrische Kleinantriebe. 1. bis 3. Auflage, Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag 2001, 2002, 2006.
- /43/ Schinköthe, W. : Chapter 4.2. Electrodynamic linear and multicoordinate drives, in Amrhein, W.; Kallenbach, E.; Stölting, H.- D.: Handbook of Fractional Horsepower Drives, Berlin: Springer Verlag 2008.
- /44/ 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.
- /45/ Hermann, M.; Schinköthe, W.: Piezoelektrische Wanderwellenmotoren für lineare Bewegungen. Tagung Innovative Kleinantriebe, Mainz 9./10.05.1996, VDI-Berichte 1269, S. 301-314.
- /46/ Hermann, M.; Schinköthe, W.: Piezoelectric Travelling Wave Motors Generating Direct Linear Motion. Actuator 96, Bremen 26.-28.06.96, Conference Proceedings, S. 200ff.
- /47/ Schinköthe, W.; Hermann, M.; Voss, M.: Lineardirektantriebe erschließen neue Anwendungen. 41. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau 1996, Ilmenau 23.-26.09.1996, Reihe Mechatronik, Tagungsband 2, S. 51-56.
- /48/ Krause, W.; Schinköthe, W.: Antriebssysteme für Automaten der Kleinteilmontage. Technische Rundschau Bern 89(1997)14, S. 26-30.
- /49/ Schinköthe, W.; Hartramph, R.: Miniaturlinearantriebe mit integriertem Wegmesssystem. F&M Feinwerktechnik, Mikroelektronik, Mikroelektronik 104(1997)9, S. 634-636.
- /50/ Hermann, M.; Schinköthe, W.: Piezoelectric Travelling Wave Motors Generating Direct Linear Motion. 16. Internationales Kolloquium Feinwerktechnik, Budapest, 1.-3.10.97, Postervortrag.
- /51/ 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.
- /52/ Schinköthe, W.; Hermann, M.: Wanderwellenmotoren - eine Alternative in der Feinwerktechnik. F&M Feinwerktechnik, Mikroelektronik, Mikroelektronik 105(1997)11-12, S. 854-858.
- /53/ 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.
- /54/ Schinköthe, W.; Hermann, M.: Wanderwellenmotoren - alternative Antriebe in der Fein-

- werktechnik. DRIVES 98, 24.-26.11.98, Vortrag, Tagungsband, S. 207-216.
- /55/ Hartrampf, R.; Schinköthe, W.: Elektrodynamische Direktantriebe mit integriertem Wegmesssystem. DRIVES 98, 24.-26.11.98, Postervortrag, Tagungsband, S. 700-701.
- /56/ 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.
- /57/ Hartrampf, R.; Schinköthe, W.; Welk, C.: Elektrodynamische Lineardirektantriebe mit integriertem Wegmesssystem. 44. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau 1999, Ilmenau 20.-23.09.1999, Reihe 6 Mechatronik, Tagungsband S. 63-68.
- /58/ Welk, C.; Gundelsweiler, B.; Schinköthe, W.: Integrierte Wegmessung in Lineardirektantrieben. Tagung Innovative Klein- und Mikroantriebe, Mainz 15./16.05.2001, GMM-Fachberichte 33, S. 33-60.
- /59/ Pröger-Mühleck, R.; Gebhardt, A.; Guyenot, V.; Schinköthe, W.; Siebenhaar, C.: Aero-statisch gelagerter Impulsantrieb zur Präzisionsmontage in der Mikrotechnik. Tagung Innovative Klein- und Mikroantriebe, Mainz 15./16.05.2001, GMM-Fachberichte 33, S. 61-69.
- /60/ Haug, J.; Schinköthe, W.: Linearer Wanderwellenmotor - Optimierung und Eigenschaften. 47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau 2002, Ilmenau 23.-26.09.2002.
- /61/ Clauß, C.; Schinköthe, W.; Welk, C.: Integrierte Wegmessung in Lineardirektantrieben - Potenziale und Grenzen. Tagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Darmstadt 3./4.03.2004, ETG-Fachberichte 96, S.117-122.
- /62/ Haug, J.; Schinköthe, W.: Linearer Wanderwellenmotor - Ergebnisse einer Motoroptimierung. Tagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Darmstadt 3./4.03.2004, ETG-Fachberichte 96, S. 177-182.
- /63/ Grotz, A.: Motorführung - Linearführung mit integriertem Lineardirektantrieb, <http://www.uni-stuttgart.de/ikff/>, Januar 2005.
- /64/ Clauß, C.; Schinköthe, W.: Integrierte Wegmessung in Lineardirektantrieben - Erschließung neuer Anwendungsbereiche durch Detektion der Flussdichte. VDI-Fachtagung Mechatronik 2005 - Innovative Produktentwicklung, Wiesloch 1./2.06.2005.
- /65/ Clauß, C.; Schinköthe, W.: Integrierte Wegmessung in Lineardirektantrieben - Stand und Ausblick. 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau 2005, Ilmenau 19.-23.09.2005.
- /66/ 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.
- /67/ Pröger-Mühleck, R.; Gebhardt, A.; Guyenot, V.; Schinköthe, W.: DFG-Forschungsvorhaben Automatisierte Justage mit aerostatisch gelagertem Impulsantrieb für die Feinwerk- und Mikrotechnik. Abschlussbericht 2001, Schi 457/4.
- /68/ Schinköthe, W.; Welk, C.: DFG-Forschungsvorhaben Feinwerktechnische Lineardirektantriebe mit integrierter Wegmessung. Abschlussbericht Oktober 2003, Schi 457/6.
- /69/ Clauß, C.; Schinköthe, W.: DFG-Forschungsvorhaben Integrierte Wegmessung in feinwerktechnischen Lineardirektantrieben durch Detektion der Flussdichte im flussführenden Eisen. Abschlussbericht April 2006, Schi 457/8.
- /70/ Schinköthe, W.; Voss, M.: Gleichstromlinearmotor mit integriertem Wegmesssystem. OS DE 196 05 413, 14.02.1996.
- /71/ Schinköthe, W.; Voss, M.; Hartrampf, R.: Elektrodynamischer Gleichstromlinearmotor mit aktiver Klemmung. OS DE 196 05 412, 14.02.1996.
- /72/ Schinköthe, W.; Voss, M.; Irion, K.: Endoskop. OS DE 196 18 355, 08.05.1996.
- /73/ Schinköthe, W.; Voss, M.; Hartrampf, R.: Gleichstromlinearmotor mit integriertem

Wegmesssystem. Gebrauchsmuster DE 297 05 315.9, 25.01.1997.

- /74/ Hartrampf, R.; Schinköthe, W.: Elektromagnetisches Antriebssystem mit integrierter Wegsignalerzeugung. Patentanmeldung, OS 197 48 647 A1, 04.11.1997.
- /75/ Hartrampf, R.; Schinköthe, W.: Electromagnetic drive system with integrated path signal generation. US-Patent US 6 037 739.
- /76/ Schinköthe, W.; Welk, C.: Verfahren zur integrierten Wegsignalerzeugung in Asynchronlinearmotoren. Patentanmeldung, Aktenzeichen 100 25 885.9, 25.05.2000.
- /77/ Schinköthe, W.; Welk, C.: Verfahren zur integrierten Wegsignalerzeugung in Induktionslinearmotoren nach Elihu Thomson. Patentanmeldung, Aktenzeichen 100 36 260.5, 26.07.2000.
- /78/ Hartrampf, R.; Schinköthe, W.: Elektromagnetisches Antriebssystem mit integrierter Wegsignalerzeugung. Patenterteilung, Patentschrift DE 197 48 647 C2, 27.09.2001.
- /79/ Gundelsweiler, B.; Schinköthe, W.: Verfahren zur integrierten Wegmessung in Gleichstromlinearmotoren mit alternierender Anordnung von Permanentmagneten und Flussführungsteilen. Patentanmeldung, Aktenzeichen 102 29 689.8, 27.06.2002.
- /80/ Gundelsweiler, B.; Schinköthe, W.: Verfahren zur integrierten Wegmessung in Gleichstromlinearmotoren unter Ausnutzung von Flussdichteänderungen im magnetbehafteten Teilsystem. Patentanmeldung, Aktenzeichen 102 29 687.1, 27.06.2002.
- /81/ Gundelsweiler, B.; Schinköthe, W.: Hochdynamischer Linearmotor. Patentanmeldung, Aktenzeichen 102 59 601.8, 19.12.2002.
- /82/ Schinköthe, W.; Voss, M.; Irion, K.: Endoskop. Patent DE 196 18 355.
- /83/ Grotz, A.; Schinköthe, W.: Linearmotor mit Selbsthemmung. Patentanmeldung, Aktenzeichen 10 2005 039 267.9, 19.08.2005.

Weitere Veröffentlichungen siehe auch Veröffentlichungen 2007.

Veröffentlichungen im Arbeitsgebiet Präzisions-spritzguss (Auswahl)

- /84/ Tewald, A.; Laage, A.; Thissen, U.: Herstellung langer Kunststoffzeiger durch Spritzgießen. 5ème congrès chronométrie in Besancon, 18.–19. Octobre 1994.
- /85/ Schinköthe, W.; Tewald, A.; Walther, T.: Induction heating as a method for dynamic tempering of injection moulds. 6th international induction heating seminar, Nashville, 13.-15. September 1995.
- /86/ Tewald, A.; Thissen, U.: Angussloses Spritzgießen dünnwandiger Miniaturhülsen. 6ème congrès chronométrie in Biel, 17.–18. Octobre 1996.
- /87/ Tewald, A.; Walther, T.: Induction heating of injection moulds - Experimental results. 7th international induction heating seminar, St Louis Missouri, 22.-25. April 1997.
- /88/ Walther, T.: Optimiertes Betriebsverhalten durch Oberflächenveredelung, Seminar Werkzeug-Formenbau, Technische Vereinigung, Würzburg 10.-11. Juni 1997.
- /89/ Tewald, A.; Walther, T.: Simulation der Induktionserwärmung beim Kunststoffspritzguss, 15. CAD-FEM Users Meeting, Fulda 16.10.1997.
- /90/ Walther, T.: Durch Beschichtungen schneller aus der Form, Plastverarbeiter 48(1997)11, S. 78-83.
- /91/ Schaumburg, C.; Ehrfeld, W.; Schinköthe W.; Walther, T.; Weber L.: Injection Moulding of Microstructures with Inductive Heating, Proceedings Micro System Technologies 1998 Potsdam, p. 679-681.
- /92/ Walther, T.; Schinköthe, W.; Ehrfeld, W.; Schaumburg, C.; Weber, L.: Mikrospritzgießen mit induktiver Werkzeugtemperierung. Vortrag 16. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 10./11.3.1999.
- /93/ Burkard, E.; Walther, T.; Schinköthe, W.: Einfluss von Werkzeugbeschichtungen auf das Entformungsverhalten beim Spritzgießen. Vortrag 16. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 10./11.3.1999.

- /94/ Nguyen, T. N.; Geiger, K.; Walther, T.: Das Fließverhalten von LCP-Schmelzen und seine Auswirkungen auf Morphologie und mechanische Eigenschaften von Spritzgießteilen. Vortrag 16. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 10./11.3.1999.
- /95/ Burkard, E.: Einfluss von Werkzeugbeschichtungen auf das Entformungsverhalten beim Spritzgießen. Vortrag Internationale Tagung Werkzeugbau 1999, 27./28.04.1999.
- /96/ Schinköthe, W.; Walther, T.: Zykluszeiten verringern - Eine alternative Werkzeugtemperierung beim Mikrospritzgießen. Kunststoffe 90 (2000) 5, S. 62-68.
- /97/ Schinköthe, W.; Walther, T.: Reducing Cycle Times - Alternative Mould Temperature Control for Microinjection Moulding. Kunststoffe plast europe 90 (2000) 5, S. 17-19.
- /98/ Burkard, E.: Verbessertes Entformungsverhalten durch Werkzeugbeschichtungen. MM (Maschinenmarkt) 2001 Nr. 22.
- /99/ Walther, T.; Schinköthe, W.: Einsatzmöglichkeiten der induktiven Werkzeugtemperierung beim Spritzgießen. Vortrag 17. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 14./15.3.2001.
- /100/ Schinköthe, W.: Temperierkonzepte für das Mikrospritzgießen im Vergleich. Vortrag 18. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 19./20.3.2003. Tagungsband.
- /101/ Weber, A.; Schinköthe, W.: Vollständig integrierte induktive Beheizung und Impulskühlung von Spritzgießwerkzeugen. Vortrag 19. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 9./10.3.2005. Tagungsband.
- /102/ Burkard, E.; Weber, A.; Schinköthe, W.: Induktive Formtemperierung mit integriertem Induktor, Verfahren - Eigenschaften - Einsatzgebiete. Postervortrag 19. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 9./10.3.2005.
- /103/ Burkard, E.; Weber, A.; Schinköthe, W.: Induktive Formtemperierung mit externem Induktor, Verfahren - Eigenschaften - Einsatzgebiete. Postervortrag 19. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 9./10.3.2005. Tagungsband.
- /104/ Burkard, E.; Schinköthe, W.: Induktive Beheizung von Spritzgießwerkzeugen. SKZ-Fachtagung Spritzgießen von Elastomeren, Würzburg 8./9.03.2006.
- /105/ Schinköthe, W.; Tewald, A.: Verbundprojekt Neuartige Spritzgießtechnologien. Ergebnisbericht des IKFF, Universität Stuttgart Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, 31.12.1995.
- /106/ Schinköthe, W.; Ehrfeld, W.: DFG-Forschungsvorhaben Einfließen von Polymer-schmelzen in kleine Kavitäten beim Spritzgießen mit induktiver Werkzeugtemperierung. Abschlussbericht 1999, Schi 457/1.
- /107/ Rejman, W.; Walther, T.; Schinköthe, W.: Verfahren zur Kontrastierung von organischen Polymeren für mikroskopische Strukturuntersuchungen. Patentanmeldung, Aktenzeichen 102 03 913.5, 28.01.2002.
- Weitere Veröffentlichungen siehe auch Veröffentlichungen 2007.
- Veröffentlichungen im Arbeitsgebiet Zuverlässigkeit feinwerktechnischer Antriebe (Auswahl)**
- /108/ Köder, T.; Schinköthe, W.: Untersuchungen zur Zuverlässigkeit von DC-Kleinstmotoren. Workshop „Systemzuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen“, 27.-28. September 2004, Freudenstadt, veröffentlicht im Jahresbericht des IKFF 2004.
- /109/ Köder, T.; Schinköthe, W.: Untersuchungen zur Zuverlässigkeit und Lebensdauer von DC-Kleinmotoren und Positioniersystemen. 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau 2005, Ilmenau 19.-23.09.2005.
- /110/ Gandy, A.; Jensen, U.; Köder, T.; Schinköthe, W.: Ausfallverhalten bürstenbehafteter Kleinantriebe. F&M Mechatronik 113(2005)11-12, S. 14-17.
- /111/ Köder, T.; Schinköthe, W.: Zuverlässigkeit von elektromechanischen/mechatronischen Systemen am Beispiel feinwerktechnischer Antriebe/Aktorik. Vortrag zum Industrieworkshop der Forschergruppe DFG 460 System-Zuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen, 1.12.2005.
- /112/ Köder, T.; Schinköthe, W.: Zuverlässigkeit von elektromechanischen/mechatronischen

Systemen am Beispiel feinwerktechnischer Antriebe/Aktorik. Vortrag zum Workshop des SFB 614, Paderborn, 19.12.2005.

- /113/ Köder, T.; Schinköthe, W.: Zuverlässigkeit von elektromechanischen/mechatronischen Systemen am Beispiel feinwerktechnischer Antriebe/Aktorik. Zwischenbericht 2005 der Forschergruppe DFG 460 System-Zuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen, Schi 457/7.

Veröffentlichungen 2007

- /114/ Zülch, M.; Burkard, E.; Schinköthe, W.: Optimierter Energieeinsatz durch induktive Erwärmung von Spritzgießwerkzeugen - FEM unterstützte Auslegung von induktiven Heizungssystemen. Vortrag 20. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 14./15.3.2007. Tagungsband.
- /115/ Rothenhöfer, E.; Schinköthe, W.: Piezomotoren - Stand und Potenzial für KFZ-Anwendungen. Vortrag 7. Internationales Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik, 20./21.3.2007. Tagungsband 1, S. 573-586.
- /116/ Rothenhöfer, E.; Schinköthe, W.: Halten ohne Energie - Piezomotoren bieten Potenzial für KFZ-Anwendungen. Transmitter 02/2007, S. 14/15.
- /117/ Clauß, C.; Schinköthe, W.: Integrierte Wegmessung in Lineardirektantrieben - Eine Zusammenfassung der Arbeiten am IKFF. Tagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Augsburg 12./13.06.2007, Tagungsband.
- /118/ Rothenhöfer, E.; Schinköthe, W.: Piezomotoren – Eine Übersicht über Bauformen und Potenzial. Tagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Augsburg 12./13.06.2007, Tagungsband.
- /119/ Lütkebohmert, C.; Jensen, U.; Beier, M.; Schinköthe, W.: Wie lange lebt ein Kleinmotor? F&M Mechatronik 115(2007)9, S. 40-43.
- /120/ Rothenhöfer, E.; Schinköthe, W.: Design of Ultrasonic Resonators using ANSYS Classic and ANSYS Workbench. ANSYS. ANSYS Conference and 25. CADFEM Users“ Meeting, Dresden 21-23.11.2007.

Vorträge anlässlich des Doktoranden-Kolloquiums 2006 und 2007

- /121/ Beier, M.: Zuverlässigkeitsbetrachtungen von mechatronischen Systemen am Beispiel von Kleinplanetenradgetrieben mit Kunststoffverzahnung. IKFF, 19.10.2006.
- /122/ Mochel, F.: Aerostatische Führungen mit statorseitiger Druckluftversorgung für Ein- und Mehrkoordinatenantriebe zur Realisierung freier Läuferbewegungen. IKFF, 16.11.2006.
- /123/ Dannemann, M.: Dimensionierung von Lineardirektantrieben. IKFF, 07.12.2006.
- /124/ Joerges, P.: Dynamische Untersuchungen an Lineardirektantrieben, spez. Rastkraftreduzierung. IKFF, 3.5.2007.
- /125/ Zülch, M.: Induktive Werkzeugtemperierung im Spritzgießprozess - Herausforderungen an den Auslegungsprozess. IKFF, 24.5.2007.
- /126/ Rothenhöfer, E.: Modellierung und Analyse piezoelektrischer Motoren. IKFF, 24.5.2007.

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

Umfangreiche, schriftliche Lehrmaterialien

- /127/ Schinköthe, W.; Hartrampf, R.: Skript zur Vorlesung Konstruktionslehre Feinwerktechnik I. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, Stuttgart 1994.
- /128/ Schinköthe, W.: Skript zur Vorlesung Konstruktionslehre Feinwerktechnik III. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, 3. Aufl. Stuttgart 2006.
- /129/ Schinköthe, W., Burkard, E.: Skript zur Vorlesung Konstruktionslehre Feinwerktechnik III - Teil 2 Optische Funktionsgruppen. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, Stuttgart 2004.
- /130/ Schinköthe, W.: Skript zur Vorlesung Konstruktionslehre Feinwerktechnik IV. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und

Fertigung in der Feinwerktechnik, 5. Aufl.
Stuttgart 2007.

- /131/ Schinköthe, W.; Hermann, M.; Hartrampf, R.; Tewald, A.: Skript zur Vorlesung Aktorik in der Feinwerktechnik. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, Stuttgart.
Teil 1 Vorlesungsskript, 5. Auflage 2006.
Teil 2 Skript zur Übung und zum Praktikumsversuch Piezosysteme / Ultraschallantriebe, 2. Aufl. 2001.
Teil 3 Skript zur Übung und zum Praktikumsversuch Lineare Direktantriebe, 4. Aufl. 2004.
Teil 4 FEM-Kurs ANSYS, 2006.
- /132/ Schinköthe, W.: Skript zur Vorlesung Grundlagen der Feinwerktechnik - Konstruktion und Fertigung. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, Stuttgart.
Teil 1 Vorlesungsskript, 6. Auflage 2006,
Teil 2 Skript Spritzgießen.
- /133/ Schinköthe, W.; Gundelsweiler, B.; Haug, J.: Online-Lehrmaterial zur Vorlesung Aktorik in der Feinwerktechnik II. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, Stuttgart 2002, <http://www.uni-stuttgart.de/ikff/>.
Teil 1 Vorlesungsmaterial,
Teil 2 Material zur Übung Piezosysteme/ Ultraschallantriebe,
Teil 3 Material zur Übung Lineare Direktantriebe.

3.5 Institutsmitarbeiter 2007

Institutsleitung:

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe
Emeritus Prof. Dipl.-Ing. Artur Jung

Sekretariat:

Ulrike Ortner
Margit Reinhardt (Vorruhestand)
Kornelia Wanner

Unbefristeter wissenschaftl. Mitarbeiter:

Akademischer Oberrat
Dipl.-Ing. Eberhard Burkard

Befristete wissenschaftl. Mitarbeiter:

Dipl.-Ing. Michael Beier
Dipl.-Ing. Matthias Dannemann
Dipl.-Ing. Philipp Joerges
Dipl.-Ing. Frank Mochel
Dipl.-Ing. Elmar Rothenhöfer
Dipl.-Ing. Michael Zülch

Modellbau und Versuchswerkstatt:

Ralf Berwanger
Stefan Schneider

Wissenschaftliche Hilfskräfte:

Bailer, Matthias
Hämmerle, Moritz
Hellmann, Mark
Keller, Bastian
Maucher, Andreas
Rausch, Manuel
Reiber, Dirk
Retzbach, Adrian
Rupp, Jochen
Scheu, Christian
Ulmer, Matthias
Voelz, Karsten
Wengert, Nicolai

3.6 Institutsausstattung

- Messlabors mit Messdatenerfassung, Mikroskopen, Weg-, Winkel- und Kraftaufnehmer usw.,
- Laser-Doppler-Vibrometer, Impedanz-, FFT-Analysator,
- Funktionsgeneratoren, optische Wegmesssysteme, Laserinterferometer,
- Oberflächenmessgerät zur Rauheits- und Topographie- sowie Profilmessung (gemeinsam mit IMA, IMK),
- Komplett ausgerüstete Werkstatt mit CNC-Fräsmaschine zur Herstellung von Formen und Prototypen,
- Elektronik- und Ätzlabor, 3 dSPACE-Arbeitsplätze,
- Rasterelektronenmikroskop Zeiss DSM 960,
- 3-Koordinaten-Messmaschine Carl Zeiss, Prismo 9/12/7 HTG VAST,
- Spritzgießmaschine Arburg 270 S / 250-60, Spritzgießmaschine Dr. Boy 22A,
- Magnetisiergerät Technotower 2000,
- Einzelfrequenz-Hochfrequenz-Induktionsgenerator (150 bis 500 kHz),
- scannende Wärmebildkamera Infra-tec Varioscan hr,
- Für FEM-Simulationen und Magnetfeldberechnungen sind die Programme ANSYS und MAXWELL, zur Formfüllung MOLDFLOW und für konstruktive Aufgaben Pro/Engineer, Cadra und Autocad verfügbar.

4 Wissenschaftliche Beiträge

Nachfolgend soll eine Momentaufnahme der derzeitigen Forschungen am IKFF gegeben werden. Die Beiträge im Einzelnen aber auch in Summe erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit und Abgeschlossenheit. Sie sollen einige, in der Vorstellung der Forschungsrichtungen des Institutes bereits angerissene Themenstellungen vertiefen und verdeutlichen. Dazu stellen die wissenschaftlichen Mitarbeiter im ersten Teil ihre Ergebnisse dar. Im letzten Beitrag stellt Herr Prof. Jung seine Gedanken zur Ausbildung im Konstruieren dar, gewissermaßen als Erfahrungsbericht aus 18 Jahren Lehre als Universitätsprofessor.

Die Beiträge im Einzelnen:

Dipl.-Ing. Michael Beier:

Zuverlässigkeitsbetrachtungen von mechatronischen Systemen

Dipl.-Ing. Eberhard Burkard:

Entformungskräfte und Entformungskraftmessungen im Kunststoffspritzguss

Dr.-Ing. Christin Clauß, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe:

Integrierte Wegmessung in Lineardirektantrieben - Eine Zusammenfassung der Arbeiten am IKFF

Dipl.-Ing. Matthias Dannemann:

Vorabschätzungen zur Dimensionierung von Lineardirektantrieben unter Berücksichtigung dynamischer Einflüsse

Dipl.-Ing. Philipp Joerges:

Dynamische Untersuchungen an Linearantrieben, speziell Rastkraftuntersuchungen

Dipl.-Ing. Frank Mochel:

Aerostatische Führungen in Direktantrieben

Dipl.-Ing. Elmar Rothenhöfer:

Dimensionierung und Analyse eines linearen Ultraschallmotors mit zwei Reibkontakten

Dipl.-Ing. Michael Zülch:

Simulativ gestützte Auslegung von induktiven Werkzeugheizsystemen im Kunststoffspritzguss

Prof. em. Dipl.-Ing. Artur Jung:

Zur Ausbildung im Konstruieren

Zuverlässigkeitsbetrachtungen von mechatronischen Systemen

Dipl.-Ing. Michael Beier

Kurzfassung

In den letzten Jahren werden die Forderungen an die Zulieferindustrie in puncto Lebensdaueraussagen immer verschärfter. Die Zulieferteile, hier betrachtet am Beispiel der mechatronischen Systeme DC-Motoren und Kleingetriebe, sollen mit vorgegebenen Lastkollektiven zuverlässig eine vorgeschriebene ausfallfreie Zeit t_0 bzw. eine B_{10} Lebensdauer erzielen. Um diesem gerecht zu werden, setzen die Hersteller auf aufwendige, langwierige Untersuchungen mit Versuchsplanung. Diesbezügliche, kurzfristige Aussagen sind derzeit nicht möglich. Systematische Untersuchungen und mathematische Werkzeuge könnten eine Abhilfe schaffen.

1 Einleitung

Im Herbst 2002 wurde an der Universität Stuttgart eine Forschergruppe ins Leben gerufen, die sich mit der Thematik „Entwicklung von Konzepten und Methoden zur Ermittlung der Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen“ auseinandersetzt. Insgesamt beteiligen sich fünf Institute unterschiedlicher Fachrichtungen an diesem interdisziplinären Thema, das aus Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird.

Am Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik (IKFF) wird in diesem Rahmen das Zuverlässigkeitsverhalten elektrischer und mechatronischer Systeme am Beispiel feinwerktechnischer Antriebe erforscht. In der ersten Projektphase (bis Herbst 2005) wurde hierbei der Schwerpunkt auf DC-Kleinstmotoren gesetzt. Seit der laufenden Folgephase richtet sich der Fokus auf Untersuchungen von Kleinplanetenradgetrieben mit Kunststoffverzahnung.

2 Derzeitige Situation von Zuverlässigkeitsangaben seitens der Hersteller

Um einen Überblick über die derzeitige Marktsituation zu erhalten, wurde zu Beginn der jeweiligen Projektphase einleitend eine Herstellerbefragung basierend auf einer Katalogrecherche durchgeführt. Sowohl bei den DC-Motoren als auch bei den Planetenradgetrieben zeigten sich hierbei ähnliche Verhalten dem Kunden gegenüber. Meist wurde auf Zuverlässigkeitsangaben verzichtet. Begründet wird dieses Verhalten mit dem vielseitigen Einsatz und den sich daraus ergebenden Möglichkeiten.

Im Fall von Wertangaben zeigt sich, dass diese derartig unterschiedlich sind, dass ein vom Kunden angestrebter Vergleich nahezu unmöglich erscheint. Zudem verwirren Aussagen bezüglich der Lebensdauer wie folgt: „zwischen 200 und 10.000 Stunden“. „Die Vielfalt der Anwendungsmöglichkeiten erlaubt keine allgemeingültige Lebensdaueraussage“ (Katalogangabe eines Herstellers).

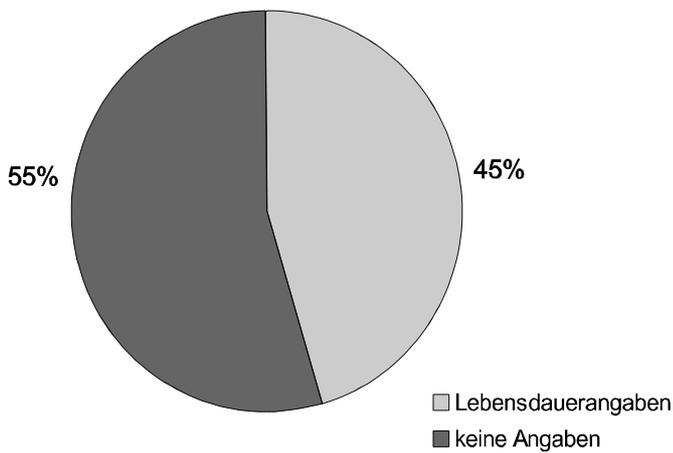


Abb. 1: Lediglich 45 % der untersuchten Herstellerkataloge machten Lebensdaueraussagen

Die Ergebnisse der Katalogrecherche der Getriebehersteller sollen Abb. 1 und Abb. 2 wiedergeben.

Insgesamt machten von 31 gesichteten Produktkatalogen lediglich 45 % der Hersteller eine Wertangabe. Klassifiziert man diese Wertangaben bezüglich ihrer statistischen Maßzahl ergibt sich folgende Auswertung: 21 % der Hersteller geben eine B_{10} Lebensdauer an, 14 % berichten von einer B_{50} Lebensdauer und weitere 21 % formulieren Ihren Zahlenwert als ausfallfreie Zeit t_0 . Die restlichen 44 % geben sonstige Werte an, wobei sich oftmals die oben angegebene Textpassage bezüglich der Laufzeit widerspiegelt.

Betrachtet man die angegebenen Werte B_{10} , B_{50} und t_0 weitergehend mit der hier zur Anwendung kommenden Weibullverteilung, welche das Ausfallverhalten dieser Komponenten sehr gut beschreibt /2/, so ergeben sich aufgrund der benötigten Parameter zur vollständigen Beschreibung große Interpretationsspielräume, siehe /5/. Abb. 3 zeigt die Auswirkungen einer angestellten Interpretation einer B_{10} Wertangabe von 3.000 h und einem variierenden

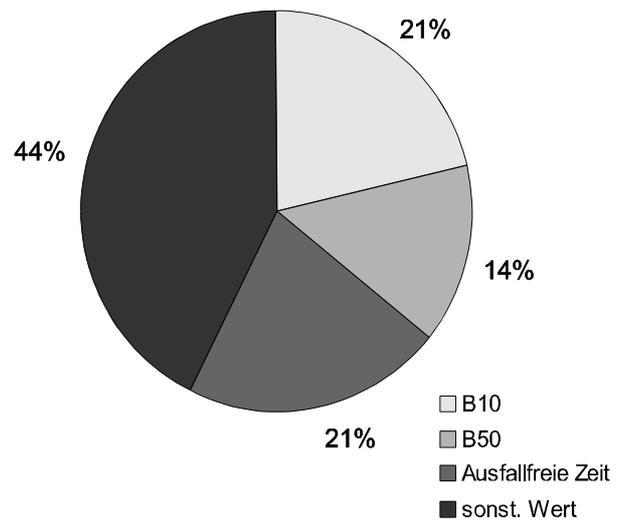


Abb. 2: Das Diagramm demonstriert die unterschiedliche Wahl der Werteangaben

Formfaktor b im Intervall $[1..4]$ (hellgrau dargestellte Fläche), /3/.

Strategische Untersuchungen mit statistischer Auswertung sollen aus diesem Grunde eine neue Möglichkeit schaffen, ohne unscharfe Katalogangaben dem Kunden eine Ausfallwahrscheinlichkeit in Form einer Weibullverteilung für den angefragten Belastungsfall zu ermitteln. Diese soll auf Basis von bereits getesteten Modellen erstellt werden /1/.

3 Grundlegende Überlegungen zu Daueruntersuchungen an Planetengetrieben mit Kunststoffverzahnung

Um die erforderliche Datenlage zu erhalten und daraus ein mathematisches Modell ableiten zu können, wurden vorab Überlegungen bezüglich der Parameterwahl und der Getriebeauswahl zum systematischen Prüfen angestellt.

Die Getriebe beeinflussenden Parameter wurden in zwei Gruppen aufgeteilt, zum einen in die Hersteller bestimmten, zum anderen in die Anwender bestimmten.

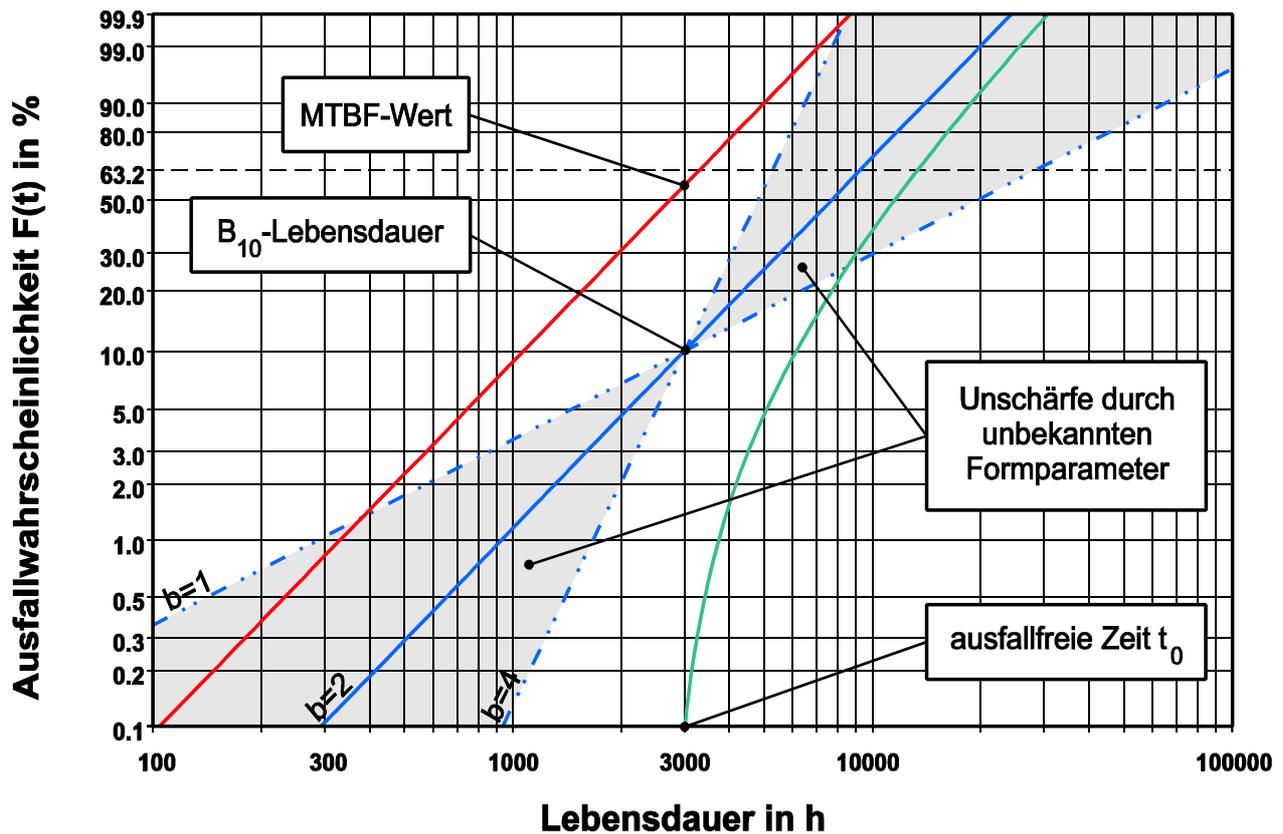


Abb. 3: Sich ergebende Interpretationsspielräume aufgrund unvollständiger Herstellerangaben für eine Wertangabe (t_0 , MTBF, B_{10}) von 3.000 h, nach /5/

Hersteller bestimmte Anwendungsparameter stellen vor allem die konstruktiv bedingten sowie Baugruppenparameter wie Werkstoffpaarung, Fettschmierung, etc. dar. Anwenderparameter lassen sich auf das Abtriebsmoment, die Ausgangsdrehzahl, die Belastungsform und die Belastungsdauer festlegen. Da eine Veränderung der Herstellerparameter nur über den Hersteller selbst ausgelöst werden kann, werden sich die Untersuchungen am IKFF auf variierende Anwendungsparameter aufbauen.

Zusammenfassend soll die Zielstellung der Untersuchungen nochmals anhand einer Abbildung vermittelt werden (siehe Abb. 4). Mit variierenden Benutzerparametern sollen systematische Untersuchungen stattfinden, um das Ausfallverhalten der Prüflinge zu dokumentieren. Im darauf

folgenden Schritt sollen Zusammenhänge zwischen den Belastungsprofilen und den Ausfällen ermittelt und simultan eine Ermittlung des mathematischen Modells erfolgen. Mit diesem besteht dann die Möglichkeit, basierend auf einer Parametervorgabe Ausfallwahrscheinlichkeiten zu generieren und somit diesbezüglich Aussagen treffen zu können. Ein solcher Einsatz wäre zum einen in frühen Entwicklungsphasen, bei der Auslegung von Kundenwünschen, als auch zur Angabe von Lebensdauerwerten unter anwenderspezifischen Gesichtspunkten denkbar.

Untersucht wird eine Getriebebaureihe der Fa. IMS Gear in den unterschiedlichen Stufen und Untersetzungen. Je Stufe werden die niedrigste und die höchste Untersetzung geprüft. Diese beiden stellen je Stufenform die Extrema dar. Zum einen

Benutzerparameter:

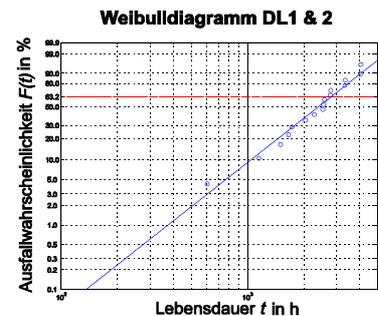
- M_{\max}
- n_{aus}
- Belastung
- Einsatzdauer

Systematische Versuche



Quelle: www.imsgea.com

Ausfallverteilung



Zusammenhänge zw. Benutzerparameter und der Ausfallwahrscheinlichkeit auffinden um Zuverlässigkeitsaussagen in frühen Entwicklungsstadien treffen zu können

Abb. 4: Zielstellung der Getriebeuntersuchungen am IKFF

wirken bei diesen Untersetzungen die höchsten Drehzahlen, zum anderen treten die höchsten Kräfte auf und daraus resultierend die größten Drehmomente.

4 Realisierung der Prüfstände

Um die Belastungsparameter den Prüflingen einzuprägen ist es notwendig, die Ursachen der auftretenden Parameter zu variieren. Die Drehzahl lässt sich über die Motorspannung (U_B) einstellen, ebenfalls die Belastungsform als auch die Dauer. Das einzuprägende Drehmoment kann nicht durch die elektrische Motoransteuerung realisiert werden. Hierzu muss der Abtrieb des Getriebes mit dem gewünschten Moment belastet werden. Eine sehr kostenintensive Möglichkeit ist, dies über sogenannte Hysteresebremsen zu verwirklichen. Diese wurden bereits zur Systemuntersuchung in der ersten Projektphase eingesetzt. Um die Stückzahl der Prüf-

linge zu erhöhen, wurde hier auf eine kostengünstigere Alternative gesetzt.

Dem aktiv untersuchten Prüfling wird das identische System gegenübergestellt und unter Verwendung einer Faltenbalkenkupplung werden diese Komponenten mechanisch miteinander verbunden. Das gegenübergestellte System arbeitet nun als Generator und induziert, angetrieben durch den Prüfling, eine Spannung. Durch einen seriellen Lastwiderstand (R_L) wird dem Generator ein Drehmoment eingepreßt, welches über den Widerstandswert des Lastwiderstandes justiert werden kann (siehe Abb. 5).

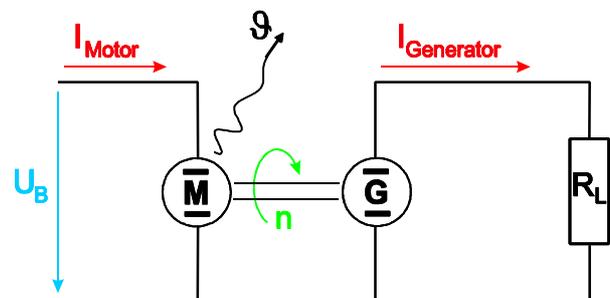


Abb. 5: Elektrische Anordnung der neu entwickelten Prüfstände

Zusätzlich sind Abb. 5 die kontinuierlich kontrollierten Messwerte zu entnehmen. Dabei werden simultan die Drehzahl, die Motorgehäusetemperatur, der Motorstrom und der Generatorstrom aufgezeichnet. Die Betriebsspannung wird zeitweise manuell kontrolliert.

Der neu konstruierte, mechanische Aufbau der drei Prüfstände umfasst jeweils vier Komponentenzellen und eine Systemzelle. Das oben beschriebene Konzept wird in den Komponentenprüfständen eingesetzt und besitzt den in Abb. 6 gezeigten Aufbau. Aus der ersten Projektphase wurden die Prüfstände zur Systemuntersuchung, bestehend aus Ansteuerung und justierbarer Hysteresebremse, beibehalten. Auf eine Beschreibung bezüglich des Aufbaus der System- als auch Motorenprüfstände soll an dieser Stelle verzichtet werden, da diese bereits in /5/ ausführlich behandelt wurden.



Abb. 6: Aufbau der Getriebekomponentenprüfstände

5 Erkenntnisse der Motoruntersuchungen

In Zusammenarbeit mit dem Institut für angewandte Mathematik und Statistik (IMS) der Universität Hohenheim wurden die aufbereiteten Messdaten der Motorun-

tersuchungen mathematisch ausgewertet. Unter Anwendung eines Cox-Modells mit Change-Points (siehe /7/) wurde mit Hilfe von Co-Variablen das Ausfallverhalten der Motoren beschrieben. Folgende Co-Variablen fanden dabei Anwendung: Motorstrom, Belastung, Drehzahl, Motorspannung und Betriebsspannung. Bei der Motorspannung handelt es sich um den Spannungstyp eines DC-Motors einer Baureihe, die Betriebsspannung gibt die tatsächliche Testspannung der Untersuchungen wieder. Nach Aufstellung des mathematischen Modells und Formulierung der Beeinflussung der Co-Variablen wurde ein hypothetisches Motormodell berechnet, siehe Abb. 7. Damit wurde auf Basis der 232 getesteten Motoren ein noch unbeachteter Fall beschrieben. Die gestrichelten Kurven geben hierbei die Vertrauensintervalle der Überlebenswahrscheinlichkeit an, siehe auch /1/.

Um dieses Modell einer Validierung zu unterziehen, wurde zusätzlich ein 18 V Motor auf Basis der untersuchten 12 V und 24 V Motoren berechnet. Diesem wurde dann der reale Fall der getesteten 18 V Motoren gegenübergestellt, siehe Abb. 8. Betrachtet man die konkurrierenden Kurven, so lässt sich daraus erkennen, dass das mathematische Modell mit ausreichender Genauigkeit den Ausfallvorgang beschreiben kann. Zudem muss berücksichtigt werden, dass die hypothetische Berechnung (graue Darstellung) bei der Validierung nur noch auf zwei Drittel der gemessenen Motordaten basiert.

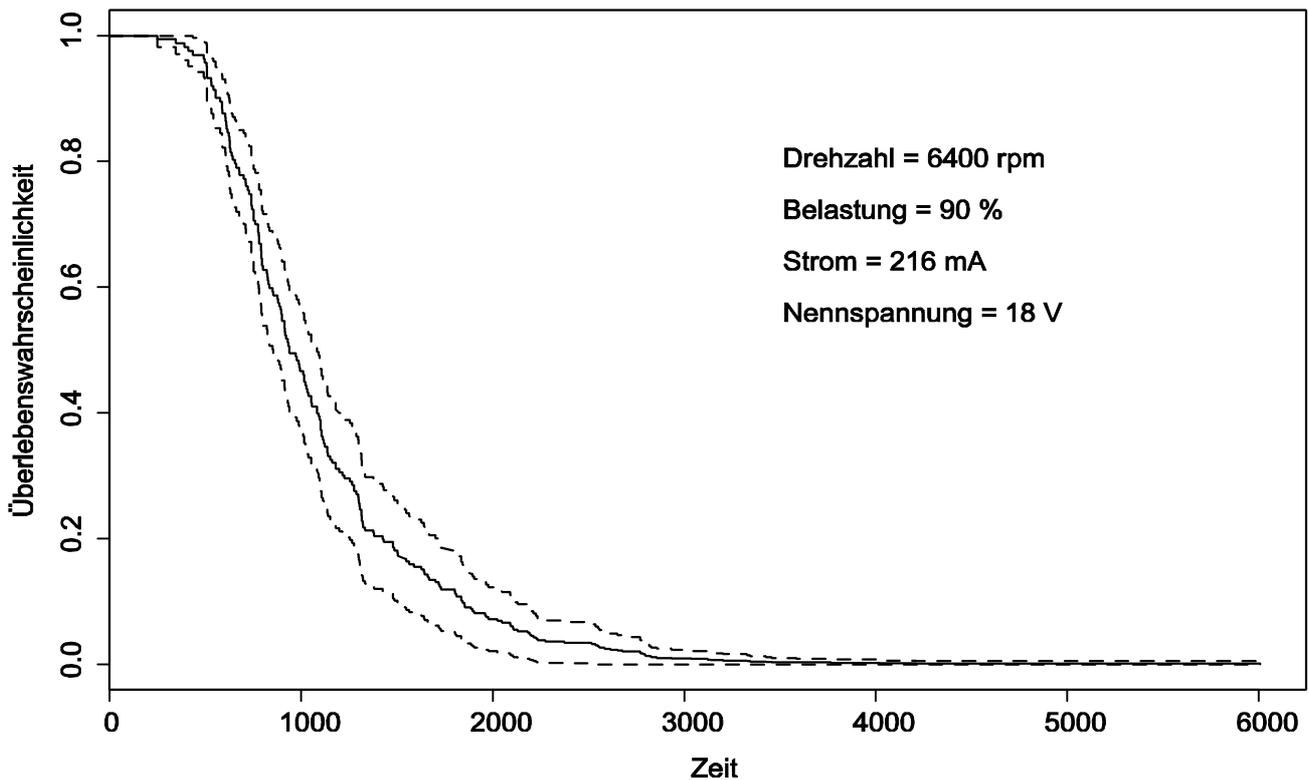


Abb. 7: Berechnete Ausfallwahrscheinlichkeit eines hypothetischen 18 V Motors bei vorgegebenen Laufparametern, /1/

6 Zusammenfassung und Ausblick

In den beiden Projektphasen wurden jeweils, je nach Untersuchungsschwerpunkt, Prüfstände konstruiert. Mit Hilfe dieser wurde eine unzensierte Datensammlung eingeleitet. Die Daten der bereits abgeschlossenen Motorenuntersuchung aus Phase 1 wurden in einer Datenbank organisiert. Nach Auswertung der Motordaten konnte in Kooperation mit dem IMS ein mathematisches Modell zur Beschreibung der Überlebenswahrscheinlichkeit aufgestellt werden. Derzeit ist allerdings nur eine Aussage über die am IKFF untersuchte Baureihe möglich.

Unter Anwendung dieses Cox-Modells mit Change-Points ist es möglich, ungetestete Belastungsbeispiele auszuwerten und eine Aussage in Form einer Ausfallwahrscheinlichkeit zu erhalten. Validiert wurde das Modell durch einen zensierten Datensatz.

Den realen Testergebnissen wurden die zensierten Daten gegenübergestellt und es zeigte sich ein annähernd gleicher Verlauf der Überlebenswahrscheinlichkeit. Ziel der aktuellen Projektphase ist es, mit den bereits konstruierten Prüfständen eine Datensammlung für Planetenradgetriebe mit Kunststoffverzahnung einzuleiten. Auf Basis dieser Daten soll wieder eine mathematische Aufbereitung durchgeführt werden, um ebenfalls anhand der Belastungsparameter Ausfallwahrscheinlichkeiten bzw. Überlebenswahrscheinlichkeiten zu generieren.

Unter dem angesprochenen Aspekt der Herstellerangaben könnte sich durch die mathematische Modellierung ein neues Werkzeug ergeben. Mit diesem wäre der Hersteller in der Lage, dem Kunden zeitnahe Aussagen bezüglich der Anwendungsparameter in Form einer Ausfallstatistik (Weibulldiagramm) anzugeben.

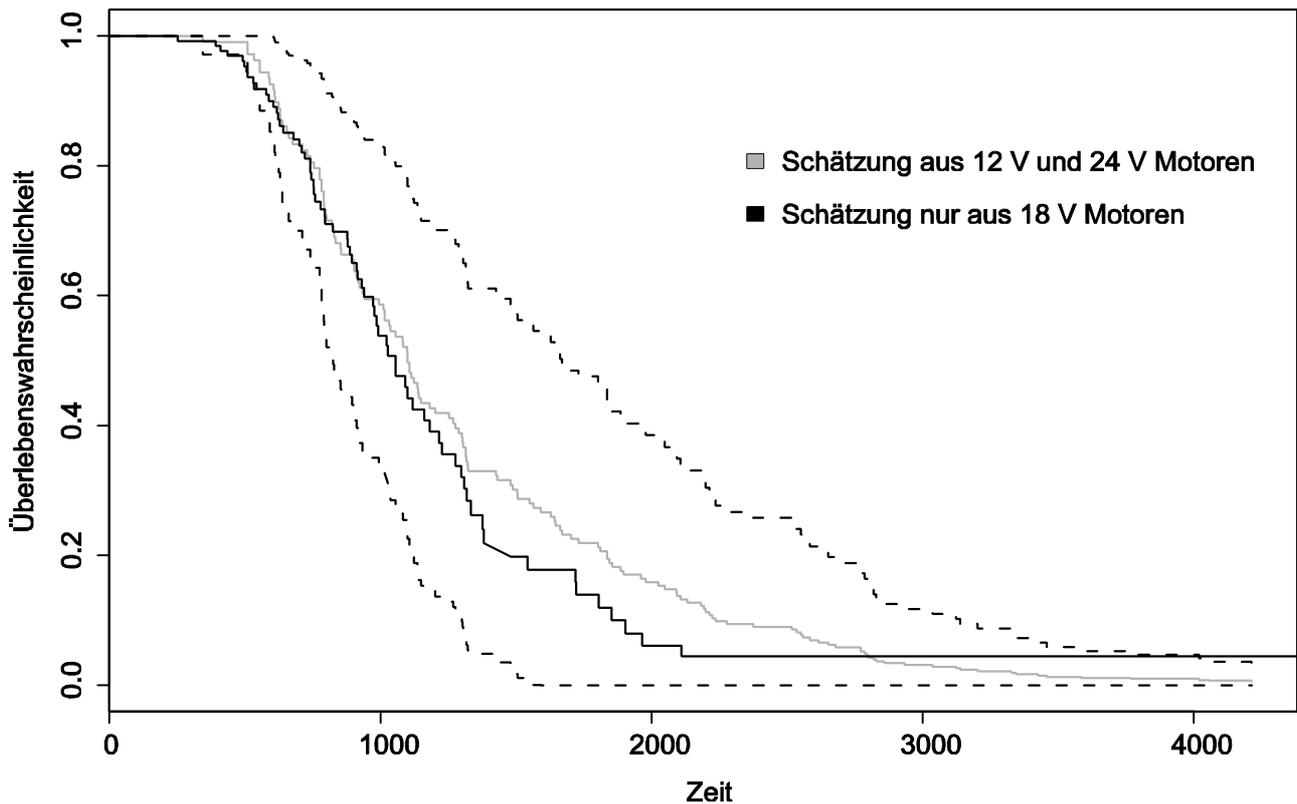


Abb. 8: Validierung des mathematischen Modells unter Gegenüberstellung des realen 18 V Motors mit dem hypothetischen 18 V Motor, /1/

Literatur

- /1/ Beier, M.; Jensen, U.; Lütkebohmert, C.; Schinköthe, W.: Wie lange lebt ein Kleinmotor?, F&M Mechatronik 115(2007)9, S. 40-43, München, Carl Hanser Verlag
- /2/ Bertsche, B.; Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau; Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag 2004
- /3/ Gandy, A.; Jensen, U.; Köder, T.; Schinköthe, W.: Ausfallverhalten bürstenbehafteter Kleinantriebe. Mechatronik F & M 11-12/05, München: Carl Hanser Verlag
- /4/ Gandy, A.; Jensen, U.; Lütkebohmert, C.: A Cox model with change-point applied to an actuarial problem; Brazilian Journal of Probability and Statistics (2005), 19, pp. 93-109
- /5/ Köder, T.: Zuverlässigkeit von mechatronischen Systemen am Beispiel feinwerktechnischer Antriebe, Dissertation, Universität Stuttgart 2006

Entformungskräfte und Entformungskraftmessungen im Kunststoff-spritzguss

Dipl.-Ing. Eberhard Burkard

Kurzfassung

Am IKFF wird seit einigen Jahren die Auswirkung von Werkzeugbeschichtungen bei Spritzgießwerkzeugen auf das Entformungsverhalten untersucht. Mit dem am Institut vorhandenen Versuchswerkzeug können mit geringem Aufwand verschiedene Werkzeug-Kunststoff-Paarungen untersucht werden.

Durch die Vielzahl der beim Entformen wirksamen Parameter können 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.

1 Einleitung

Die Produktion von Kunststoffspritzgussteilen wird von steigenden Ansprüchen geprägt. Nicht nur der Kostendruck, sondern auch der Einsatz von neuen hochtechnischen Formmassen und die Kom-

plexität der Teile führen zu extremeren Verarbeitungsbedingungen und damit auch steigenden Ansprüchen an das Formwerkzeug. Zunahme von Verschleiß und Belagbildung sowie ein schlechteres Entformungsverhalten sind oft die Folge. Ein Ansatz diese Probleme zu lösen, ist der

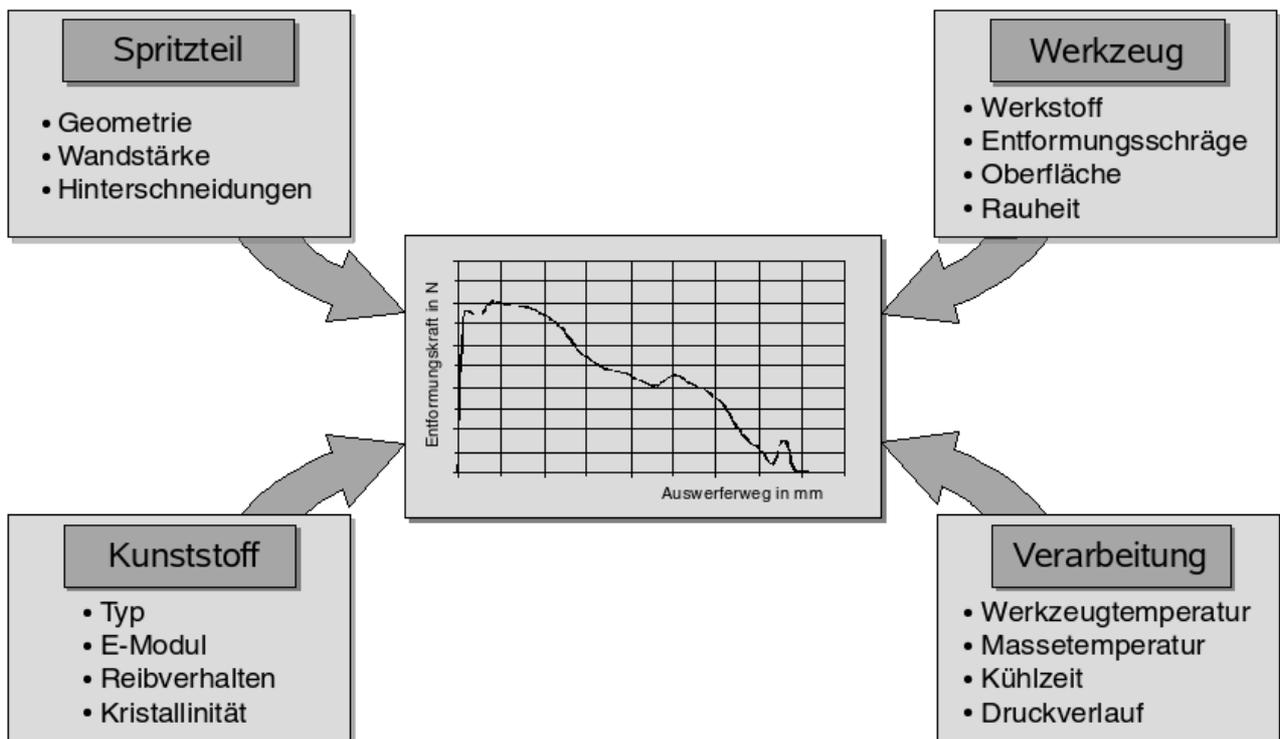


Abb. 1: Einflussfaktoren auf die Entformungskraft /1/

Einsatz von Oberflächenbeschichtungen im Formwerkzeug.

Das Entformungsverhalten des Spritzteils wird von verschiedenen Faktoren bestimmt. Um diese Einflüsse zu untersuchen, wurden am IKFF verschiedene Spritzgießwerkzeuge entwickelt und teilweise aufgebaut, mit denen es möglich ist, einige der Einflussfaktoren auf das Entformungsverhalten zu untersuchen.

2 Einflussfaktoren auf die notwendige Entformungskraft

In Abbildung 1 sind die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Entformungskraft dargestellt. In den am IKFF vorgenommenen Untersuchungen wird ein Teil der Faktoren näher betrachtet.

3 Bauformen von Testwerkzeugen

Bei der Entwicklung von Spritzgusswerkzeugen zur Untersuchung der Entformungskraft muss darauf geachtet werden, dass kein Ablösen des Spritzlings von der

Formoberfläche vor Beginn des Auswerfens stattfinden kann. Ein vorzeitiges Ablösen führt dazu, dass nur die Festkörperreibung der Materialpaarung gemessen wird und die durch Adhäsion verursachten Entformungskräfte nicht erfasst werden. Dies führt zu fehlerhaften Ergebnissen, da die Adhäsionseffekte teilweise deutlich dominieren.

Für die ersten Untersuchungen zur Entformungskraft wurde zu Beginn der 90er Jahre am IKFF ein Werkzeug mit einer Schraubdeckelkavität entwickelt und aufgebaut [2/].

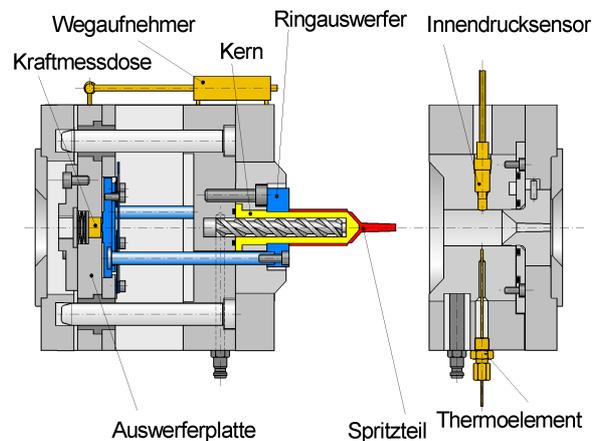


Abb. 3: Entformungskraftwerkzeug

Es zeigte sich jedoch, dass die aufwendige Gewindegeometrie eine Untersuchung von

Eigenschaften	Formteilgeometrien									
	rechteckige Platte	zylindrische Hülse	Schelbe	Ring	Gewindedeckel					
undefinierte Einflüsse auf die Messung	Erhöhung der Flächenpressung, während Messung	--	nur Abweichungen von idealer Form	+	Reibfläche im Angussbereich undefiniert	--	nur Abweichungen von idealer Form	+		
Beschädigung der Reibfläche	nein	+	„Fressen“ des Ringauswerfers	-	nein	+	nein	+		
Herstellung der Reibfläche	flachsleifen	++	rundsleifen, polieren/rollieren	-	flachsleifen	+	flachsleifen	+	sehr aufwendig bei genauen Oberflächen	--
vorzeitiges Lösen	muss verhindert werden	-	nein, Normalkraft ergibt sich aus Schwindung	+	muss verhindert werden	-	muss verhindert werden	-	nein, Normalkraft ergibt sich aus Schwindung	+

Abb. 2: Werkzeugbauformen

einer größeren Zahl von Beschichtungen unmöglich macht. Daraufhin wurde ein Hülsenwerkzeug mit einem auswechselbaren Kern entwickelt und aufgebaut, das mit wenigen Änderungen bis heute eingesetzt wird.

Bei diesem Werkzeug sind mit vertretbarem Aufwand verschiedene, vergleichbare Kerne herstellbar, so dass auch eine größere Zahl von Beschichtungen und Oberflächenrauheiten untersucht werden kann. Zusätzlich ist durch die Geometrie kein vorzeitiges Ablösen von der Kavitätsoberfläche möglich.

Ein Nachteil bei der Hülsengeometrie ist die unbekannte Normalkraft. Sie wird durch die Schwindung der Formmasse bestimmt und kann nicht gemessen bzw. eingestellt werden.

4 Einfluss der Kombination von Kunststoff, Werkzeugmaterial und -oberfläche

Der Kraftverlauf bei der Entformung kann in zwei Bereiche aufgeteilt werden. Zu Beginn der Entformung wird der Spritzling von der Werkzeugwand gelöst. Danach wird bei Werkzeugen mit Entformungsschräge nahezu keine Kraft für den weiteren Auswerfvorgang benötigt. Bei Werkzeugen ohne Entformungsschräge schließt an das Lösen ein Gleitvorgang bis zum vollständigen Auswerfen des Teils an.

Die notwendige Entformungskraft während des Gleitvorgangs beruht hauptsächlich auf Reibkräften, die der Bewegung des Spritzlings relativ zur Kavität entgegenwirken. Die für die Reibung ursächlichen Normalkräfte resultieren aus der Schwindung des Kunststoffs während der Verarbeitung.

In Abbildung 2 ist beispielhaft das pVT-Diagramm für ein typisches ABS dargestellt, anhand dessen die sehr deutliche Verarbeitungsschwindung S_V beim Spritzgießen erkennbar ist.

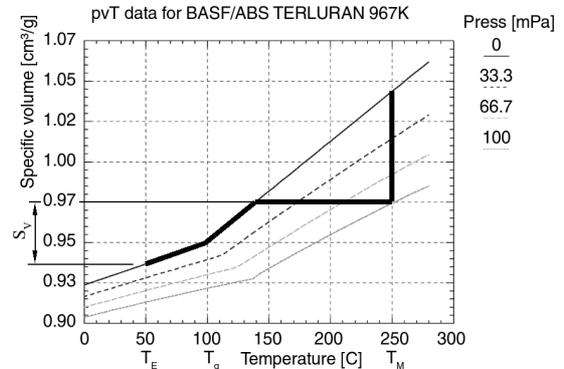


Abb. 4: Schwindung von Terluran 967K

Kommt es während des Gleitvorgangs nicht zu Verschleiß am Spritzling kann der Gleitvorgang analog zur Festkörperreibung betrachtet werden. Verschleißt der Spritzling während des Gleitens, treten zusätzliche Effekte wie Aufschmelzen der Formmasse und evtl. erneutes Verschweißen, Ausbrechen von Kunststoffpartikeln, die sowohl reibungsvermindernd als auch verstärkend wirken können, und ähnliches auf.

Zu Beginn des Auswerfens kann die notwendige Losbrechkraft nicht mit der Haftreibungssituation der Festkörperreibung verglichen werden, da die Kraft, die zum Lösen des Spritzgussteils vom Werkzeug notwendig ist, auch von der Adhäsion der Kunststoff-Werkzeugoberflächen-Paarung abhängt.

Teilweise wird die Kraft durch mechanische Adhäsion, also mechanischen Verankerungen des Teils in der Oberflächenstruktur des Werkzeugs, verursacht. Die Höhe der Kraft hängt dabei von der Normalkraft, der Oberflächenrauheit und der Abformgüte der Werkzeugoberfläche ab.

Bis zu einem Grenzwert kann dabei gesagt werden, dass je glatter die Werkzeugoberfläche ist, desto weniger Verzahnungen existieren und desto weniger Entformungskraft notwendig ist. In Abbildung 5 ist dies beispielhaft für ein ABS (Terluran 967K, BASF) dargestellt.

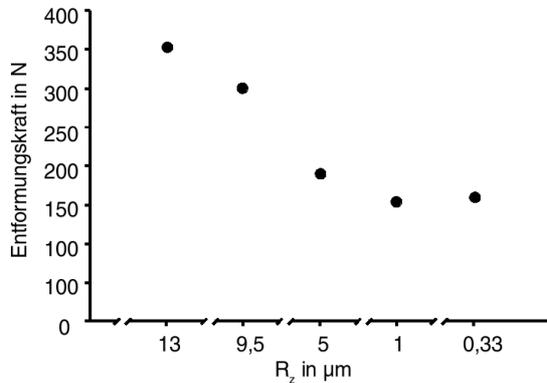


Abb. 5: Einfluss der Oberflächenrauheit

Wird die Oberflächenrauheit weiter reduziert führt dies zu keiner weiteren Abnahme der Entformungskraft, da ab einem bestimmten Punkt der Einfluss der mechanischen Adhäsion nur noch eine untergeordnete Rolle spielt. Es überwiegt dann der Einfluss der spezifischen Adhäsion.

Unter der spezifischen Adhäsion fasst man alle chemischen und physikalischen Erscheinungen zusammen, die auf Valenzkräften beruhen. Sie kann unterteilt werden in

- Ausbildung zwischenmolekularer Kräfte in der Grenzfläche,
- Ausbildung chemischer Bindungen,
- thermodynamische Vorgänge (z. B. Benetzungskräfte) in der Grenzschicht,
- Mikroverzahnung von Polymermolekülen und den Reaktionsschichten der Werkzeugoberfläche und
- Diffusionsvorgänge zwischen Polymer und Werkzeugoberfläche.

Spezifische Adhäsion tritt auf, wenn Moleküle zweier Stoffe einander so weit angenä-

hert werden, dass sie in Wechselwirkungen treten können. Dies ist nur möglich, wenn einer der Partner, beim Spritzguss der Kunststoff, im flüssigen Zustand vorliegt. Beide Partner müssen dabei in der Lage sein, den anderen Stoff zu adsorbieren. Hier ist der Aufbau und die Zusammensetzung der Oberflächen entscheidend, und die Polymerschmelze muss eine ausreichende Benetzung der Werkzeugoberfläche erreichen, damit sich genügend Haftbrücken bilden können.

5 Einfluss der spezifischen Adhäsion

Die spezifische Adhäsion hängt stark von der Werkstoffkombination und der Benetzungsgüte ab.

Spritzbedingungen			
Kunststoff	TERLURAN 967K		
Beschichtung	TiN gebläntzt	t _{Masse}	250 °C
Rz (axial/radial)	1,92/2,86 µm	t _{Form}	47,9 °C
Formschräge	0°	d _{Schnecke}	22 mm
Spritzgussmaschine	BOY 22M	Form	MEVEK
Ablaufprogramm	MEVEKABS.006	Log-Datei	02bcpe.log

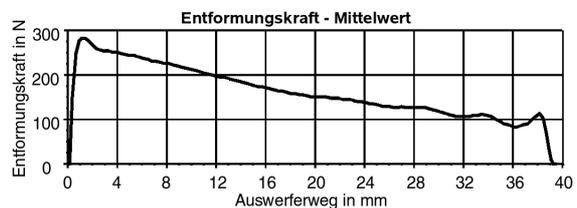


Abb. 6: Entformungskraftmessung ABS-TiN

Abbildung 6 zeigt einen nur sehr schwach ausgeprägten Einfluss bei einem ABS in Kombination mit einem mit Titanitrid beschichteten Kern mit mittlerer Oberflächenrauheit.

Abbildung 7 zeigt dagegen eine sehr stark ausgeprägte spezifische Adhäsion bei einem sehr glatten Kern mit einer Silizium-Kohlenstoff-Stickstoff-Beschichtung und einem PE (Lupolen 1840H, BASF) niedriger Dichte als Formmasse.

Die spezifische Adhäsion ist sehr stark vom verwendeten Kunststoff abhängig.

Spritzbedingungen			
Kunststoff	LUPOLEN 1840H		
Beschichtung	SiCN(FHG) gegläntzt	† Masse	235 °C
Rz (axial/radial)	0.23/0.34 µm	† Form	33.6 °C
Formschräge	0°	d Schnecke	22 mm
Spritzgussmaschine	BOY 22M	Form	MEVEK
Ablaufprogramm	MEVEK_PE.006	Log-Datei	16hbnf.log

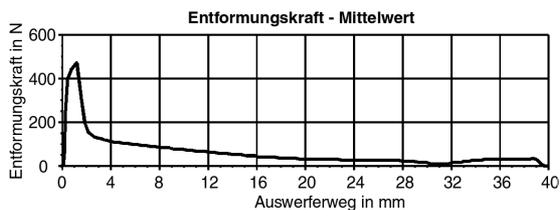


Abb. 7: Entformungskraftmessung LDPE-SiCN

Schon sehr geringe Änderungen, z. B. durch Beimischung von Additiven, beeinflussen die notwendige Entformungskraft stark. Beispielsweise eine Beimischung von 3 % Antistatikum zu einer ansonsten gleichen Metallocen-Polypropylen-Type führt bei gleichen Versuchsbedingungen zu einem deutlichen Abnehmen der notwendigen Entformungskraft (siehe Abbildung 8).

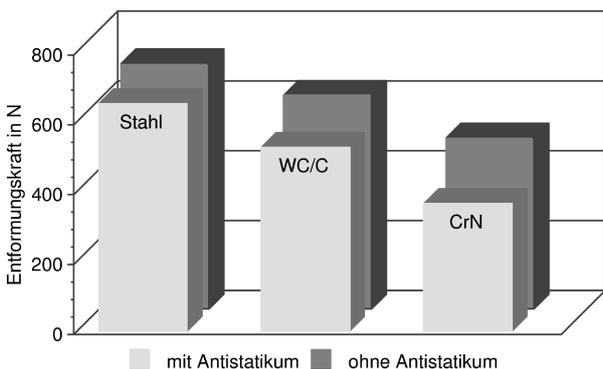


Abb. 8: Einfluss von Additiven

6 Einfluss von Formabweichungen

Bei allen Untersuchungen mit dem Werkzeug zur Entformungskraftmessung treten

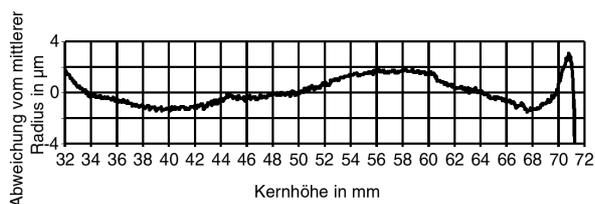


Abb. 9: Abweichungen von idealer Zylinderform

auffällige Welligkeiten in den gemessenen Kraftdiagrammen auf. Bei sehr weichen Kunststoffen (vgl. Abbildung 7) sind die Welligkeiten nur schwach ausgeprägt, bei steifen Kunststoffen treten sie sehr stark in Erscheinung. Diese Welligkeiten werden zum größten Teil durch Abweichungen von der idealen Zylinderform der Hülsen verursacht.

Die auswechselbaren Werkzeugkerne für das Hülsenwerkzeug werden von Hand poliert. Bei dieser Bearbeitung ist es leider nicht vermeidbar, dass Durchmesserabweichungen im Bereich von wenigen Mikrometern entstehen. Insbesondere beim Übergang zur keglichen Spitze (ganz rechts in Abbildung 9) sind bei allen polierten Kernen deutliche Abweichungen vorhanden.

Beim Entformen führen diese Abweichungen zu einem Aufweiten und Zusammenziehen der Hülse, was zu einer zusätzlichen Normal- und damit auch Entformungskraft führt.

Ansatzweise kann dieser Effekt durch eine FEM-Simulation einer realitätsnahen Kerngeometrie gezeigt werden. In Abbildung 10 ist die gemessene Entformungskraft der mittels FEM berechneten Kraft eines Kerns mit und ohne Abweichungen von der Zylinderform gegenübergestellt. Bis auf die Spitze am Ende der Entformung und den absoluten Wert der Entformungskraft ist eine gute Übereinstimmung erkennbar.

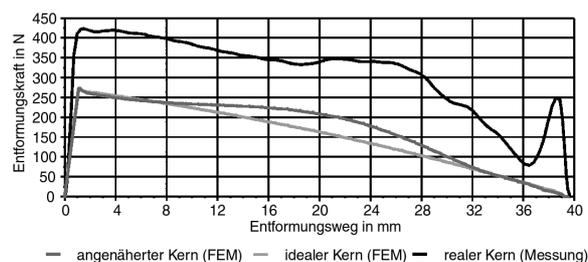


Abb. 10: gemessene und FEM-berechnete Entformungskraft

7 Einfluss der Werkzeugbeschichtung

In Abbildung 11 ist der Einfluss von verschiedenen Werkzeugbeschichtungen auf die Entformungskraft bei einem PA66 (Ultramid A3W, BASF) dargestellt.

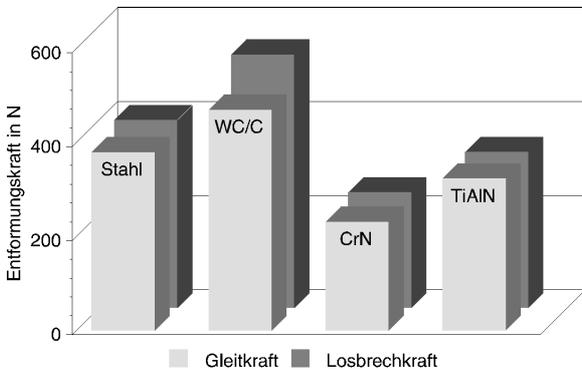


Abb. 11: Entformungskraft bei PA66, glatte Kerne

In Abbildung 12 sind die Messergebnisse für ein POM (Ultraform N2320, BASF) dargestellt. Bei allen Messungen war das

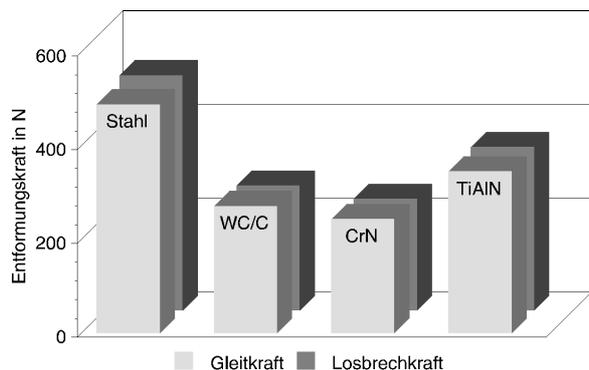


Abb. 12: Entformungskraft bei POM, glatte Kerne

verwendete PA66 und das POM gleich vorgetrocknet und auch die anderen Versuchsbedingungen waren jeweils identisch. Man sieht, dass die verschiedenen Beschichtungen die notwendige Kraft zum anfänglichen Lösen des Spritzlings, als auch die Gleitkraft während des Entformens sowohl erhöhen als auch erniedrigen können und dass je nach Kunststofftyp der Einfluss der Beschichtung sehr stark variieren kann.

8 Einfluss der Entformungstemperatur

Im folgenden Bild ist beispielhaft der Einfluss der Entformungstemperatur aufgezeigt. Wie zu erwarten, nimmt die notwendige Entformungskraft aufgrund der geringeren Schwindung bei höheren Temperaturen ab.

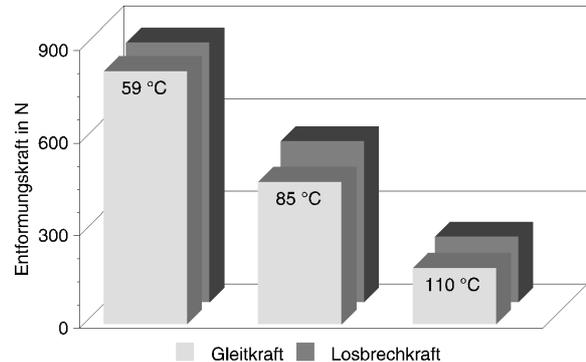


Abb. 13: Entformungskraft bei POM, glatte Kerne

9 Zusammenfassung

Mit dem am IKFF vorhandenen Werkzeug zur Entformungskraftmessung können einige der Einflussfaktoren auf das Entformungsverhalten von Spritzgussteilen untersucht werden.

Durch auswechselbare Kerne können verschiedenen Werkzeugoberflächen und -beschichtungen untersucht werden.

Aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren kann keine allgemeingültige Berechnungsformel aufgestellt werden.

Literatur

- 1/ Walther, Th.: Einfluß von Verschleißschutzschichten auf die Entformungskraft beim Spritzgießen, Diplomarbeit IKFF Stuttgart, 1996
- 2/ Basche, U.: Entwicklung und Erprobung eines Versuchswerkzeuges zur Messung des Entformmoments beim Spritzgießen von Gewindedeckeln, Studienarbeit IKFF Stuttgart, 1990

Integrierte Wegmessung in Lineardirektantrieben – Eine Zusammenfassung der Arbeiten am IKFF

Dr.-Ing. Christin Clauß, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe

Kurzfassung

Elektrodynamische Linearmotoren besitzen zunächst keine internen Maßverkörperungen und benötigen deshalb externe Wegmesssysteme zum Betrieb im geschlossenen Regelkreis oder zur Kommutierung. Es stellt sich deshalb die Frage, ob ausgewählte Motorparameter als inhärente sensorische Eigenschaften genutzt bzw. auch gezielt eingebracht werden können. In den zurückliegenden Jahren wurden am Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik (IKFF) derartige Ansätze untersucht. Einige sollen hier vorgestellt werden.

1 Eingrenzung der Antriebe

Lineare Bewegungen in der Fein- und Mikrotechnik werden zunehmend durch Lineardirektantriebe realisiert. Sie bieten Voraussetzungen für eine höhere Dynamik, einen einfachen, kostengünstigen Aufbau, sie besitzen ein hohes Miniaturisierungspotenzial und benötigen keine Getriebe. Im Beitrag stehen Lineardirektantriebe des unteren Leistungsbereiches nach dem elektrodynamischen Prinzip, also Gleichstromlinearmotoren, im Mittelpunkt. Als mögliche Bauformen kommen dabei Linearmotoren mit bewegten Spulen aber auch Antriebe mit bewegten Magneten bzw. Magnetkreiskomponenten in Betracht. Hinsichtlich ihrer konstruktiven Gestaltung können diese Antriebe rotationssymmetrisch (Tauchspulmotoren), prismatisch (Kastenspulensysteme) oder auch flach (Flachspulmotoren) ausgeführt sein.

Derartige Motoren besitzen keine internen Maßverkörperungen. Sie stellen kontinuierliche Antriebe dar und erfordern deshalb für Positionieranwendungen geschlossene Regelkreise und somit Weg-

messsysteme, gegebenenfalls auch zur Kommutierung. Es stellt sich deshalb die Frage, ob Motorparameter inhärente sensorische Eigenschaften zeigen oder solche durch Modifikation der Motorkonstruktion gezielt eingebracht werden können. Dies würde mechanisch einfache, weniger komplexe und kostengünstige Antriebe ermöglichen, in denen ein Wegmesssignal auf rein elektronischem Wege ohne zusätzliche externe Messsysteme generiert werden kann.

Am Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik (IKFF) der Universität Stuttgart wurden in den letzten Jahren mit Unterstützung durch die DFG umfangreiche Untersuchungen vorgenommen, um diese Frage für verschiedene Antriebsbauformen zu untersuchen [1-8]. Die Ergebnisse sollen nachfolgend vorgestellt werden.

2 Nutzbare inhärente sensorische Eigenschaften

Betrachtet man oben genannte Linearmotoren, so zeigen sich insbesondere zwei zur Wegmessung geeignete inhärente

sensorische Eigenschaften. Bei Systemen mit bewegten Spulen, wie Tauchspulantrieben, umfassen diese Spulen bei Bewegung feststehende Eisenteile des Rückschlusses mit unterschiedlicher Flussbelastung und somit unterschiedlicher Permeabilität. In Antrieben mit bewegten Magnetkreiskomponenten oder Magneten, verändert sich dagegen bei Bewegung die Position eines beispielsweise eisenbehafteten Läufers innerhalb einer Wicklung und damit die Induktivität dieser. Auch hier ist eine sensorische Eigenschaft erkennbar. Abb. 1 zeigt zugehörige Motorbauformen.

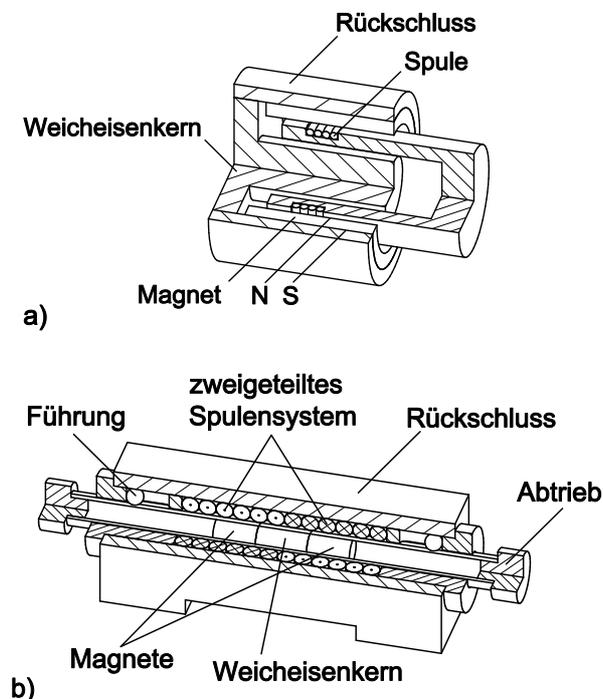


Abb. 1 Antriebe mit sensorischen Eigenschaften
a) mit bewegter Spule (Kurzspulsystem)
b) mit bewegtem Magnetsystem (Langspulsystem)

Dies trifft sowohl auf rotationssymmetrische als auch auf prismatische Bauformen zu. Lediglich Flachspulsysteme entziehen sich beiden Einflüssen, da sie keinen flussführenden Kern umfassen. Nachfolgend soll die integrierte Wegmessung deshalb eingegrenzt werden auf rotationssymmetrische oder prismatische

Bauformen mit umfassten flussführenden Komponenten, die feststehend oder auch beweglich sein können.

3 Detektion von Flussdichteänderungen zur Wegmessung

Die Flussdichte im Magnetkreis bzw. die sich dadurch im Weicheisen einstellende Permeabilität eignet sich als inhärente sensorische Eigenschaft. Die Messung der Flussdichte zur Läuferpositionsbestimmung über zusätzliche Bauelemente wie Hall-Sensoren oder magnetoresistive Sensoren ist bereits Stand der Technik. Diese zusätzlichen Bauelemente sollen durch die integrierte Wegmessung jedoch vermieden werden. Die Flussdichte kann aber auch über die Permeabilität aus der Impedanz oder Induktivität einer Wicklung ausgelesen werden, insbesondere bei Linearmotoren mit Kurzspulsystemen, die einen Kern umfassen und dessen Parameter bei der Bewegung quasi abtasten können. Zur Erläuterung sei der einfache Tauchspulmotor aus Abb. 1 nochmals hinsichtlich seines Magnetkreises betrachtet, Abb. 2.

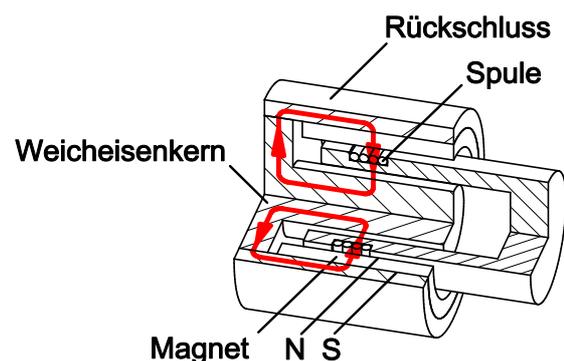


Abb. 2 Magnetkreis eines Tauchspulmotors

Die einsträngige Wicklung ist hier als Kurzspulsystem ausgeführt, das Feld wird beispielsweise durch einen radial magnetisierten Magnetring oder Segmente erzeugt. Bedingt durch diesen Aufbau weist

der weichmagnetische Kern des Antriebs keine konstante Flussdichte auf, wie Abb. 3 verdeutlicht. Hier ist also keine Relativbewegung zwischen Eisenteilen des Magnetkreises nötig, vielmehr erfasst die Wicklung positionsabhängige Flussdichten im festen Magnetkreis. Voraussetzungen für eine geeignete und erfassbare Flussdichteänderung sind dabei eine monoton verlaufende Permeabilität im Weicheisenkern und eine den Fluss umfassende Spule, vorzugsweise Kurzspule wegen der höheren Sensibilität. Insbesondere die erste Voraussetzung ist dabei gezielt bei der Magnetkreisauslegung zu berücksichtigen.

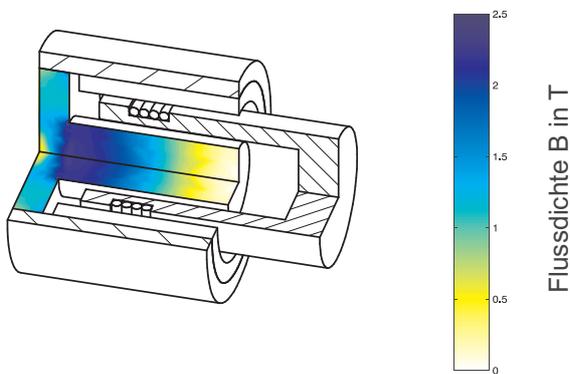


Abb. 3 Flussdichte im Kern des Tauchspulmotors (Simulation)

Allein mit Hilfe der Antriebsspule besteht zunächst keine Möglichkeit zur direkten Flussdichtemessung, es ist also auf die abgeleitete Größe Permeabilität $\mu = \mu_0 \mu_r$ auszuweichen. Um sie als positionsabhängige Messgröße nutzen zu können, muss diese, wie bereits erwähnt, einen monotonen Verlauf über dem Läuferweg aufweisen. Da die Permeabilität weichmagnetischer Werkstoffe ein ausgeprägtes Maximum bei einer Flussdichte von 0,5 T bis 0,75 T aufweist, ist es nicht ausreichend, die Feldverteilung im magnetischen Kreis des Motors dahingehend zu optimieren, dass sich ein monotoner

Flussdichteverlauf ohne nennenswerte Sättigung über dem Läuferweg ergibt. Es ist vielmehr auch notwendig, Zonen geringer Flussdichte zu vermeiden, da hier die maximale Permeabilität wieder unterschritten wird und kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Permeabilität und Flussdichte mehr gegeben ist. Abhilfe ist hier durch zusätzliche Maßnahmen, wie z. B. kegelförmige Senkungen im Kern, möglich.

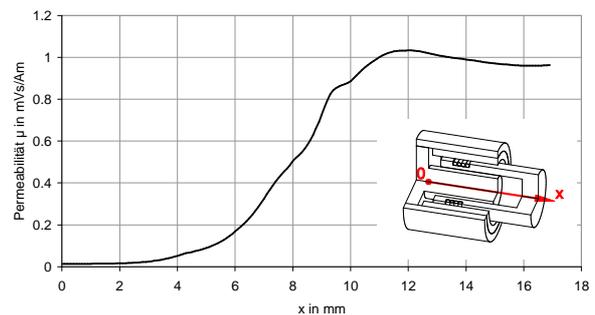


Abb. 4 Permeabilität in einem Tauchspulmotor (Simulation; Kernlänge 17 mm)

Für einen beispielhaft ausgewählten Tauchspulantrieb ergibt sich über der Kernlänge die in Abb. 4 dargestellte Permeabilität. Eine eindeutige Zuordnung von Läuferposition und Permeabilität ist hier nur bis zu einem Hub von 12 mm gegeben, der Bewegungsbereich ginge allerdings eigentlich bis 17 mm. Die Permeabilitätsänderung kann letztlich als Änderung des komplexen Widerstandes Z der Spule bzw. der Induktivität L erfasst werden, für die allgemein gilt:

$$L = n^2 \mu_0 \mu_r \frac{A}{l} \quad (1)$$

Sie ist direkt von der Permeabilität des umfassten Kernmaterials abhängig. Aber auch der Gesamtwiderstand, der sich aus dem Gleichstromwiderstand der Wicklung und dem Ersatzwiderstand der Kernverluste zusammensetzt, zeigt läuferpositi-

onsabhängige Änderungen. Die Ursache hierfür liegt in den Hystereseverlusten, die zusammen mit Wirbelstrom- und Nachwirkungsverlusten die Kernverluste bilden.

Auch in mehrsträngigen, heteropolaren Systemen kann eine integrierte Wegmessung nach dem Verfahren der Flussdichtedetektion realisiert werden. Dazu wurde ein dreisträngiger Antrieb in rotations-symmetrischer Bauweise untersucht, Abb. 5.

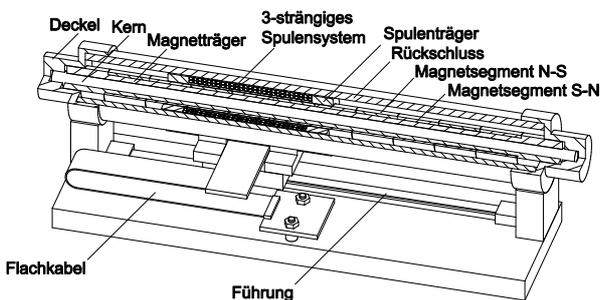


Abb. 5 Dreisträngiger, rotations-symmetrischer Linearmotor mit integrierter Wegmessung

Kern und Magnetträger bestehen aus Automatenstahl (9SMn28k), auf dem Magnetträger sind die Magnete in Form von diametral magnetisierten Viertelsegmenten aufgeklebt. In diesem Kern ergibt sich ein periodischer Flussdichteverlauf mit lokalen Maxima an den axialen Fügestellen der Magnete. Eine Messung der Spuleneigenschaften mit einem Impedanzanalysator ergab die in Abb. 6 dargestellten Ergebnisse.

Jeder Antriebsstrang zeigt einen periodischen Verlauf der Induktivität. Dabei ist die Phasenverschiebung zwischen den einzelnen Strängen so groß, dass ein inkrementelles Messsystem aufgebaut werden kann.

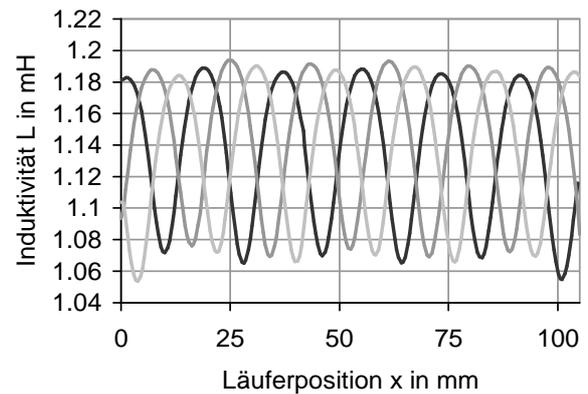


Abb. 6 Induktivitätsverlauf in den drei Strängen

4 Detektion von Induktivitätsänderungen zur Wegmessung

Die Induktivität ist dann als interne inhärente sensorische Eigenschaft zur Wegmessung nutzbar, wenn möglichst große lineare, mindestens aber monotone Induktivitätsänderungen in Spulen oder Teilspulen von Linearmotoren bei Relativbewegung von Läufer und Stator auftreten und erfassbar sind. Dies trifft insbesondere auf Motoren mit bewegten Magneten beziehungsweise bewegten Magnetkreiskomponenten in feststehenden Langspulensystemen zu, aber auch bei Umkehrung der beweglichen Komponente (bewegtes Spulensystem). Abb. 7 verdeutlicht das Prinzip an einem einsträngigen homopolaren Linearmotor.

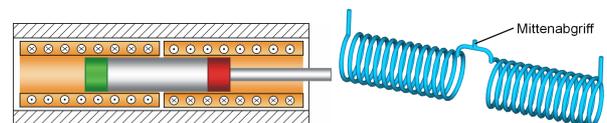


Abb. 7 Einsträngiger homopolarer Linearmotor mit bewegtem Magnetsystem und Vorbereitung zur integrierten Wegmessung (Mittenabgriff)

Der bewegliche Läufer fährt aus einer der Teilspulen bei Bewegung heraus und dabei in die andere hinein, es stehen also zwei gegenläufige Induktivitätsänderungen zur Auswertung zur Verfügung, wie

aus der elektrischen Ersatzschaltung Abb. 8 deutlich wird.

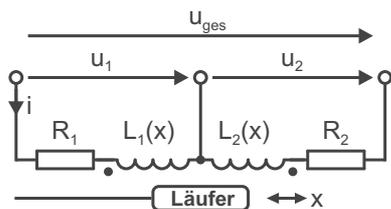


Abb. 8 Elektrisches Ersatzschaltbild des homopolaren Linearmotors mit integrierter Wegmessung

Voraussetzungen für eine deutliche Induktivitätsänderung sind dabei:

1. Ein Weicheisenkern oder ein Kern mit wenigstens abschnittsweise hoher Permeabilität.
2. Eine angepasste konstruktive Gestaltung, so dass eine Bewegung eine Veränderung der von Teilspulen umfassten Eisenanteile und damit der Induktivität bewirkt.
3. Wicklungen, die diese Veränderung erfassen können, das heißt als Langspulen den bewegten Kern bzw. Teile von diesem während der Bewegung umschließen.

Abb. 9 zeigt mögliche Läuferbauformen für eine solche integrierte Wegmessung als erste Voraussetzung. Eine konstruktive Anpassung als zweite Voraussetzung ist in diesem homopolaren Fall nicht erforderlich, der Kern wird ohnehin linear aus einer Teilwicklung in die andere Teilwicklung verschoben. Die dritte Voraussetzung der Überdeckung durch eine Langspule ist dann gegeben, wenn eine Mittelanzapfung zwischen den Teilspulen herausgeführt wird und damit beide Teilspulen getrennt auswertbar sind. Mit wenigen Anpassungen ist somit die Vor-

aussetzung für eine integrierte Wegmessung zu schaffen.

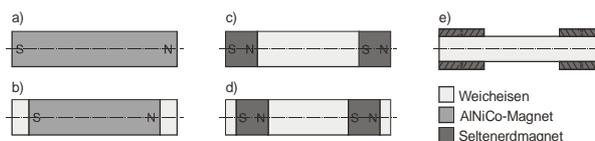


Abb. 9 Geeignete Läuferbauformen a) bis d) mit axial magnetisierten Magneten, e) mit radial magnetisierten Segmentmagneten

Bei dem hier vorgestellten Antrieb ist vorzugsweise das Magnetsystem beweglich als Läufer ausgeführt. Zum Einsatz kommen Magnete aus AlNiCo mit axialer Magnetisierung oder Seltenerd magnete, die radial auf einem weichmagnetischen Kern mit hoher Permeabilität angeordnet und polarisiert sind. Bei Verschiebung des Läufers kommt es dann zu den erwarteten symmetrischen Induktivitäts- bzw. Impedanzänderungen in den Teilspulen des Antriebes entsprechend Abb. 10. Diese müssen elektronisch erfasst und als Wegsignal aufbereitet werden.

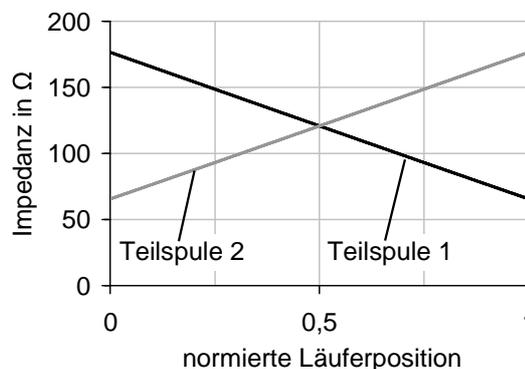


Abb. 10 Theoretischer Verlauf der Teilspulimpedanzen über dem Läuferweg für Motoren nach Abb. 7

Ein ähnliches Verhalten ist auch bei mehrsträngigen Antrieben realisierbar. Erforderlich ist wiederum eine Unterteilung des Antriebsstranges in Teilspulen durch

eine Mittelanzapfung, hier jedoch je Strang und ein alternierender Läuferaufbau, der konstruktiv so angepasst werden muss, dass der Läufer bei Bewegung immer aus einem Teilstrang beziehungsweise mindestens einer Teilspule dieses Teilstranges heraus fährt und in gleichem Maße in einen anderen Teilstrang beziehungsweise in eine Teilspule des Teilstranges hinein fährt. Zusätzlich ist hier natürlich eine entsprechende Kommutierung nötig, das Kommutierungssignal ist aus dem Wegmesssystem ableitbar. Abb. 11 zeigt einen entsprechenden Motor und das Spulensystem dazu. Die Ausführungen zum Läuferaufbau für homopolare Motoren gelten sinngemäß. Die Ersatzschaltung zeigt Abb. 12.

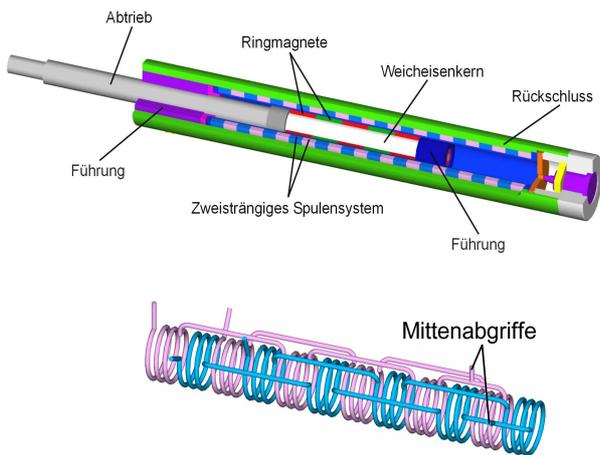


Abb. 11 Mehrsträngiger Linearmotor mit integrierter Wegmessung

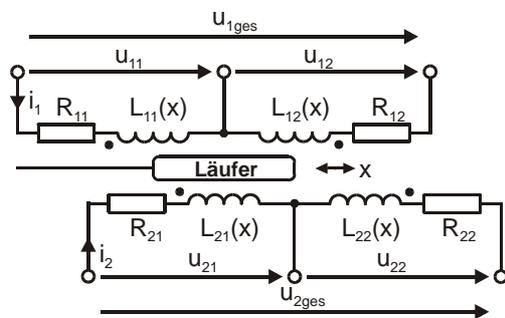


Abb. 12 Zusammengefasstes elektrisches Ersatzschaltbild bei zweisträngigen Antrieben

Der theoretische Verlauf der Induktivitätsänderung in einem zweisträngigen System ist in Abb. 13 dargestellt.

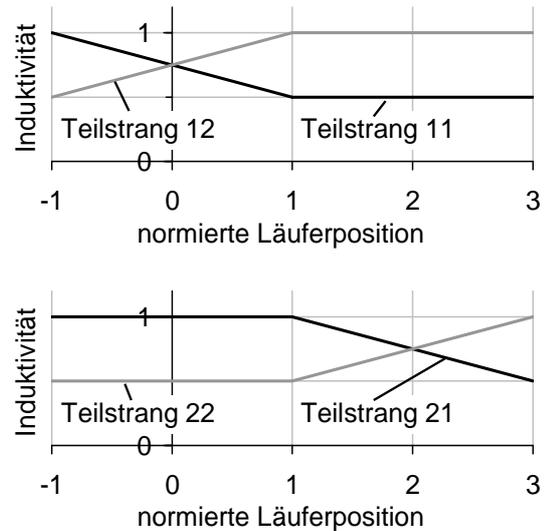


Abb. 13 Vereinfachter theoretischer Verlauf der Induktivität in zweisträngigen Antrieben

5 Auswerteverfahren

Bei der Auswertelektronik für die integrierte Wegmessung in ein- oder mehrsträngigen Linearmotoren ist zu unterscheiden zwischen Verfahren für die integrierte Wegmessung bei analoger oder bei getakteter Ansteuerung.

Integrierte Wegmessung bei getakteter Ansteuerung. Die Ansteuerung von Antrieben höherer Leistung und auch mehrsträngiger, heteropolarer Antriebe erfolgt im Allgemeinen über getaktete Leistungssteller. Zur Erfassung von Induktivitäts- bzw. Impedanzänderungen für die integrierte Wegmessung eignet sich hier die Auswertung der Anstiegsflanken der getakteten Motorbetriebsspannung. Abb. 14 zeigt beispielhaft die Verläufe von pulsweitenmodulierter Betriebsspannung und daraus resultierendem Spulenstrom sowie der Spannung am Mittenabgriff.

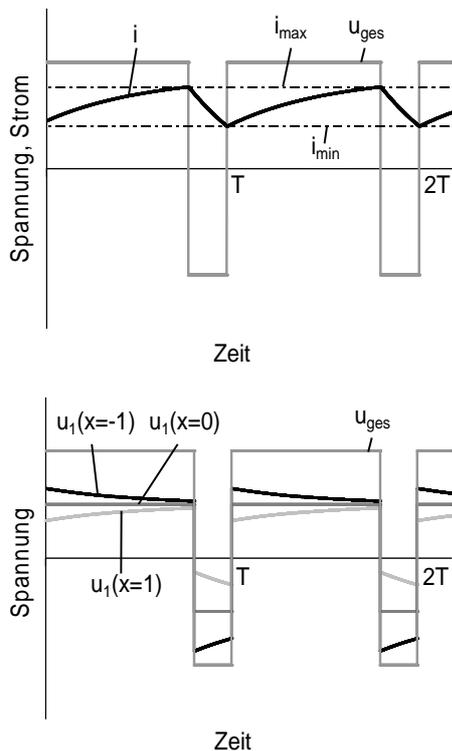


Abb. 14 Verlauf von Motorspannung, Spulenstrom (oben) und Mittenabgriffspannung (unten) bei pulswidenmodulierter Ansteuerung

Die Spannung am Mittenabgriff ist abhängig von der Induktivität in der jeweiligen Spule bzw. Teilspule und dient letztlich als läuferpositionsabhängiges Signal. Sie wird zu zwei Zeitpunkten nach dem Flankenwechsel abgetastet. Zur Minimierung von Fehlereinflüssen findet die Abtastung nicht während des normalen PWM-Betriebes sondern in periodisch auftretenden Messzyklen statt. Gleichzeitig mit der Mittenspannung wird auch der Strangstrom gemessen. Dadurch können Temperatureinflüsse rechnerisch weitgehend eliminiert werden. Die gemessenen Ströme und Spannungen werden verstärkt, gefiltert, in Digitalwerte gewandelt und anschließend in einem Mikrocontroller weiterverarbeitet.

Für den in Abb. 11 dargestellten zwei-strängigen Antrieb ergeben sich beispielsweise die in Abb. 15 dargestellten

Positionssignale analog zu den erwarteten Verläufen nach den Abbildungen 10 und 13. Der Signalverlauf macht deutlich, dass in diesem Fall ein inkrementell arbeitendes Messsystem realisiert wird. Aufgrund des inkrementellen Aufbaus des Systems ist die Genauigkeit dann nicht direkt vom Hub des Antriebs abhängig. Bei homopolaren Antrieben ist kein inkrementelles Signal vorhanden, dort ist nur ein Signal analog den Abbildungen 4 oder 10 zu erwarten.

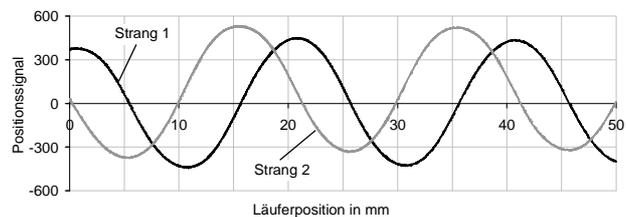


Abb. 15 Positionssignale der beiden Stränge des Linearmotors nach Abb. 11

Dieses vorgestellte Verfahren ist entsprechend modifiziert prinzipiell sowohl für die Detektion von Induktivitätsänderungen als auch für die Detektion von Flusssdichteänderungen nutzbar, da letztere auf die Auswertung der Permeabilität und schließlich auf die Induktivitätsänderung zurückgeführt wird.

Integrierte Wegmessung bei analoger Ansteuerung. Um die Impedanzänderungen in den Teilspulen detektieren zu können, kann bei analoger Ansteuerung dem von der Endstufe erzeugten Gleichsignal (Gleichspannung oder Gleichstrom) ein Wechsignal überlagert und über dieses die Impedanz- bzw. letztlich die Weginformation ausgewertet werden. Periode und Amplitude des Wechsignals sind dem jeweiligen Antrieb anzupassen. Als Messsignal dient die Spannung am Mittenabgriff beispielsweise nach Abb. 8, deren Amplitude von der

Läuferposition abhängt. Zur Auswertung wird dieses Signal zunächst gleichspannungsmäßig entkoppelt, anschließend kann die Amplitude des reinen Wechselsignals auf verschiedene Arten messtechnisch ermittelt werden. Die Signalauswertung kann rein analog erfolgen, es ist aber auch eine digitale Weiterverarbeitung mittels Mikrocontroller möglich.

Dieses Verfahren ist aber von eingeschränkter Bedeutung, da analoge Endstufen nur bei sehr kleinen Leistungen sinnvoll sind. Auch lassen sich Korrekturmaßnahmen analog nur eingeschränkt realisieren. Der mikrorechnerbasierte PWM-Betrieb ist der am weitesten verbreitete Einsatzfall.

6 Erzielbare Genauigkeit - Zusammenfassung

Die Messgenauigkeit dieser Verfahren ist zunächst natürlich von der Fertigungsgenauigkeit der für die internen sensorischen Eigenschaften maßgeblichen mechanischen Größen abhängig. Diese kann durch eine Anfangskalibrierung bei Bedarf kompensiert werden. Im Betrieb des Motors kommen allerdings weitere Störgrößen hinzu, die schaltungstechnisch oder softwaremäßig soweit möglich ebenfalls kompensiert werden müssen. Im Wesentlichen sind dies:

- Motorstromabhängigkeit,
- thermische Einflüsse durch den Stromfluss in den Antriebsspulen,
- bewegungsinduzierte Gegenspannungen,
- transformatorische Kopplungen zwischen Antriebssträngen aber auch zwischen Antriebspulen und Läufer, Rückschluss oder weiteren als Kurz-

- schlusswicklung wirkenden Motorbauteilen (Führungsbuchsen),
- verlangsamter Feldabbau durch Wirbelströme.

Eine Kompensation einiger dieser Einflüsse ist bei Teilspulen mit gegenläufigem Verhalten durch geeignete Auswertalgorithmen unter Nutzung beider Teilspannungen möglich. Generell ist jedoch die Nutzung von Korrekturtabellen anzuraten. Bei der integrierten Wegmessung durch Detektion der Flussdichte sind die Fehlereinflüsse dabei im Allgemeinen höher als bei Detektion von Induktivitätsänderungen. Wegen der Vielzahl von Einflussgrößen sei hinsichtlich der Analyse dieser und der möglichen Kompensationsmaßnahmen auf die angegebene Literatur verwiesen.

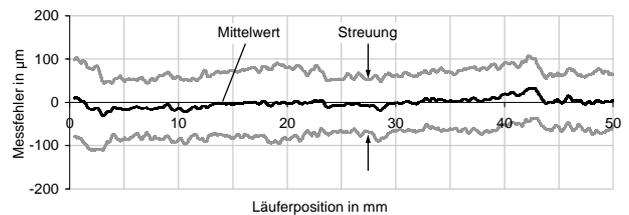


Abb. 16 Grundgenauigkeit der integrierten Wegmessung des Motors nach Abb. 11 bei getakteter Ansteuerung

Die Wiederholgenauigkeiten der integrierten Wegmessung liegen bei getakteter Ansteuerung und mehrsträngigen Antrieben etwa im Bereich von 0,1 mm bis 0,2 mm. Fertigungsabweichungen der für die internen sensorischen Eigenschaften maßgeblichen mechanischen Größen kommen hinzu. Abb. 16 zeigt beispielhaft die Grundgenauigkeit (ohne diverse zusätzliche o. g. Störgrößen) der integrierten Wegmessung des Motors nach Abb. 11 bei getakteter Ansteuerung. Soll eine Genauigkeit bis 0,05 mm erreicht werden, sind schon sehr umfangreiche Fehlerkor-

rektor- und Kompensationsmaßnahmen erforderlich.

Vorrangiges Einsatzgebiet dieses Verfahrens zur integrierten Wegmessung werden mehrsträngige, kommutierte Systeme mit vergleichsweise großem Hub sein. Diese Antriebe benötigen zur Kommutierung in jedem Fall ein Messsystem. Dieses kann mit einem vergleichsweise geringen schaltungstechnischen Aufwand integriert ausgeführt werden, ohne zusätzlichen Bauraum zu benötigen.

Bei analogen Stellgliedern sind vorrangig homopolare Antriebe anzutreffen, die einen vergleichsweise geringen Hub bis ca. 50 mm aufweisen. In diesem Bereich kann das analoge Verfahren zur integrierten Wegmessung dann sinnvoll zum Einsatz kommen. Die erzielbaren Wiederholgenauigkeiten liegen dabei etwa bei 0,05 mm bis 0,1 mm, hinzukommen aber wieder Fertigungsungenauigkeiten. Vorteile ergeben sich hier insbesondere beim Einsatz in stark miniaturisierten Antrieben, bei denen kein Bauraum für zusätzliche externe Messsysteme vorhanden ist.

Literatur

- /1/ Hartramph, R.: Integrierte Wegmessung in feinwerktechnischen elektrodynamischen Lineardirektantrieben. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 18, 2001.
- /2/ Gundelsweiler, B.: Dimensionierung und Konstruktion von feinwerktechnischen elektrodynamischen Lineardirektantrieben. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 22, 2003.
- /3/ Welk, C.: Detektion interner sensorischer Eigenschaften von elektrodynamischen Lineardirektantrieben. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 24, 2004.
- /4/ Clauß, C.: Sensorische Eigenschaften elektrodynamischer Lineardirektantriebe mit Kurzspulsystemen. Dissertation, Universität Stuttgart, IKFF, Institutsbericht Nr. 27, 2007.

- /5/ Clauß, C.; Schinköthe, W.: Integrierte Wegmessung in Lineardirektantrieben - Erschließung neuer Anwendungsbereiche durch Detektion der Flussdichte. VDI-Fachtagung Mechatronik 2005, Wiesloch 1./2.06.2005.
- /6/ Clauß, C.; Schinköthe, W.; Welk, C.: Integrierte Wegmessung in Lineardirektantrieben - Potenziale und Grenzen. Tagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Darmstadt 3./4.03.2004, ETG-Fachberichte 96, S.117-122.
- /7/ Hartramph, R.; Schinköthe, W.: Elektromagnetisches Antriebssystem mit integrierter Wegsignalerzeugung. Patent DE 197 48 647 C2.
- /8/ Hartramph, R.; Schinköthe, W.: Electromagnetic drive system with integrated path signal generation. US-Patent US 6 037 739.

Vorabschätzungen zur Dimensionierung von Lineardirektantrieben unter Berücksichtigung dynamischer Einflüsse

Dipl.-Ing. Matthias Dannemann

Kurzfassung

Einer der Schwerpunkte des IKFF liegt seit Jahren in der linearen Antriebstechnik. In dieser Arbeit werden Dimensionierungshilfen dargestellt, welche auf analytischem Wege bestimmt werden. Es wird gezeigt, dass auf einfachem Wege Materialkonstanten eine wichtige Aussage liefern. Weiterhin wird eine leistungsbezogene dynamische Dimensionierungshilfe dargestellt, so dass die Analyse wichtiger Motorkenndaten schon im Voraus möglich ist. Diese Charakteristiken können abstrakt ermittelt werden. Dadurch eröffnen sich neue Möglichkeiten zur Dimensionierung.

1 Einleitung

Elektrodynamische Lineardirektantriebe finden mittlerweile ihren Einsatz durch die gesamte Mechatronik hinweg bis hin zum Schwermaschinenbau. Ihr wichtigster Vorteil ist das Einsparen der Rotations-Translations-Umformer. Sie sind in ihrem Aufbau einfacher als konventionelle Linearantriebe, die mit Zahnstangen, Spindel-Mutter-Systemen oder Zahnriemen ausgestattet werden müssen. Im einfachsten Fall bedarf es zweier Magnete, zweier Eisenplatten, einer Spule und einer Führung um einen Antrieb zu realisieren. Anwendung finden sie in der Positionier-technik in Form von Servoantrieben, z. B. Lese-Schreibkopf-Positionierung in Festplatten mittels Flachspulsystem, Abb. 1.

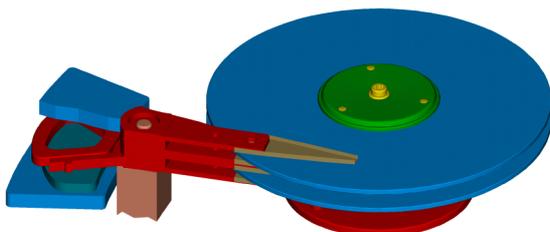


Abb. 1: Schreib-Lese-Kopf-Positioniersystem mit Flachspulantrieb

Dieser Antrieb weist aufgrund der geringen Eigenmasse eine hohe Dynamik auf, die durch rotatorische Antriebe nicht erreicht werden kann. Nur dadurch können die hohen Lese-Schreib-Geschwindigkeiten erreicht werden.

So klein Lineardirektantriebe auch gebaut werden, es gibt sie genauso in sehr großen Bauformen. Ein Beispiel dafür ist der Transrapid, der als Induktionsmotor ausgeführt ist und im Prinzip einer abgewickelten Synchronmaschine entspricht, Abb. 2.

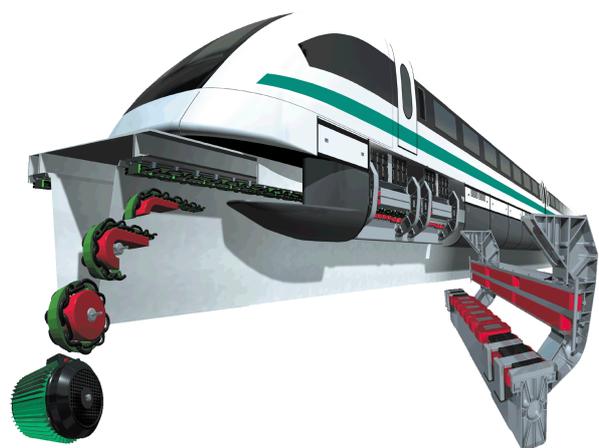


Abb. 2: Aufbau des Transrapid-Antriebssystems, /2/

Da Lineardirektantriebe meist spezifische Lösungen darstellen, ist es von Vorteil

möglichst früh in der Dimensionierung Aussagen über mögliche Geschwindigkeiten, Schubkräfte und Dynamiken zu erhalten.

2 Statische Dimensionierung und Kraftkonstante

Zur Bestimmung der Schubkraft gelangt man über die totale zeitliche Ableitung des magnetischen Feldes /3/,

$$\frac{d\vec{B}(\vec{s};t)}{dt} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \frac{1}{dt} \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial \vec{s}} d\vec{s} \right). \quad (1)$$

Weiterhin gilt Gl. (2)

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial \vec{s}} d\vec{s} = \text{rot}(\vec{B} \times d\vec{s}) + (\text{div} \vec{B}) d\vec{s}. \quad (2)$$

Durch Anwendung des Induktionsgesetzes können die zeitlichen Ableitungen von \vec{B} als Rotation eines elektrischen Feldes betrachtet werden. Die zeitliche Veränderung des Ortes wird als Geschwindigkeit interpretiert. Die zweite Maxwellsche Gleichung wird dann mit obiger Gleichung in Einklang gebracht. Dafür werden die elektrischen Feldstärken wie folgt definiert:

1. \vec{E} ist die durch die partielle Ableitung von \vec{B} entstehende Feldstärke.
2. \vec{E}' ist die durch die totale zeitliche Ableitung von \vec{B} entstehende Feldstärke.
3. \vec{E}_e sei eine durch fremde elektromotorische Kraft erzeugte bzw. eingeprägte Feldstärke.

Da die magnetische Flussdichte auch quellenfrei ist, vereinfacht sich Gl. (1) zu

$$-\text{rot} \vec{E}' = -\text{rot} \vec{E} - \text{rot}(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (3)$$

Das Induktionsgesetz lässt sich dann wie folgt beschreiben.

$$\text{rot} \vec{E} = \text{rot}(\vec{E}' - (\vec{v} \times \vec{B})) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4)$$

Mithilfe der in die Gleichungen eingebrachten Geschwindigkeit kann an dieser Stelle das elektrodynamische Wirkprinzip hergeleitet werden. Die Verknüpfung zwischen elektrischer Feldstärke und der Stromdichte in einem Medium liegt in der Leitfähigkeit. Es gilt

$$\vec{J} = \kappa \cdot \vec{E}' = \kappa(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}). \quad (5)$$

Durch Umstellen der Gleichung entsteht eine Bilanz für die elektrisch eingebrachte Leistung in das System

$$\vec{E} \cdot \vec{J} = \frac{J^2}{\kappa} - \vec{J} \cdot (\vec{v} \times \vec{B}). \quad (6)$$

Die elektrische Leistung teilt sich in den bekannten Wärmeanteil und einen mechanischen Anteil auf. Dieser geschwindigkeitsabhängige Term kann noch um das stromdurchflossene Volumen erweitert werden, was zur nächsten Gleichung führt,

$$-\int_V (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{J} dV = \int_V (\vec{J} \times \vec{B}) \cdot \vec{v} dV. \quad (7)$$

Da Gl. (7) einer Verlustleistung entspricht und allgemein der Sachverhalt Leistung = Kraft x Geschwindigkeit gilt, kann das Kreuzprodukt als volumenspezifische Kraft interpretiert werden. Wenn das Kreuzprodukt und die Geschwindigkeit dabei dasselbe Vorzeichen haben, dann spricht man vom elektromotorischen Prinzip, im anderen Fall vom elektrogeneratorischen. Bei Elektromotoren treten meist Dauermagnetfelder auf, so dass die partielle zeitliche Ableitung des Magnetfeldes entfällt. Dem entgegen entsteht aber durch außen angelegte Spannung eine äußere elektromotorische Kraft. Dadurch kann die

entstehende Stromdichte zusammengefasst werden als

$$\vec{J} = \kappa \cdot (\vec{v} \times \vec{B} + \vec{E}_e). \quad (8)$$

Wenn keine Bewegung stattfindet, wird auch keine mechanische Arbeit verrichtet, das heißt, die gesamte elektrische Leistung geht in Wärme über. Bei einem sinnvollen Motoraufbau reduziert man die Komponenten auf möglichst senkrechte und homogene Anteile. Dadurch vereinfachen sich die Vektorgleichungen zu skalaren Gleichungen

$$F = J \cdot B \cdot V = I \cdot B \cdot l \quad (9)$$

Diese Beschreibung und die Tatsache, dass Linearantriebe oft zur Positionierung verwendet werden, also zum Teil längere Zeit statisch verharren, führen dazu, dass die notwendige Verlustleistung zum Betreiben des Motors wichtiger für die Dimensionierung ist, als die Stromdichte oder gar Stromstärke. Es lässt sich aus Gl. (6) und Gl. (9) die Stromdichte eliminieren, und eine statische Dimensionierungsformel darstellen, die ausschließlich von der thermischen und in diesem Fall gleichzeitig elektrischen Verlustleistung abhängt

$$F = B \cdot \sqrt{\kappa \cdot P_{th} \cdot V}. \quad (10)$$

Gl. (10) zeigt schneller die Möglichkeiten eines Antriebes auf, außerdem lässt sie eine neue Interpretation der spezifischen Leitfähigkeit zu. Sie kann als Kraftkonstante eines Mediums interpretiert werden

$$\sqrt{\kappa} = \frac{F}{B \cdot \sqrt{P_{th} \cdot V}}. \quad (11)$$

Die Kraftkonstante gibt an, welche maximale Kraft ein bestimmtes stromdurchflossenes Leitungsvolumen bei einer bestimmten Verlustleistung in einem definierten Magnetfeld erfahren kann. In Tabelle 1 sind dafür einige Beispiele dar-

gestellt. Die beiden letzten Materialien sind in Klammern dargestellt, da dort die Reluktanzkräfte die elektrodynamischen bei weitem übertreffen.

In Abb. 3 ist aus diesem Sachverhalt eine statische Dimensionierungshilfe dargestellt, die sehr schnell mögliche Schubkräfte ermitteln lässt.

Tabelle 1: Ausgewählte Leitfähigkeiten und daraus berechnete Kraftkonstanten /4/

Werkstoff	κ in $\frac{S}{cm}$	$\sqrt{\kappa}$ in $\frac{N}{T\sqrt{cm^3W}}$
Cu	57.000	7,55
Ag	67.000	8,18
Au	45.000	6,71
Al	35.000	5,91
(Fe)	8.000	(2,83)
(9SMn28k)	11.000	(3,32)

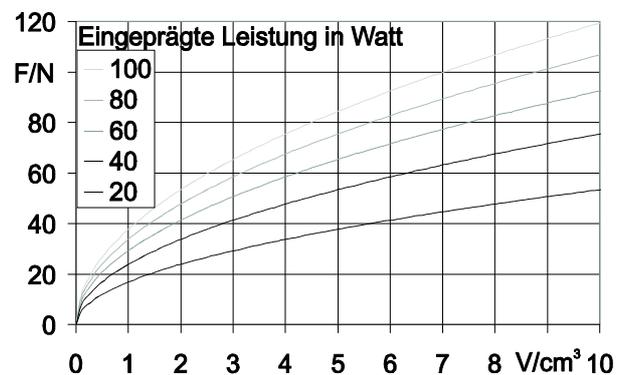


Abb.3: Mögliche Schubkraft bei unterschiedlichen Leitungsvolumen am Beispiel von Kupfer bei einer Luftspaltinduktion von 0,5 T

Es konnte somit gezeigt werden, dass eine leistungsbezogene Dimensionierung schneller zu den möglichen Fähigkeiten eines Antriebes führt.

Dieser Sachverhalt verlangt aber eine statische Vereinfachung. Er ist nur gültig, solange die bewegungsinduzierte Spannung klein gegen die elektromotorische Kraft ist, bzw. nur sehr wenig mechanische

Leistung umgesetzt wird. Da aber jede Bewegung mit Gegenkraft zu einer mechanischen Arbeit führt, steigt mit zunehmender Geschwindigkeit der Wirkungsgrad an /5/.

3 Leistungsbezogene dynamische Dimensionierung

Im Falle einer Bewegung muss die Geschwindigkeit in der Beschreibungsformel berücksichtigt werden, was zu einer mechanischen Arbeit bzw. Verlustleistung führt. Die elektrische Verlustleistung lässt sich dann beschreiben als

$$P_{el} = P_{th} + P_{mech} \quad (12)$$

Die Kraftgleichung (10) modifiziert sich durch Einsetzen von Gl. (12) zu

$$F_{mech}^2 = B^2 \cdot \kappa \cdot V \cdot (P_{el} - F_{mech} \cdot v) \quad (13)$$

Mit dem Ersetzen von

$$B^2 \cdot \kappa \cdot V = k_A \quad (13b)$$

und dem Lösen der quadratischen Gleichung entsteht eine Lösung für die Schubkraft

$$F = -\frac{k_A v}{2} + \sqrt{\left(\frac{k_A v}{2}\right)^2 + k_A P_{el}} \quad (14)$$

Diese Lösung beinhaltet für $v=0$ auch den statischen Fall. Da dies aber ein fließender Übergang ist, kann je nach Sachverhalt auch ein Wirkungsgrad von 10 % noch als fast statisch angesehen werden. Man kann jetzt aber die Kraft relativ einfach nur durch Kenntnisse der Grundgeometrie und Dynamik abschätzen.

Unter Beachtung der Leistungsaufteilung kann für verschiedene Geschwindigkeiten eine mögliche Schubkraft bei konstanter eingepprägter elektrischer Leistung be-

stimmt werden. Außerdem kann der Wirkungsgrad ermittelt werden. Dies soll an einem quantitativ sinnvollen Beispiel geschehen. Dafür sollen in einer idealen Motorbauform (alle vektoriellen Komponenten senkrecht) einige Werte angenommen werden.

Die spezifische Leitfähigkeit betrage 57.000 Scm^{-1} , der Füllfaktor wird an dieser Stelle noch vernachlässigt, das komplette kraftwirksame Volumen beträgt 10 cm^3 und wird einer elektrischen Leistung von 100 W ausgesetzt. Die magnetische Flussdichte beträgt in Luftspalten bestenfalls $0,5 \text{ T}$. Unter diesen Randbedingungen ergibt sich Abb. 4. Zu beachten ist, dass zum Konstanthalten der elektrischen Leistung die elektrische Spannung die gesamte Zeit nachgeregelt und erhöht werden muss.

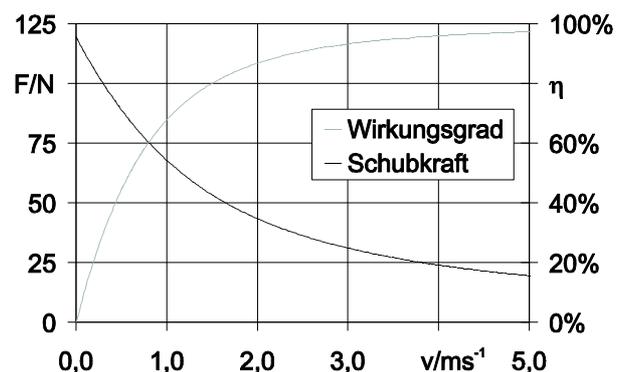


Abb. 4: Mögliche Schubkraft und Wirkungsgrad bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten (100 W elektrische Leistung, 10 cm^3 kraftwirksames Leitungsvolumen)

Um die Geschwindigkeit direkt mit dem Wirkungsgrad zu verknüpfen, muss dieser bestimmt werden:

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_{el}} = \frac{F \cdot v}{P_{el}} \quad (15)$$

Durch Einsetzen der Kraft in diese Gleichung und Vereinfachen entsteht ein direkter Zusammenhang zwischen Wirkungsgrad und Geschwindigkeit,

$$v = \sqrt{\frac{P_{\text{el}}}{k_A} \cdot \frac{\eta^2}{1 - \eta}} \quad (16)$$

Durch diese Schreibweise lässt sich auch schnell festlegen, mit welchen Fehlern man rechnen muss, wenn man trotzdem die statische Dimensionierung durchführen will.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Bericht wurde die Herleitung zweier Dimensionierungsformeln dargestellt. Diese sollen den ersten Schritt für Motorbauraumabschätzungen verkürzen. Die statische Dimensionierungsvariante zeigt sehr einfach die technischen Grenzen und die elektrischen Verlustleistungen, die bei Antrieben in Abhängigkeit ihres Bauvolumens auftreten. Weiterhin liefert sie für die elektrische Leitfähigkeit eine einfache Interpretation als Kraftkonstante.

In einem zweiten Schritt wurde die statische Dimensionierung erweitert, um dynamische Effekte im Stromleiter zu berücksichtigen. Auch wurde eine einfache Formel zur Bestimmung der Kraft in Abhängigkeit der elektrischen, mechanischen und magnetischen Größen dargestellt.

Weitere Untersuchungen sollen die Möglichkeiten, aber auch die Grenzen der Leistungsüberhöhung als Mittel zur Kraft-erhöhung zeigen. Außerdem kann vor allem die dynamische Kraftgleichung noch um Wirbelströme bei bewegtem fluss-führenden Material erweitert werden.

Es wurden dabei baufornunabhängige Gleichungen abgeleitet, so dass dieser Schritt noch vor die Bauformauswahl treten kann.

Literatur

- /1/ Gundelsweiler, B.: Dimensionierung und Konstruktion von feinwerktechnischen elektrodynamischen Lineardirektantrieben; Dissertation, Universität Stuttgart 2003
- /2/ www.transrapid.de
- /3/ Simonyi, K.: Theoretische Elektrotechnik; VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften Berlin, 1973
- /4/ Fischer, U.: Tabellenbuch Metall; Europa Lehrmittelverlag, Leinfelden, 2002
- /5/ Weigel, W.: Zur numerischen Berechnung von Wirbelstromverlusten in Konstruktionselementen von Induktionsöfen; Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2002

Dynamische Untersuchungen an Linearantrieben, speziell Rastkraftuntersuchungen

Dipl.-Ing. Philipp Joerges

Kurzfassung

Sowohl bei der Entwicklung von rotatorischen als auch bei Linearantrieben mit bewegten Eisenkomponenten stellen reluktanzbehaftete Rastkräfte ein Problem dar. Sie sind verantwortlich für wellige bzw. nicht konstante Schubkräfte und Drehmomente im Betrieb. Diese werden nachfolgend behandelt.

1 Einleitung

Rastkräfte (engl. detent force, cogging force) sind magnetische Störkräfte, die zwischen dem Eisen des Primärteils und den Magneten des Sekundärteils in Abhängigkeit der Position zueinander periodisch wiederkehrend wirken. In eisenlosen Motoren können sie vernachlässigt werden. Sie sind dort so gut wie nicht vorhanden. Die folgende Abb. 1 zeigt eine seitliche Ansicht eines Lineardirektantriebes.

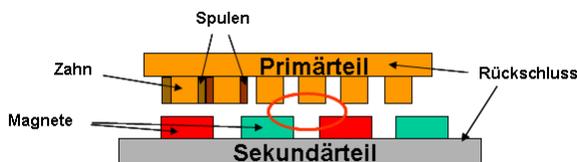


Abb.1: Seitliche Ansicht eines Linearmotors

Rastkräfte führen zu einer schlechteren Positionierbarkeit, zu Geschwindigkeitsschwankungen und somit zu Instabilitäten im Vergleich zu eisenlosen Motorvarianten. Vor allem ist ein starker Einfluss der Nichtlinearitäten bei niedrigen Verfahrensgeschwindigkeiten festzustellen. Daher werden derzeit Untersuchungen zu den mechanischen Einflussmöglichkeiten als auch regelungstechnischen Einflüssen am Lehrstuhl bezüglich Lineardirektantrieben untersucht.

2 Zielsetzung

Ziel der Untersuchungen ist eine einheitliche Darstellung, die Verifizierung und Validierung der Einflussmöglichkeiten (mechanisch, elektrisch/elektronisch) für das Bewegungsverhalten bei dynamischen Positionierprozessen unter der Berücksichtigung von Rastkräften. Hieraus sollen definierte Konstruktions- (geometrisch) und Regelungs-/Steuerparadigmen (elektrisch/elektronisch) für Lineardirektantriebe bei mitbewegtem Eisen abgeleitet und überprüft werden. Vergleichend sind Untersuchungen zu eisenlosen hochdynamischen Antrieben vorgesehen.

3 Beschreibung der Einflussmöglichkeiten

Generell kann auf zwei Arten Einfluss auf Rastkräfte genommen werden. Zu einen kann mechanisch, also über die Geometrie, zum anderen durch regelungs- und steuerungstechnische Verfahren (elektrisch) Einfluss auf die Wirkung von Rastkräften genommen werden.

Maßgeblich für die geometrische Manipulation der Rastkräfte sind z. B. die Größen des Luftspaltes, die Magnete und die Ge-

staltung des Rückschlusses. So haben z.B. bei den Magneten unter anderem die Magnetform, die Magnetabstände oder eine Drehung der Magnete Einfluss auf die Rastkraftverhältnisse. Beim Rückschluss beispielsweise ist die Rückschlusslänge oder Zahnform maßgeblich für die Einflussnahme auf die Rastkräfte.

Für die Untersuchung der Rastkraftthematik werden hierzu 3D-Simulationen mit Hilfe der FEM-Methoden durchgeführt. Abb. 2 stellt beispielhaft einen Ausschnitt aus einer Simulation dar. Es zeigt ein Simulationsmodell eines Linearmotors, an dem die Geometrien optimiert werden. Anschließend erfolgt die Überprüfung der durch Simulation gewonnenen Ergebnisse bzw. Erkenntnisse an einem eigens dafür aufgebauten modularen Teststand.

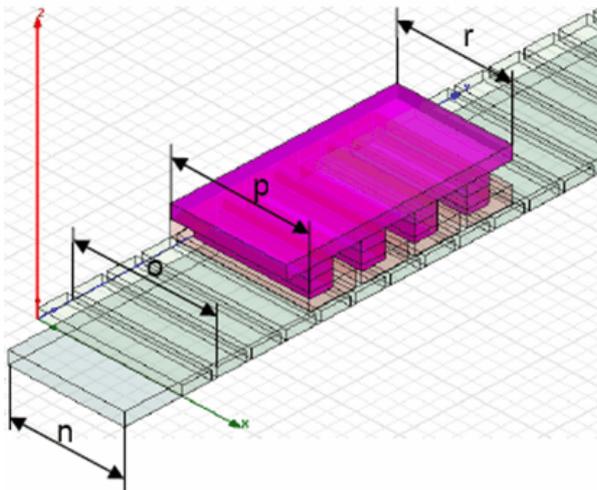


Abb. 2: Simulationsmodell eines Lineardirektantriebes

Die folgende Darstellung in Abb. 3 zeigt den Teststand zur Untersuchung der geometrischen Einflussfaktoren. Hierbei können modular verschiedene Rückschlussvarianten und Magnetanordnungen angeordnet, vermessen und überprüft werden. Die Ermittlung der Kraft-Weg-Kennlinien erfolgt mit Hilfe von Kraftmessdosen, einem hochgenauen Wegmesssystem und

einer präzisen Linearachse. Die Rückschlüsse können hier nach Wahl bzw. entsprechend der Ergebnisse der Simulation in einen doppelt geführten Schlitten montiert werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit Spulen auf die Zähne des Rückschlusses zu setzen, um weitere Untersuchungen bei Bestromung der Spulen durchzuführen. In der Darstellung ist der Rastkraftprüfstand noch nicht über die Kraftmessdose mit der Linearachse verbunden. Unter anderem ist hier die Schrägstellung der Permanentmagneten zu erkennen.

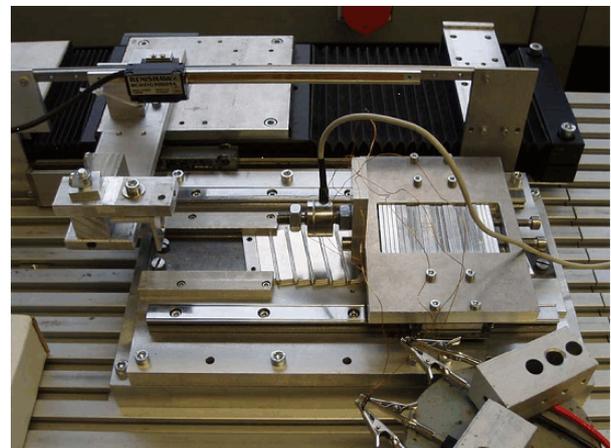


Abb. 3: Rastkraftteststand und Prätec-Linearachse für Rastkraftuntersuchungen

Neben den geometrischen Manipulationsmöglichkeiten besteht die Möglichkeit, über regelungs- und steuerungstechnische Maßnahmen Rastkrafteinflüsse auszuregulieren. Wesentlich kann hier Einfluss genommen werden über eine Ansteuerung mittels Sinuskommütierung, über geeignete Reglermodelle und Regelkreisstrukturen und damit zusammenhängend über eine sinnvoll gewählte Regloptimierung. So besteht, im Vergleich zur Blockkommütierung, bei der Sinuskommütierung die Möglichkeit, bei identisch ins System eingebrachter Leistung mehr Kraft in ein Zweispulensystem einzubringen. Bei geeigneter

PWM-Taktung der Leistungsendstufe (H-Brücken), z. B. mit einer Frequenz von 30 kHz, kann nicht nur mehr Kraft sondern auch ein sanftes geräuschloses Schalten erzielt werden. Generell wird die Stromrichtung des in den Spulen fließenden Stromes durch das Vorzeichen und die Stärke des fließenden Stromes durch die Amplitude des wegabhängigen Sinus-signals bestimmt. Natürlich muss hierzu das Wegsignal geeignet auf die Stellung der Magneten zu den Spulen abgestimmt und einjustiert sein.

Die nachfolgende Abb. 4 zeigt eine prinzipielle Anordnung von Permanentmagneten, unten dargestellt, und den beiden Spulen, oben dargestellt, eines zweisträngigen Flachspulenantriebes. Vergleichend zur Sinuskommutierung ist auch die Bestromung der Blockkommutierung dargestellt. Sie ist wie die Einzelkurven der beiden Stränge der Sinuskommu-

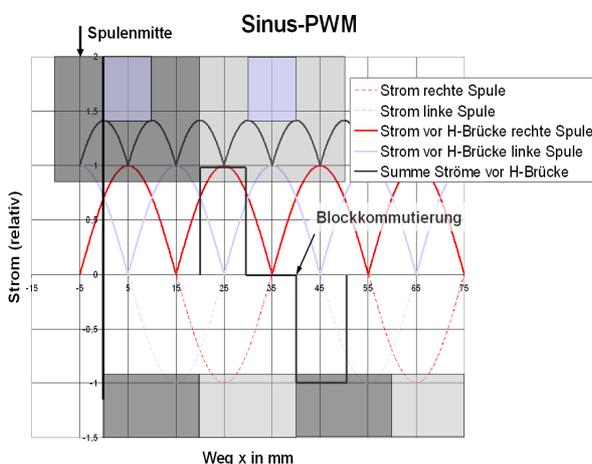


Abb. 4: Prinzipielle Funktionsweise der Sinuskommutierung bei einem Flachspulenantrieb

tierung auf eins normiert und für die rechte Spule dargestellt. Jedoch kann bei der Blockkommutierung jeweils immer nur eine Spule bestromt werden. Bei der Sinuskommutierung hingegen werden beide Spulen gleichzeitig bestromt, was zu einer effektiven Summierung der Einzelströme und

somit zu einem höheren Gesamtstrom führt. Der Maximalstrom der beiden Spulen beträgt hierbei das 1,4-fache und zeigt deutlich die bessere Ausnutzung der in das System eingebrachten Leistung. Beide Spulen teilen sich die Leistung somit auf. Misst man am Eingang der Leistungs-H-Brücke den Strom, fließt dieser Strom nur in eine Richtung. Somit können die einzelnen Sinuskurven mit dem Betrag angenommen werden, vgl. Abb. 4. Die ersten Untersuchungen bei sinuskommutiertem Betrieb eines Flachspulenantriebes sind sehr vielversprechend.

Nicht nur die Sinuskommutierung sondern auch verschiedene Regelmodelle sind prägend für das Positionier- und Regelverhalten. Nachdem es eine große Anzahl an Regelmodellen gibt, werden hier nur kurz die wesentlichen Modelle aufgeführt und exemplarisch dargestellt. So sind bei den allgemein vermaschten Regelkreisen die Begrenzungsregelung, die Störgrößenaufschaltung und die Hilfsstellgrößenschaltung die am häufigsten anzutreffenden Formen der Regelung. Bei der Begrenzungsregelung greift beispielsweise bei Überschreitung eines bestimmten Streckenwertes eine Hilfsregelgröße ein, die parallel über einen Begrenzungsregler auf den Streckeneingang wirkt. Dagegen wird bei der Störgrößenaufschaltung bewusst eine Störgröße nicht nur auf die Regelstrecke, sondern auch über eine geeignet gewählte Übertragungsfunktion vor oder in den Regler mit aufgeschaltet. Sie wird dadurch schnell ausgeglichen. Auch zählt die allgemein bekannte Kaskadenregelung, die verschachtelte bzw. unterlagerte Regelkreise besitzt, noch zu der Gruppe der allgemein vermaschten Regelkreise. Zur nächsten großen Gruppe, der Gruppe der

modellbasierten Regelungen, zählen, die Conditional Feedback Control und die Internal Model Control (IMC). In der nachfolgenden Abb. 5 ist das Reglerschema für die Internal Model Control Struktur dargestellt. Hierbei wird der realen Regelstrecke $G(s)$ ein Streckenmodell $\hat{G}(s)$ parallel geschaltet und die Differenz $y-\hat{y}$ auf den Eingang zurückgeführt.

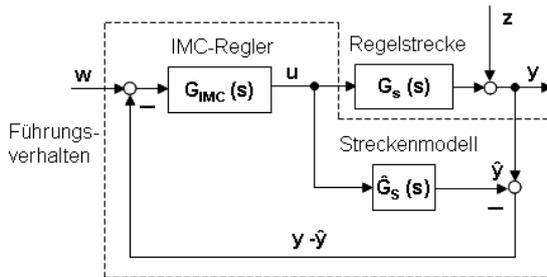


Abb. 5: Aufbauschema der Internal Model Control Regelung

Auch sind Zustandsregelungen, bei denen die verteilten Regler zusammengefasst ausgelegt werden können, bei LDAs im Einsatz. Hier können über die Regelungsnormform, die Beobachternormform und die Jordansche Normalform lineare zeitinvariante Regler ausgelegt werden. Neuerdings werden auch Regelstrukturen über Neuronale Netze eingesetzt. Hierbei wird anfangs einem PID-Regler ein Neuronales Netz parallel geschaltet. Über mathematische Funktionen unterschiedlicher Gewichtung und durch Lernprozesse wird die Arbeit des PID-Reglers allmählich vom Neuronalen Netz übernommen, da dieses automatisch lernt und schließlich den PID-Regler überflüssig macht. Nach dem Lernprozess kann der Regler wieder entfernt werden. Allerdings sind diese Regelungsstrukturen mit sehr hohem Aufwand verbunden und werden am IKFF bisher nicht eingesetzt.

4 Zusammenfassung

Bei dynamischen Bewegungen haben Rastkräfte bei eisenbehafteten Motoren (rotatorisch, linear) erheblichen Einfluss auf das Bewegungsverhalten. Diese magnetischen Störkräfte können sowohl geometrisch als auch elektrisch/elektronisch beeinflusst und verringert werden. Derzeit werden hierzu verschiedene Simulationen durchgeführt und zwei Teststände aufgebaut, wobei der erste Teststand inzwischen in Betrieb genommen wurde und erste Erkenntnisse liefert. Bei dem zweiten Teststand wird ein modularer langhubiger LDA aufgebaut, um weitere Untersuchungen im Hinblick auf das dynamische Bewegungsverhalten und der Rastkraftthematik über große Wegstrecken vorzunehmen. Man darf gespannt sein, wie die entsprechend vorgesehenen Regelstrukturen nach Fertigstellung der Motorteststände die Einflussmöglichkeiten weiter aufzeigen und die gewonnenen Erkenntnisse vertiefen.

Literatur

- /1/ Stölting, H.-D.; Kallenbach, E.: Handbuch elektrische Kleinantriebe. Carl Hanser Verlag München, Wien 2001
- /2/ Schröder, D.: Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen. 2. überarbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2001
- /3/ Schröder, D.: Elektrische Antrieb - Grundlagen, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2001
- /4/ Lutz, H.; Wendt, W.: Taschenbuch der Regelungstechnik, 5. erweiterte Auflage, Harri Deutsch Verlag

Aerostatische Führungen in Direktantrieben

Dipl.-Ing. Frank Mochel

Kurzfassung

Ein neuer Gestaltungsansatz bei luftgeführten Ein- und Mehrkoordinatenantrieben sieht die vollständige Integration der aktiven Antriebs- und Luftführungskomponenten in den Stator vor. Mit dieser konstruktiven Umkehrung der sonst üblichen Anordnung der aktiven und passiven Baugruppen sollen die derzeit bei industriell verfügbaren Linearachsen und Planarmotoren bestehenden Nachteile wie begrenzte Verfahrswege und eingeschränkte Dynamik vermieden werden, die sich bauartbedingt infolge der sonst erforderlichen und permanent mitzuführenden Versorgungsleitungen für z. B. Strom, Druckluft, Steuer- und Messsignale ergeben. Während sich dieser Ansatz antriebsseitig mit vertretbarem Aufwand umsetzen lässt, entstehen bei der aerostatischen Führung durch die im Vergleich zum Läufer dann ortsfeste Drucklufteinspeisung über die größere Statorfläche eine Reihe prinzipbedingter Probleme, die die Funktion und den Betrieb der Führung grundlegend beeinflussen und im Einzelnen erst noch zu untersuchen und zu lösen sind.

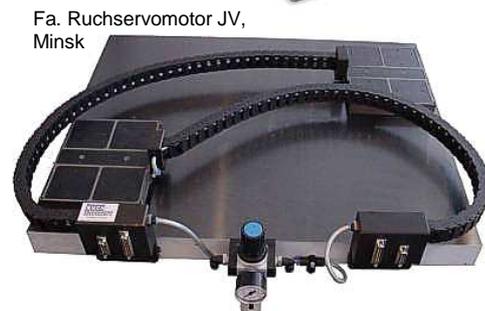
1 Einleitung

Luftlager und -führungen erfahren in jüngster Zeit auf Grund einiger markanter Vorteile wachsendes Interesse von Seiten der Industrie. Hohe Genauigkeit, nahezu nicht vorhandene Reibung, kein nachteiliger Wärmeeintrag in angrenzende Bauteile, kein Bedarf an verunreinigenden Schmiermitteln sowie Wartungsfreiheit über die gesamte Lebensdauer hinweg stellen wichtige Eigenschaften dar, die heute von vielen Anwendungen in Mess-, Prüf- und Produktionseinrichtungen gefordert werden und für den einwandfreien Betrieb dieser Anlagen häufig unverzichtbar oder sogar gesetzlich vorgeschrieben sind.

Die gezielte Einbindung dieser Konstruktionselemente in ein- und mehrachsige Direktantriebe macht diese Merkmale auch der Antriebstechnologie zugänglich. Dies ermöglicht nicht zuletzt die Erschließung neuer Einsatzfelder im Bereich der Feinst-



Fa. HIWIN GmbH,
Offenburg



Fa. Ruchservomotor JV,
Minsk

Abb. 1: Luftgeführte Direktantriebe

und Mikrobearbeitung sowie der Medizintechnik, der Pharma- und der Lebensmittelindustrie, bei denen neben kleinsten Abmessungen und höchster Präzision insbesondere auch ein kontaminationsfreier Betrieb angesichts steriler oder emissions-

kritischer Umgebungen (Reinraumtauglichkeit) zu garantieren ist.

Derzeit sind bereits eine Vielzahl aerostatisch geführter Linearachsen und Planarmotoren kommerziell verfügbar (Abb. 1). Ihnen ist gemein, dass sie vorzugsweise läuferseitig integrierte Luftführungskomponenten zur Drucklufteinspeisung im Zusammenhang mit ebenfalls meist läuferseitig aktiven Antriebskomponenten nutzen. Diese Anordnung der aktiven Funktionselemente (Abb. 2) bedingt aber Versorgungsleitungen für z. B. Strom, Druckluft, Steuer- und Messsignale, die nicht nur aufwändig und sorgsam nachgeführt werden müssen, sondern zugleich die Dynamik, die Bewegungsfreiheit und den Arbeitsraum, insbesondere wenn mehrere Läufer auf einem Stator genutzt werden, erheblich einschränken. Antriebe dieser Bauart eignen sich daher lediglich für kleine Verfahrswege.

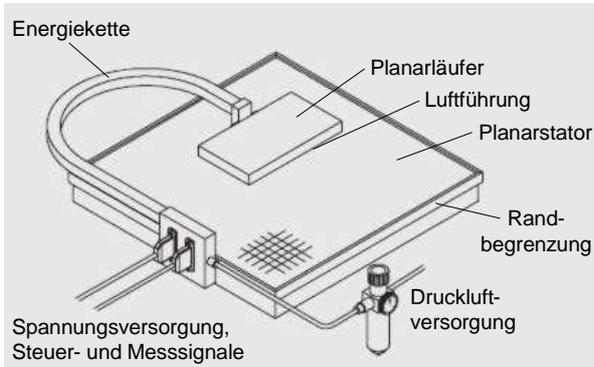


Abb. 2: Aufbau eines Planarmotors

2 Neues Antriebskonzept

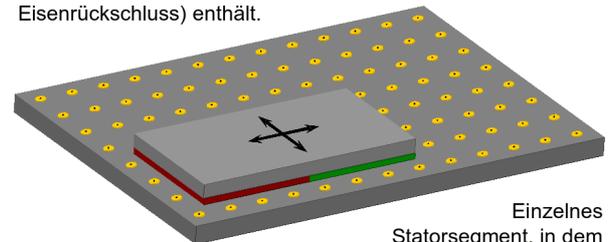
Die Realisierung großer Verfahrswege für räumlich unbegrenzte Transport- und Positionieraufgaben erfordert ein hiervon abweichendes Gestaltungskonzept, das die vollständige Integration der aktiven Antriebs- und Luftführungskomponenten in den Stator vorsieht, folglich auf die sonst

läuferseitig notwendigen und mitzuführenden Zuleitungen verzichtet und somit einen gänzlich ungebundenen, frei beweglichen Läufer ermöglicht.

Dieser Ansatz setzt allerdings eine konstruktive Umkehrung der sonst üblichen Anordnung der aktiven und passiven Baugruppen voraus (Abb. 3). Während sich dies antriebsseitig mit vertretbarem Aufwand durch eine stationäre, gestellfeste Antriebswicklung und einen passiven, magnetbehafteten Läufer realisieren lässt, ergeben sich bei der aerostatischen Führung auf Grund der ortsfesten Drucklufteinspeisung und des im Vergleich zum Läufer flächenmäßig größeren Luftaustrittsbereichs eine Reihe prinzipbedingter Probleme, die den Aufbau und die Funktionsweise der Führung grundlegend verändern und folglich auch erheblichen Einfluss auf die Gebrauchseigenschaften und Betriebsparameter haben.

Planarmodul

In der XY-Ebene frei beweglicher Läufer, der die passiven Antriebs-elemente (Permanentmagnete, Eisenrückschluss) enthält.



Einzelnes Statorsegment, in dem die aktiven Komponenten der aerostatischen Führung (Drosselstellen, Druckluftversorgung, -verteilung und -kommutierung) und des Antriebssystems (Spulenwicklungen, Wegmesssystem) integriert sind.

Abb. 3: Konstruktionsansatz für Direktantriebe mit passiven Läufers

3 Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Eine ganzheitliche Lösung dieser Probleme ist ohne detailliertes Wissen über die Auslegung, die Gestaltung und den Gebrauch derartiger Führungen nicht zu erreichen.

Da aber zu diesen großflächigen Systemen bislang weder wissenschaftliche Analysen noch praktische Erfahrungen vorliegen und eine generelle Übertragung der umfangreichen Kenntnisse zu aerostatischen Gleitlagern gewöhnlicher Bauart ohne eine entsprechende Verifikation unzulässig ist, besteht für dieses innovative Konzept aktuell noch ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Für eine erste Betrachtung und zur Konkretisierung des Untersuchungsaufwands

wurden deshalb nach vorheriger Näherungsberechnung in Anlehnung an Unterberger /1/ bzw. Heinzl und Gerke /2, 3/ am IKFF mehrere Versuchsstatoren aufgebaut. Basierend auf dem realen Betriebsverhalten dieser Führungen und den zusätzlichen Anforderungen, die speziell an ebene Ein- und Mehrkoordinatenantriebe mit uneingeschränkten Bewegungsräumen zu stellen sind, konnten die in der nachstehenden Tabelle (Tab. 1) zusammengefassten Aufgabenbereiche eruiert werden.

Tab. 1: Aktueller Forschungs- und Entwicklungsbedarf

<p><u>Druckluftverbrauch, -kommutierung:</u> Der zu beaufschlagende Stator ist flächenmäßig größer als der Läufer. Infolgedessen ist ein Teil der Düsen ständig unbelastet, was insbesondere bei Verwendung von offenporösen Materialien als Drosselstellen zu einem extrem hohen Luftverbrauch führt. Es ist daher eine Kommutierung der Luftauslassbereiche vorzusehen, die ohne großen Zusatzaufwand in Abhängigkeit von der aktuellen Läuferposition und -bewegung möglichst selbsttätig funktioniert.</p>
<p><u>Druckluftanschluss, -verteilung:</u> Es ist eine Druckluftversorgung mit möglichst nur einem zentralen Druckluftanschluss pro Statorsegment und einem internen Verteilernetz oder Luftkammernsystem zu gestalten. Der Feldverlauf des magnetischen Antriebs darf durch die Luftführungsstrukturen allerdings nicht nachteilig gestört werden. Bei der Nutzung von Luftkammern ist zusätzlich auf eine ausreichende Fixierung bzw. Abstützung der Führungsflächen zu achten, da abhängig vom anliegenden Speiseluftdruck eine Durchbiegung oder Aufwölbung der Flächen infolge der sich darunter stauenden Druckluft auftreten kann.</p>
<p><u>Führungsverhalten beim Überfahren beaufschlagter Luftdüsen:</u> Im Gegensatz zum statischen bzw. quasistatischen Betriebsverhalten bei läuferseitig integrierten Elementarlagern weisen statorseitig beaufschlagte Luftführungen nicht nur dynamisch äußerst komplexe, sondern bisweilen auch instabile Strömungsvorgänge auf. Insbesondere das Überfahren der Luftdüsen bewirkt eine permanente Veränderung bzw. Störung des tragenden Luftfilms, was wiederum zu Schwingungen, Kippmomenten, Grundieren oder Rückstößen führen kann. Dieses Verhalten ist noch nicht erforscht. Es ist jedoch zu erwarten, dass die beschriebenen Auswirkungen bei Mikrodüsen stärker ausfallen als bei porösen Werkstoffen und insofern deren optimale Gestaltung und Anordnung mit entscheidend sind. Je nach Position differiert die Anzahl der tragenden Mikrodüsen unter dem Läufer erheblich. Es ist offen, inwieweit auch entsprechend optimierte Bypassrillen bis in die Randzonen auf der Läuferunterseite zu einer verbesserten Tragfähigkeit beitragen können.</p>
<p><u>Veränderliche Antriebskräfte:</u> Auch positions- und bewegungsabhängig auf den Läufer einwirkende Antriebskräfte führen zu wechselnden Betriebsbedingungen. Erste Abschätzungen ergaben einen dynamischen Kraftanteil von über 30 Prozent der von der Führung aufzunehmenden Gesamtkraft. Für die Auslegung und Untersuchung sind die genauen Antriebskräfte zu ermitteln und ggf. die Größe und der Einfluss der dynamischen Komponente zu minimieren.</p>
<p><u>Einleitung der Nutzlast- und Antriebskräfte:</u> Die außerezentrische Einleitung der Nutzlast- und Antriebskräfte kann ebenfalls ein einseitiges Verkippen und Grundieren des Läufers zur Folge haben. In Relation zum jeweiligen Betrag der wirkenden Kräfte kann es mitunter sinnvoll sein, die Art der Krafteinleitung zu optimieren. Allerdings sind die vorhandenen Normalkräfte in den vorliegenden Antriebsstrukturen meist sehr groß, so dass die Nutzlasten oft vernachlässigbar bleiben.</p>
<p><u>Genauigkeitsanforderungen an die Führungsflächen:</u> Die Dimensionen der Düsen und des Luftspalts liegen im Bereich von wenigen Mikrometern und damit in derselben Größenordnung wie die Form- und Oberflächenfehler wirtschaftlicher Fertigungsverfahren für großflächige Statoren. Unter den Aspekten der führungsbezogenen notwendigen und fertigungstechnisch möglichen Oberflächengüte sind daher die Gestaltung der Luftführungen sowie die Auswahl eines geeigneten Bearbeitungsverfahrens durchzuführen.</p>
<p><u>Modulare Gestaltung des Stators:</u> Um lange Verfahrswege sowie eine anwendungsbezogene Erweiterung bzw. Anpassung des Systems zu ermöglichen, ist der Stator modular zu gestalten. Die dadurch bedingten Übergangsstellen müssen allerdings ein störungsfreies Überfahren gewährleisten und sind deshalb gesondert zu untersuchen.</p>

Zu den Untersuchungsschwerpunkten zählt hierbei eine zuverlässige und möglichst selbsttätige Kommutierung der Druckluftversorgung, um den in Abhängigkeit mit der Statorfläche enorm ansteigenden Luftverbrauch zu begrenzen. Des Weiteren ist eine gezielte Analyse des Läuferverhaltens bzw. der komplexen Strömungsvorgänge beim Überfahren der beaufschlagten, flächig verteilten Lufteinlassdüsen nötig, um ein instabiles Verhalten auf Grund von Schwingungen, Kippmomenten, Rückstößen oder Grundieren auch unter Berücksichtigung der zeitlich und örtlich veränderlichen Normalkräfte des elektrodynamischen Antriebs zu vermeiden.

Bereits in einer früheren Arbeit /4/ wurde am Institut am Beispiel radial durchströmter Lagerhülsen der Nachweis für die Eignung und Bearbeitbarkeit offenporöser Werkstoffe als Ersatz für die sonst notwendigen Mikrodüsen erbracht. Diese Ergebnisse sind auf die ebenen Führungselemente zu übertragen und anhand experimenteller Versuche zu überprüfen und zu optimieren. Besonderes Interesse gilt dabei neben der speziellen Materialauswahl der Beherrschbarkeit des zugehörigen Fertigungsprozesses, um ideale Führungsflächen mit definierten sowie reproduzierbaren Eigenschaften zu gewährleisten.

Allgemein ist bei der Erforschung und Verwirklichung dieses neuen Gestaltungsansatzes zu konstatieren, dass die größte Schwierigkeit nicht in der Lösung der verschiedenen Teilaspekte (Tab. 1), sondern vielmehr in der Komplexität der zwischen ihnen bestehenden Abhängigkeiten und gegenseitigen Beeinträchtigungen liegt. In erster Linie beruht dies auf den Vorgaben und den Einschränkungen des verfügbaren Bauraums, die oftmals nur bestimmte An-

ordnungen oder unveränderliche Konstruktionsformen der einzelnen Bauteile gestatten und deshalb häufig auch deren multifunktionale Verwendung bedingen.

Aber auch zueinander divergente Restriktionen und Zielsetzungen erschweren die Auslegung. Die konsequente Abstimmung und sinnvolle Zusammenführung der verschiedenen Teillösungen zu einem optimal funktionierenden Gesamtsystem stellen somit während des gesamten Entwicklungsprozesses erfolgsbestimmende Aufgaben dar. Dies belegt auch die im nachfolgenden Abschnitt exemplarisch beschriebene Entwicklung einer selbsttätig kommutierenden Druckluftversorgung.

4 Selbsttätige Druckluftkommutierung

Bei den hier zu entwickelnden, statorseitig beaufschlagten Planarführungen besteht die Notwendigkeit, auf einen angemessenen Druckluftverbrauch achten zu müssen. Würde man diese Antriebssysteme in ihrer angedachten Funktion als unternehmensweites oder zumindest den Produktionsbereich umfassendes Transportsystem ohne jede Vorkehrung in ihrer Gesamtheit betreiben, entstünden bauartbedingt durch die großen Austrittsflächen nicht nur ein permanenter Druckluftdurchsatz, den die meisten Kompressoranlagen potentieller Anwender schlichtweg nicht aufbringen könnten, sondern in den Werkhallen auch eine dementsprechend starke Luftströmung, die negative Auswirkungen auf das Raumklima und insofern auch auf das allgemeine Wohlbefinden am Arbeitsplatz hätte.

Diese Aussagen lassen sich mit speziellen Verbrauchsmessungen an den instituts-

eigenen Demonstratoren belegen. Deren Mikrodüsen sind in einem auf die Antriebs- elemente und die Läufergröße abgestimmten Raster angeordnet und haben mit einem Bohrungsdurchmesser von 250 µm denselben Drosselstellenquerschnitt wie die Mehrheit der industriell angebotenen Elementarluftlager. Bereits bei 3 bar Versorgungsdruck beträgt der Durchfluss eines solchen Düsenkörpers 1,96 l/min, was bezogen auf 1 m² Führungsfläche beachtliche 128 m³/h ergibt. Dieser Wert steigt mit zunehmendem Speiseluftdruck und erreicht bei 4,5 bar fast 180 m³/h bzw. bei 6 bar über 225 m³/h. Der Einsatz offener Werkstoffe bedingt in der Regel noch höhere Durchflussraten.

Doch unabhängig von der Größe und der Gestaltung des Stators kann nur über die wesentlich kleinere Läuferfläche die Tragkraft der Führung erzielt werden. Die den Läufer umgebenden Bereiche sind zwar beaufschlagt aber ohne Belastung, so dass nahezu die gesamte eingebrachte Druckluft ungenutzt und ungehindert entweicht. Zur Senkung des Luftverbrauchs ist folglich eine Begrenzung der Druckluftversorgung auf die vom Läufer tatsächlich benötigte Statorzone unerlässlich.

Dazu ist eine Unterteilung der gesamten Statorfläche in geeignet kleine Ausströmbereiche vorzunehmen. Um eine möglichst zügige und ungestörte Läuferbewegung gewährleisten zu können, müssen diese einzelnen Segmente allerdings zeitlich und räumlich korrekt zueinander betrieben werden. Dies erfordert eine zuverlässige Steuerung oder Regelung der Luftzufuhr in Abhängigkeit der aktuellen Position sowie des vorgesehenen Fahrwegs des Läufers, möglichst ohne großen Zusatzaufwand.

In Analogie zum elektrotechnischen Wortgebrauch wird dieser Vorgang der beabsichtigten Weiterschaltung bzw. der Zu- und Abschaltung der Druckluftversorgung zugeordneter Führungsbereiche ebenfalls als „Kommutierung“ bezeichnet.

Realisierbar ist eine derartige Kommutierung zum Beispiel mittels extern gesteuerter Schaltventile. Jedoch wird hierfür mit zunehmender Statorgröße oder bei entsprechend kleiner Segmentierung der Fläche eine große Anzahl teurer Schaltventile benötigt, die ihrerseits einen enormen Montage- und Steuerungsaufwand verursachen.

Aus wirtschaftlichen Gründen ist deshalb eine möglichst selbsttätige Kommutierung der Statorsegmente vorzusehen, die ggf. die vorhandenen Antriebs- und Führungskomponenten sinnvoll einbezieht und ohne äußeren Bedieneingriff auskommt, d. h. einzig durch die Läuferposition oder die Läuferbewegung gesteuert wird.

Eine Möglichkeit hierzu bietet die Adaption des aus der Fördertechnik bekannten „Air-in-floor“-Systems /5/. Dabei geben im Boden eingelassene Kugelventile unter dem Gewicht des jeweiligen Transportguts die Druckluftzufuhr frei (Abb. 4). Ein am IKFF entwickelter Stator greift dieses Funktionsprinzip auf. Er ist mit federnden Druckkörpern ausgestattet, die nicht nur im Handel kostengünstig zu beziehen, sondern auch einfach zu montieren sind. Dennoch konnte diese Lösung nicht überzeugen, da beim

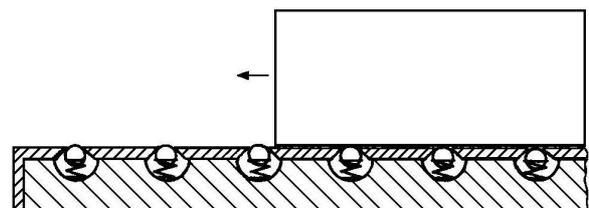


Abb. 4: „Air-in-floor“-System /5/

Überfahren und Niederdrücken der Kugelsätze durch den Läufer immer ein direkter Kontakt zwischen diesen Bauteilen entsteht und somit bei jeder Läuferbewegung Rückwirkungen in Form von Stößen und Luftspaltänderungen auftreten. Die Vorteile des berührungslosen und damit erschütterungs-, reibungs- und verschleißfreien Betriebs aerostatischer Führungen sind mit dieser Kommutierung folglich nicht zu realisieren.

Selbsttätig schaltende Druckluftsysteme für Präzisionsführungen, wie sie beispielsweise in der Feinwerktechnik, der Mikrotechnik und der Nanotechnologie für hochgenaue Bewegungen und Positioniervorgänge gefordert werden, setzen einen hiervon abweichenden Gestaltungsansatz voraus. Am IKFF werden nicht zuletzt deshalb weitere Kommutierungsverfahren entwickelt und am eigens hierfür eingerichteten, computergesteuerten Prüfstand untersucht (siehe Abb. 5).

Als besonders geeignet hat sich in diesem Zusammenhang eine Statorvariante erwiesen, deren innovative Funktionsweise auf der geschickten Ausnutzung des Antriebsmagnetfeldes basiert. Der berührungslose Zustand wird dabei mittels eines permanentmagnetbehafteten Läufers und im Stator integrierter, ferromagnetischer Ventilkörper erreicht (Abb. 6). Diese Ventilkörper verschließen im Ruhezustand durch Feder-



Abb. 5: In-house test stand

kraft die Druckluftversorgungskanäle und werden erst bei entsprechender Überdeckung durch den Läufer auf Grund der dann wirkenden Anziehungskraft des Permanentmagnetfeldes entgegen der Federkraft soweit angezogen, dass die Zuleitungen der Versorgungskanäle öffnen. Die Druckluft kann nunmehr durch die axialen Durchgangsbohrungen der Ventilkörper in die Vorkammern und von dort über die flächig angeordneten Mikrodüsen in den Luftspalt der Führung einströmen.

Dieses Funktionsprinzip lässt sich gleichermaßen auf ein- oder mehrachsige Antriebe übertragen. Sowohl das Öffnen als auch das Schließen der Ventile erfolgt bei richtiger Auslegung des Magnetkreises, der Federkraft und des anliegenden Speiseluftdrucks selbsttätig, ohne externen Eingriff, ausschließlich in Abhängigkeit der Läuferposition. Bei der Dimensionierung der Per-

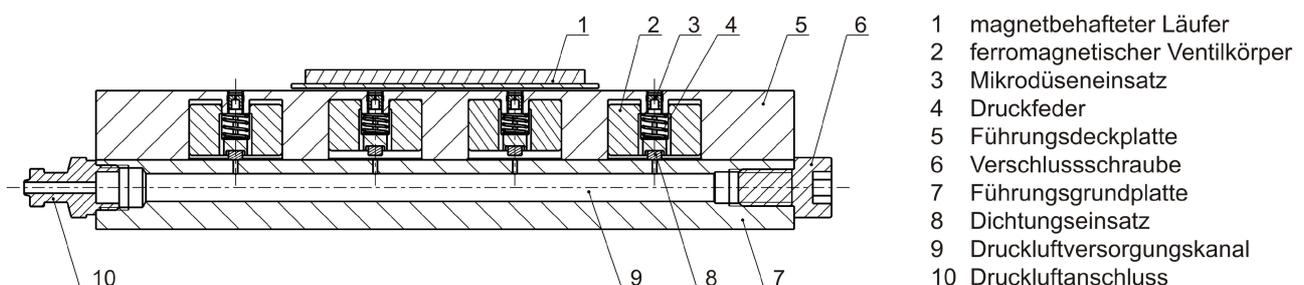


Abb. 6: Aerostatische Führung mit selbsttätiger Kommutierung der statorseitigen Druckluftzufuhr

manentmagnete und der Gestaltung des ferromagnetischen Rückschlusses ist jedoch zu beachten, dass die resultierenden magnetischen Eigenschaften zugleich den Anforderungen des elektrodynamischen Antriebs, der statorseitigen Druckluftkommutierung und der Vorspannung der aerostatischen Führung genügen müssen.

5 Zusammenfassung

Luftgeführte Ein- und Mehrkoordinatenantriebe sind in vielen Bereichen der Industrie und Wissenschaft unverzichtbar. Die derzeit verfügbaren Systeme weisen aber bauartbedingt einige Nachteile auf, die die Dynamik, die Bewegungsfreiheit und den Arbeitsraum erheblich einschränken. Am IKFF wird deshalb ein neuer Gestaltungsansatz verfolgt, der die Integration der aktiven Antriebs- und Führungskomponenten in den Stator vorsieht, somit auf die sonst läuferseitig notwendigen, permanent mitzuführenden Versorgungsleitungen verzichtet und mit einem völlig frei beweglichen Läufer auch große, räumlich unbegrenzte Verfahrenswege ermöglicht.

Für dieses Projekt wurde bereits der erforderliche Forschungs- und Entwicklungsbedarf bestimmt und darauf aufbauend verschiedene Methoden zur selbsttätigen Kommutierung der statorseitigen Druckluftzufuhr konzipiert. Aktuell werden die erfolgversprechendsten Lösungen hinsichtlich ihrer jeweiligen Einsatz- und Realisierungsmöglichkeiten miteinander verglichen. Für experimentelle Untersuchungen stehen dazu speziell angefertigte Versuchsstatoren zur Verfügung.

Wenngleich die ersten Ergebnisse bereits das enorme Potential dieser interessanten Antriebsform aufzeigen, müssen noch eine Reihe weiterer Fragestellungen gezielt analysiert und gelöst werden, um einen wirtschaftlichen sowie störungsfreien Betrieb dieser Systeme auch unter industriellen Einsatzbedingungen gewährleisten zu können.

Letztlich eröffnen die Vorteile dieser aerostatisch geführten Direktantriebe mit statorseitiger Druckluftversorgung und passivem Läufer aber die Chance, mit innovativen Lösungen neue Anwendungsfelder zu erschließen oder bestehende zu optimieren.

Literatur

- /1/ Unterberger, R.: Vereinfachte Berechnung der Tragfähigkeit von aerostatischen Luftlagern und Führungen. In: *Feinwerktechnik & Messtechnik* 87 (1979), Heft 8, S. 372-380.
- /2/ Heinzl, J.: Auslegung und Berechnung aerostatischer Lager mit Einzeldüsen und mit flächig verteilten Mikrodüsen. In: Bartz, W. J.: *Luftlagerungen*. Ehningen: expert-Verlag, 1993.
- /3/ Gerke, M.: Auslegung von ebenen und zylindrischen aerostatischen Lagern bei stationärem Betrieb. Technische Universität München, Dissertation, 1991.
- /4/ Pröger-Mühleck, R.: Lineardirektantriebe für die Stoßjustierung feinwerk- und mikrotechnischer Baugruppen. Universität Stuttgart, Dissertation, 2004. (Bericht aus dem Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, Nr. 23)
- /5/ Schmidt, J.: Grundlagen und Stand der Technik der Luftlagerungen. In: Bartz, W. J.: *Luftlagerungen*. Ehningen: expert-Verlag, 1993.

Dimensionierung und Analyse eines linearen Ultraschallmotors mit zwei Reibkontakten

Dipl.-Ing. Elmar Rothenhöfer

Kurzfassung

Dieser Beitrag berichtet über die Untersuchung eines linearen Ultraschallmotors aus piezoelektrischer Keramik mit zwei Reibkontakten für den Aufbau linearer Positioniersysteme. Seine Funktion basiert auf der phasenverschobenen Anregung der ersten Longitudinal- und der zweiten Biegeschwingung in einem quaderförmigen Resonator bei einem Frequenzverhältnis von eins. Die Longitudinalschwingung erzeugt die Vortriebskraft des Motors und die Biegeschwingung die Normalkraft im Kontaktbereich. Die Resonanzfrequenzen der beiden Eigenformen sind durch die Untersuchung der Resonatorgeometrie mit der Methode der finiten Elemente angeglichen, so dass durch große mechanische Amplituden eine hohe Ausgangsleistung erreicht wird. Die freie Geschwindigkeit des Motors beträgt etwa 130 mm/s bei einer Haltekraft von etwa 10 N.

1 Einleitung

Die Ausgangsleistung piezoelektrischer Linearmotoren hängt stark von der Anzahl der Reibkontakte ab, die auf den Schlitten des Linearantriebs wirken. Der Parallelbetrieb mehrerer Motoren ist damit ein einfacher Ansatz höhere Antriebskräfte zu realisieren. Die Betriebsparameter dieser Motoren hängen jedoch stark von den Abmessungen und der Montage der einzelnen Resonatoren ab, so dass ein vollständig identisches Verhalten nicht immer erreicht wird. Infolgedessen müssen ein erhöhter Verschleiß und ein komplexeres mechanisches Design akzeptiert werden. Ein alternativer Ansatz ist die Verwendung des vorgestellten Motors mit mehreren Reibkontakten. Der Betrieb des untersuchten Multikontakt-Motors stellt eine ebenso große Herausforderung dar, da ein Optimum an mechanischer Abtriebsleistung nur dann erwartet werden kann, wenn die Reibkontakte gleichzeitig oder abwechselnd mit identischer Geschwindigkeit und

gleichen Trajektorien während der Kontaktphase den Schlitten vorantreiben. Ein deutlicher Vorteil derartiger Antriebe allerdings sind die geringeren Kosten und Bauraumvorteile, die sich aus dem vereinfachten Gesamtsystem ergeben.

2 Resonator Dimensionierung

Abbildung 1 zeigt den Resonator mit zwei Reibspitzen und einem zentralen Befestigungspin. Der Resonator besteht aus einem Block aus piezoelektrischer Keramik mit einer Länge von 60 mm, einer Breite von 16 mm und einer Dicke von 5 mm. Diese Abmessungen erlauben hohe Vorspannkraft und damit einen leistungsstarken Motor. Die Anregung der Schwingung erfolgt über zwei identische Oberflächenelektroden des in Dickenrichtung polarisierten Quaders. Die Vorspannung wird durch zwei Gummiblöcke erzeugt, die auf der den Reibkontakten gegenüberliegenden Seite angebracht sind. Das Funk-

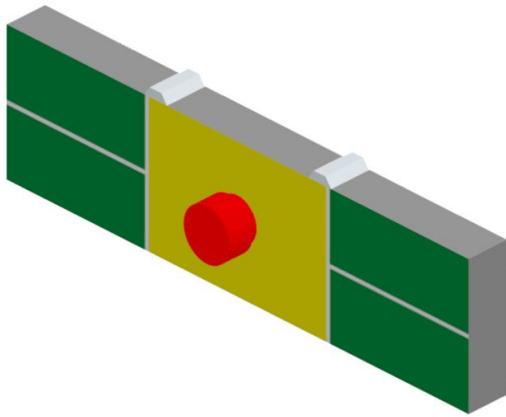


Abb. 1: Resonator mit Befestigungspin

tionsprinzip basiert auf der gleichzeitigen Anregung der zweiten Biegeschwingung und der ersten Longitudinalschwingung. Die Biegeschwingung erzeugt die Normalkraft an den Spitzen. Die Longitudinalschwingung treibt den Schlitten (nicht dargestellt) voran. Die Anregung der Longitudinalschwingung erfolgt durch das mittlere Elektrodenpaar (hellgrau). Die Biegeschwingung wird durch ein Elektrodenmuster angeregt, das durch eine diagonale Verbindung der Ekelektroden (dunkelgrau) aufgebaut wird und die Elektroden auf der Vorder- und Rückseite so verbindet, dass damit eine Anregung der Biegeschwingung möglich ist. Dabei führt die Anregung zu einer Ausdehnung und Kontraktion gegenüberliegender Bereiche des piezoelektrischen Quaders, so dass daraus eine Biegeschwingung entsteht. Beide

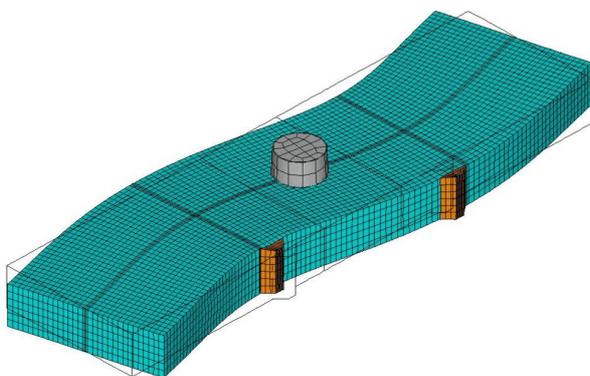


Abb. 2: Zweite Biegeschwingung

Elektrodengruppen werden mit einem Phasenwinkel von 90 Grad angesteuert. Die Förderrichtung kann durch die Veränderung der Phaselage eines Anregungsbereichs um 180 Grad umgekehrt werden. Der mechanische Kontakt zwischen dem Läufer und den beiden Kontaktelementen erfolgt abwechselnd mit einer Phasenlage von 180 Grad.

3 Simulation

Das Erreichen optimaler Motorleistung erfordert eine Abstimmung der Eigenformen, so dass diese möglichst identische Resonanzfrequenzen aufweisen. Die Abstimmung erfolgt durch die Ausnutzung der starken Frequenzabhängigkeit der Biegeschwingung von der Breite des Resonators. Die Modalanalyse der Struktur liefert Resonanzfrequenzen von 27440 Hz für die Longitudinalschwingung und 27420 Hz für die Biegeschwingung. Abbildungen 2 und 3 zeigen die Berechnungsergebnisse des piezoelektrischen Quaders mit Reibkontakten und Befestigungspin.

Die Kontaktelemente haben einen entscheidenden Einfluss auf die Motorleistung, so dass ihre Position und Form entscheidend für die Optimierung sind. Die Reibspitzen werden so positioniert, dass

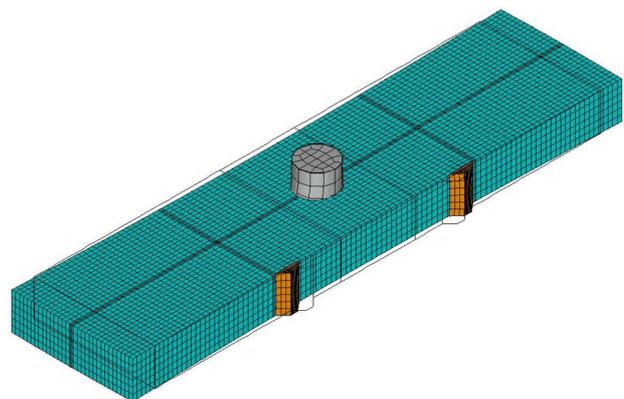


Abb. 3: Erste Longitudinalschwingung

sie bei einer alleinigen Anregung der Biegeschwingung eine rein oberflächenorthogonale Schwingung ausführen. Abbildung 4 zeigt die resultierenden Trajektorien der Mittelpunkte der beiden keramischen Reibelemente für eine Anregung mit einer elektrischen Wechselspannung von 60 V bei einer modalen Dämpfung von 0,5 % und einem Phasenwinkel von 90 Grad.

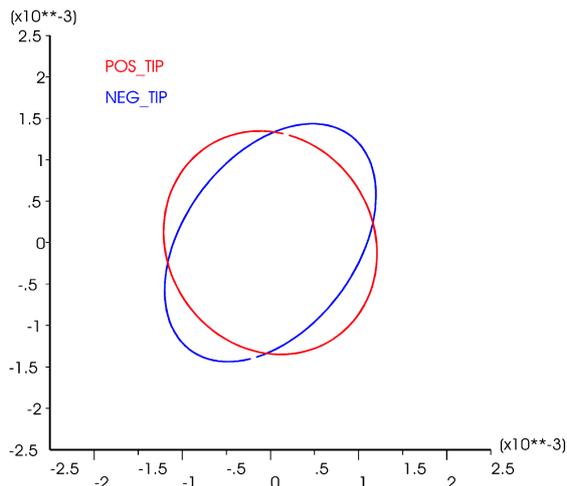


Abb. 4: Elliptische Trajektorien

Die Verdrehung der Trajektorien resultiert aus der Querkontraktion des Vibrators, die eine geneigte Schwingungstrajektorie bereits für die Longitudinalschwingung zur Folge hat. Dieser Effekt ist unumgänglich für die gewählte Position der Reibelemente. Eine Positionierung der Reibelemente an den Enden des Resonators führt zu stark geneigten Schwingungstrajektorien bei der Biegeschwingung und damit zu deutlich größeren Abweichungen der beiden Gesamtrajektorien. Die gewählte Position ist also als optimal anzusehen, da der Kontakt aufgebaut wird, wenn die Biegeschwingung die größte Amplitude hat und die longitudinale Schwingung mit durch ihre Nulllage geht. Aufgrund dieser Überlegungen wird der Einfluss der gegenseitigen Verdrehung als unbedeutend angesehen.

4 Funktionsnachweis

Die Überprüfung der Eigenformen ist aufgrund der extrem geringen Amplituden im Mikrometerbereich technisch schwierig. Es ist von großem Vorteil, die Vermessung der mechanischen Schwingungen berührungsfrei auszuführen. Dies ist möglich mit einem 3D Scanning-Vibrometer, das durch zwei Laserstrahlen, d. h. einen Messstrahl und einen Referenzstrahl, räumliche Schwingungen abbilden kann. Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse der Oberflächenanalyse für eine zweiphasige Anregung des frei schwingenden Resonators mit einer Spannung von 30 V. Die Darstellung erfolgt stark überhöht. Insgesamt zeigen diese Messungen eine gute Übereinstimmung mit den in der Simulation berechneten Schwingungen.

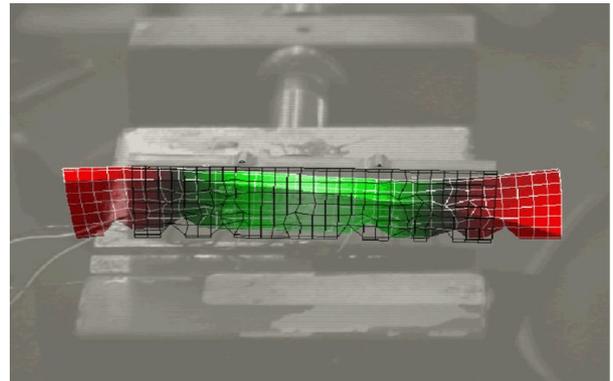


Abb. 5: Scanning Vibrometer Messung

In dem Aufbau aus Abbildung 6 erreicht der Motor eine Leerlaufgeschwindigkeit von 130 mm/s und eine Maximalkraft von 10 N.



Abb. 6: Linearversteller

Für die Analyse des elektrischen Verhaltens kann die Admittanz des Motors mit einem Prüfstand analysiert werden, Abbildung 7.

Die Strommessung erfolgt mit einem Widerstand (SHUNT). Die Messdaten des Oszilloskops (SCOPE) werden über GPIB zurück an den PC übermittelt, um daraus im Anschluss Phasenlage und Betrag der Admittanz berechnen zu können.

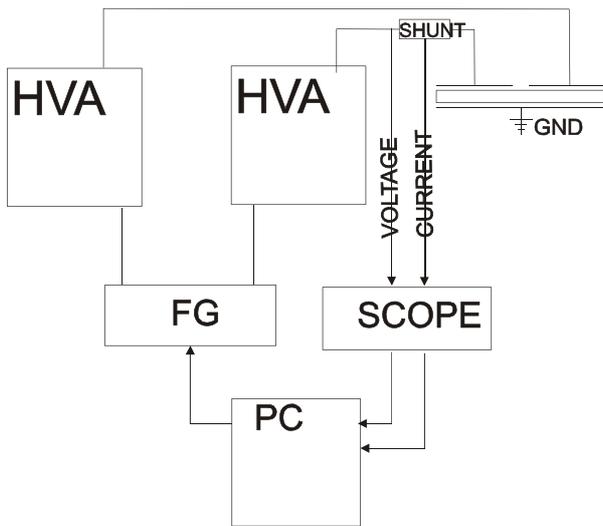


Abb. 7: Impedanz Prüfstand

Die Analyse kann für Spannungen von bis zu $300 V_{p-p}$ im Betrieb erfolgen. Zum Vergleich sind die Ergebnisdaten einer freien Messung der Admittanz mit einem Impedanzanalysator dargestellt, Abbildung 8.

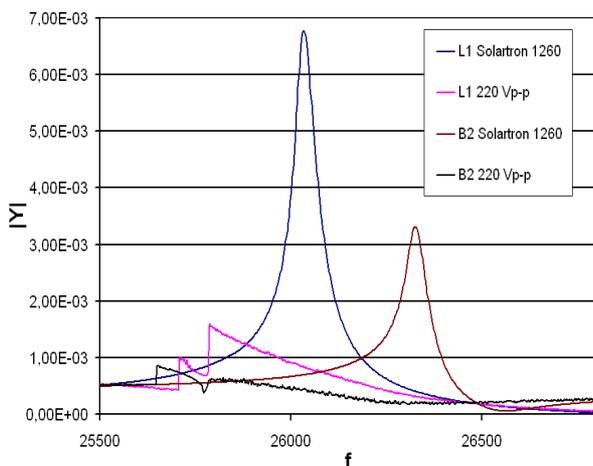


Abb. 8: Impedanzverläufe

Der Verlauf bei kleiner Spannung zeigt aufgrund des fehlenden Reibkontakts einen deutlich höheren Maximalwert. Die Frequenzverschiebung der Biegemode ist auf die mechanische Vorspannung zurückzuführen.

5 Zusammenfassung

Ein Bimodenresonator aus Vollkeramik wurde theoretisch und experimentell für die Anwendung in linearen Präzisionsstellern untersucht. Der Motor besitzt zwei Reibelemente und erreicht damit mit einem Resonator hohe Abtriebskräfte. Die Position und die Form der Reibelemente wurden optimiert und die Resonanzfrequenzen der Eigenformen angenähert. Das Impedanzverhalten des Motors wurde unter Betriebsbedingungen mit einem LABVIEW-Programm und einer geeigneten Messumgebung analysiert. Der Motor erreicht eine Leerlaufgeschwindigkeit von 130 mm/s und eine Maximalkraft von 10 N mit einem Resonator mit 60 mm Länge, 16 mm Breite und 5 mm Dicke.

Simulativ gestützte Auslegung von induktiven Werkzeugheizsystemen im Kunststoffspritzguss

Dipl.-Ing. Michael Zülch

Kurzfassung

Die variotherme Führung des Spritzgießprozesses ermöglicht es, lange Fließwege und hohe Aspektverhältnisse insbesondere bei hochpräzisen, wie zum Beispiel bei mikrosystemtechnischen oder optischen Formteilen konturtreu abzuformen. Auch die Abformung großformatiger Formteile, wie sie zum Beispiel im Automotive-Bereich anzutreffen sind, lässt sich durch eine variotherme Prozessführung gezielt optimieren oder auch erst ermöglichen.

Eine Möglichkeit, den benötigten zusätzlichen Temperaturhub zu realisieren, stellt die induktive Werkzeugtemperierung dar. Sie ermöglicht eine außerordentlich hohe Energieeinkbringung in das Werkzeug und somit eine starke Reduktion der benötigten Aufheizzeiten.

Die Auslegung dieser Prozessvariante stellt hohe und fachübergreifende Anforderungen an die Werkzeugentwicklung. Der Einsatz numerischer Simulationsverfahren kann jedoch helfen, die Entwicklung zielgerichtet und zeitnah zu unterstützen und Fehlinvestitionen wie einen überdimensionierten Induktionsgenerator oder Fehler bei der Induktor-Auslegung zu vermeiden.

1 Einleitung

Bei den meisten konventionellen Spritzgusswerkzeugen wirkt die Temperierung als Kühlsystem, um die beim Einspritzen durch die aufgeschmolzene Formmasse eingebrachte Wärme aus dem Werkzeug abzuführen. Das Temperiermedium wird dabei genutzt, um das Werkzeug auf einer im Mittel konstanter Temperatur zu halten. Zunehmend werden aber an Spritzgusswerkzeuge Anforderungen gestellt, die eine variotherme Temperierung erforderlich machen.

Variotherm bedeutet hierbei, dass das Werkzeug nicht mehr annähernd konstant auf einer Temperatur gehalten wird, sondern vor dem Einspritzprozess auf eine höhere Temperatur, bis hin zur Temperatur der Formmasse, gebracht und nach dem Einspritzen heruntergekühlt wird, um

eine schnelle Erstarrung des Teils zu ermöglichen. Durch diese Art der Temperierung wird ein zu schnelles Erstarren der Formmasse während des Einspritzens verhindert und dadurch die Abbildung von feinsten Strukturen, langen Fließwegen usw. ermöglicht.

Die üblichen Verfahren zur variothermen Temperierung verwenden zwei Flüssigkeitskreisläufe mit Medien auf unterschiedlichen Temperaturniveaus oder widerstandselektrische Heizelemente, gepaart mit Flüssigkeitskühlung. Hierbei wird immer ein sehr großer Bereich des Werkzeugs aufgeheizt, der nach dem Einspritzen dann wieder heruntergekühlt werden muss.

Durch den Einsatz der induktiven Werkzeugtemperierung wird ein deutlich kleinerer Teil des Werkzeugs erwärmt. Dies resultiert, in Kombination mit der schnellen

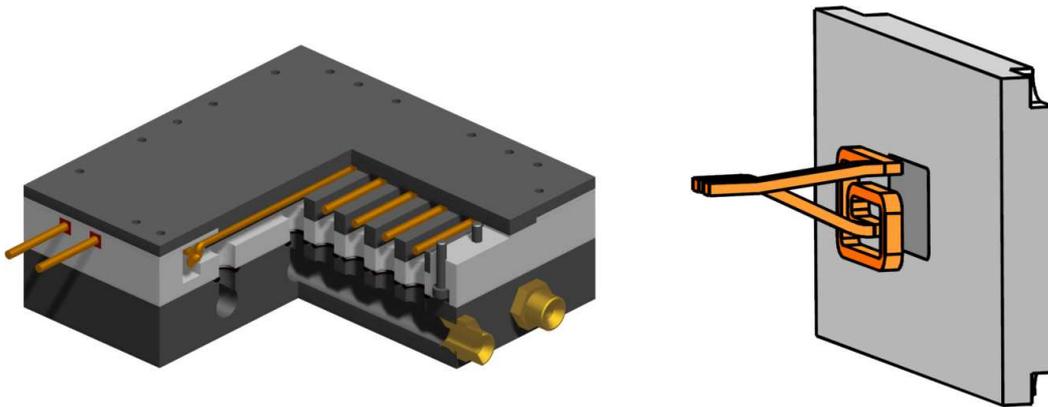


Abb. 1: Vollintegriertes und externes induktives Werkzeugheizsystem

Energieeinbringung der induktiven Erwärmung, in deutlich kürzeren Heizzeiten und führt durch die geringere Energiemenge auch zu deutlich kürzeren Kühlzeiten. Sowohl die dadurch möglichen kürzeren Zykluszeiten als auch der geringere Energieeinsatz führen zu einer wirtschaftlichen Produktion der Spritzgussteile.

2 Grundlagen der induktiven Temperierung

Am häufigsten wird die induktive Erwärmung in den Bereichen der Wärmebehandlung von Metallen und in der Gießereitechnik eingesetzt. Aber auch im Bereich der Gastronomie und zunehmend in privaten Haushalten wird sie inzwischen genutzt. Am IKFF wird seit einigen Jahren daran geforscht, die Vorteile der induktiven Erwärmung bei der variothermen Temperierung von Spritzgusswerkzeugen zu nutzen /1, 2, 3/.

Die induktive Wärmeerzeugung beruht auf dem Transformatorprinzip. 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 leit-

fähiges 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.

Vorteilhaft gegenüber den anderen Methoden, die zur variothermen Temperierung genutzt werden, sind vor allem die sehr hohe Geschwindigkeit bei der Erwärmung des Metalls und die Möglichkeit, gezielt nur den Bereich zu erwärmen, der für ein präzise abformendes Einspritzen der Formmasse notwendig ist.

Je nach Geometrie des Formteils kann dabei der Induktor der induktiven Heizung sowohl vollständig in das Spritzgusswerkzeug integriert als auch als externe Spule eingesetzt werden (Abbildung 1).

Die Auslegung eines induktiven Heizsystems sowie seine Integration in das Werkzeug soll sich nahtlos in bestehende Prozesse zur Konstruktion von Spritzgusswerkzeugen einfügen. Relevant ist hierbei neben der Sicherstellung der Prozesssicherheit vor allem eine genaue Prognose des thermischen und energetischen Verhaltens des Werkzeugs im Betrieb.

Analog zu bereits etablierten Verfahren zur rheologischen, thermischen und mecha-

nischen Auslegung von konventionellen Spritzgusswerkzeugen verfolgt das IKFF bereits seit mehreren Jahren eine simulationsgestützte Auslegung des induktiven Werkzeugheizsystems mit Hilfe der „Finite-Elemente-Methode“ (FEM) /3/.

3 Simulationsgestützte Auslegung

Auf Grund der hohen Komplexität des Problems und der daraus resultierenden langen Rechenzeit zur Lösung des Simulationsmodells ist eine Abklärung eines weiten Parameterraums mit Hilfe eines vollständig dreidimensional modellierten Werkzeugs schwierig. Daher wird am IKFF ein zweistufiger Auslegungsprozess verfolgt, bei dem in einem ersten Schritt ein vereinfachendes zweidimensionales Simulationsmodell zur Klärung möglichst vieler Parameter eingesetzt wird. Erst in einem zweiten Schritt werden dann die Ergebnisse der Grobauslegung auf ein dreidimensionales Modell übertragen und dort weiter verfeinert.

Die generelle Vorgehensweise ist hierbei in beiden Stufen der Auslegung identisch (Abbildung 2). Nach der Modellierung und Vernetzung des Werkzeugs wird in einem ersten Schritt die Einkopplung der elektrischen Energie in das Werkzeug mit Hilfe einer harmonischen Simulation bestimmt. In einem zweiten Schritt wird dann die Temperaturverteilung über der Erwärmungsdauer, die sich aus der Verlustwärme ergibt, in einer transienten thermischen Simulation bestimmt /5/.

Als Ausgangsgrößen stehen nach dem Auslegungsprozess sowohl geometrische Daten wie Induktorgeometrie und Randdaten zur Werkzeugauslegung als auch

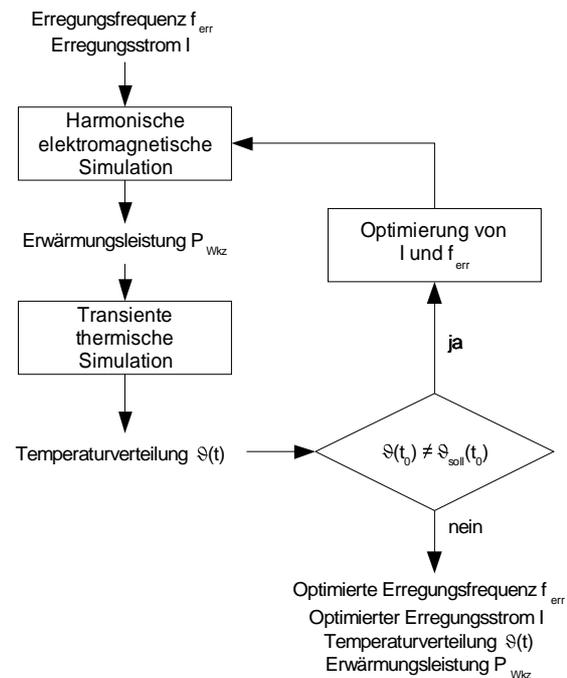


Abb. 2: Simulationsverfahren

elektrische und thermische Daten wie die erforderliche Generatorleistung und -frequenz oder mögliche kritische Bereiche, in denen Material oder Werkzeug hohen thermischen Belastungen ausgesetzt sind, zur weiteren Systemauslegung zur Verfügung.

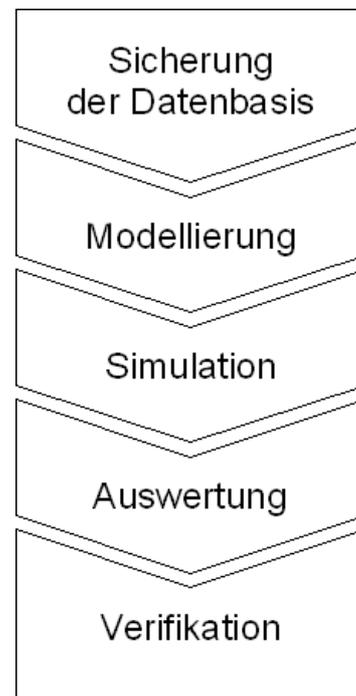


Abb. 3: Simulationsschritte

Um die erforderliche Prognosegenauigkeit der simulativen Auslegung sicherzustellen und somit die Prozesssicherheit im Rahmen der industriellen Massenfertigung sicherzustellen, müssen hierbei alle Simulationsschritte gezielt optimiert werden (Abbildung 3).

Auf Grund der Abfolge bauen die Simulationsschritte auch in Bezug auf die Genauigkeit aufeinander auf. Daher müssen alle Schritte bei der Optimierung als gleichwertig behandelt werden.

Ansatzpunkte zur Optimierung ergeben sich in der Regel direkt aus dem Aufgabeninhalt der Einzelschritte. Exemplarisch sind im Folgenden mögliche Optimierungswege aufgeführt, die derzeit am IKFF verfolgt werden.

4 Datenbasis

Grundlage für eine hohe Prognosegenauigkeit der simulativen Auslegung stellt eine mit ausreichender Genauigkeit gesicherte Datenbasis des Simulationsproblems dar. Hierunter sind neben den geometrischen und thermischen Grunddaten aus der Werkzeugkonstruktion vor allem die elektromagnetischen und thermischen Kenndaten der Werkzeugmaterialien zu verstehen.

Während die thermischen Grunddaten von Formstählen mit ausreichender Genauigkeit verfügbar sind, stehen die elektromagnetischen Kennzahlen derzeit nicht oder nur als grobe Schätzwerte zur Verfügung. Da jedoch insbesondere die elektrische Leitfähigkeit und die elektromagnetische Hystereseurve des Zielmaterials der induktiven Erwärmung einen entscheidenden Anteil an der erzielten Temperaturver-

teilung haben, schränken diese groben Abschätzungen die Aussagekraft der Simulationsergebnisse in nicht zu vertretendem Maßstab ein.

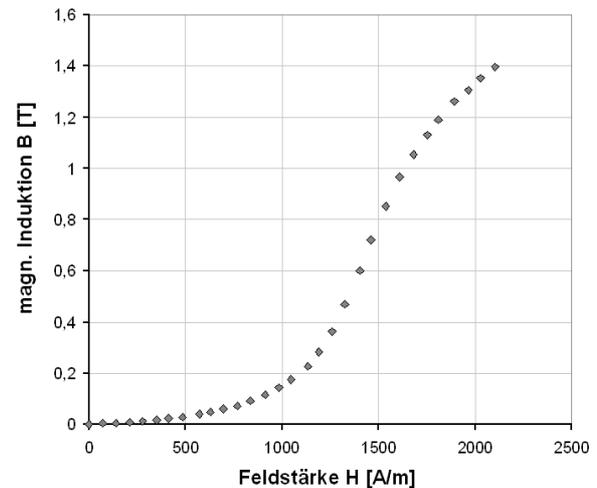


Abb. 4: Experimentell bestimmte Neukurve (Material 1. 2312) /4/

Ziel einer Optimierung der Datenbasis ist es also, diese elektromagnetischen Kennzahlen mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen. Hierzu wurden am IKFF Messstände aufgebaut, die in strenger Übereinstimmung mit den einschlägigen Normen und Standards (u.a. DIN EN 60404 und DIN V ENV 13005) eine Messung der Kennzahlen ermöglichen (Abbildung 4).

5 Modellierung

Wie bereits erwähnt, hat die Modellierung einen entscheidenden Einfluss auf die Modellgröße und somit die Rechenzeit zur Lösung des Problems. Zur Abklärung eines großen Parameterraums ist eine Reduktion der Dimensionalität des Problems erforderlich. Dies kann zum Beispiel durch eine Rückführung des dreidimensionalen Grundproblems auf ein zweidimensionales Modell erfolgen.

Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung der sog. Submodelltechnik, bei der ein grobvernetztes dreidimensionales Modell lokal geschnitten wird und der ausgeschnittene Teilbereich mit einer hohen Elementzahl losgelöst vom Gesamtmodell berechnet wird

Die Anwendung dieser durchaus vielversprechenden Methode beschränkt sich leider derzeit auf wenige ausgewählte Modelle und kann auch nicht ohne Weiteres auf andere Probleme übertragen werden. Es ist jedoch zu erwarten, dass mit fortschreitender Verbesserung der eingesetzten Software ANSYS auch der Einsatz dieser Simulationsmethodik reproduzierbar möglich sein wird.

6 Simulation

Unabhängig von bisherigen Betrachtungen stellt sich bei der konsequenten Betrachtung des Simulationsverlaufs die Frage nach dem Programmpaket, mit dem die Simulationen durchgeführt werden sollen. Es gibt derzeit auf dem Markt eine Vielzahl unterschiedlicher Softwarelösungen, mit denen Simulationen nach dem gewählten Prinzip (harmonisch elektromagnetisch gekoppelt mit transient thermisch) durchgeführt werden können. Als Beispiel seien die am Institut eingesetzten Programm-

pakete ANSYS und Maxwell/ePhysics genannt.

Die einzelnen Programmpakete unterscheiden sich dabei nicht nur in Bezug auf Interface und Funktionsumfang, sondern auch in wesentlichen Aspekten wie den zum Einsatz kommenden Algorithmen. Dies kann zur Folge haben, dass die Ergebnisse der Simulation zum Teil große Unterschiede aufweisen.

Im Rahmen einer Evaluierung der Simulationsprogramme sowie dem Vergleich mit experimentell erhobenen Daten können die unterschiedlichen Pakete in Bezug auf die erreichbare Prognosegenauigkeit verglichen werden. Ziel dieser Untersuchungen ist es Richtlinien zu definieren, nach denen das für den Anwendungsfall optimale Simulationsprogramm ausgewählt werden kann.

7 Auswertung

Die Auswertung, das heißt die Ableitung interpretierbarer Kenndaten aus den Ergebnissen der Simulation, stellt einen weiteren wichtigen Punkt zur Optimierung des Simulationsverfahrens dar.

Können triviale Informationen wie die induktiv erzeugte Wärmemenge oder der sich einstellende Temperaturverlauf noch direkt aus den Rohausgangsdaten abge-

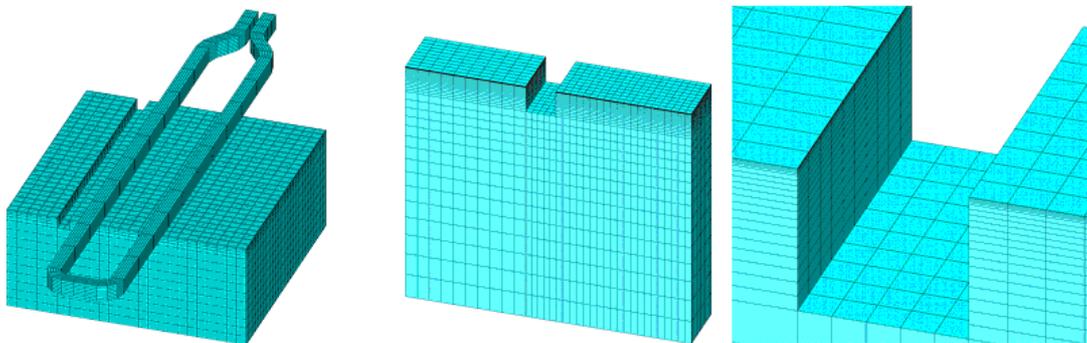


Abb. 5: Grobe Vernetzung (links) und Submodellvernetzung (Mitte und rechts) /6/

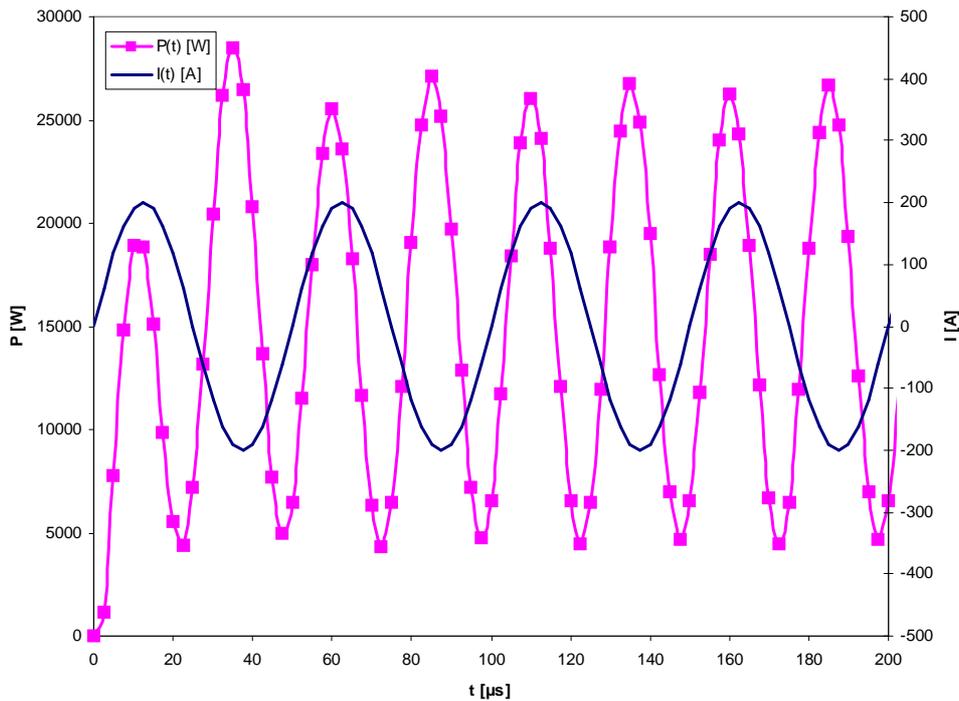


Abb. 6: Beispiel eines Stromverlaufs und des simulativ ermittelten Wirkleistungsverlaufs

leitet werden, sind dahingehend wichtige Kenndaten für den Auslegungsprozess wie die erforderliche Generatorleistung nur über theoretische Betrachtungen herzuleiten.

So muss bei der Betrachtung des Modells davon ausgegangen werden, dass der Induktor eine gemischte Last in einem Wechselstromkreis darstellt. Somit steht für die Erwärmung nicht die theoretische Scheinleistung S des Generators als Produkt aus Effektivstrom und Effektivspannung zur Verfügung,

$$S = U_{eff} \cdot I_{eff}$$

sondern nur der „Wirkleistung“ P genannte Anteil

$$P = S \cdot \cos \varphi$$

wobei φ bei einer sinusförmigen Einkopplung des Stroms den Phasenwinkel zwischen dem Spannungsverlauf und dem Stromverlauf bezeichnet. Der auch als „Leistungsfaktor“ bezeichnete Anteil $\cos \varphi$

kann hierbei als Wirkungsgrad angesehen werden.

Aus der Simulation sind in den bisher eingesetzten Simulationsansätzen nur der Stromverlauf $I(t)$ über der Zeit als Eingangsdatum sowie der Verlauf der Wirkleistung $P(t)$ direkt ableitbar. Zur Bestimmung der erforderlichen Generatorleistung als Auswahlkriterium für den Auslegungsprozess muss daher auch der Phasenwinkel φ bestimmt werden.

Dies gelingt über die Betrachtung des Einschwingvorgangs des sinusförmig erregten Systems (Abbildung 6)

$$I(t) = \sin(\omega \cdot t)$$

und der Bestimmung der Koeffizienten der nichtlinearen Regressionsgleichung

$$P(t) = I(t) \cdot U(t) + PT_2(K, d, T, t)$$

$$P(t) = I(t) \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) + PT_2$$

Der Term „ PT_2 “ entspricht hierbei der Impulsantwort eines PT_2 -Gliedes mit den Ko-

effizienten K , d , und T und stellt das Einschwingen des Gesamtsystems dar. Aus den Koeffizienten folgt nun direkt der Wert für den Phasenwinkel φ und somit auch der bisher fehlende Leistungsfaktor $\cos \varphi$. Somit ist die erforderliche Generatorleistung S über die Multiplikation mit dem Effektivwert der Wirkleistung P ermittelbar.

8 Verifikation

Auch die Verifikation der Ergebnisse hat entscheidenden Einfluss auf die Prognosegenauigkeit der simulativ gestützten Auslegung.

Hierbei ist es von entscheidender Wichtigkeit, welche Parameter des aufgebauten Werkzeugs erfasst werden können und müssen, um zum einen die erforderliche Prozesssicherheit zu gewährleisten, zum anderen jedoch auch eine Wissensbasis für spätere Auslegungsprozesse zu bilden. Von hoher Bedeutung ist hierbei die Messwerterfassung, die auf Grund des Erwärmungsprinzips sich insbesondere im Bereich der Temperaturüberwachung hohen Anforderungen gegenüber sieht.

So ist es in der Regel nicht möglich, die Oberflächentemperatur eines in der industriellen Massenfertigung eingesetzten Werkzeugs mit Hilfe von Infrarotkameras aufzunehmen. Darüber hinaus bestehen auch die in der Temperaturmesstechnik etablierten Thermoelemente in der Regel aus hochpermeablen Metallen wie Eisen oder Nickel und können daher durch eingekoppelte Wirbelströme leicht geschädigt werden. Darüber hinaus sind sie auf Grund der geringen Messspannung anfällig gegenüber Störfeldern, die sich aus der hochfrequenten induktiven Erregung des Werkzeugs ergeben.

Im Rahmen von Grundlagenuntersuchungen ergaben sich erste Richtlinien, nach denen die Messinfrastruktur ausgewählt werden kann. So wurde festgestellt, dass bei Einsatz von Thermoelementen eine vollständige galvanische Trennung von Messstelle und Auswertelektronik in Kombination mit einer Tiefpassfilterung der Messspannungen den Rauschabstand der Messsignale bis in vertretbare Bereiche reduzieren konnte.

Zusätzlich werden derzeit Wege untersucht, mit denen sich über die Temperaturmessung in tieferliegenden Schichten

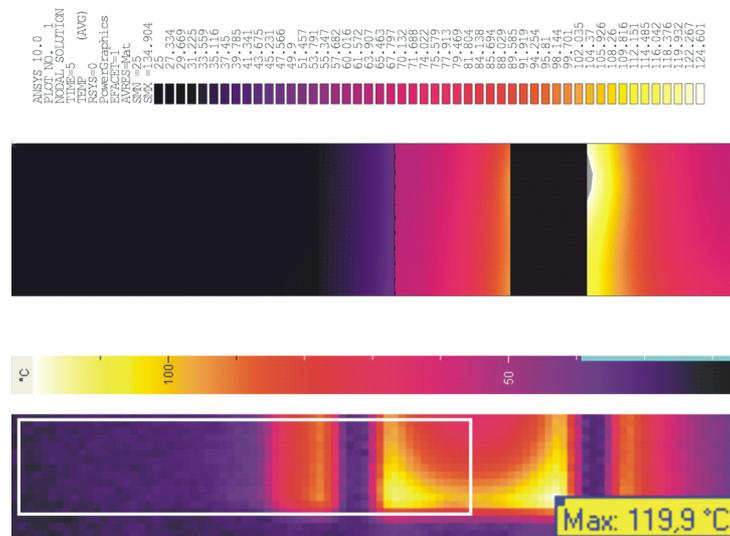


Abb. 7: Vergleich Simulation und Messung der Temperaturverteilung /6/

des Werkzeugs Rückschlüsse auf die reale Oberflächentemperatur ziehen lassen.

9 Erreichte Prognosegenauigkeit

Mit Hilfe der bisher durchgeführten Optimierungen gelang es, die Prognosegenauigkeit der Simulation stark zu erhöhen. So konnte unter Einsatz einer optimierten Datenbasis und der Submodelltechnik in der Simulation bei einem exemplarischen extern temperierten Werkzeug (Abbildung 7) eine Abweichung der gemessenen Temperatur von den Simulationsergebnissen von unter 5 K erreicht werden.

Um eine derartig hohe Genauigkeit reproduzierbar auch bei intern erwärmten Werkzeugen zu ermöglichen, sind weitere Untersuchungen erforderlich, die derzeit im Rahmen eines von der DFG geförderten Projektes am IKFF durchgeführt werden.

Literatur

- /1/ Teward, A.: Entwicklung und Untersuchung eines schnellen Verfahrens zur variothermen Werkzeugtemperierung mittels induktiver Erwärmung. Dissertation, Universität Stuttgart, 1997.
- /2/ Schaumburg, C.: Mikrospritzgießen mit induktiver Werkzeugtemperierung. Dissertation, Universität Stuttgart, 2001.
- /3/ Walther, T.: Geräte und Verfahrenstechnik zur induktiven Werkzeugtemperierung beim Mikrospritzgießen. Dissertation, Universität Stuttgart, 2002.
- /4/ Schupp, T.: Untersuchung der elektromagnetischen Eigenschaften von Kunststoffformstahl. Studienarbeit, Universität Stuttgart, 2007.
- /5/ Zülch, M.; Burkard, E.; Schinköthe, W.: Optimierter Energieeinsatz durch induktive Erwärmung von Spritzgießwerkzeugen - FEM unterstützte Auslegung von induktiven Heizsystemen. Beitrag zum 20. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, 14.-15. März 2007.
- /6/ Hamed, A.: Einsatz der Submodelltechnik in der FEM-Simulation mit ANSYS® bei der induktiven Erwärmung eines Werkstücks. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, 2006.

Zur Ausbildung im Konstruieren

in memoriam Heinrich Stabe

o. Prof. em. Dipl.- Ing. Artur Jung VDI

Vorbemerkung

Der Autor trat 1953 als junger Ingenieur seine erste Stelle in der Versuchsanstalt für Papiermaschinen bei J. M. Voith in Heidenheim an der Brenz an. Das dortige Umfeld mit seiner Vielseitigkeit von konstruktiven und experimentellen Aufgaben war prägend und führte damals zu Überlegungen, die mit der Überschrift angesprochen werden. Das Zusammenwirken von Maschinenbau, Verfahrenstechnik, Elektrotechnik, Regelungstechnik, Mess- und Prüftechnik im System der Papiermaschine verursachten beim Autor Skepsis gegenüber der in den fünfziger Jahren an einigen Hochschulen in Deutschland aufkommenden „Konstruktionsmethodik“. Diese Konstruktionsmethodik und ihre Entstehungsgeschichte ist in einem Buch von Heymann ausführlich dargestellt /1/. Vom Autor wurde seinerzeit diese „Methodik“ für die Praxis am Brett als nicht brauchbar eingestuft. Es drängten sich dem Anfänger Fragen auf wie: Gibt es Methoden, die für die Praxis geeigneter sind, was aus dem Studium ist hier anwendbar? Diese Fragen wurden vertieft gestellt, als der Autor Konstruktions- und Entwicklungsarbeiten Anfang der sechziger Jahre in Führungsfunktion bei Zeiss in Oberkochen übernahm.

1 Blicke in die Literatur

Bereits früh (1850-1930) gab es in der Behandlung des Vorgehens beim Konstruieren erhebliche Unterschiede der Lehrmeinungen. Die „Deduktiven“ und die „Pragmatiker“ vertraten zwei Grundrichtungen, die auch heute noch gelegentlich zum Vorschein kommen.

Immerhin werden auch bei den meisten älteren Vorstellungen methodische Zielsetzungen erkennbar, nämlich eine gewisse Ordnung durch zeitliche Abfolgen, bestimmte Begriffsbildungen, technologisch-experimentelles Arbeiten usw. in den konstruktiven Ablauf zu bringen. Die Methoden orientierten sich an den Produkten. Auch bildeten sich bestimmte übergeordnete produktunspezifische Vorgehensweisen, wie Methoden der Regelungs-

technik, der Getriebelehre, der Strömungstechnik, der Verfahrenstechnik usw. heraus. Namen wie Redtenbacher, Reuleaux, Bach, Rauh, Ernst und später Wögerbauer (Feinwerker), Richter (Getriebe), Kesselring (Kostenfragen und Konstruktion) müssen hier genannt werden. In der Konstruktionslehre wurden (vor 1960) an den Hochschulen im Wesentlichen Vorlesungen über Maschinenelemente angeboten. Nach dem Vordiplom wurde die Konstruktion produktbezogen gelehrt, Stodola (Dampfturbinen), Pfeleiderer (Kreiselpumpen), u.s.w.

2 Konstruktionsmethodik ab 1960

Nach 1960 wurde eine vom Objekt gelöste Konstruktionslehre erkennbar, die als „Kon-

struktionsmethodik“ bezeichnet wurde. Als ein Grund für diesen didaktischen Schritt wurde z. B. die anwachsende Zahl neuer Produkte angegeben, für die keine konstruktiven Vorgehensweisen vorhanden seien. War also bisher die in der Lehre vertretene produktorientierte, rechnerisch-gestaltbezogene Konstruktionslehre üblich, so tritt diese an einigen Hochschulen zurück. Es wurden dort neben den bestehenden Lehrstühlen für Maschinenkonstruktion und Maschinenelemente Institute gegründet, die die neue Konstruktionsweise vertraten. Es entwickelten sich dabei Schulen die - je nach ihrem Gründer - eigene Begriffsbildungen und eigene Ablaufschemata für den Konstruktionsprozess bereitstellten. Gelegentlich wurde das Denken in Black-Box-Strukturen überbetont und das eigentliche konstruktive Gestalten in den Hintergrund geschoben.

In den siebziger Jahren erfolgte mit der VDI-Richtlinie 2222 eine gewisse Vereinheitlichung der unterschiedlichen Vorstellungen. Auch wurden große Anstrengungen unternommen, die „neue“ Methodik den Konstrukteuren der Praxis nahezubringen. Indessen blieb der erwartete Durchbruch in der Praxis aus, was seinerzeit von einigen prognostiziert wurde. Heute weiß man, dass die objektgelöste Konstruktionsmethodik in der Praxis nie eine Rolle gespielt hat. Sie war für den in einem Produktgebiet arbeitenden Konstrukteur kaum (nicht) brauchbar, man vergleiche /5/. Was davon brauchbar war, war den Konstrukteuren schon vorher bekannt und wurde von ihnen auch genutzt.

Ein Kernproblem für die Akzeptanz der objektgelösten Methode durch die Konstrukteure der Praxis war auch der von einigen ihrer Vertreter hochstilisierte Gültig-

keitsanspruch für alle Konstruktionsaufgaben. Heute im Zeitalter des CAD-gestützten Konstruierens sind Universal-Anwendungsvorstellungen einer Methode überwunden. Die Benutzung von CAD-Programmen ist im Allgemeinen immer produktbezogen. Man denke z. B. an Formfüllungs-Simulationen für Spritzgussformen, an Programme für die Konstruktion optischer Systeme usw. Die Beispiele sind Legion.

Neben dem Anspruch der universellen Anwendbarkeit war es problematisch, nicht deutlich zu unterscheiden zwischen der Konstruktionsmethodik für die Lehre und für die Praxis. Man dachte wohl, die Methodik der Lehre würde sich von selbst irgendwie und irgendwann in die Praxis einführen. Das war aber nicht der Fall.

In der Lehre sollte die Frage, welche Anforderungen von der Praxis an die konstruktive Ausbildung gestellt werden, im Vordergrund stehen. Es sind altbekannte Antworten, die z. B. schon bei Wögerbauer zu finden sind. Es sollten solide Kenntnisse in den Grundlagen der technischen Mechanik, der Mathematik, der Physik und räumliches Vorstellungsvermögen, Grundkenntnisse von Werkstoffeigenschaften und von Fertigungsverfahren für die Konstruktionslehre vorhanden sein. Und heute natürlich Kenntnisse von CAD-Methoden und Sprachen. Manche Firmen erwarten von Anfängern bereits Branchenkenntnisse (in Stellenanzeigen erkennbar!).

Was erwartet den jungen konstruktiv interessierten Ingenieur in der ersten Firma? Eine bestimmte Produktpalette, Menschen mit unterschiedlicher Ausbildung und unterschiedlichen Vorstellungen, sowie eine Organisation, die es kennen zu lernen gilt. Nach einer bestimmten Einarbeitungszeit -

oft auch schon in der Einarbeitungszeit - sind aktuelle Tagesprobleme zu lösen. An einem vorhandenem Produkt treten Funktionsstörungen auf (Stopfbüchsen werden zu schnell undicht, unvorhergesehene Schwingungen führen zu Materialbrüchen usw. usw.). Auch Fertigungsschwierigkeiten sind ein Grund dafür, wenn Konstrukteure gerufen werden.

Das Zusammentreffen mit Physikern, Kostenrechnern, Fertigungsfachleuten und anderen Konstrukteuren setzt beim Anfänger Einfühlungsvermögen voraus, insbesondere über den Umgang mit Kritik, die vielleicht notwendig ist. Die Chance, dass ein Anfänger für die Konstruktion eines sehr neuen Produktes eingesetzt wird, ist selten. Meist geht es um Nachfolgeprodukte mit verbesserten Eigenschaften, um Kostensenkung, Gewichtsreduzierung, Verkleinerung oder um das Design. Was also ist in der Lehre für die Praxis zu zeigen?

3 Lehrinhalte für die konstruktive Ausbildung

Weil die Konstruktion von Neuem überwiegend an vorhandenen Produkten ansetzt, ist es gut, wenn dem Studierenden erklärt wird, wie man sich in ein gegebenes Produktspektrum einarbeitet. Hierzu eignet sich die Aufstellung eines Fragekataloges an einem konkreten Beispiel (s. u.). Für die Aufgabe ist im Allgemeinen eine Zielsetzung vorgegeben und nach Abklärung der Situation von Einzelheiten (Konkurrenz, Patentlage, Zeitrahmen) beginnt die Konstruktionsphase. Anstöße für die Entwicklung bildlicher Vorstellungen gehen meist aus vom Verfahren der Variation der Geo-

metrieparameter des gegebenen Produktes, um zu dem gewünschten Funktionsziel zu kommen (Vergleiche Niemann „Maschinenelemente“). Anstöße gehen auch vom Wechsel der Stoffe aus.

Wandel der Geometrieparameter und der Stoffparameter sind die wichtigsten Möglichkeiten, die dem Konstrukteur zur Gestaltung zur Verfügung stehen. Seltener ist es die Möglichkeit einer anderen physikalischen Grundlage. Allerdings kommt dieser Fall bei feinwerktechnischen Aufgabenstellungen vor, aber er führt auch dort im Allgemeinen zum Eingriff in die Geometrie- und Stoffparameter. Weil der Geometriewandel und der Wechsel der Stoffparameter am häufigsten bei neuen Produktkonstruktionen anzutreffen sind, wurden vom Autor hierfür die Begriffe **Geometrie-Funktionsprinzip, Grundgeometrie, Stoff-Funktionsprinzip und Gestalt** geprägt /2/,/3/,/4/. Damit werden die Fragen zu beantworten versucht, welchen geometrischen Grundaufbau verlangt die zugrundeliegende Physik des Produktes, welche Grundgeometrie des Ganzen, welche Stoffe, welche Strukturen für die Steuerung und Regelung der Baugruppen sind möglich?

Zum Verständnis des Begriffes Grundgeometrie ist auf Abbildung 1 die Anordnungsstruktur der Entwässerung in der Papiermaschine in zwei Grundgeometrien dargestellt. Oben ist die Grundgeometrie „Langsieb-Entwässerung“, unten die „Duo-sieb“-Grundgeometrie gezeigt. Die Erfindung einer neuen Grundgeometrie, die andere Funktionseigenschaften besitzt, ist eine kreative Leistung. Sie erschließt für ein Produkt neue Einsatzgebiete oder andere Anwendungsbereiche (Beispiel Wasserturbinen: Peltonturbine, Francistur-

bine, Kaplan turbine sind z. B. die drei Grundgeometrien für unterschiedliche Einsatzbereiche).

In der Lehre des methodischen Konstruierens sollte die Bedeutung der gestaltbildenden Vorgehensweise an Beispielen gezeigt und geübt werden. Das ist nicht einfach und setzt beim Lehrenden Konstruktionserfahrungen, die in längerer Zeit gesammelt wurden, voraus. Auch bei der Gestaltung von Baugruppen geht es um die Auffindung der bestgeeigneten Grundgeometrie /6/. An methodischen Hilfsmitteln für die Findung von Grundgeometrien können geometrisch orientierte morphologische Kästen dienen /7/.

4 Verallgemeinerungen

Die Fragestellungen, die an den Beispielen des gestaltenden Konstruierens gewonnen wurden (Was gibt es an Grundgeometrien, wo sind Mängel des Produktes, was verursacht die meisten Kosten, wo sind die engsten Toleranzen, wo sind kritische Wärmequellen in einem Gerät, Kabelbäume: Zugänglichkeit bei der Montage usw. usw.), lassen sich für ganze Produktkategorien verallgemeinern, so dass man dazu beinahe von einer branchenspezifischen Fragestellung sprechen kann. Und so sei die Meinung geäußert:

Eine Lehre für die Ausbildung in der Methodik der Konstruktion, die auch in der Praxis bestehen kann, ist ohne produktbezogenes Denken, mit den Antworten auf die dabei auftretenden Fragen der Gestaltbildung und ihren Wegen, nicht vermittelbar.

Beispiele für methodisches produktspezifisches Konstruieren finden sich in /3/, /8/, /9/ mit vielen Literaturhinweisen dazu. Weiter in der „Feinwerktechnik & Meßtechnik“ der Jahrgänge 1970/1980.

5 Methodische Gestaltbildung (Empfehlungen für die Lehre)

Man gebe den Studierenden Anregungen, wie man sich in ein konstruktives Gebiet einarbeitet.

Fragen:

- Wie kam es zu den Produkten der Firma?
- Kurze Einführung in die Historie!
- Aktuelle Probleme der Produkte?
- Konkurrenzprodukte?
- Physikalische Grundlagen der Produkte?
- Mathematische Grundlagen?
- Erfahrungswerte?
- Aufstellung von Leitgleichungen?

Beispiele zur Gestaltbildung entwickeln:

- Möglichst gute, nachvollziehbare Tafel-skizzen, die schrittweise aufgebaut werden, vorführen (für ein Skizzenheft des Studenten).
- Die Gestalt des physikalischen Prinzips als Kern einer möglichen Grundgeometrie ausarbeiten.
- Die stoffliche Gestaltbildung in ihrem Einfluss auf die geometrische Formen.

6 Gestaltbildung von Details - Kernaufgaben

Aufgabe 1: Zusammenhalt bilden, das Ganze sehen, „Etwas“ halten...

- Gehäuse, Rahmen, Chassis, Platten, ...
- Aufgabe 2: Lage definiert positionieren und befestigen ...
 Passstifte, Passschrauben, Justierelemente, Vorrichtungen dazu ausdenken, ...
- Aufgabe 3: Bewegungen ausführen und übertragen ...
 Motoren, Magnete, Piezos, Getriebe, Spindeln, Hebel, Schrauben, ...
- Aufgabe 4: Es muss „Etwas“ geführt werden ...
 Linearführungen, Blattfederführungen, Luftlager (Genauigkeitsaspekt), ...
- Aufgabe 5: Es muss „Etwas“ gelagert werden ...
 Gleitlager, Kugellager, Federgelenke (Lebensdauer), ...
- Aufgabe 6: Verbinden von Leitungen, Rohren, Kabel, ...

Weitere Aufgaben aus dem Erfahrungsbereich des Lehrenden:

Technologische Aspekte der Gestaltung, Dichten, Fehleranalysen an den Elementen, Montierbarkeit von Kabelbäumen, usw.

Das Vorführen von fertigen Overheadfolien ist für die Lehre der Gestaltbildung nicht geeignet.

7 Beispiel der Feinwerktechnik: Arzneimitteldosierung

In den Grundvorlesungen der Konstruktionslehre ist es zur Gestaltbildung wertvoll, Beispiele aus verschiedenen Gebieten am

Overhead-Projektor (oder an der Tafel) nachvollziehbar für die Studenten vorzuführen. Es kann dabei ein Skizzenheft angelegt werden. Dabei können bei den Skizzen Idealisierungen, Vereinfachungen, Merkmalskonzentrationen usw. erfolgen, die mit kurzen Kommentaren versehen sind.

Ein Beispiel für diese Vorgehensweise kann die konstruktive Entwicklung aller Arten von Schnupftabakschleudern sein. Hier taucht die Aufgabe der Dosierung und Einbringung von Pulvermengen auf, die sich auch bei der Inhalation von Arzneimitteln ergibt.

Die am Markt vorhandenen Geräte hierzu sind Beispiele für die Gestaltbildung von Kunststoffteilen hoher Komplexität. Der Vortrag über eine solche Konstruktion erfordert vom Lehrenden (der ja nicht Fachmann ist) Aufwand an Zeit. Er muss sich vorhandene Geräte beschaffen, diese zerlegen, analysieren und für den Vortrag aufbereiten. Wie schwierig das bei der zeitlichen Belastung durch Verwaltungsarbeiten, Gremienaufgaben usw. ist, zeigt eigentlich, dass eine gute Gestaltungsvorlesung äußerst mühsam und auch selten möglich ist. Es liegt viel näher eine „Schema F“-Vorlesung anzubieten, die aber dem Studenten die Lust am Konstruieren vergällt.

Im folgenden Beispiel wird die Lösung einer Arzneimittel-Dosierung der Firma Glaxo-Smith gezeigt, bei der das Pulver dosiert zwischen zwei Folien eingeschweißt ist und beim Transport zum Inhalieren freigesetzt wird. Abbildung 2 zeigt die Lösung in zerlegter Form. Abbildung 3 dient dem Verständnis. Der Hebel H wird bewegt und dreht die Räder in Pfeilrichtung. An der Stelle T werden die Pulver-

kammern geöffnet, indem das Deckband gelöst und vom rechten Rad aufgewickelt wird. Das Pulver kann nun oben abgesaugt werden. Das leere Band bewegt sich nach links und wird dort aufgenommen. Feinheiten, wie das Stillstehen der Räder bei der Rückbewegung des Hebels H, sind nicht dargestellt. Für die Gestaltung war hier das geometrisch-kinematische Denken und die technologische Idee, das Arzneimittel dosiert zwischen zwei Bänder einzuschließen, erforderlich. Geometrisch-kinematisches Denken ist besonders auch in Spielzeugen anzutreffen, weshalb diese sich gut für gestaltende Vorlesungen eignen.

Aufgabe:

Es gibt für die Arzneimittel-Dosierung noch weitere Lösungen am Markt. Wie könnten sie aussehen?

Anmerkung:

Um Gestaltbildung zu üben sind Konstruktionswettbewerbe eine gute didaktische Möglichkeit, die auch zur Motivation für eine konstruktive Tätigkeit geeignet ist.

Literatur

- /1/ Heymann, M.: Kunst und Wissenschaft in der Technik des 20. Jahrhunderts, Chronos-Verlag Zürich, 2005.
- /2/ Jung, A.: Aufgabenstellung und Konstruktionsmethodik, Konstruktion 25/1973, Springer Verlag.
- /3/ Jung, A.: Funktionale Gestaltbildung, Springer Verlag Berlin, 1989.
- /4/ Jung, A.: Die technische Gestalt - ein Werkzeug zur Analyse und Kreation beim Konstruieren, Jahrbuch TU Ilmenau Bd. 12, 2005.
- /5/ Mette, M.: Die Geschichte eines technischen Produktes, Konstruktionsmethodik- Quo vadis?, Bericht 56 zum 80. Geburtstag von Prof. K. Roth, TU Braunschweig, 1999.
- /6/ Stabe, H.: Grundsätzliches über die verschiedenen Gehäuse in der Feingerätetechnik, Feingerätetechnik 6, 1975.
- /7/ Zwicky, F.: Entdecken Erfinden Forschen im morphologischen Weltbild, Knauer-Droemer Verlag München, 1966.
- /8/ Jung, A.: Methodische Alternativensuche und Intuition beim Konstruieren, KEM 10 (1973) H.8 S. 27-32, H 9 S.51-63, H 10 S. 41-49.
- /9/ Wolff, J.: Kreatives Konstruieren, Giradet Verlag Essen, 1976.

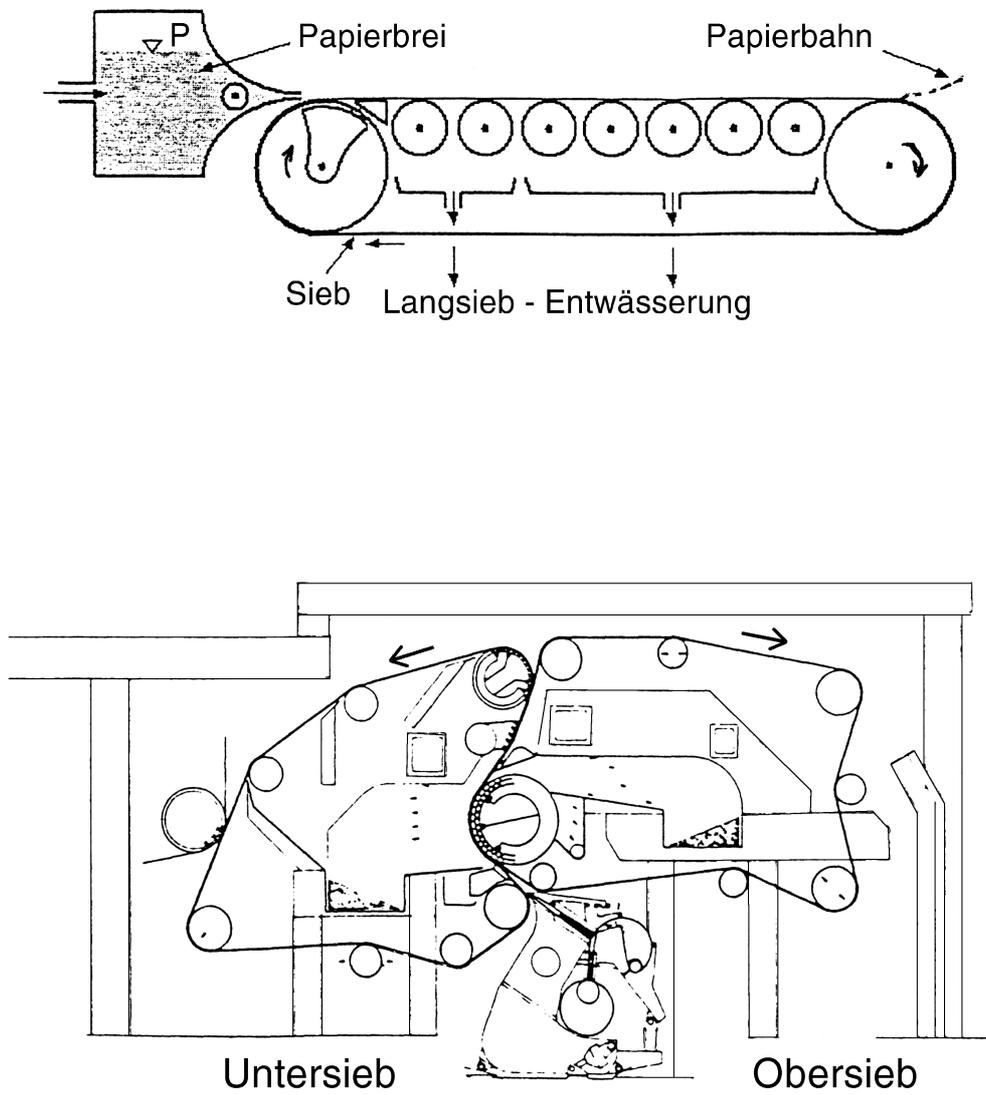
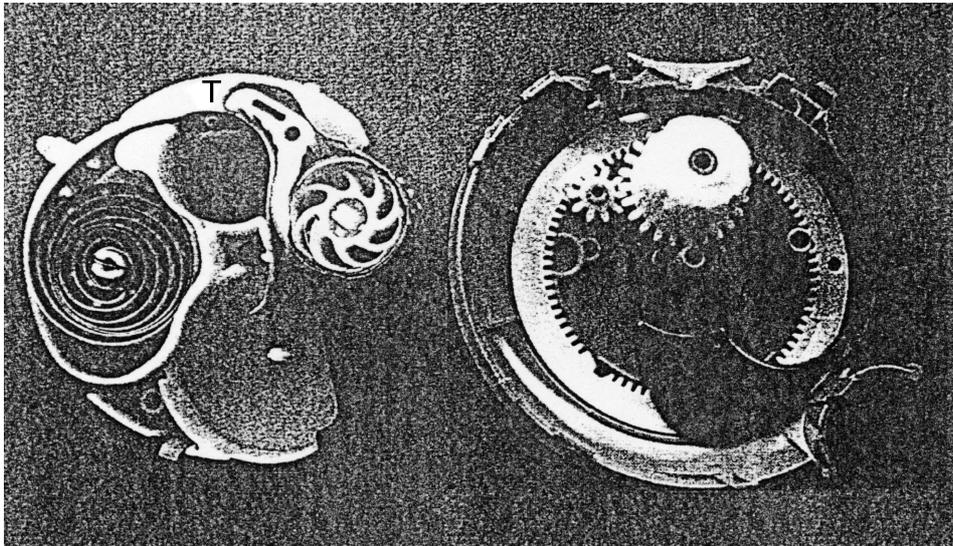
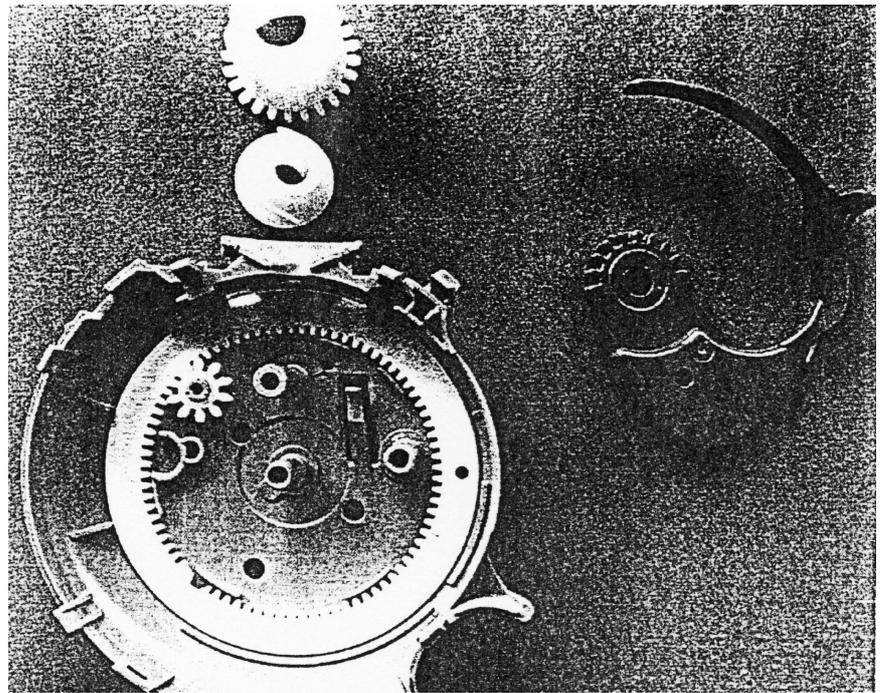


Abb. 1: Grundgeometrien der Entwässerung bei Papiermaschinen

Teilbild 1
 Einzelteile der Transportmechanik
 rechts:
 Betätigungshebel
 oben:
 Zahnrad mit Nocken
 zum Auspressen, Mitnehmer
 unten:
 Gehäuse, Innenzahnrad



Teilbild 2
 rechts:
 Teile von Teilbild 1,
 zusammengesteckt
 links:
 Gehäuseteil mit aufgewi-
 ckeltem Band (links)
 bei T: Trennstelle des
 Bandes
 rechts:
 Wickelrad der Bandab-
 deckung

Teilbild 3
 Mechanismus zusammengesteckt
 V=Vorratskammer für bestücktes Band
 (hier leer)
 bei P: Pulveraustritt zum Inhalieren

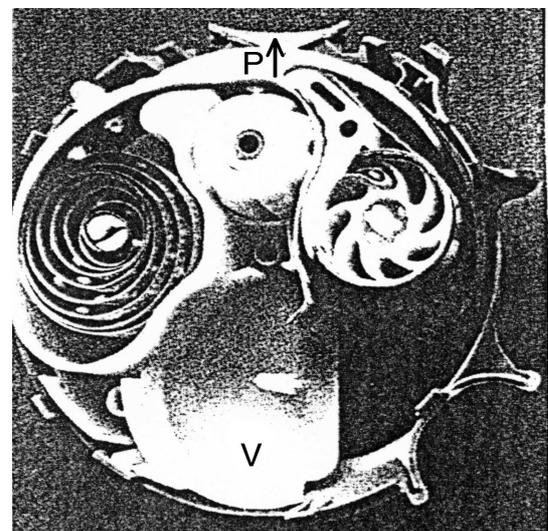


Abb. 2: Arzneimitteldosiergerät

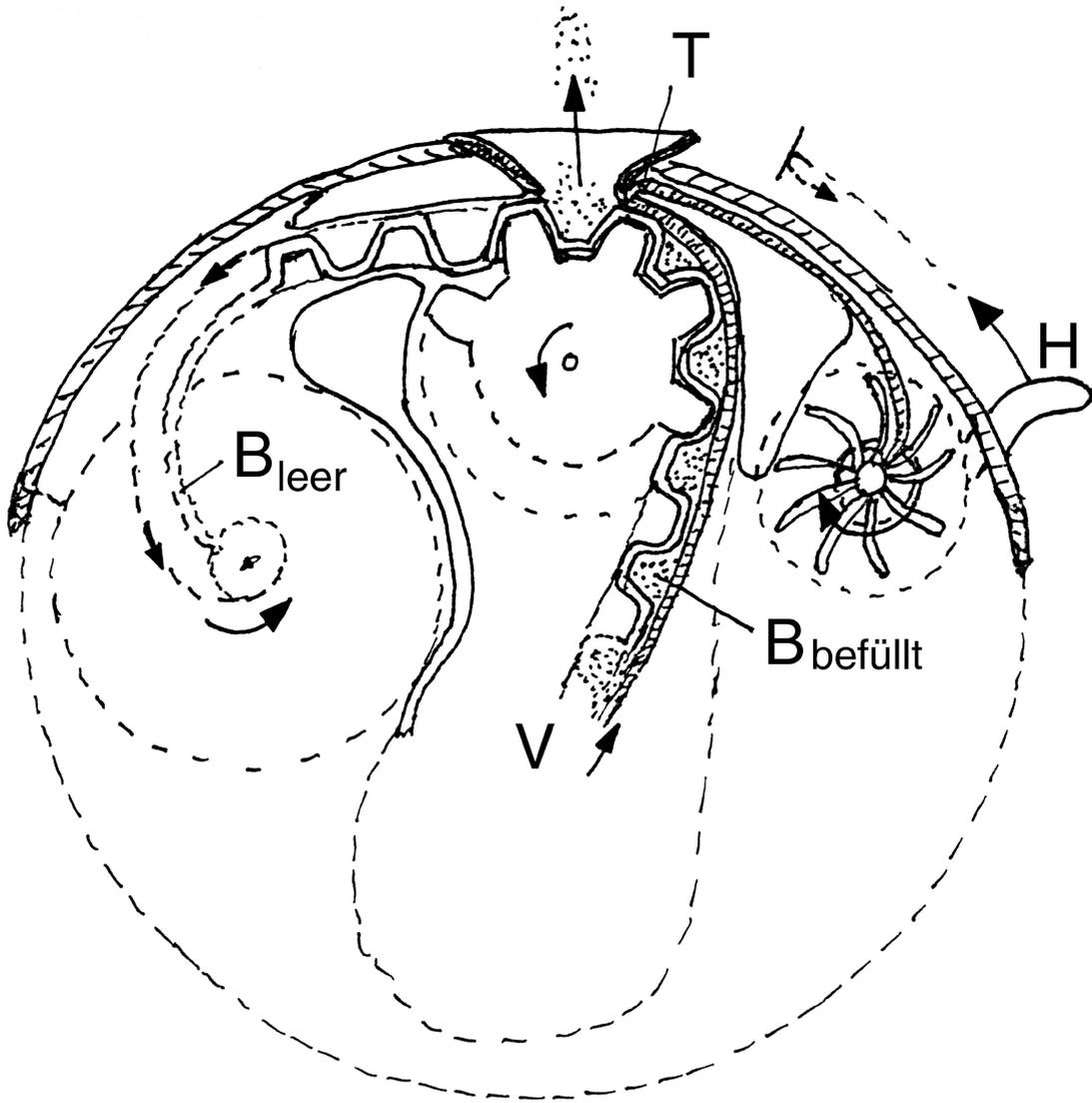


Abb. 3: Vereinfachte Darstellung zu Abbildung 2

