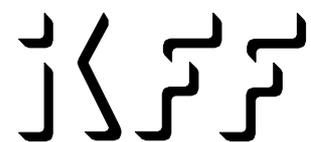


Universität Stuttgart

## **Jahresbericht IKFF 2004**

Institut für Konstruktion und  
Fertigung in der Feinwerktechnik



Herausgeber und Verlag:

Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik  
Pfaffenwaldring 9

70550 Stuttgart

Tel.: 0711 / 685 64 02

Fax: 0711 / 685 63 56

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe

Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, März 2005

## **1 DAS INSTITUT**

- 1.1 Mitarbeiter
- 1.2 Jahresrückblick
- 1.3 Wissenschaftliche Arbeitsgebiete

## **2 LEHRVERANSTALTUNGEN**

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

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

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

## **4 ARBEITSGEBIETE DER MITARBEITER**

- 4.1 Aktorik
- 4.2 Spritzgießen
- 4.3 Sonstige Arbeiten

## **5 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT**

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

## **6 KONGRESSE, TAGUNGEN UND MESSEN**

## **7 WERKSTATTBERICHT**

## **8 ANHANG - wesentliche Veröffentlichungen**

# 1 DAS INSTITUT

## 1.1 Mitarbeiter

### **Institutsleitung:**

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe

### **Emeritus:**

Prof. Dipl.-Ing. Artur Jung

### **Sekretariat:**

Ulrike Ortner

Margit Reinhardt

### **Unbefristeter wissenschaftlicher Mitarbeiter:**

Akademischer Rat: Dipl.-Ing. Eberhard Burkard

### **Befristete wissenschaftliche Mitarbeiter:**

Dipl.-Ing. Uwe Bayer

Dipl.-Ing. Christin Clauß

Dipl.-Ing. Matthias Dannemann

Dipl.-Ing. Andreas Grotz

Dipl.-Ing. Thilo Köder

Dipl.-Ing. Elmar Rothenhöfer

Dipl.-Ing. Andreas Weber

### **Modellbau und Versuchswerkstatt:**

Ralf Berwanger

Stefan Schneider

**Wissenschaftliche Hilfskräfte:**

Tobias Alber  
Michael Beier  
Nora Hägele  
Selga Ignasi

Metodi Kostadinow  
Georg Pfeilschmidt  
Marc Schneider  
Daniel Sieber

## 1.2 Jahresrückblick

### Personalia

Herr Dipl.-Ing. Uwe Bayer war vorübergehend im Bereich der Zuverlässigkeitstechnik eingestellt, sonst gab es 2004 keine personellen Veränderungen.

### Aktivitäten in der Lehre

Die Anfängerzahlen im Maschinenbau im weiteren Sinn stabilisieren sich, allerdings nur wegen der Einführung eines Eignungsfeststellungsverfahrens mit Begrenzung der Zugangszahlen. Insgesamt liegen die Anfängerzahlen aller maschinenbaulichen Studiengänge der Universität Stuttgart (ohne Luft- und Raumfahrttechnik) derzeit bei über 700 Studierenden.

Im Studiengang Maschinenwesen selbst bewegen sich die Anfängerzahlen nach Einführung eines Eignungsfeststellungsverfahrens um 250 Studierende. Im Hauptdiplom ist die starke Zunahme der Studierendenzahlen der letzten beiden Jahre jedoch nach wie vor noch nicht angekommen.

Bei den Lehrveranstaltungen des Instituts ist das Bild auch dementsprechend geteilt. Die Vordiploms-Lehrveranstaltungen konzentrierten sich auf die Fächer Konstruktionslehre Feinwerktechnik III und IV im dritten und vierten Semester als Wahlmöglichkeit für den Studiengang Maschinenwesen und seit dem Jahr 2002 auch zusätzlich als Wahlmöglichkeit für den Studiengang Technologiemanagement. Für die Studierenden des Technologiemanagements wird dabei in KL IV ein modifiziertes Programm mit nur 2 Stunden Vorlesung angeboten. Insgesamt sind derzeit im Wintersemester 2004/2005 in KL III 157 Studierende und damit fast doppelt so viele wie im letzten Jahr eingeschrieben. Der schon traditionell jährlich stattfindende Konstruktionswettbewerb der Studierenden der Konstruktionslehre IV war wieder ein Höhepunkt unserer Arbeit im Vordiplom (siehe Abschnitt 5.3).

Das Hauptfach Feinwerktechnik kann sich demgegenüber den sinkenden Studierendenzahlen im Hauptdiplom nicht entziehen. Derzeit wird es von ca. 15 Studierenden in den beiden Semestern belegt. Die Lehrveranstaltungen des Hauptdiploms

konzentrieren sich auf die beiden Schwerpunkte Gerätekonstruktion als methodisch orientierte und feinwerktechnische Aktorik als konkret forschungs- und entwicklungsorientierte Linie.

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

Die Vorlesung „Aktorik in der Feinwerktechnik - Berechnung, Konstruktion und Anwendung“ beleuchtet dagegen feinwerktechnische Antriebssysteme (Aktorik) unterschiedlichster Wirkprinzipien. Den Schwerpunkt bilden elektromagnetische und elektrodynamische Stelltechnik, piezoelektrische und magnetostriktive Stelltechnik, Magnettechnik und -technologie sowie Beispiele zur Realisierung feinwerktechnischer Antriebssysteme. Die Lehrinhalte zur Aktorik sind in zwei Buchbeiträgen für das „Handbuch Elektrische Kleinantriebe“ und für das Lehrbuch „Gerätekonstruktion in Feinwerktechnik und Elektronik“ enthalten.

Die Hauptfachpraktika „Ultraschallantriebe“, „Lineardirektantriebe“, „Schrittmotoren“, „Koordinatenmesstechnik“, „FEM-Berechnungen mit ANSYS sowie Maxwell“ und „Spritzgießen“ sind in die Lehrveranstaltungen einbezogen.

Die Absolventen fanden auch 2004 relativ schnell einen Einstieg in die Industrie.

### **Self-study online**

Im Rahmen der Aktion self-study online der Universität Stuttgart erarbeitete unser Institut im Jahre 2004 ein Selbstlern-Modul für das FEM-Praktikum ANSYS im Wintersemester. Ziel ist eine schnellere Einarbeitung der Studierenden in ANSYS, die Bereitstellung einer Möglichkeit zur effizienten Vorbereitung auf das Praktikum selbst und auch eine Unterstützung für Studierende, die unsere Kurse nicht belegt haben, in Studien- und Diplomarbeiten aber mit ANSYS FEM-Rechnungen vornehmen. Damit haben wir den Ausbau unseres Online-Auftritts weiter vorangetrieben. Auch 2005 werden wir diese Aktivitäten gezielt weiterführen.

### **Aktivitäten in der Forschung**

Die Entwicklung alternativer Antriebssysteme für die Feinwerktechnik auf der Basis elektrodynamischer Kraftwirkung (Elektrodynamische Linearmotoren) bzw. von Festkörpereffekten (Wanderwellenmotoren) steht nach wie vor im Mittelpunkt des Arbeitsgebiets **Aktorik**. Als Schwerpunkt in der Nutzung elektrodynamischer Antriebsprinzipien wird derzeit die am Institut entwickelte integrierte Wegsignal-erfassung im Rahmen eines DFG-Projekts auf Motoren mit Kurzspulen und Motoren mit bewegten eisenlosen Wicklungen erweitert. Das DFG-Projekt dazu wurde nach erfolgreichem Zwischenbericht für das dritte Jahr genehmigt.

Die Arbeiten zur integrierten Wegmessung in Motoren mit bewegten Magneten als Läufer wurden bereits zu einem gewissen Abschluss gebracht, insbesondere durch die Untersuchungen hinsichtlich der erzielbaren Genauigkeiten und der Wechselwirkungen mit dem Motorstrom. Im Jahre 2004 wurde die Dissertation dazu veröffentlicht.

In Industrieprojekten werden darüber hinaus diverse anwendungsspezifische elektrodynamische Linearmotoren und die zugehörige Ansteuerelektronik sowie Software dafür entwickelt und realisiert.

Die Forschungen zur Anwendung von stark miniaturisierten elektrodynamischen Lineardirektantrieben für die Stoßjustierung feinwerk- und mikrotechnischer Baugruppen wurden 2004 mit der Drucklegung der Dissertation dazu abgeschlossen. Forschungen zur Realisierung von Direktantrieben nach dem Prinzip von Wanderwellenmotoren wurden 2004 als Industrieprojekt ausgeführt.

Das Thema **Spritzgießtechnologie** in der Feinwerktechnik bildet einen weiteren Stützpfeiler des Instituts. Nach wie vor werden am IKFF die Entformungskräfte beim Spritzgießen in Abhängigkeit von Oberflächenrauheit und Beschichtung sowie vom eingesetzten Kunststoff untersucht und spezielle Werkstoffe und Beschichtungen für Firmen getestet. Hier gibt es immer wieder Anfragen aus der Industrie zur Untersuchung spezieller Werkstoffe.

Im Jahre 2004 wurden die Arbeiten zur variothermer Prozessführung durch Induktionserwärmung auf größere Bauteile und Werkzeuge mit integrierten Induktoren und Impulskühlung ausgeweitet und übertragen.

Das Arbeitsgebiet **Zuverlässigkeit feinwerktechnischer Antriebe** wurde inzwischen am IKFF gut etabliert. Das IKFF ist mit einem Teilprojekt in der DFG-Forschergruppe „System-Zuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen“ integriert.

Das angestrebte Ziel der Forschergruppe ist die Entwicklung von Methoden zur Bestimmung der Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen. Durch die Einbeziehung der Zuverlässigkeitsuntersuchungen bereits in den frühen Entwicklungsphasen sollen neben zuverlässigeren Produkten mit geringeren Ausfallquoten auch ein schnellerer Entwicklungsprozess und die Integration aller am Produkt beteiligten Fachgebiete (System-Zuverlässigkeit) an aktuellen mechatronischen Systemen erreicht werden.

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

Inzwischen sind zwei Dauerversuchsstände zur Ermittlung der Ausfalldaten von Kleinmotoren einschließlich deren Getriebe realisiert und im Dauerbetrieb. Erste Daten liegen vor.

### **Weitere Aktivitäten**

Im Rahmen der Forschungsprojekte wurde eine Reihe von Drittmittelaufträgen aus der Industrie eingeworben. Veröffentlichungen (siehe Abschnitte 5 und 8) zeugen von den in der Forschung erzielten Ergebnissen.

Viele der Veröffentlichungen sind im Volltext auf der Homepage des Instituts zugänglich ([www.uni-stuttgart.de/ikff](http://www.uni-stuttgart.de/ikff)).

## **1.3 Wissenschaftliche Arbeitsgebiete**

Am Institut werden vier Forschungsschwerpunkte bearbeitet:

Im Arbeitsgebiet **Aktorik** stehen feinwerktechnische Direktantriebe, vorzugsweise für lineare Antriebsbewegungen, im Mittelpunkt. Einen Schwerpunkt bilden elektrodynamische Linearantriebe, deren Berechnung und die integrierte Wegsignalerfassung. Neben den elektrodynamischen Systemen bilden piezoelektrische Antriebe, insbesondere Wanderwellenmotoren, einen zweiten Arbeitsschwerpunkt.

Im Arbeitsgebiet **Präzisionsspritzguss** steht die Abformung von Präzisionsbauteilen mit sehr feinen, genauen Strukturen durch Spritzgießen im Vordergrund. Dabei wird neben der Bauteilkonstruktion und dem Formenbau insbesondere der Formfüllvorgang sowohl theoretisch simuliert als auch praktisch an zwei Spritzgieß-

automaten untersucht. Maßnahmen zur Verbesserung des Füllvorgangs, wie die variotherme Prozessführung durch induktive Formtemperierung, sowie die Erfassung von Entformungskräften bilden gegenwärtig die Arbeitsschwerpunkte.

Im Arbeitsgebiet **optische und mechanische Sensorik** wurden ausgewählte Sensoren, beispielsweise zur Abstandsmessung und zur Oberflächenerfassung untersucht. Gegenwärtig stehen jedoch insbesondere die Verfahren zur integrierten Wegsignalerfassung in elektrodynamischen Linearmotoren mit bewegten Magneten oder auch bewegten Spulen im Mittelpunkt der Arbeiten.

Übergreifend bildet produktbezogene **Konstruktionsmethodik** in der Feinwerktechnik ein viertes Arbeitsgebiet. Schwerpunkte sind hier die konstruktive Gestaltung, die Berechnung von Systemen und die Simulation mit FEM. Dazu zählen auch Magnetfeldberechnungen für Linearantriebe. Auch das Arbeitsgebiet „**Zuverlässigkeit feinwerktechnischer Antriebe**“ lässt sich in diesen Problembereich einordnen. Im Rahmen der DFG-Forschergruppe „System-Zuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen“ bearbeitet das Institut das Thema „Zuverlässigkeit von elektromechanischen/mechatronischen Systemen am Beispiel feinwerktechnischer Antriebe/Aktorik“. Dadurch soll Kompetenz in der Zuverlässigkeitstechnik, speziell zur Zuverlässigkeit feinwerktechnischer Antriebe und Aktorik aufgebaut werden.

**Im Detail werden folgende Inhalte bearbeitet:**

#### **Feinwerktechnische Aktorik**

- Entwicklung alternativer Antriebssysteme für die Feinwerktechnik auf der Basis elektrodynamischer Kraftwirkung bzw. von Festkörpereffekten (Elektrodynamische Linearmotoren, Piezowanderwellenmotoren).
- Berechnung derartiger Antriebe und Simulation ihres dynamischen Verhaltens.
- Erarbeitung geeigneter Unterstützungsmittel und Methoden zur Entwicklung alternativer Antriebssysteme.
- Entwicklung ein- und mehrsträngiger elektrodynamischer Lineardirektantriebe mit integrierten Wegmesssystemen.
- Entwicklung geeigneter elektronischer Ansteuerungen unter Ausnutzung der integrierten Messsysteme.
- Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten poröser Materialien für aerostatische Lagerungen von Linearantrieben. Ermittlung von Bearbeitungsparametern zur Luftlagerherstellung und Dimensionierung der Luftlager.

### **Präzisions-Spritzgießtechnologie**

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

### **Messtechnik und Sensorik**

Mit dem Ziel, zusätzliche Sensoren bzw. Wegmesssysteme entbehrlich zu machen, werden folgende Aufgaben bearbeitet:

- Entwicklung von integrierten Messsystemen zur Läuferpositionsbestimmung in ein- und mehrsträngigen elektrodynamischen Lineardirektantrieben.

### **Theorie des Konstruktionsprozesses**

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

### **Zuverlässigkeit feinwerktechnischer Antriebe**

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

## 2 LEHRVERANSTALTUNGEN

### 2.1 Vorlesungen und Übungen für das Vordiplom

#### 2.1.1 Konstruktionslehre III (Feinwerktechnik)

(Schinköthe, Burkard)

Wintersemester 2003/2004:

88 Studenten

Wintersemester 2004/2005:

157 Studenten (mach+tema)

16 Vorlesungen (à 2 SWS)

16 Vorlesungen (à 1 SWS)

16 Übungen (à 3 SWS)

Betreuer: Burkard, Clauß, Dannemann, Grotz, Köder, Rothenhöfer, Weber

#### 2.1.2 Konstruktionslehre IV (Feinwerktechnik)

(Schinköthe, Burkard)

Sommersemester 2004:

88 Studenten

14 Vorlesungen (à 2 SWS)

14 Vorlesungen (à 1 SWS)

14 Übungen (à 2 SWS)

Betreuer: Burkard, Clauß, Dannemann, Grotz, Köder, Rothenhöfer, Weber

### 2.2 Vorlesungen und Übungen für das Hauptdiplom

#### 2.2.1 Grundlagen der Feinwerktechnik, Konstruktion und Fertigung

(Schinköthe, Burkard, Köder)

Wintersemester 2003/2004:

13 Studenten

Wintersemester 2004/2005:

11 Studenten

16 Vorlesungen (à 2 SWS)

16 Übungen (à 2 SWS)

## 2.2.2 Aktorik in der Feinwerktechnik - Berechnung, Konstruktion und Anwendung

(Schinköthe, Clauß, Dannemann, Grotz)

Wintersemester 2003/2004: 10 Studenten

Wintersemester 2004/2005: 3 Studenten

16 Vorlesungen (à 2 SWS)

Sommersemester 2004: 10 Studenten

6 Vorlesungen (à 2 SWS)

8 Übungen (à 2 SWS)

## 2.3 Prüfungen

Fach	Termin	Kandidaten
KL III + IV (FWT)	F 2004	18
	H 2004	62
Grundlagen der Feinwerktechnik, Konstruktion und Fertigung (Pflichtfach, schriftlich)	F 2004	7
	H 2004	0
Grundlagen der Feinwerktechnik, Konstruktion und Fertigung (Kernfach, mündlich)	F 2004	5
	H 2004	1
Aktorik in der Feinwerktechnik - Berechnung, Konstruktion und Anwendung (Kernfach, mündlich)	F 2004	2
	H 2004	7

## 2.4 Praktika

### 2.4.1 Praktikum Feinwerktechnik

(Für Studierende des Hauptfachs Feinwerktechnik)

#### Wintersemester 2003/2004

Versuch 1: „Koordinatenmesstechnik“  
 5 Teilnehmer 2 Termine  
 Betreuer: Burkard

Versuch 2: „FEM-Kurs ANSYS“  
 5 Teilnehmer 5 Termine  
 Betreuer: Dannemann, Rothenhöfer, Weber

Versuch 3: „Spritzgießen“  
 9 Teilnehmer 2 Termine  
 Betreuer: Weber

#### Sommersemester 2004

Versuch 3: „Piezoantriebe“  
 5 Teilnehmer 1 Termin  
 Betreuer: Rothenhöfer

Versuch 4: „Lineardirektantriebe“  
 7 Teilnehmer 2 Termine  
 Betreuer: Grotz

### 2.4.2 Allgemeines Praktikum Maschinenbau (APMB)

(Für Studierende im zweiten Studienabschnitt Maschinenbau)

#### Sommersemester 2004

Versuch 1: „Rasterelektronenmikroskopie“  
 13 Teilnehmer 3 Termine  
 Betreuer: Burkard

Versuch 2: „Schrittmotoren“  
 11 Teilnehmer 4 Termine  
 Betreuer: Grotz

## 2.5 Seminar Feinwerktechnik

22.01.2004	Weber, Jörn	FEM-Simulation und theoretische Untersuchungen zur induktiven Werkzeugtemperierung
12.02.2004	Scholten, Thomas	WebCam-basierte Fertigungs- und Prüfstandsüberwachung
18.03.2004	Frentz, Hartmut	Entwicklung und Aufbau einer controller-gestützten Ansteuerelektronik für Lineardirektantriebe mit integrierter Wegmessung
01.07.2004	Wentz, Stefanie	Praxisbezogene Verfahrensentwicklung zur Lebensdauerbestimmung von Elektromotoren
15.07.2004	Hopp, David	Mikrocontrollergesteuerter Motorenprüfstand zur Analyse feinwerktechnischer Lineardirektantriebe
28.10.2004	Bittner, Max	Kompensation konstanter Lastkräfte in Lineardirektantrieben
18.11.2004	Sieber, Daniel	Ermittlung des Ausfallverhaltens feinmechanischer Antriebe anhand vorliegender Dauerlaufergebnisse
02.12.2004	Metsch, Volker	Numerische Optimierung von rotationssymmetrischen Lineardirektantrieben mit bewegtem Magnetsystem und Linearkugellagerung
02.12.2004	Alber, Tobias	Konstruktion eines rotationssymmetrischen Lineardirektantriebs mit bewegtem Spulensystem

### 3 WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN, STUDIEN- UND DIPLOMARBEITEN

#### 3.1 Dissertationen

Welk, Christian	Detektion interner sensorischer Eigenschaften von elektrodynamischen Lineardirektantrieben
Pröger-Mühleck, Rainer	Lineardirektantriebe für die Stoßjustierung feinwerk- und mikrotechnischer Baugruppen

#### Mitberichte

Steck, Alexander	Entwurf und Modellierung von Ventilen für magnetorheologische Flüssigkeiten
Dittrich, Harald	Werkzeugentwicklung für das Heißprägen beidseitig mikrostrukturierter Formteile
Schöllhammer, Gerd	Entwicklung und Untersuchung inverser Wellendichtsysteme

#### 3.2 Diplomarbeiten am IKFF

01/2004	Aßfalg, Jochen	Modellierung und Regelung einer Zweimotorenwischenanlage
03/2004	Beyer, Martin	Entwicklung eines Gelenkes für ein Hochfrequenzkabel
04/2004	Künzler, Rainer	Konstruktion, Aufbau und Erprobung eines direkt wirkenden Ventils auf der Basis eines Piezo-Aktors mit spielfreier Wegübersetzung
06/2004	Stein, Tobias	Aufbau und Inbetriebnahme eines Versuchstands zur Induktionserwärmung mit integriertem Induktor

08/2004	Müller, Cornelia	Konzeption einer Entölungseinrichtung
08/2004	Anderle, Jens	Entwicklung eines innovativen Druckproportionalventils unter Verwendung eines Piezobiegeaktors
09/2004	Hippel, Holger	Entwicklung eines aerostatisch gelagerten, hochdynamischen, rotationssymmetrischen Lineardirektantriebes zur Untersuchung von Hysterese- und Wirbelstromverlusten

### 3.3 Studienarbeiten am IKFF

01/2004	Weber, Jörn	FEM-Simulation und theoretische Untersuchungen zur induktiven Werkzeugtemperierung Standort: 15.2.942
02/2004	Scholten, Thomas	WebCam-basierte Fertigungs- und Prüfstandsüberwachung Standort: 15.2.943
03/2004	Frentz, Hartmut	Entwicklung und Aufbau einer controllergestützten Ansteuerelektronik für Lineardirektantriebe mit integrierter Wegmessung Standort: 15.2.944
07/2004	Wentz, Stefanie	Praxisbezogene Verfahrensentwicklung zur Lebensdauerbestimmung von Elektromotoren Standort: 15.2.945
07/2004	Hopp, David	Mikrocontrollergesteuerter Motorenprüfstand zur Analyse feinwerktechnischer Lineardirektantriebe Standort: 15.2.946
10/2004	Rothenhöfer, Gerald	Untersuchung zur Regelbarkeit von Linearmotoren mittels motorinterner Hallsensoren Standort: 15.2.947

10/2004	Sieber, Daniel	Ermittlung des Ausfallverhaltens feinmechanischer Antriebe anhand vorliegender Dauerlauf- ergebnisse Standort: 15.2.948
10/2004	Bittner, Max	Kompensation konstanter Lastkräfte in Linear- direktantrieben Standort: 15.2.949
10/2004	Kliche, Kurt	Mikrocontrollergesteuerter Motorenprüfstand zur Analyse feinwerktechnischer Lineardirekt- antriebe Standort: 15.2.952
12/2004	Alber, Tobias	Konstruktion eines rotationssymmetrischen Lineardirektantriebs mit bewegtem Spulen- system Standort: 15.2.950
12/2004	Metsch, Volker	Numerische Optimierung von rotationssymme- trischen Lineardirektantrieben mit bewegtem Magnetsystem und Linearkugellagerung Standort: 15.2.951

### 3.4 Preise

Dr.-Ing. Bernd Gundelsweiler	Preis der Gustav-Magenwirth-Stiftung für seine Dissertation am IKFF
Dipl.-Ing. Karsten Weiß	Preis der Freunde der Universität Stuttgart für besondere wissenschaftliche Leistungen für seine Diplomarbeit am IKFF

## 4 ARBEITSGEBIETE DER MITARBEITER

### 4.1 Aktorik

- Clauß, C.                      Bearbeitung des DFG-Forschungsprojekts „Integrierte Wegmessung in feinwerktechnischen Lineardirektantrieben durch Detektion der Flussdichte im flussführenden Eisen“.  
 Untersuchungen zur Genauigkeit der integrierten Wegmessung in Lineardirektantrieben mit bewegten Magneten.  
 Entwicklung und Aufbau elektronischer Schaltungen, Programmierung von Mikrocontrollern und DSPs.  
 Konstruktion und Aufbau eines dreisträngigen Lineardirektantriebs mit bewegtem Spulensystem.  
 Betreuung von Gruppenübungen im Vordiplom; Mitarbeit an der Vortragsübung „Lineardirektantriebe“ (Schwerpunkt Regelung) im Hauptdiplom.  
 Betreuung von Elektroniklabor und Ätzraum.  
 Unterstützung bei der Softwarewartung PC-Netzwerk.
- Dannemann, M.              Lehre:  
 Betreuung der Vordiplomsübungen in KL 3/4, Vortrags- und Gruppenübungen; Ausarbeitung von Aufgabenstellungen und Musterlösungen für Übungsaufgaben, Korrektur von Übungsaufgaben, FEM-Praktikum.
- Industrieprojekte:  
 Erstellung einer Machbarkeitsstudie für einen integrierten Lineardirektantrieb ohne Rückschluss in einer Führung und dessen Konstruktion und Erprobung.  
 Nach erfolgreicher Studie Durchführung einer konstruktiven Untersuchung eines Lineardirektantriebes mit externer Führung und dessen vollständiger Aufbau.  
 Integration neuer, speziell auf elektromechanische Systeme ausgerichteter, kommerzieller FEM-Software

Grotz, A.

Lehre:

Durchführung der Hauptfachübungen und des zugehörigen Hauptfachpraktikums „Lineare Direktantriebe“.

Durchführung und Weiterentwicklung des APMB-Praktikums „Schrittmotoren“.

Betreuung der Vordiplomsübungen Konstruktionslehre 3/4.

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

Betreuung des Übungskomplexes „Koppelgetriebe“ innerhalb der Vordiplomsübungen Konstruktionslehre 3/4.

Betreuung einer Studienarbeit „Numerische Optimierung von rotationssymmetrischen Lineardirektantrieben mit bewegtem Magnetsystem und Linearkugellagerung“.

Betreuung einer Studienarbeit „Konstruktion eines rotationssymmetrischen Lineardirektantriebes mit bewegtem Spulensystem“.

Betreuung einer Studienarbeit „Mikrocontrollergesteuerter Motorenprüfstand zur Analyse feinwerktechnischer Lineardirektantriebe – Konstruktion des Prüfstandes und Entwicklung der Ansteuerelektronik“.

Betreuung einer Studienarbeit „Mikrocontrollergesteuerter Motorenprüfstand zur Analyse feinwerktechnischer Lineardirektantriebe – Erstellung einer Positionsregelung und Inbetriebnahme des Prüfstandes“.

Industrieprojekte:

Konstruktion, Fertigung und Montage einer Motorführung (Linearführung mit integriertem Lineardirektantrieb).

Machbarkeitsstudie zu einem Direktantriebssystem für Schwenkbewegungen als Substitution einer rotatorischen Motor-Getriebe-Kombination.

sonstiges:

PC-Administration

Rothenhöfer, E.

Lehre:

Betreuung von Vordiplomsübungen in KL 3/4 sowie Gruppenübungen

Korrektur von Übungsaufgaben,  
 Anfertigung von Prüfungsaufgaben  
 FEM-Praktikum  
 Hauptfachpraktikum Ultraschallantriebe

Industrieprojekte:

Erstellung einer Machbarkeitsstudie für einen Wanderwellenmotor und Untersuchung erreichbarer Leistungsparameter durch FEM-Berechnung

Optimierung eines bestehenden Ultraschallmotors in Zusammenarbeit mit der Firma Physik Instrumente durch FEM-Berechnung

Querschnittsaufgaben:

PC-Administration mit Wartung bestehender und Installation neuer Rechnersysteme

Verantwortung für die Geräteprüfung

## 4.2 Spritzgießen

- |             |   |
|-------------|---|
| Burkard, E. | <p>Untersuchung des Einflusses von Werkzeugbeschichtungen auf die Entformungskraft bei Spritzgussbauteilen aus Thermoplastwerkstoffen.</p> <p>Bearbeitung von Industrieaufträgen zur Entformung von Spritzgussteilen.</p> <p>Organisation des Konstruktionslehrewettbewerbs.</p> <p>Betreuung des Rasterelektronenmikroskops und Untersuchung von Proben, APMB-Versuch Rasterelektronenmikroskop</p> <p>Administration und Wartung der UNIX-Workstations.</p> |
| Weber, A.   | <p>Weiterentwicklung der vollständig integrierten induktiven Werkzeugtemperierung mit Impulskühlung</p> <p>Betreuung der Vordiplomsübungen KL 3/4, Vortrags- und Gruppenübungen, Ausarbeitung von Aufgabenstellungen und Musterlösungen für Übungsaufgaben, Korrektur von Übungs- und Klausuraufgaben.</p>  |

FEM-Praktikum ANSYS; Organisation, Theorieteil und Abschnitte „Elastomechanik“ und „Temperaturfelder“  
Aufbau einer Online-Präsentation zum FEM-Praktikum ANSYS im Rahmen des Projekts „self-study online“  
Hauptfachpraktikum „Spritzgießen“  
Administration und Wartung der UNIX-Workstations, der Linux-PCs und der Firewall.

### 4.3 Zuverlässigkeitstechnik

Köder, T.                    Mitarbeit in der DFG Forschergruppe zum Thema „System-Zuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen“ mit dem Arbeitsschwerpunkt auf dem Teilprojekt „Zuverlässigkeit von elektromechanischen/mechatronischen Systemen am Beispiel feinwerktechnischer Antriebe/Aktorik“  
Begleitender Aufbau des neuen Arbeitsgebiets der Zuverlässigkeit von Antriebssystemen am Institut. Diese Aufgabe umfasst neben der reinen Forschungstätigkeit auch den Aufbau und die Betreuung von Dauerlaufprüfständen für rotatorische Kleinantriebe.  
Ansprechpartner für Literaturrecherchen.  
Durchführung und Erstellung der Zuverlässigkeitsübungen im Hauptdiplom.  
Mitbetreuung der Gruppenübungen KL 3/4, Korrektur von Übungsaufgaben.

### 4.4 Sonstige Arbeiten

Berwanger, R.; Schneider, S.  
Fertigung von Linearmotoren, Spritzguss-Formen und Formeinsätzen sowie Bauteilen und Baugruppen für Versuche, wie Luftlager und Linearmotorprüfstände.

## 5 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

### 5.1 Veröffentlichungen

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.

Clauß, C.; Schinköthe, W.

DFG-Forschungsvorhaben Integrierte Wegmessung in feinwerktechnischen Lineardirektantriebe durch Detektion der Flussdichte im flussführenden Eisen. Zwischenbericht Oktober 2004, Schi 457/8.

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.

Köder, T.; Schinköthe, W.

Untersuchungen zur Zuverlässigkeit von DC-Kleinstmotoren. Workshop „Systemzuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen“, 27.-28. September 2004, Freudenstadt

Schinköthe, W.

Antriebssysteme der Feinwerktechnik. Lehrgangsheftung und drei Vorträge. Technische Akademie Esslingen, 15.-16.03.2004.

Zusätzlich diverse Forschungsberichte für industriefinanzierte Drittmittelprojekte.

## 5.2 Gremienarbeit

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe:

Mitglied des Universitätsrats der Universität Stuttgart

Leitung der Berufungskommissionen zur Nachfolge Höfflinger

Mitarbeit in der Berufungskommissionen zur Nachfolge Pritschow

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

Mitglied des Beirats der GMM

Fachbereichsleiter Fachbereich 3 – Feinwerktechnik und Mechatronik

Mitglied des Fachausschusses 3.3 „Elektrische Geräte- und Stellantriebe“

Mitglied im Arbeitskreis „Universitätsprofessoren der Mikro- und Feinwerktechnik“

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

### 5.3 Tag der offenen Tür

#### „drüber drunter durch“

Es gibt viele Möglichkeiten, auf die andere Seite einer Mauer zu kommen. Die Aufgabe bei unserem 12. Konstruktionswettbewerb klang wieder ganz einfach: Eine Maschine muss selbstständig von der einen Seite einer Mauer auf die andere kommen. Zusätzlich waren noch ein paar Hilfsmittel, wie eine Leiter, ein mit Kunststoffgranulat gefüllter Durchlass, ein Seil und zwei Fenster vorhanden. Aber wie schon in der früheren Wettbewerben zeigte sich, dass auch bei dieser Aufgabe die Tücke im Detail steckte. Ist es für einen Menschen eher einfach, eine Leiter hochzusteigen oder ein Seil hinaufzuklettern, hatten die studentischen Maschinen teilweise doch Probleme, die Aufgabe zu bewältigen.

Wie unterschiedlich die Lösungen sein können, zeigt auch die Spanne der notwendigen Zeiten um auf die andere Seite zu kommen. Das kann gerade mal 2,25 Sekunden dauern, es können bei gemächlichen Maschinen aber auch mal 176 Sekunden sein. Manche Maschine erledigte die Aufgabe zuverlässig in allen drei Läufen, andere benötigten den Ansporn durch das Publikum, um beim letzten Lauf doch noch die Aufgabe zu lösen. Und es kam auch vor, dass Maschinen, die in der Vorbereitung ohne Probleme die Mauer überwunden hatten, beim Wettbewerb die Aufgabe nicht lösten. Alles in allem war es mal wieder für die Teilnehmer und das Publikum ein bis zum letzten Lauf spannender Wettbewerb.

Ein besonderer Dank gilt den folgenden Firmen, die den Konstruktionswettbewerb schon seit mehreren Jahren unterstützen:

Arburg GmbH & Co, Dr.-Ing. Paul Christiani GmbH & Co KG, Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG, Carl Hanser Verlag GmbH & Co, Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co KG, Otto Bilz Werkzeugfabrik GmbH & Co., Robert Bosch GmbH, Trumpf GmbH & Co

#### **Ergebnisse:**

1. Platz: Karl-Peter Fritz, Simon Kern, Michael Kopp, Michael Lauxmann
2. Platz: Greta Bernhardt, Thomas Dittert, Björn Petersen, Philipp Treiber
3. Platz: Valerie Speth, Benjamin Krauss, Tobias Möss, Heiko Mozer

Der Wettbewerb zeigte auch dieses Jahr wieder, dass eine attraktive Aufgabe die StudentInnen trotz zeitnah anstehender Klausuren motivieren kann. Der Wettkampf selbst fand zum dritten mal in einem großen Hörsaal statt, der auch wieder vollständig gefüllt werden konnte.

## 6 KONGRESSE, TAGUNGEN UND MESSEN

Prof. Schinköthe, W.:

- Tagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Darmstadt, 3./4.3.2004
- VDI/VDE Arbeitskreis „Stellantriebe“ Villingen, 5.05.2004 und Frankfurt, 4.11.2004
- Workshop „System-Zuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen“, Freudenstadt, 27./28.9.2004
- SPS/Drives, Nürnberg, 25.11.2004

Berwanger, R.:

- ARBURG Maschineneinstellkurs, Loßburg, 14./15.6.2004
- AMB, Stuttgart, 14.9.2005

Burkard, E.:

- ARBURG Technologietage 2004, Loßburg, 26.3.2004

Clauß, C.:

- Tagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Darmstadt, 3./4.3.2004
- SPS/Drives, Nürnberg, 25.11.2004

Dannemann, M.:

- SPS/Drives, Nürnberg, 25.11.2004

Köder, T.:

- Workshop „System-Zuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen“, Freudenstadt, 27./28.9.2004
- SPS/Drives, Nürnberg, 25.11.2004

Schneider, S.:

- ARBURG Maschineneinstellkurs, Loßburg, 14./15.6.2004
- AMB, Stuttgart, 14.9.2005

Weber, A.:

- ARBURG Technologietage 2004, Loßburg, 26.3.2004

## **7 WERKSTATTBERICHT**

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

## **8 ANHANG - wesentliche Veröffentlichungen**

In diesem Jahr exemplarisch eine Veröffentlichung aus dem Bereich Zuverlässigkeitstechnik:

Köder, T.; Schinköthe, W.:

### **Untersuchungen zur Zuverlässigkeit von DC-Kleinstmotoren**

Vortrag zum Workshop „Systemzuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen“, 27.-28. September 2004, Freudenstadt

# Untersuchungen zur Zuverlässigkeit von DC-Kleinstmotoren

Vortrag im Rahmen des Workshops „System-Zuverlässigkeit in frühen Entwicklungsphasen“ am  
27./28.09.2004 in Freudenstadt

## Autoren:

Dipl.-Ing. Thilo Köder; Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe;  
Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik (IKFF)  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 9  
70550 Stuttgart  
Tel.: 0711/685-6402  
Fax: 0711/685-6356  
E-Mail: [zuverlaessigkeit@ikff.uni-stuttgart.de](mailto:zuverlaessigkeit@ikff.uni-stuttgart.de)  
Homepage: <http://www.uni-stuttgart.de/ikff/>

## Kurzfassung:

Heutzutage werden in der Entwicklung immer kürzere Entwicklungszeiten bei steigenden Ansprüchen, insbesondere an die Zuverlässigkeit gefordert. Um dieses Ziel realisieren zu können sind Methoden notwendig, die bereits in frühen Entwicklungsphasen eine quantitative Lebensdauerabschätzung eines Produkts ermöglichen. Bisher können diese Informationen nur durch aufwendige Versuche am Ende des Entwicklungsprozesses gewonnen werden.

Die laufende Forschungsarbeit am IKFF beschäftigt sich mit der Zuverlässigkeitsbestimmung typisch feinmechanischer Bauteile in frühen Phasen am Beispiel von DC-Kleinstantrieben. Das besondere Augenmerk liegt hierbei auf dem elektromechanischen Teilsystem.

Ausgehend vom Stand der Technik und einer Branchenbefragung hat sich gezeigt, dass die Notwendigkeit besteht, zuerst eine zuverlässige Datenbasis für das untersuchte System zu schaffen. Hierfür wurden spezielle Prüfstände aufgebaut, um durch institutseigene Dauerversuche die entsprechenden Zusammenhänge für die analytische Lebensdauerbestimmung ermitteln zu können. Anhand erster Versuchergebnisse wird exemplarisch die weitere Vorgehensweise, um zu Aussagen in frühen Phasen zu gelangen, dargestellt. Die abschließende Zusammenfassung verdeutlicht nochmals den aktuellen Stand der Untersuchungen und die angestrebten Ziele nach Beendigung der ersten Versuchsreihe.

## 1 Einleitung

Zuverlässigkeitsoptimierungen erfolgen bisher überwiegend in den späten Entwicklungsphasen. Die endgültige Gestalt der Systeme steht da bereits weitgehend fest, so dass Änderungen mit erheblichem Zeit- und Kostenaufwand verbunden sind. Da die größten Einflussmöglichkeiten am Beginn des Entwicklungsprozesses vorhanden sind, sollte auch die Zuverlässigkeitsbetrachtung in sehr frühen Entwicklungsphasen durchgeführt werden. Gerade auf Systemebene und im Bereich feinwerktechnischer Erzeugnisse stehen aber keine geeigneten Methoden zur Verfügung.

Feinwerktechnische Antriebe bestehen aus mechanischen, elektromechanischen und elektronischen Komponenten und verkörpern komplexe mechatronische Systeme. Basisdaten und Methoden für die Beschreibung der Zuverlässigkeit fehlen sowohl für elektromechanische als auch für feinmechanische Baugruppe meist völlig und es liegen nahezu keine konkreten Aussagen bzgl. des Ausfallverhaltens vor. Feinmechanische Lager, Getriebe u.a. gleichen zwar den Baugruppen des Maschinenbaus, umfangreiche Untersuchungen zur Zuverlässigkeit und eine Verifizierung der Auslegungsmethoden bei kleinen Abmessungen fehlen jedoch. Hinzu kommt, dass sich die Durchführung von Versuchen sehr schwierig und zeitaufwendig gestaltet, da speziell für Elektromotoren keine sinnvoll nutzbaren Ansätze zur Testzeitverkürzung vorhanden sind. Allerdings ist die Systemzuverlässigkeit erst ermittelbar, wenn die beschriebenen Lücken für feinmechanische und elektromechanische Komponenten geschlossen sind und aus anderen Gebieten bekannte Rechenverfahren verifiziert wurden. Dieses Basiswissen bildet letztlich die Voraussetzung für die Verbesserung des Entwicklungsprozesses.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Bestimmung der Zuverlässigkeit in frühen Phasen. Dabei werden zunächst neben den wichtigsten Grundlagen der Stand der Technik und damit auch die bereits geleisteten Vorarbeiten erläutert. Ein wesentlicher Teil der Aufgabe besteht darin, eine eigene, zuverlässige Datenbasis zur ermitteln, insbesondere für die bisher noch unzureichend untersuchten elektromechanischen und feinmechanischen Komponenten. Hierfür sind die Konzeption und der Aufbau institutseigener Dauerversuchsstände nötig.

Basierend auf diesen Versuchen gilt es, das Ausfallverhalten der Einzelkomponenten sowie des Gesamtsystems möglichst genau zu beschreiben. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen zudem genutzt werden, um daraus bisher noch fehlender Strategien zur Testzeitverkürzung zu entwickeln.

## 2 Stand der Technik

Typische Elektromechanische bzw. mechatronische Baugruppen in der Feinwerktechnik sind Antriebe und Aktoren. Beispielsweise DC-Motoren mit integrierten inkrementalen Gebern und dazugehöriger Auswerte- und Regelelektronik, finden in vielen feinwerktechnischen Erzeugnissen, von der Audio- und Videotechnik bis zum PC, von der Meßtechnik bis zur biomedizinischen Technik und darüber hinaus in sehr vielen anderen Gebieten, insbesondere in der KFZ-Technik, eine sehr breite Anwendung /1/, /2/. Diese elektromechanischen Baugruppen werden in sehr großen Stückzahlen teilweise extrem kostengünstig gefertigt.

Derartige feinwerktechnische Baugruppen stellen häufig sehr komplexe mechatronische Systeme, bestehend aus mechanischen Komponenten (Getrieben, Lagern), elektrotechnischen Komponenten (Aktoren) und Elektronik (Ansteuerung, Regelung, integrierte Meßtechnik) dar (Abb. 1).

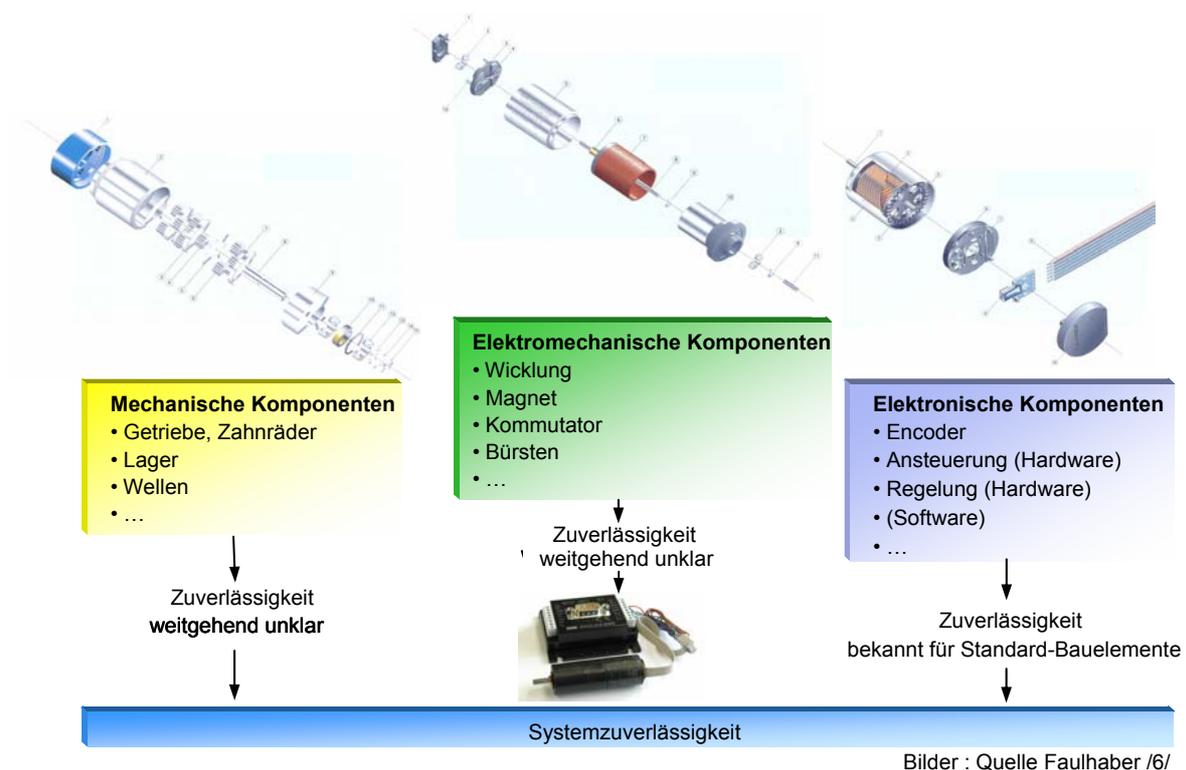


Abb. 1: Beispielhafter Aufbau komplexer mechatronischer Systeme

Den Ausgangspunkt für die Ermittlung der Systemzuverlässigkeit bildet das Ausfallverhalten der Einzelelemente. Die Randbedingungen sind durch die funktionellen Beanspruchungen sowie die Umgebungsbedingungen festgelegt. Nur die elektronischen Komponenten sind dabei hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit gut berechenbar.

Bei Elektromechanischen Komponenten liegen bisher nur punktuelle experimentelle Untersuchungen vor und feinmechanische Komponenten sind noch nahezu gar nicht erfasst /3/, /4/.

Die Berechnung der Systemzuverlässigkeit scheitert daher meist an elektromechanischen und feinwerktechnischen Systembestandteilen, während für elektronische Bauteile ausreichend genaue Basisdaten per Katalog verfügbar sind.

Neben der Berechnung des Ausfallverhaltens über das Boolesche Modell existieren deshalb weitere, teilwissenschaftliche Methoden zur Ermittlung von Zuverlässigkeitsangaben, wie die Ausfall-Effekt-Analyse bzw. FMEA (failure mode and effect analysis) /3/, die Fehlerbaumethode /3/, die Technische Diagnostik oder die Checklistenmethode, da sich die vielfältigen Einflussfaktoren auf die Zuverlässigkeit oft nur qualitativ erfassen lassen. Letztlich sind für komplexe mechatronische Baugruppen und Systeme exakte und gesicherte quantitative Aussagen nur experimentell durch z.B. Dauerversuche, forcierte Tests bzw. Stresstests zu ermitteln.

### **3 Zuverlässigkeitsbetrachtung am Beispiel von Gleichstromantrieben**

Um eine Aussage bzgl. des ausgewählten Demonstrators zu erhalten, wurde eine Katalogrecherche zu bürstenbehafteten und elektronisch kommutierten Gleichstrommotoren durchgeführt. Das Hauptauswahlkriterium lag hierbei auf der Motorbauart, wodurch Motoren mit einem sehr breiten Leistungs- und Anwendungsspektrum berücksichtigt wurden. Insgesamt wurden 53 Firmen mit bürstenbehaftete DC-Motoren im Programm und 35 Hersteller von EC-Motoren betrachtet. Dabei wurden nur die reinen Katalogdaten berücksichtigt und nach den Kriterien der Lebensdauerangaben ausgewertet (Abb. 2).

Das Ergebnis der Untersuchung zeigt deutlich, dass noch eine sehr große Unsicherheit im Umgang mit der Zuverlässigkeitsanalyse solcher Systeme herrscht. In vielen Fällen wird nicht weiter auf die Problematik eingegangen, sondern abgewartet bis eine Nachfrage von Seiten des Kunden erfolgt. Unter der Erwähnung der Problematik sind Angaben zu verstehen, die nur besagen, dass ein Produkt eine lange Lebensdauer hat, ohne Angabe von weiteren Werten oder Gründen. Bei den Zahlenwerten handelt es sich zumeist um Zeiträume, die einen sehr großen Bereich und damit auch mehrere Typen und Anwendungsgebiete abdecken sollen. Angaben zum Bezug der Werte werden bei DC-Motoren gar nicht getätigt, so dass unklar bleibt, ob

es sich z.B. um eine ausfallfreie Zeit oder eine  $B_{10}$ -Wert handelt. Alles in allem sind die Angaben damit nur begrenzt aussagekräftig und in vielen Fällen nur als grober Richtwert für mehrere Motortypen zu sehen.

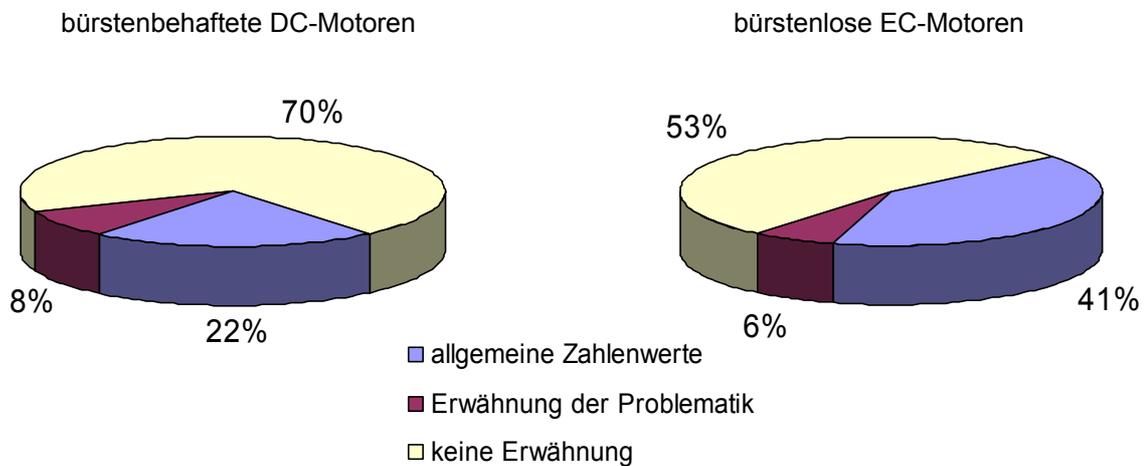


Abb. 2: Angaben zur Produktlebensdauer in Herstellerkatalogen

Bei EC-Motoren hängt die erreichbare Lebensdauer überwiegend von der Lagerbauart ab. Einige Anbieter beziehen sich auf die verbauten Kugellager und geben daher eine  $B_{10}$ -Lebensdauer des Gesamtsystems an, die aber letzten Endes nur das Ausfallverhalten der Lagerbaugruppe widerspiegelt. Ansonsten werden auch hier zum großen Teil Bereiche angegeben bzw. einheitliche Mindestlebensdauern von 20000h, die als ausfallfreie Zeit interpretiert werden können.

Um aufbauend auf der Katalogrecherche detailliertere Daten zu erhalten wurden 14 der 68 Herstellerfirmen telefonisch kontaktiert. Hierbei lag der Schwerpunkt auf Herstellern von Kleinmotoren im unteren Leistungsbereich.

Ziel hierbei war herauszufinden, welchen Bezug die aufgeführten Kenndaten in den Katalogen haben (Abb. 3). Bei Betrachtung der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die Gesprächspartner aus sehr unterschiedlichen Bereichen kommen und vom Vertrieb über die technische Beratung, dem Versuch bis hin zur Entwicklungsabteilung reichen. Daher ist teilweise die Aussagekraft der Antworten schwer einzuschätzen.

Überraschenderweise definieren die meisten Hersteller ihre Angaben als ausfallfreie Zeiten. Dieser Wert ist zwar für den Kunden optimal, bedeutet jedoch für den Hersteller, dass er bei einer solch konkreten Zusage einen sehr großen Sicherheitsfaktor mit einbeziehen muss. Vor allem für die Aussagen bei EC-Motoren verwundert es sehr, dass nicht grundsätzlich die  $B_{10}$ -Lebensdauern angegeben wird, da sich alle Hersteller

darin einig sind, dass nur die Lager als Ausfallursache in Frage kommen und somit eine Übernahme des gängigen Lagerkennwertes sinnvoll erscheint.

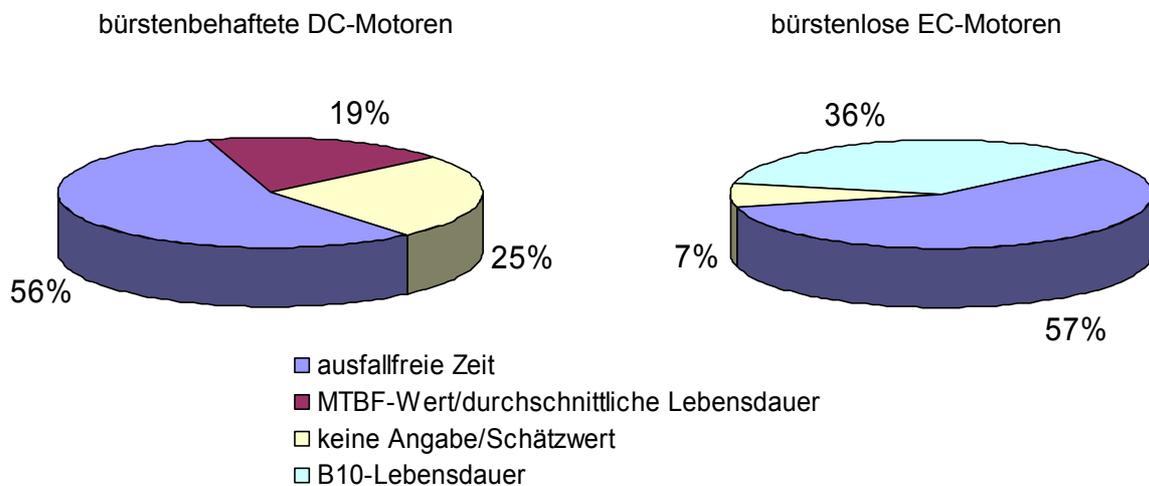


Abb. 3: Bezug der Lebensdauerangaben

Des Weiteren hat die Umfrage ergeben, dass momentan keiner der Befragten quantitative Zuverlässigkeitsmethoden in der Konzeptionsphase hinsichtlich der elektromechanischen Teilsysteme nutzt. Allenfalls kommen Festigkeits- bzw. Lagerberechnungen in frühen Phasen zum Einsatz. Ansonsten stützt sich die Entwicklung derzeit auf qualitative Erfahrungswerte von Vorgängern. Erste konkrete Ergebnisse werden stets durch Versuche und Dauerläufe mit Prototypen bzw. in Vorserientests ermittelt. Auf Grund des hohen Kosten- und Zeitaufwands besteht ein reges Interesse an geeigneten quantitativen Verfahren für eine frühzeitige Bestimmung der bisher schwer zugänglichen Teilsysteme.

Bei Lebensdaueraussagen zu einem bestimmten Motortyp wird in aller Regel so verfahren, dass die Hersteller kundenspezifische Versuche durchführen, bei denen die exakten späteren Einsatzbedingungen nachvollzogen werden und somit nur für diese eine konkrete Anwendung eine Aussage getroffen wird.

Sofern Methoden und Ausfallverhalten einzelner Komponenten, wie z.B. Elektronikbauteile oder bestimmte mechanische Baugruppen, vorhanden sind, werden diese auch genutzt. Gerade aber bei den bürstenbehafteten Motoren gibt es bisher keine geeignete Beschreibungsform für das Ausfallverhalten des elektromechanischen Subsystems, so dass Versuche weiterhin unumgänglich sind. Nicht zuletzt wegen dem stark zunehmenden Interesse an der Zuverlässigkeitstechnik und der steigenden Nachfrage nach Angaben von der Kundenseite besteht ein akuter Handlungsbedarf zur Verbesserung der analytischen Lebensdauerbestimmung für Gesamtsysteme.

me, um die Produktentwicklung zu beschleunigen. Einzelne Firmen sind bereits auf diesem Gebiet tätig geworden und widmen sich dieser Problematik. Allerdings sind diese Daten meist sehr unvollständig auf Grund der hohen Produktvielfalt der einzelnen Hersteller. Da es sich um sehr sensible Daten handelt ist nahezu keine Literatur bzw. Veröffentlichung von Ergebnissen erhältlich. Ausnahmen sind /5/,/8/ und /9/.

Die komplette Recherche hat gezeigt, dass bisher durchgeführte Untersuchungen im Bereich von Elektromotoren sich hauptsächlich auf Antriebe mit Graphitbürsten beziehen und derzeit keine allgemeingültigen Modelle oder Berechnungsmöglichkeiten zur Zuverlässigkeit dieser Systeme vorhanden sind. Das Interesse von Industrieseite an der Beschreibung des Ausfallverhaltens ist sehr groß und es werden auch teilweise eigene Untersuchungen in den Betrieben durchgeführt, wobei die Daten nicht zugänglich sind.

Dies bestätigt die Zielstellung des Projektes, entsprechende Modelle aufzustellen und zur Ermittlung der nötigen Datenbasis eigene Prüfanlagen aufzubauen.

#### **4 Dauerlaufprüfstände**

Zur Durchführung eigener Lebensdauertests wurden institutseigene Prüfstände konzipiert und aufgebaut. Dadurch ist es momentan möglich, 80 Prüflinge parallel zu betreiben. Der Grundaufbau der Versuchstände ist zweigeteilt. Der Hauptteil beschränkt sich auf reine Elektromotoren und besitzt einen Umfang von 64 Prüfplätzen. Zur Komplettierung der Versuchsergebnisse stehen im weiteren Teil 16 Plätze für Systemuntersuchungen bestehend aus Motor, Getriebe, Encoder und Ansteuerelektronik zur Verfügung (Abb. 4).

Es ist möglich, die Prüflinge kontinuierlich, reversierend, mit einer Fahrkurve oder im Start-Stopp-Betrieb zu betreiben. Die Belastung eines jeden Motors kann individuell durch Bremssysteme eingestellt werden. Dabei werden die Motoren mit hohen Drehzahlen und kleinen Momenten über Wirbelstrombremsen belastet, da diese keine direkte Ankoppelung an die Motorwelle benötigen und somit keine unerwünschten Querkräfte auftreten. Das Bremsmoment ist über den Luftspalt zwischen Bremse und Motor frei einstellbar. Die Motor-Getriebe-Kombinationen benötigen auf Grund der hohen Momente und der geringen Drehzahlen ein alternatives Bremssystem. Die Auswahl fiel auf Hysteresebremsen. Diese arbeiten verschleißfrei und besitzen eine sehr hohe Drehmomentkonstanz über ihren gesamten Verstellbereich. Der Aufbau ist

somit in der Lage, einen Drehmomentbereich der Motoren von 0mNm - 1000mNm abzudecken.



Abb. 4: Dauerlaufprüfstand am IKFF

Während der Versuchsdurchführung werden von jedem Motor der Kommutierungsstrom, die Drehzahl, die Temperatur und die Laufzeit überwacht und die Daten permanent gespeichert. Die gesamte Prüfstandssteuerung und Datenauswertung erfolgt mit Hilfe einer selbstprogrammierten Oberfläche in LabView. Die dazu notwendige Hardware wurde ebenfalls selbst aufgebaut und in ein 19"-Rack integriert. Um möglichst konstante Randbedingungen zu erhalten, finden die Versuche in einem separaten Raum mit Klimaanlage statt. Der Betrieb rund um die Uhr stellt die optimale Ausnutzung der Einrichtung sicher. Insgesamt gewährleistet somit der Prüfstand eine sehr schnelle Anpassung an unterschiedliche Prüflinge und kann langfristig zur Ermittlung von Daten eingesetzt werden.

## 5 Versuchsdurchführung

Zur Beginn der Versuchsplanung wurde nach geeigneten Teststrategien gesucht, um den Versuchsaufwand zu reduzieren bzw. die Testzeit zu verkürzen. Auf Grund der geringen Vorkenntnisse bzgl. des Ausfallverhaltens von edelmetallkommutierten Motoren und der begrenzten Prüfstandskapazität macht es zu Beginn der Versuche noch keinen Sinn, zensierte Versuche durchzuführen. Nach Ablauf der ersten Versuchsreihen und dem Gewinn erster Erkenntnisse ist es jedoch durchaus denkbar, erkennbare Zusammenhänge zu nutzen, um die Dauerläufe zu optimieren.

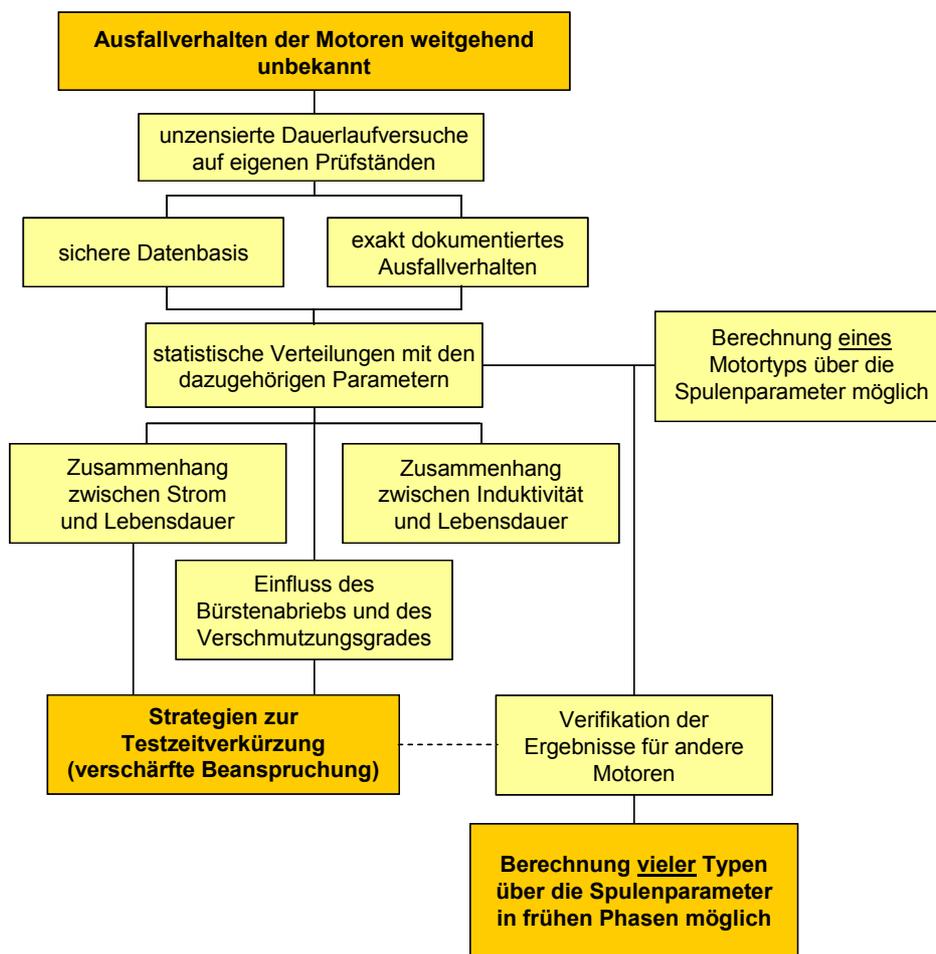


Abb. 5: Zielsetzung der Dauerversuch mit Motoren

In der ersten Projektphase werden ausschließlich Versuche mit edelmetallkommutierten Antrieben durchgeführt. Das Verhalten graphitkommutierten Motoren ist bereits besser erforscht, so dass auf vorhandene Ergebnisse zurückgegriffen werden kann. Bei EC-Motoren hat sich nach ausgiebiger Recherche gezeigt, dass lediglich die Lager lebensdauerbestimmend sind und somit die Problematik theoretisch abgehandelt

werden kann /8/. Parallel zur den Versuchen mit Schwerpunkt auf dem elektromechanischen Teilsystem werden Gesamtsystemversuche durchgeführt.

Die Zielsetzung besteht darin, die Zusammenhänge zwischen den bestimmenden Motorparametern zu ermitteln, diese in Strategien zur Testzeitverkürzung einfließen zu lassen und letztendlich schon in sehr frühen Phasen beispielsweise nur über Festlegung der Spulenparameter, eine Aussage über die Zuverlässigkeit verschiedener Konzepte treffen zu können (Abb. 5).

<b>Belastung</b>	<b>150%</b>	<b>125%</b>	<b>100%</b>	<b>75%</b>	<b>50%</b>
<b>Motortyp 1</b>					
12V-Ausführung (Kon.)	16 Stk.	16 Stk.	16 Stk.	16 Stk.	16 Stk.
12V-Ausführung (Rev.)			16 Stk.		
18V-Ausführung (Kon.)	16 Stk.	16 Stk.	16 Stk.	16 Stk.	16 Stk.
24V-Ausführung (Kon.)	16 Stk.	16 Stk.	16 Stk.	16 Stk.	16 Stk.
<b>Motortyp 2</b>					
24V-Ausführung (Kon.)	8 Stk.		8 Stk.		
<b>System 1</b>					
Übersetzung 1 (Rev.)			8 Stk.		
Übersetzung 2 (Rev.)			8 Stk.		
Übersetzung 3 (Rev.)			8 Stk.		
Übersetzung 4 (Rev.)			8 Stk.		
Übersetzung 5 (Rev.)			8 Stk.		

Abb. 6: Versuchsplan

In Abbildung 6 sind alle geplanten Versuche im ersten Projektabschnitt aufgeführt. Dabei werden jeweils 16 Motoren einer Spannungsklasse bei 5 verschiedenen Belastungshöhen im kontinuierlichen Dauerbetrieb getestet. Die Ergebnisse sollen dabei den Zusammenhang zwischen Kommutierungsstrom und Verschleiß liefern und den Einfluss der Auslegung auf die Lebensdauer aufzeigen, wobei stellvertretend dafür der Parameter Induktivität kennzeichnend gewertet wird. Bei den Systemversuchen werden identische Systeme, allerdings mit 5 verschiedenen Getriebeübersetzungen getestet. Der Gesamtversuchsumfang erstreckt sich damit über 312 Motoren und 40 Systeme.

## 6 Versuchsergebnisse

Die ersten Dauerläufe dienten zur Untersuchung des Einflusses der gewählten Betriebsart. Es wurden sowohl Motoren mit konstanter Drehrichtung als auch im Reversierbetrieb unter jeweils gleicher Last betrieben. Dabei hat sich gezeigt, dass die Belastung für das Kommutierungssystem im Dauerbetrieb deutlich höher ist. Dies ist im Wesentlichen auf das schlechtere Schmierverhalten und die konstante Bürstenpolarität zurückzuführen (Abb. 7). Zudem hat sich gezeigt, dass der Drehzahleinfluss und damit der rein mechanische Verschleiß eine untergeordnete Rolle spielt (vgl. /9/). Das dominierende Kriterium für das Lebensdauerende der Motoren ist der elektrische Verschleiß.

	Dauerbetrieb	Reversierbetrieb
Betriebsparameter	kontinuierlicher Betrieb (Rechtslauf)	Betrieb mit ständiger Richtungsumkehr (300s/3s)
Bürstenverschleiß	+Bürste verschleißt sehr stark - Bürste ohne gravierende Verschleißspuren	+ und – Bürste werden gleichmäßig stark durch den Umpolvorgang abgenutzt
Kollektorverschleiß	Verschleiß unter 5%, teilweise sehr starke Rillenbildung erkennbar	Verschleiß unter 5%, vereinzelt etwas stärker glatt geschliffen, als beim Dauerbetrieb
Fettschmierung	Schmierung wird sehr schnell verbraucht und teilweise „weggeschleudert“	Schmierung bleibt länger erhalten, Position des Fettpropfes nahezu konstant
Lebensdauer	die Lebensdauer des Motors im Reversierbetrieb liegt deutlich über der erreichbaren beim Dauerbetrieb	
Erkenntnisse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• der Dauerbetrieb stellt die kritischere Belastung für den Motor dar</li> <li>• die Anodenbürste ist auf Grund des Energieflusses einer höheren Belastung ausgesetzt</li> <li>• der Kollektorverschleiß unterscheidet sich nur sehr geringfügig</li> <li>• das Verhalten des Fettpropfes ist im Dauerbetrieb ungünstiger</li> <li>• die Drehzahl spielt eine untergeordnete Rolle. Der elektrische Verschleiß ist dominant.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• die ständigen Anfahr- und Abbremsvorgänge scheinen keinen entscheidenden Einfluss auf die Lebensdauer zu haben</li> <li>• die Gefahr des Lamellenschlusses scheint auch vom Entstehungsort des Abriebs abhängig zu sein bzw.</li> <li>• die Lage des Fettpropfes bleibt länger stabil und kann daher mehr Schmutz binden</li> </ul>

Abb. 7: Vergleich von kontinuierlichem mit reversierendem Betrieb

Bei Zerlegung der Prüflinge haben sich zwei Hauptursachen für das Lebensdauerende herauskristallisiert, der Lamellenschluss und der Bürstenverschleiß. Der Lamellenschluss ist dadurch gekennzeichnet, dass sich zwischen den Kollektorlamellen Abrieb anlagert, der zu Kriechströmen zwischen den einzelnen Lamellen führen kann und im schlimmsten Fall einen Kurzschluss verursacht, der damit zum Ausfall des Motors führt (Abb. 8). Durch die lokale Überhitzung, bedingt durch den Kurzschlussstrom, kann es zu einer starken Deformation des Kollektors kommen. Der Bürstenab-

rieb hingegen beschreibt den Verschleiß der einzelnen Bürstenfinger. Ist die gesamte Lauffläche der Bürste verschliffen, so dass die Lamellen auf dem Trägermaterial laufen, spricht man von Bürstenverschleiß. Bei den bisher untersuchten Motoren wurden die Ausfälle überwiegend durch Lamellenschluss hervorgerufen.

Bei Auswertung der ausgefallenen Motoren wird der Kommutator sehr gründlich untersucht, so dass der Verschleiß jedes Bürstenfingers separat ermittelt wird, um das genaue Verschleißverhalten zu ermitteln. In einem ersten Ansatz konnten die gewonnenen Erkenntnisse in ein mathematisches Modell umgesetzt werden. Dieses Modell ist jedoch noch nicht verifiziert, da der Abschluss weiterer Versuche zu diesem Zeitpunkt noch aussteht.

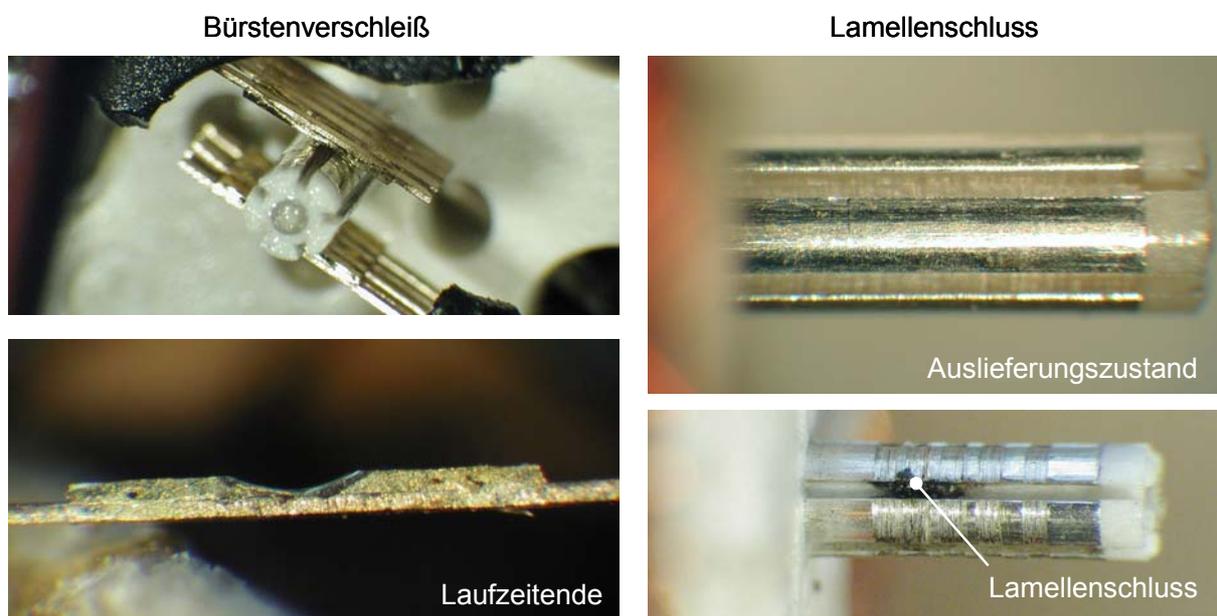


Abb. 8: Ausfallursachen des elektromechanischen Teilsystems

Die Untersuchungsergebnisse der Gesamtsysteme haben gezeigt, dass die Getriebe mit Kunststoffzahnradern die höchstbelastete Baugruppe darstellen und somit das Ausfallverhalten des Systems bestimmen. Auf Grund der bisher noch geringen Anzahl an Prüflingen wird an dieser Stelle noch nicht näher auf weitere Ausfallursachen und die exakten Ausfallmechanismen eingegangen.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Literaturrecherche am Anfang des Projekts hat gezeigt, dass keine Berechnungsmodelle für die Zuverlässigkeitsvorhersage in frühen Phasen vorhanden sind. Die durchgeführten Versuche können durch vorhandene Methoden momentan nicht

analytisch abgebildet werden. In der Praxis kommen zur Ermittlung der Produktzuverlässigkeit ausschließlich Lebensdauertests in späten Phasen zum Einsatz.

Um eine zuverlässige Datenbasis zur Ableitung mathematischer Zusammenhänge zu erhalten, wurden institutseigene Dauerlaufeinrichtungen aufgebaut, so dass nun die notwendigen Untersuchungen durchgeführt werden können. Zudem wurden bereits die Hauptausfallursachen und Einflussparameter identifiziert. Erste Versuchsergebnisse und Erkenntnisse liegen vor.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen, wird das restliche Versuchsprogramm durchgeführt. Durch die neu dazu gewonnenen Informationen soll das mathematische Modell verfeinert und verifiziert werden. Mit Hilfe der ermittelten Zusammenhänge wird dann am Beispiel der Motorentwicklung der Einsatz in frühen Phasen dargestellt und ein entsprechender Vergleich zwischen Versuch und Berechnung vorgenommen. Im Optimalfall sollte es nach Beendigung dieser ersten Versuchsserie möglich sein, anhand von groben Randbedingungen am Anfang des Entwicklungsprozesses quantitative Aussagen zur Produktzuverlässigkeit machen zu können.

## 8 Literaturverzeichnis

- /1/ Kallenbach, E.; Stölting, H.-D.: Handbuch Elektrische Kleinantriebe, 2. Auflage. Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag 2002.
- /2/ Schinköthe, W.: Skript Aktorik in der Feinwerktechnik. Universität Stuttgart, IKFF, Stuttgart 2004.
- /3/ Bertsche, B.; Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 2004.
- /4/ Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA): Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie: Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten. Teil 2, 3. überarbeitete und erweiterte Auflage, Frankfurt: VDA-QMC, 2000.
- /5/ Meyna, A.: Experimentelle und theoretische Untersuchung der technischen Zuverlässigkeit von Elektronikmotoren. Dissertation, TU Berlin 1976.
- /6/ Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co.KG: Antriebssysteme. Firmenkatalog, Schön-aich, 2004.
- /7/ Maxon Motor GmbH: maxon 2004. Firmenkatalog, München, 2004.
- /8/ Volkmann, W.: Kohlebürsten, Untersuchungsergebnisse, Erfahrungen, Empfehlungen. Schunk & Ede GmbH. Gießen, 1980.

- /9/ Halmai, A.; Huba, A.: Die Vorteile der Axial-Magnetfeld Gleichstrom-Kleinstmotoren. IWK 43, TU Ilmenau, 1998. Band IV. Vortragsreihen S. 511-516.

**Neue Telefon- und Telefaxnummer:**

**Telefon: +49 (0)711 685 – 6 6402**

**Telefax: +49 (0)711 685 – 6 6356**

**Neue E-Mail-Adressen:**

**ikff@ikff.uni-stuttgart.de**

**linearantriebe@ikff.uni-stuttgart.de**

**piezoantriebe@ikff.uni-stuttgart.de**

**spritzguss@ikff.uni-stuttgart.de**

**zuverlaessigkeit@ikff.uni-stuttgart.de**