

26. Okt. 2005

# MODAN

**Forschungsverbundprojekt  
„Entwurf und Modellierung von Antriebssystemen  
für die Mikrosystemtechnik“**

**MODAN**

**www.modan.org**

TECHNISCHE  
INFORMATIONSBIBLIOTHEK  
UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK  
HANNOVER

**Abschlußbericht des Teilprojektes  
„Modellierungsmethoden und -werkzeuge“  
des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Schaltungen  
Außenstelle Entwurfsautomatisierung Dresden**

*16 SV 1547*

Verbund-Nr.: V2285  
Fördermittelgeber: BMBF  
Projekträger: VDI/VDE-IT Teltow  
Betreuer: Dipl. - Ing. Chr. Breckenfelder / Dipl. - Ing. S. Krüger

TIB/UB Hannover  
128 672 455

89



**Inhaltsverzeichnis**

1 Kurzdarstellungen ..... 3

1.1 Aufgabenstellung ..... 3

1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens ..... 3

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens..... 3

1.4 Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand ..... 3

1.4.1 Für das Vorhaben genutzte bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte..... 3

1.4.2 Verwendete Fachliteratur, genutzte Informations- und Dokumentationsdienste ..... 4

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen ..... 6

2 Eingehende Darstellungen..... 6

2.1 Projektziel ..... 6

2.2 Projektdurchführung..... 7

2.3 Erzielte Ergebnisse ..... 8

2.3.1 Einheitliche Modellschnittstelle ..... 9

2.3.2 Erweiterung von SimulationX um Elektronik-Modelle ..... 10

2.3.3 Programmierung einer Monte-Carlo-Simulationsumgebung für SPICE..... 12

2.3.4 Erprobung symbolischer Analyseverfahren ..... 13

2.3.5 Optimierung eines mechanischen Übersetzungsformkörpers mit ANSYS ..... 15

2.3.6 Modellierung des Hystereseverhaltens eines Piezoaktors ..... 17

2.3.7 Gewinnung der Modellparameter durch Messung..... 23

2.3.8 Approximation mit radialen Basisfunktionen..... 25

2.3.9 Gesamtsystemsimulation mit SimulationX..... 28

2.3.10 Modellgenerierung durch Reduktion von FEM-Modellen..... 29

2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen ..... 30

2.5 Bekanntgewordene Fortschritte bei anderen Stellen ..... 30

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse..... 30

3 Fortschreibung des Verwertungsplans ..... 31

## **1 Kurzdarstellungen**

### **1.1 Aufgabenstellung**

Die Aufgabe bestand in der Unterstützung des Entwurfs miniaturisierter Antriebssysteme durch Werkzeuge und Methoden. Aufbauend auf einheitlichen Beschreibungsmitteln und Schnittstellen sowie der Schaffung von Modellbibliotheken und der Bereitstellung von Werkzeugen sollte eine durchgängige Designmethodik mit dem Hauptanwendungsgebiet Aktorik und Antriebstechnik entwickelt werden. Insbesondere waren grundsätzliche Arbeiten zur Definition von Schnittstellen, Modellstruktur und Sprachen durchzuführen, Methoden für Komponenten- und Systemmodellierung zu entwickeln und zu erproben, Modellbibliotheken vor allem elektronischer Bauelemente zu erstellen sowie die Projektpartner bei Modellierungs- und Simulationsarbeiten zu unterstützen.

### **1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens**

FhG IIS EAS Dresden hat langjährige Erfahrung auf dem Gebiet der Modellierung und Simulation in der Mikrosystemtechnik und bei heterogenen Systemen. Es wurden Modellierungsverfahren, Modellbibliotheken und Simulatorkopplungen sowie Optimierungsverfahren entwickelt. Eine Mitarbeit erfolgte u. a. in den Verbundprojekten BIBLIO, METEOR, MIMOSYS, SIMKOS und DEMIS. Wissenschaftliche Vorlauftforschung auf dem Gebiet der Modellierung erfolgte im Sonderforschungsbereich 358 "Automatisierter Systementwurf" an der TU Dresden. Durch den Einsatz von FEM - Simulatoren wie ANSYS und FEMLAB und System-simulatoren (Saber, Matlab) sind Modelluntersuchungen und Systemsimulationen für mikro-systemtechnische und mechatronische Fragestellungen durchgeführt worden.

Das Anwendungs-Know-How der Industriepartner in Verbindung mit den langjährigen Erfahrungen des FhG IIS EAS Dresden und der anderen Forschungspartner auf dem Gebiet Modellierung und Simulation bilden die Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens.

### **1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Bereits mit der Antragstellung erfolgte die Definition von Teilaufgaben und Zwischenzielen (Benchmarks), nach denen gearbeitet wurde. Dieser detaillierte Arbeitsplan wurde bereits zu Projektbeginn mit ITI GmbH Dresden koordiniert. Insbesondere bedingt durch die Zusammenarbeit mit TETRA GmbH Ilmenau erfolgte eine stärkere Fokussierung auf anwendungsorientierte Problemstellungen.

### **1.4 Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand**

#### **1.4.1 Für das Vorhaben genutzte bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte**

Bekannte Konstruktionen oder Schutzrechte wurden nicht genutzt. Sofern bekannte Verfahren (z.B. Algorithmen) zur Anwendung kamen, geht dies aus den in der eingehenden Darstellung angegebenen Literatur hervor. Im einzelnen betrifft dies:

- objektorientierte Modellierungsmethodik und objektorientierte Modellbeschreibungssprachen (Modelica)

- physikalische Zusammenhänge bei elektronischen Bauelementen, insbesondere Halbleitern
- mathematische Grundverfahren (z.B. Approximationsverfahren, statistische Verfahren, Verfahren der Ordnungsreduktion)
- mathematische Simulationsansätze, insbesondere Monte-Carlo-Simulation
- diverse System- und Programmiersprachen (UNIX, awk, C...)
- Simulations- und Analyseverfahren in Form von Software-Tools (z.B. SimulationX, Analog Insydes, ANSYS, SPICE)
- Preisach-Modellansatz für die Modellierung von Hystereseigenschaften
- induktive Messverfahren und Messungen mit Laserabstandssensor

#### 1.4.2 Verwendete Fachliteratur, genutzte Informations- und Dokumentationsdienste

- [1] Achanta, S.; Celis, J.-P.; Mollenhauer, O.; Spiller, F.: A new tool for industrial tribology filling the gap between macro and nanotribology. 14<sup>th</sup> International Colloquium Tribology, Esslingen, 13-15 January, 2003 über <http://www.tetra-ilmeneau.de>
- [2] Affour, B.; Spirkovitch, S.; Ostergaard, D; Gyimesi, M.: Efficient reduced order modeling for system simulation of micro electro mechanical systems (MEMS) from FEM models. Proc. Symposium on Design, Test, Integration, and Packaging of MEMS/MOEMS, SPIE Vol. 4019(2000), 50-54
- [3] ANSYS Theory Reference, 8. Edition, SAS IP, 1997.
- [4] Becker, J.; Haase, J.; Reitz, S.; Schwarz, P.: Automatische Generierung von Modellen mechanischer Komponenten für die Systemsimulation. 14. Symposium "Simulationstechnik", ASIM2000, Hamburg, 29.09.00, S. 153-160
- [5] Borchers, C.; Lucke, S.; Barke, E.: Integration der Monte-Carlo-Analyse in eine Schaltungssimulationsumgebung. 3. GI/ITG/GME-Fachtagung „Rechnergestützter Entwurf und Architektur mikroelektronischer Systeme“, Oberwiesenthal, Mai 1994, 96-104
- [6] Brenan, K.E.; Campbell, S.L.; Petzold, L.R.: Numerical solution of initial-value problems in differential-algebraic equations. North-Holland, New York, 1989
- [7] Clauss, C.; Haase, J.; Kurth, G.; Schwarz, P.: Extended admittance description of nonlinear n-poles. Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik 49(1995)2, 91-97
- [8] Clauss, C.; Haase, J.; Kurth, G.; Schwarz, P.: Makromodellierung analoge nichtlinearer Mehrpole. 3. GME/ITG-Diskussionssitzung "Entwicklung von Analogschaltungen mit CAE-Methoden", Bremen, 29./30. Sept. 1994, 33-38
- [9] Christen, E.; Bakalar, K.: VHDL-AMS - A hardware description language for analog and mixed-signal applications. IEEE Trans. CAS-II 46(1999)10, 1263-1272
- [10] Elmqvist, H.; Mattsson, S.E.: Modelica – The next generation modelling language – an international design effort. Proc. 1<sup>st</sup> World Congress on System Simulation WCSS'97, Singapore, 1997
- [11] Fedder, G.K.; Jing, Q.: A Hierarchical Circuit-Level design Methodology for Micromechanical Systems. IEEE Trans. CAS-II 46(1999)10, 1309-1315
- [12] Fischer, W.-J. (Hrg.): Mikrosystemtechnik. Vogel, Würzburg 2000
- [13] Fritzson, P.: Principles of object-oriented modeling and simulation with Modelica 2.1. A John Wiley & Sons, 2004

- [14] Gabbay, L.D.; Mehner, J.E.; Senturia, S.D.: Computer-aided generation of nonlinear reduced-order dynamic macromodels – I : Non-stress-stiffened case. *J. Microelectromechanical Systems* 9(2000)2, 262-278
- [15] Greengard, L.; Rokhlin, V.: A fast algorithm for particle simulation. *Journal of Computational Physics*. 73(1987), 325-348
- [16] Haase, J.; Reitz, S.; Schwarz, P.: Behavioural modeling for heterogeneous systems based on FEM description. *IEEE/ACM International Workshop on Behavioral Modeling and Simulation (BMAS'99)*, Orlando, 4.10.1999
- [17] Herold, H.: *UNIX und seine Werkzeuge. Awk und sed*. Addison-Wesley, 1994
- [18] Hofer, C.E.E.; Nielinger, H.: *SPICE*. Springer 1988
- [19] <http://www.piceramic.com>
- [20] *IEEE Standard VHDL Analog and Mixed-Signal Extensions*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 23. 12. 1999
- [21] Kasper, M.: *Mikrosystementwurf - Entwurf und Simulation von Mikrosystemen*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2000
- [22] Kuhn, K.; Janocha, H.: Inverse Steuerung für den Großsignalbetrieb von Piezoaktoren. *Automatisierungstechnik* 50 (2000) 9, S. 439-450
- [23] Martin, R.; Leitner, T.; Schneider, P.: Analyse thermisch-elektrischer Wechselwirkungen in elektronischen Schaltungen mit Schaltungssimulatoren. *Workshop "Multi-Nature-Systems 2001"*, Hamburg, 2001, S. 33-42
- [24] Mees, A. I.; Jackson, M. F.; Chua, L. O.: Device Modeling by Radial Basis Functions. *IEEE Transactions on CAS-I* 39(1992)1, 19-27.
- [25] Mittal, S.; Menq, C.-H.: Hysteresis compensation in electromagnetic actuators through Preisach model inversion, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 5, No. 4, December 2000, S. 394-409
- [26] Modelica Association: *Modelica – A unified object-oriented language for physical systems modelling*. <http://www.Modelica.org>
- [27] Nagel, L.W.: *SPICE2 – A computer program to simulate semiconductor circuits*. Berkeley, University of California, 1975
- [28] Neul, R.; Becker, U.; Lorenz, G.; Schwarz, P.; Haase, J.; Wünsche, S.: A Modeling Approach to Include Mechanical Microsystem Components into the System Simulation. *Proc. Design, Automation and Test in Europe DATE 1998*, Paris, 510-517
- [29] Palis, F.; Landra, U.; Dzhantimirov, S.: Modelling and control of piezoelectric actuators. *3rd ISTC UEES'97*, 19.-21. September 1997, Alushta (Ukraine), S. 1017-1022
- [30] Parodat, S.: MARABU - Ein Werkzeug zur Approximation nichtlinearer Kennlinien mit radialen Basisfunktionen. *Proceedings 6. Workshop „Methoden und Werkzeuge zum Entwurf von Mikrosystemen“*, Paderborn, 4. und 5. 12. 1997, 49-58.
- [31] Produktinformation Analog Insydes. Verfügbar: <http://www.analog-insydes.de>
- [32] Reitz, S.; Becker, J.; Haase, J.; Schwarz, P.: Generierung von Verhaltensmodellen aus ANSYS-Beschreibungen. *Proceedings 18. CAD-FEM Users' Meeting (Vol. 1)*, Friedrichshafen, 20.-22. 9. 2000, Beitrag 1.3.5
- [33] Scherge, M.; Mollenhauer, O.: Nanoritzversuche mittels Mikrotribometer. *GFT-Tagung, Göttingen, 2001* über <http://www.tetra-ilmeneau.de>

- [34] Schwarz, P.; Haase, J.: Behavioral Modeling of Complex Heterogeneous Microsystems. Proc. 1st Int. Forum on Design Languages FDL '98, Lausanne 1998, vol. 2, S. 53-62
- [35] Schwarz, P.; Schneider, P.: Model Library and Tool Support for MEMS Simulation. SPIE's conference "MICROELECTRONIC AND MEMS TECHNOLOGY", Edinburgh, Scotland. 30.5.-1.6.2001, SPIE Proceedings Series Volume 4407
- [36] Senturia, S.D.: CAD Challenges for Microsensors, Microactuators, and Microsystems. Proc. IEEE 86(1998)8, 1611-1626
- [37] Teegarden, D.; Lorenz, G.; Neul, R.: How to model and simulate microgyroscope systems. IEEE Spectrum 35(1998)7, 67-75
- [38] Völklein, F.; Zetterer, T.: Einführung in die Mikrosystemtechnik. Vieweg, Braunschweig 2000
- [39] Wünsche, S.; Clauß, C.; Schwarz, P.; Winkler, F.: Electro-thermal circuit simulation using simulator coupling. IEEE Trans. VLSI-5(1997)3, 277-282
- [40] Walker, N.E.: The design Analysis Handbook. Elsevier, 1998

### 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit erfolgte im wesentlichen zwischen den Projektpartnern, vornehmlich ITI GmbH Dresden und TETRA GmbH Ilmenau. Darüber hinaus gab es Kontakte in einzelnen Sachfragen mit anderen Fraunhofer Instituten (z.B. ITWM Kaiserslautern) und dem universitären Bereich.

## 2 Eingehende Darstellungen

### 2.1 Projektziel

Die Unterstützung des Entwurfs modularer miniaturisierter Antriebssysteme durch Werkzeuge und Methoden war Ziel des Verbundprojektes MODAN. Aufbauend auf einheitlichen Beschreibungsmitteln und Schnittstellen sowie der Bereitstellung von Modellbibliotheken und Werkzeugen für die Modellerstellung sollte eine von Prozess- bis Systemebene durchgängige Designmethodik entwickelt werden. Anwendungsschwerpunkte waren Aktorik und Antriebstechnik.

Aus den Aufgaben des Verbundprojektes

- Ergänzung und Erweiterung des Entwurfs von Aktor- und Antriebssystemen in der Mikrosystemtechnik um Methoden, Modellierungskonzepte, Entwurfswerkzeuge und um Modelle für Entwurf, Simulation und Optimierung
- Entwicklung von typischen Beispielsystemen aus den Bereichen elektromechanischer Mini- und Mikroantriebe für Fluidik und KFZ - Technik und modularer Präzisionsantriebe für die Laserfertigung und ihrer Komponenten unter dem Aspekt der Bereitstellung für eine breite Verwendbarkeit (Baukastensystem)
- Bereitstellung von Modellen für die Einbindung in das Baukastenkonzept
- Weitgehend automatisierte Entwicklung der Modelle durch Methoden und Werkzeuge, die einen modularen Ansatz verfolgen
- Wiederverwendung vorhandener Modelle
- Untersuchung der Eignung internet-basierter Methoden bei Modellierung und Simulation

wurden für Fraunhofer IIS / EAS die folgenden Teilaufgaben abgeleitet:

- 1) Mitarbeit an der Definition der Schnittstellen für Komponenten des VDMA-Mikrosystemtechnik-Baukastens unter dem Aspekt „Modellierung für Aktoren und Antriebe“
- 2) Unterstützung der Modellerstellung für den Mikrosystemtechnik-Baukasten (gemeinsam mit Projektpartnern): Analyse und Auswahl von Beschreibungssprachen und Simulatoren (unter besonderer Berücksichtigung von Modelica und VHDL – AMS) für den Bereich „Aktoren und Antriebe“
- 3) Unterstützung der Modellerstellung für den Mikrosystemtechnik-Baukasten: einheitliche Modellstruktur und –schnittstelle für Aktoren und Antriebe
- 4) Komponenten- und Systemmodellierung für miniaturisierte Antriebssysteme und Aktoren (unter Einbeziehung von mechanischen, magnetischen, piezoaktorischen und regelungstechnischen Bestandteilen des Systems); Bereitstellung von ausgewählten Modellen als Referenzmodelle
- 5) Rechnergestützte Optimierung miniaturisierter Antriebe.
- 6) Weiterentwicklung und Erprobung SPICE - kompatibler Transistormodelle
- 7) Weiterentwicklung von Werkzeugen zur Modellbildung (Approximation, Ordnungsreduktion, Optimierung); Bereitstellung der Tools für Projektpartner
- 8) Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit der internetbasierten Dienstbereitstellung für Modellbildung und Simulation
- 9) Anpassung und Weiterentwicklung wiederverwendbarer Modelle aus Vorgängerprojekten wie SIMKOS, MIMOSYS und BIBLIO für die Erfordernisse des Mikrosystemtechnik-Baukastens (Match-X) und den Einsatz in MODAN
- 10) Beratung und Unterstützung der Projektpartner bei der Modellierung ihrer Produkte aus der Mikrosystemtechnik, Aktorik und Mechatronik.

Die Umsetzung der Teilaufgaben sollte in enger Zusammenarbeit den Partnern in MODAN erfolgen. Dadurch war mit einer Priorisierung einzelner Teilaufgaben zugunsten anderer zu rechnen.

## 2.2 Projektdurchführung

Wie ursprünglich vorgesehen erfolgte die Bearbeitung der zehn Teilaufgaben nach der Gliederung der folgenden sechs Meilensteine, die jeweils Halbjahresschritte markieren:

- M1 Spezifizierung (Aufgabenstellung für Demonstratoren; Anforderungen an Tool-Weiterentwicklung)
- M2 Konzept für Modellierung/Simulation/Optimierung der Demonstratoren (welche Tools, Modelle; derzeitige Entwurflücken; Erarbeitung des 1. Gesamtmodells)
- M3 Erprobung und Verbesserung der Modelle (Verfeinerung); Realisierung der Demonstratoren; Messungen
- M4 Bereitstellung der verfeinerten Modelle für die Entwurfsoptimierung; Erprobung der weiterentwickelten Tools
- M5 Verbesserte Tools; Modellbibliotheken; Variantenuntersuchung für die Demonstratoren
- M6 Dokumentation; Vorbereitung der Vermarktung

Im Projekt erfolgte eine sehr enge Zusammenarbeit mit den Firmen ITI GmbH Dresden und TETRA GmbH Ilmenau. Bei den Arbeiten mit ITI GmbH Dresden stand die Weiterentwicklung und Erprobung SPICE-kompatibler Transistormodelle (Teilaufgaben 6, 9) und die Wei-

terentwicklung von Werkzeugen zur Modellbildung (Teilaufgabe 7) sowie die Simulation des Demonstrators im Vordergrund. Die wesentlich verwendete und Zielsoftware war dabei der Simulator SimulationX der ITI GmbH Dresden. TETRA GmbH Ilmenau lieferte den Demonstrator sowie damit im Zusammenhang stehende Modellierungsaufgaben, womit wesentlich die Beiträge zu den Teilaufgaben 4, 5, und 10 bestritten wurden. Bedingt durch damit verbundene Kapazitätsverschiebungen wurde die Teilaufgabe 8 (internetbasierte Dienstbereitstellung) nur am Rande behandelt. Die Teilaufgaben 1 bis 3 (Definition der Schnittstellen, Auswahl von Beschreibungssprachen und Verwendung einer einheitlichen Modellstruktur) bilden Grundlage und Klammer für alle anderen Teilaufgaben.

Es wurde auf Einzelberichte zu jedem Meilenstein verzichtet, stattdessen wurden die Ergebnisse in Veröffentlichungen, in einem internen technischen Bericht sowie in Form von übergebenen Leistungen (Modelle) festgehalten.

### 2.3 Erzielte Ergebnisse

Entsprechend der Vielzahl der detaillierten Teilaufgaben sind die Ergebnisse vielschichtig. Verbindende Klammern bilden aus Sicht der Modellbeschreibung der *verallgemeinerte Mehrpol*, der zu einer einheitlichen Modellschnittstelle führt, und aus Sicht der Modellierungsalgorithmen der *Demonstrator*, an dem sehr verschiedene, für den Anwendungsfall Antriebstechnik geeignete Algorithmen und Werkzeuge exemplarisch zusammengeführt werden. Die Problematik der Modellschnittstelle wird im Abschnitt 2.3.1 beschrieben.

Der von der TETRA GmbH Ilmenau bereitgestellte Demonstrator ist ein piezoaktorischer Mikroantrieb, der z.B. in Präzisionstestern für mikrotribologische Untersuchungen eingesetzt wird [1][33]. Der Mikroantrieb kann durch das Blockschaltbild im Bild 1 charakterisiert werden:

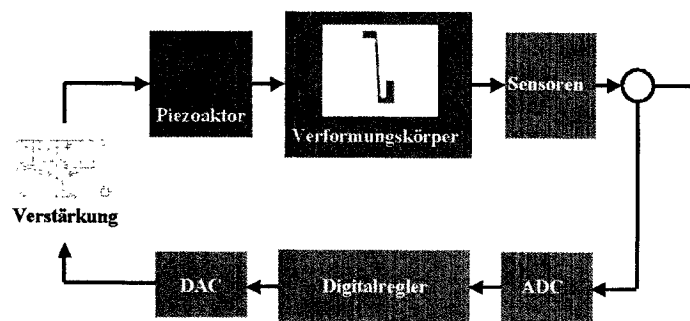


Bild 1: Blockschaltbild Mikroantrieb

Der Digitalregler gibt entsprechend einer (hier nicht eingezeichneten) Soll-Auslenkung eine Spannung vor, die im Digital-Analog-Converter in eine Analogspannung im Niedervoltbereich gewandelt wird. Die Verstärkungsschaltung formt diese in eine Eingangsspannung (ca. 0...105 V) für den Piezoaktor, dessen Auslenkung über einen geeignet gestalteten Verformungskörper die Ist-Auslenkung bereitstellt. Diese wird gemessen und zwecks Auswertung an den Regler zurückgeführt.

Die im Projekt ausgeführten Arbeiten konzentrierten sich schwerpunktmäßig auf die Kette „Verstärkung – Piezoaktor – Verformungskörper“ und lassen sich mit folgenden Schlagworten charakterisieren:



	Verstärkung	Piezoaktor	Formkörper
reales System	elektrische Schaltung	handelsüblicher Piezoaktor	mechanischer Übersetzungsformkörper aus Metall
durchgeführte Arbeiten	Schaltungsanalyse mit SPICE Programmierung Monte-Carlo-Simulation für SPICE (2.3.3) Modellbereitstellung für SimulationX (2.3.2) Test elektrothermischer Modelle (2.3.2) Erprobung symbolischer Analyseverfahren (Analog Insydes) (2.3.4)	Test eines dynamischen Modelles ohne Hysterese Programmierung eines statischen Modelles mit Hysterese (Preisach und Preisach invers) (2.3.6) Bereitstellung und Erprobung von Messverfahren zur Parametrisierung des Preisach-Modelles (2.3.7)	FEM-Modellierung mit ANSYS (2.3.5) Optimierung der Form zur Maximierung der Auslenkung (2.3.5) Modellgenerierung durch Approximation mit radialen Basisfunktionen (2.3.8) Toolerweiterung MARABU (2.3.8)
Simulationsmodell in SimulationX	(vereinfachte) elektrische Schaltung	C-Funktion	C-Funktion

In den weiteren Abschnitten wird auf die Ergebnisse einzelner durchgeführter Arbeiten eingegangen (die Abschnittsnummern sind in der Tabelle eingetragen) sowie auf die Gesamtsimulation der Regelkreises. Nicht im Zusammenhang mit dem Demonstrator stehen Untersuchungen zur Modellerzeugung durch Modellreduktion (2.1.10). Zur Vermeidung von Wiederholungen und aus Gründen einer günstigen Darstellung werden im folgenden nicht die einzelnen Teilaufgaben abgehandelt, sondern die erzielten Ergebnisse werden in sich geschlossen schwerpunktmäßig dargelegt.

### 2.3.1 Einheitliche Modellschnittstelle

Ein wichtiger Grundsatz der Modellierungsmethodik ist, ein Modell als gegen seine Umgebung abgegrenzte Einheit aufzufassen [11] [34], das über Anschlüsse (Pins, Ports, hierzu existieren diverse Bezeichnungen) mit der Umgebung kommuniziert. Das Modell kann interne (aussen nicht bekannte und daher nicht verwendbare) Variablen besitzen und es können im Modell gültige Gleichungen und Algorithmen beschrieben werden. Die Anschlüsse werden im allgemeinen unterschieden nach konservativ/nichtkonservativ, zeitdiskret/zeitkontinuierlich, wertdiskret/wertkontinuierlich. Die konkreten Werte an den Anschlüssen (auch Vektoren von Werten) werden modellspezifisch definiert. Beim Gebrauch des Modelles (Verschaltung) dürfen nur Anschlüsse gleicher Art miteinander verbunden werden.

Diese Herangehensweise orientiert sich am sogenannten verallgemeinerten Mehrpol [7] [8] nach Bild 2, der garantiert, dass bei korrekter innerer Beschreibung nach vollständiger Verschaltung ein fehlerfrei formuliertes mathematisches Gesamtsystem entsteht. Allerdings kann diese Herangehensweise im allgemeinen noch nicht die numerische Lösbarkeit sichern (z.B. wegen Index-Problematik [6]), dazu gehören ggf. noch zusätzliche Gleichungsumformungen.

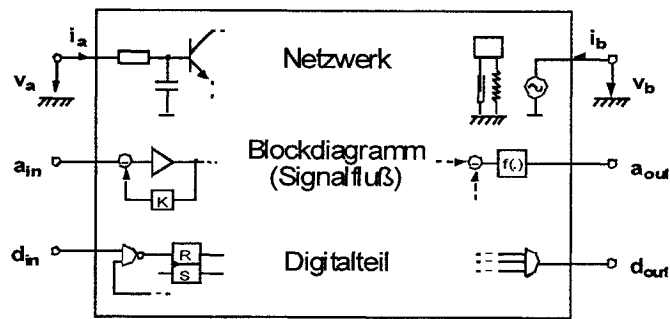


Bild 2: Verallgemeinerter Mehrpol

Durch moderne Verhaltensbeschreibungssprachen [9] [20] wird die skizzierte Herangehensweise unterstützt. Bedingt durch die Favorisierung von SimulationX von ITI GmbH Dresden wurde für die Arbeiten in MODAN vornehmlich Modelica [10] [13] [26] eingesetzt, neben C als allgemeiner Programmiersprache insbesondere für mathematische Zusammenhänge.

Es ist prinzipiell möglich, in die Modelica-Beschreibung für Modelle der Mikroaktuatorik auch weitere Informationen aufzunehmen, die nicht der Verhaltensbeschreibung dienen. Zum einen können in sogenannten *annotationen* z.B. graphische Angaben aufgenommen werden, die ein Zusatztool auswertet. Im Sinne eines Baukastenprinzips ergibt sich damit die Möglichkeit, Fragen der Platzierung und des „Zusammensteckens“ von Bauteilen auch über eine Gesamt-Systembeschreibung zu behandeln. Anstelle über Annotationen können auch Informationen der Lage im Raum beispielsweise in der Beschreibung der Anschlüsse enthalten sein.

Im Ergebnis kann festgehalten werden, dass mit dem „Mehrpolprinzip“ und der (objektorientierten) Beschreibung durch Modelica sehr weitreichende Beschreibungsmethoden und –mittel zur Verfügung stehen, die den in MODAN gestellten Anforderungen an eine einheitliche Modellierungsmethodik und einheitliche Modellschnittstelle gerecht werden. Darüber hinaus lassen sich Match-X-Datensätze im Bedarfsfall einbetten.

### 2.3.2 Erweiterung von SimulationX um Elektronik-Modelle

Wegen den häufig zu untersuchenden engen Interaktionen zwischen elektronischen Schaltungen und nichtelektronischen Systemen war es erforderlich, im Simulator SimulationX die allgemein anerkannten Halbleitermodelle des Simulators (Berkeley)SPICE3 [27] [18] zur Verfügung zu stellen. Dies erfolgte durch Anbindung einer am EAS entwickelten Modellbibliothek (C++). Es wurde eine umfangreiche Testsuite angelegt. Damit können in SimulationX folgende

SPICE-Modelle benutzt werden:

- Die Grundelemente R, L, C, lineare gesteuerte Quellen
- Alle in SPICE bekannten zeitabhängigen Strom- und Spannungsquellen
- Halbleiterwiderstand und –kapazität sowie –diode
- Transistoren JFET, MESFET, MOSFET (Level1-8) und BJT

Die Parametrisierung der SPICE-Halbleiterbauelemente ist oft sehr diffizil, und die Parameter sind meistens in den sogenannten SPICE-Netzlisten, den Eingabedateien für den Simulator SPICE, beschrieben, wobei die Parameterlisten oft sehr umfangreich sind. Um zu einem handhabbaren Vorgehen zu kommen, wurde die Übersetzung von SPICE-Netzlisten in Mo-

delica-Code programmiert, so dass exemplarisch eine „Knopfdruck“-Lösung für die Einbeziehung von SPICE-Netzlisten in Simulationen mit SimulationX erprobt werden konnte.

Beispiel einer SPICE-Netzliste für 2 Dioden mit unterschiedlichen Parametern:

```

Beispiel zwei Dioden
vsin 1 0 dc 0 sin(0 10 2 0 0)
ri 2 0 1
d1 1 2 diodel temp=30
.model diodel d is=0.56e-07 cj0=0.04 rs=23e-3
ri2 3 0 1
d12 1 3 diode2 temp=30
.model diode2 d is=0.6e-5 cj0=0.08 rs=23e-3
.end

```

Die Simulation mit SimulationX führt auf das Ergebnis nach Bild 3:

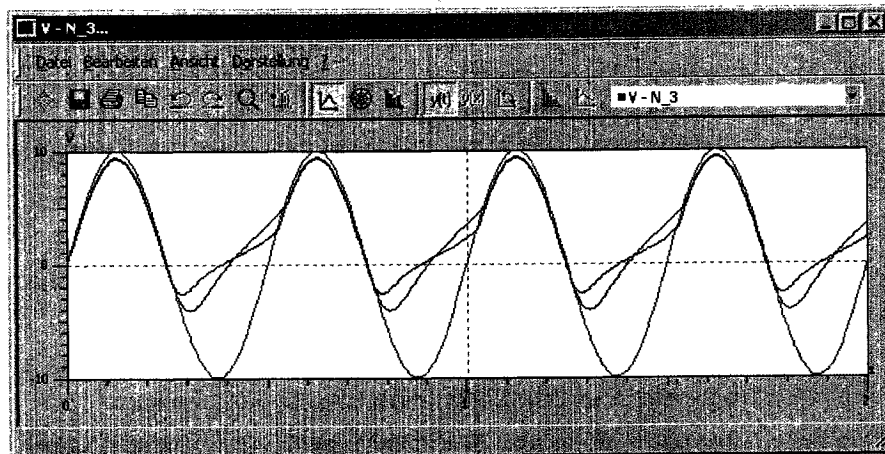


Bild 3: Simulationsergebnis Diodenschaltungen

Weiterhin wurden sehr einfache Transistormodelle im Modelica zu Verfügung gestellt, die das elektrothermische Verhalten zu simulieren gestatten. Damit ist es möglich, die durch die Elektronik erfolgende Erwärmung zu berechnen, einschließlich der Rückwirkung der Erwärmung auf das elektrische Verhalten [23] [39]. Im folgenden ist ein Ausschnitt aus dem Modelica-Quelltext des elektrothermischen NMOS-Transistors angegeben:

```

model HeatingDiode "Simple diode with heating port"
  extends Interfaces.OnePort;
  Interfaces.HeatPort_a heatPort (T(start=300.15));
  Constant Real k=1.380662e-23, q=1.6021892e-19;
  ~parameter Real Ids=1.e-6, Maxexp=15, R=1.e8, EG=1.11, N=1;
  parameter Real TNOM=300.15, XTI=3;
  Real vt_t, id, htemp, aux, auxp, maxexp=exp(Maxexp);
equation
  htemp = heatPort.T;
  vt_t = k*htemp/q;
  id = exlin((v/(N*vt_t)), Maxexp) - 1;
  aux = (htemp/TNOM - 1)*EG/(N*vt_t);
  auxp = exp(aux);
  i = Ids*id*pow(htemp/TNOM, XTI/N)*auxp + v/R;

```

```

    heatPort.Q_flow = -i*v;
end HeatingDiode;

```

### 2.3.3 Programmierung einer Monte-Carlo-Simulationsumgebung für SPICE

Häufig sind für elektrische Schaltungen Parameterstudien erforderlich, insbesondere sind die Auswirkungen von Parameterschwankungen zu untersuchen, was für die Beurteilung der Güte der Schaltung wichtig ist. Eine wichtige Simulationsmethode dafür ist die Monte-Carlo-Simulation [5] [40]. Neben der Nominalsimulation der Schaltung, die mit den vom Entwerfer gewählten Schaltungsparametern durchgeführt wird, und die nach abgeschlossenem Entwurf das gewünschte Verhalten zeigt, wird eine Vielzahl von Einzelsimulationen durchgeführt, wobei die zufälligen Schwankungen der Parameter nach vorgebbaren Verteilungsfunktionen (u.a. Normal- oder Gleichverteilung) gewählt werden. Die interessierenden Kenngrößen der Schaltung (Spannungsverläufe, Frequenzgänge, usw.) aller einzelnen Simulationen werden danach zusammengeführt und (statistisch) ausgewertet.

Da der Simulator (Berkeley)SPICE3 die Simulationsmöglichkeit der Monte-Carlo-Simulation nicht besitzt, wurde im Projekt eine Lösung entworfen und programmiert, die mit Hilfe von Scriptsprachen (awk) [17] sowie C-Programmen

- für die zu untersuchende Schaltung entsprechend Nutzervorgaben Schaltungen generiert, deren Parameter zufallsgesteuert variieren
- alle generierten Schaltungen im Batch-Modus mit SPICE simuliert, was auch verteilt auf mehreren Rechnern in einem Workstation-Cluster erfolgen kann
- die Ergebnisse zusammenführt und eine gemeinsame Ausgabe ermöglicht.

Die Spezifikation der zu variierenden Parameter erfolgt in einer an die SPICE-Eingabedatei angelegten Textdatei. Die Monte-Carlo-Simulation wurde an mehreren Schaltungen erfolgreich erprobt. Im Bild 4 ist das Schaltbild eines Stromspiegels angegeben sowie das Ergebnis einer Monte-Carlo-Simulation mit 500 Einzelsimulationen der DC-Kennlinie für eingespeisten und gespiegelten Strom bei Variation aller Breiten und Längen der MOS-Transistoren normalverteilt im Bereich von -10% bis +10% bezüglich des Nominalwertes.

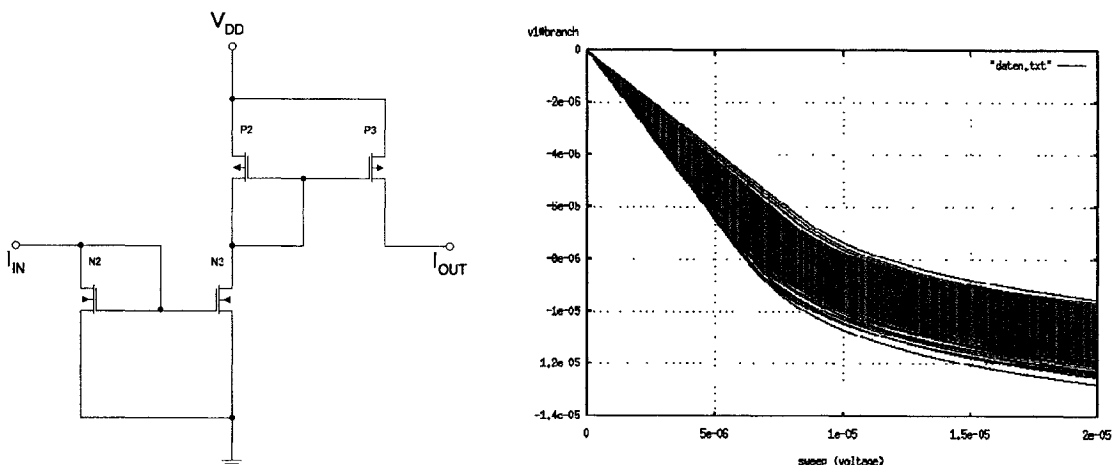


Bild 4: Schaltbild Stromspiegel und Ergebnis einer Monte-Carlo-Simulation

Im Ergebnis steht damit eine kostengünstige, einfach zu handhabende Möglichkeit für die Monte-Carlo-Simulation elektronischer Schaltungen mit SPICE zur Verfügung.

### 2.3.4 Erprobung symbolischer Analyseverfahren

Die Gesamtsimulation mikroelektromechanischer Systeme kann wesentlich beschleunigt und vereinfacht werden, wenn elektronische Schaltungen oder Teile davon durch Verhaltensmodelle beschrieben werden. Am Beispiel der Ansteuerschaltung nach Bild 5, die das vom Regler gelieferte Analogsignal in die auf den Piezoaktor gegebene Spannung umrechnet, wurde der Einsatz von symbolischen Beschreibungs- und Vereinfachungsmethoden erprobt.

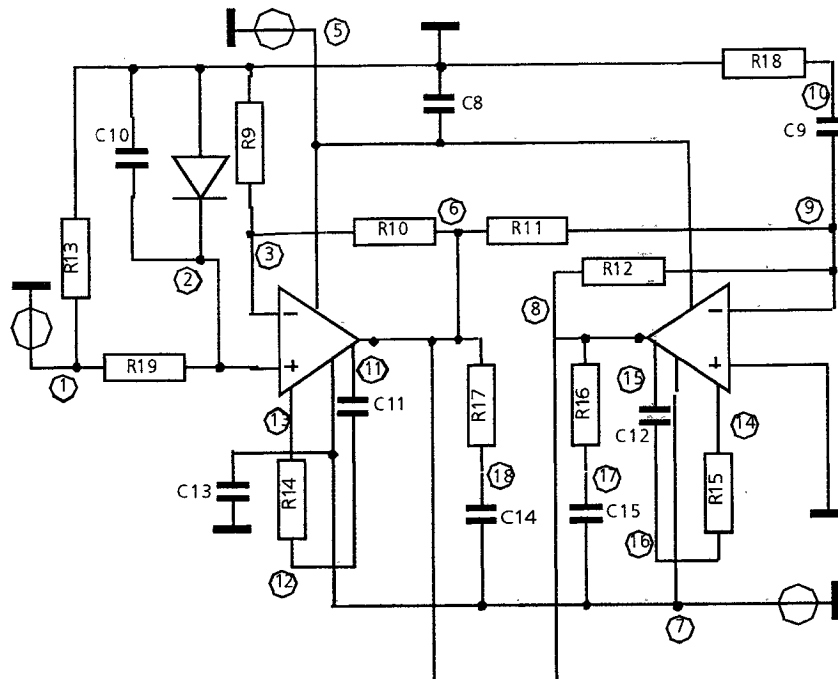


Bild 5: Ansteuerschaltung

Dazu wurde das Werkzeug Analog Insydes (AI) vom FhG ITWM Kaiserslautern angewendet, ein auf dem Computer-Algebra-System Mathematica beruhendes Analysewerkzeug [31]. In diesem Werkzeug ist es möglich, unter Verwendung spezieller Listentechniken Schaltungen symbolisch (auch gemischt symbolisch/numerisch) zu beschreiben, Netzwerkgleichungssysteme im Zeit- oder Frequenzbereich aufzustellen und diese symbolisch und numerisch zu lösen und auch zu vereinfachen, wobei die Güte der Vereinfachung an endlich vielen sogenannten Design-Punkten geprüft wird.

Die Schaltung nach Bild 5 wurde in zwei Varianten untersucht, einmal mit Transistorschaltungen für die verwendeten Operationsverstärker, die entsprechend der Typbezeichnung aus dem Internet besorgt wurden, und zum andern mit spannungsgesteuerten Spannungsquellen anstelle der Operationsverstärker.

Für die Schaltung mit spannungsgesteuerten Spannungsquellen wurde nach dem Einlesen als SPICE-Netzliste (AI-Befehl `ReadNetlist`) ein Gleichungssystem mit 19 Gleichungen erzeugt (AI-Befehl `CircuitEquations`). Da das Interesse der Eingangsspannung (Knoten 1) und der Ansteuerspannung für den Aktor gilt (Spannungen am Knoten 6 und am Knoten 8), kann das Gleichungssystem mit dem AI-Befehl `CompressNonlinearEquations` noch vereinfacht werden. Das bedeutet, Gleichungen und Variablen, die keinen Einfluss auf

die Spannungen an den Knoten 6 und 8 haben, werden entfernt. Diese Operation ist mathematisch exakt und beeinflusst die Genauigkeit der Ergebnisse nicht. Das komprimierte Gleichungssystem hat dann nur noch 10 Gleichungen. Eine Bestimmung der exakten symbolische Lösung schlägt fehl, wenn mit Symbolen für alle Parameter gearbeitet wird. Setzt man jedoch die numerischen Werte ein, kann mit Hilfe der nichtlinearen Approximation eine symbolische Vereinfachung durchgeführt werden, bei der ein System mit drei Gleichungen entsteht, die nur noch die interessierenden Größen enthalten. Die Simulationsergebnisse im Bild 6 von Analog Insydes zeigen für die Übertragungsfunktion (Spannungsdifferenz Knoten 6 und Knoten 8 dividiert durch Eingangsspannung) eine hinreichende Übereinstimmung. Im wesentlichen wird die gewünschte Verstärkung konstant gehalten.

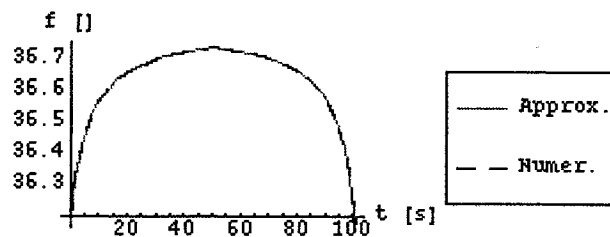


Bild 6: Verstärkungen bei Ansteuerschaltung mit spannungsgesteuerter Spannungsquelle und sägezahnartigem Durchfahren der Eingangsspannung

Das vereinfachte System aus drei Gleichungen kann nun in ein Verhaltensmodell für die Systemsimulation umgeformt werden, das die gesamte Schaltung ersetzt.

Für die Transistorschaltung war dieser Weg nicht vollständig durchführbar. Für die Ansteuerschaltung mit dem Operationsverstärkermodell konnte keine symbolische Lösung für die Übertragungsfunktion gefunden werden. Das Gleichungssystem wurde zwar von ursprünglich 215 auf 34 Gleichungen reduziert, konnte aber wegen der zahlreichen bedingten Anweisungen nicht symbolisch gelöst oder weiter vereinfacht werden. Die Ursache für die vielen bedingten Anweisungen sind die Transistoren im Operationsverstärkermodell. Bild 7 zeigt die Übereinstimmung der interessierenden Größen von der Originalschaltung mit dem auf 34 Gleichungen reduzierten Modell.

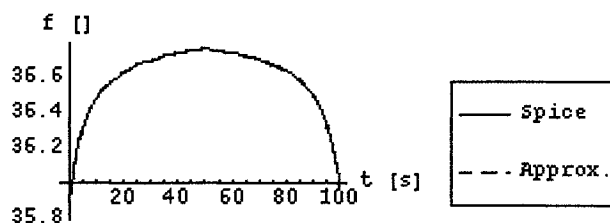


Bild 7: Verstärkungen bei Ansteuerschaltung mit Transistoren beim sägezahnartigen Durchfahren der Eingangsspannung

Als Ergebnis bleibt festzuhalten, dass mit Analog Insydes ein Werkzeug zur Verfügung steht, das zur Erzeugung von vereinfachten Modellen aus gegebenen Schaltungen einsetzbar ist, wobei besonders erfolgversprechend lineare Schaltungen ohne komplizierte Halbleiterbauelemente behandelt werden können.

### 2.3.5 Optimierung eines mechanischen Übersetzungsformkörpers mit ANSYS

Für den Übersetzungsformkörper der TETRA GmbH Ilmenau sollte die geometrische Form dahingehend optimiert werden, dass bei Einhaltung geometrischer und mechanischer Randbedingungen die resultierende Auslenkung maximiert wird. Geometrische Randbedingungen sind z.B. äußere Abmessungen und Einspannpunkte des Piezoaktors, mechanische Randbedingungen sind die maximale Spannung im Material (Aluminium) und eine minimal geforderte Auslenkung.

Die Funktionsweise des Formkörpers ist folgende (Bild 8 links): Der Formkörper ist links fest eingespannt. Ein Piezoaktor dehnt sich mit  $y_{\text{Piezo}}$  aus, die Struktur verformt sich und es ergibt sich die gewünschte Auslenkung  $x_{\text{Aktor}}$ .

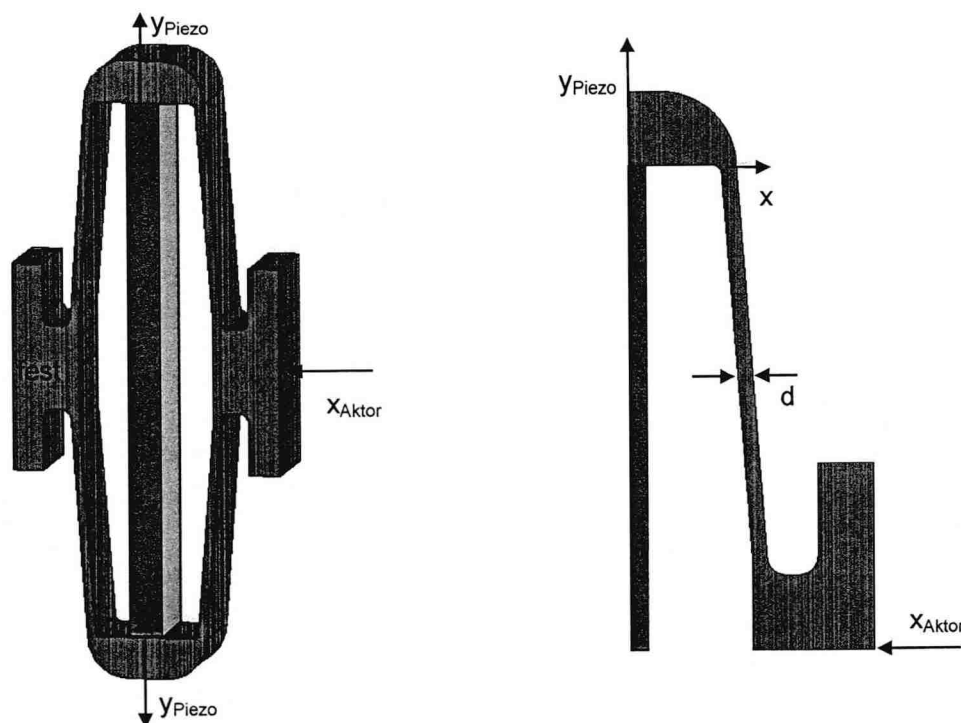


Bild 8: 3-D-Modell des Übersetzungsformkörpers und vereinfachtes 2D-Viertelmodell

Die Modellierung und Berechnung des Formkörpers erfolgte im Finite-Elemente-Programm ANSYS [3]. Dabei waren zwei Vereinfachungen möglich, die die Simulationszeit stark reduzierten. Zum einen konnte wegen des konstanten Querschnitts über der gesamten Tiefe des Formkörpers mit einem 2D-Querschnitt gerechnet werden, zum anderen konnte durch Ausnutzung der Symmetrieeigenschaften des Formkörpers und der symmetrischen Auslenkungen und Kräfteinspeisungen dieses 2D-Modell auf ein Viertelmodell vereinfacht werden (Bild 9 rechts).

Vorgaben bei der Optimierungen waren einerseits eine maximale Auslenkung des Piezoaktors von  $y_{\text{Piezo}}=15\mu\text{m}$  und andererseits eine entgegen der gewünschten Auslenkung  $x_{\text{Aktor}}$  wirkende Kraft von  $F_{\text{gegen}}=1\text{N}$ .

In einem ersten Optimierungsschritt konnte durch Variation der Dicke  $d$  des Steges und des Anstieges des Steges über die Position  $x$  eine Erhöhung der originalen Auslenkung von  $x_{\text{Aktor}}=135\mu\text{m}$  auf  $213\mu\text{m}$  erreicht werden (Bild 8 rechts).

Weitere Optimierungsläufe und Variantenuntersuchungen führten zu der Geometrie in Bild 9 links. Dabei wurden der Steg insgesamt um 10mm verlängert (auf Kosten der Dicke des unteren Einspannbereiches) und der Steg oben und unten durch kreisförmige Aussparungen abgedünnt. Es wurde damit eine Art Gelenk eingefügt. Zusätzlich zu den beiden Parametern Stegdicke  $d$  und –anstieg  $x$  wurde die Restdicke  $k$  der Aussparungen variiert. Es ergab sich eine maximale Auslenkung von  $x_{\text{Aktor}}=301\mu\text{m}$ .

Als problematisch bei diesen relativ hohen Auslenkungen erwies sich jedoch das Überschreiten der maximalen mechanischen Spannungen im Material.

Dies konnte jedoch durch eine weitere Variation der Geometrie und damit einer Verlängerung des Steges (Bild 9 rechts) und den Übergang von Aluminium auf Stahl als Material umgangen werden. Es ergab sich eine maximale Auslenkung von  $x_{\text{Aktor}}=334\mu\text{m}$ . Durch die Optimierung der Geometrie und den Einsatz von Stahl als Material des Formkörpers konnte die Auslenkung fast um  $200\mu\text{m}$  erhöht werden. Aufgrund der Symmetrie des Formkörpers in  $x$ -Richtung ist die tatsächliche Auslenkung doppelt so groß.

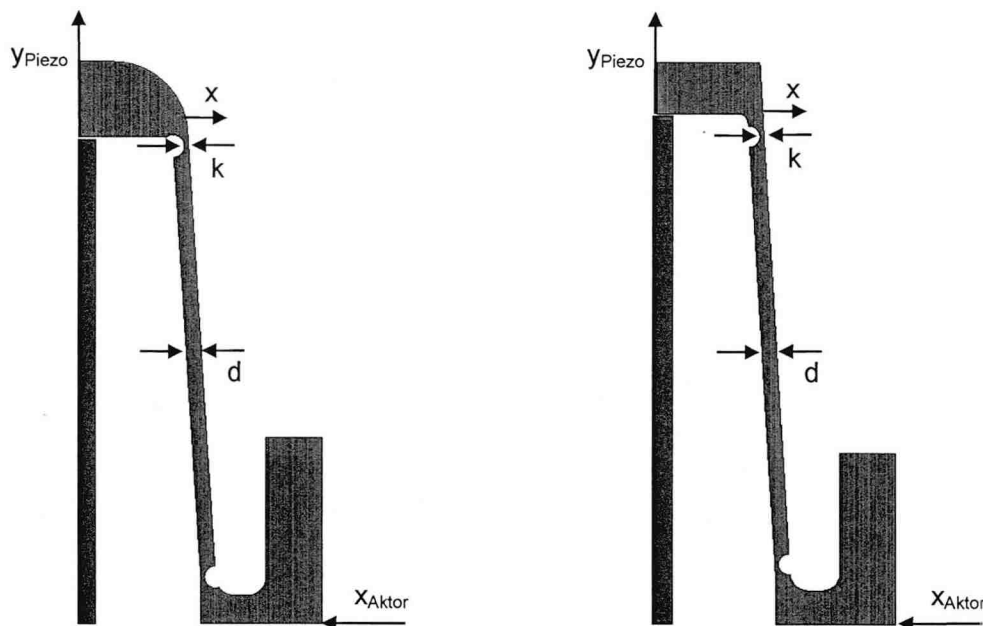


Bild 9: Optimierter Formkörper, links: aufbauend auf originaler Form, rechts: neue, vereinfachte Form

Anschließend wurde eine Variante des Übersetzungsformkörpers modelliert, welche aus der Reihenschaltung zweier Formkörper aus Bild 9 rechts besteht. Die beiden Enden sind unter einer leichten Vorspannung fest eingespannt. Durch wechselseitiges Ansteuern der beiden Piezoaktoren kann der Mittelpunkt der Struktur nach links und rechts verfahren werden, wobei er durch die Vorspannung und den symmetrischen Aufbau nicht nach oben oder unten abweichen kann. Bild 10 zeigt das Gesamtmodell, wobei auch hier die Symmetrie ausgenutzt werden kann und nur die obere Hälfte zu modellieren ist. Das Modell wurde soweit vorbereitet, eine Optimierung der Geometrie und damit der resultierenden Auslenkung sind möglich.



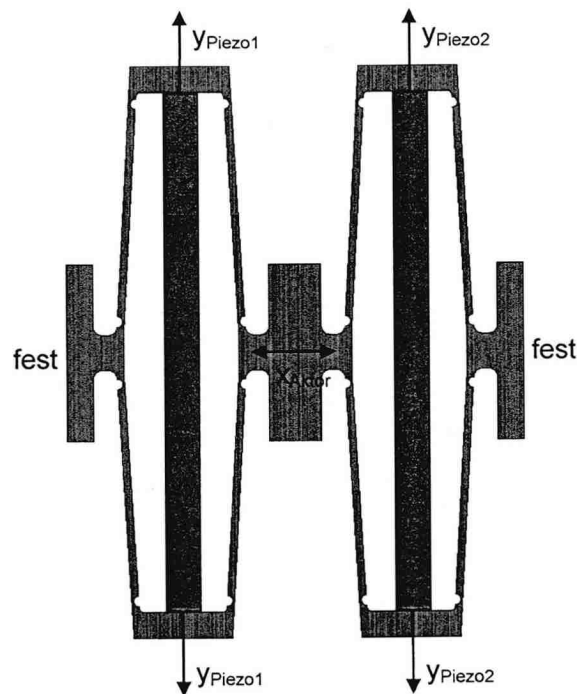


Bild 10: Doppelter Formkörper mit zwei Piezoaktoren

### 2.3.6 Modellierung des Hystereseverhaltens eines Piezoaktors

Grundsätzlich kann ein Piezoaktor [19] als mechanisches Bewegungssystem einschließlich der Beschreibung des piezoelektrischen Effektes modelliert werden, was in [29] auf ein System von zwei Differentialgleichungen führt. Da im vorliegenden Betriebsfall jedoch relativ kleine Kräfte auf den Aktor einwirken und infolge langsamer Bewegungen die dynamischen Effekte vernachlässigt werden können, ist der Einsatz eines statischen Modells ausreichend. Nicht zu vernachlässigen sind jedoch die Hysterese-Eigenschaften des Aktors. Diese werden mit dem Preisach-Modell [22] [25] ausreichend beschrieben, auf das nachfolgend etwas ausführlicher eingegangen wird:

#### Preisach-Modell

Die piezokeramische Ausdehnung  $f(t)$  wird aus der anliegenden Spannung  $u(t)$  berechnet durch

$$f(t) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta} [u(t)] d\alpha d\beta,$$

wobei die  $\gamma_{\alpha\beta}$  elementare Hysterese-Operatoren (sogenannte Relaiselemente) mit den Umschaltpunkten  $\alpha$  und  $\beta$  sind (Bild 11). Die Preisach-Funktion  $\mu(\alpha, \beta)$  ist eine Gewichtsfunktion, die aus Messwerten bestimmt wird. Die doppelte Integration erfolgt so, dass  $u_{\min} \leq \beta \leq \alpha$  und  $u_{\min} \leq \alpha \leq u_{\max}$  ist, wobei  $u_{\min}$  und  $u_{\max}$  Minimal- bzw. Maximalwert der Eingangsspannung sind. Diese Beschränkungen an die Eingangsspannung führen auf das Begrenzungsdreieck  $T_0$  (Bild 12). Innerhalb dieses Dreiecks definiert jedes Paar  $(\alpha, \beta)$  genau einen Operator  $\gamma_{\alpha\beta}$  mit den Umschaltpunkten  $\alpha$  und  $\beta$ . Für eine monoton wachsende

Eingangsspannung  $u_0$  kann das begrenzende Dreieck in die beiden Gebiete  $S^+$  und  $S^-$  unterteilt werden (Bild 12), wobei die Begrenzungslinie horizontal verläuft und sich nach oben bewegt. Für alle zu  $S^+$  gehörenden Operatoren gilt  $\gamma_{\alpha\beta} = 1$  (alle Relais mit Umschaltpunkten  $\alpha < u_0$ ), und für alle zu  $S^-$  gehörenden Operatoren ist  $\gamma_{\alpha\beta} = 0$ . Eine äquivalente Formulierung für das Preisach-Modell ist somit

$$f(t) = \iint_{S^+} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta.$$

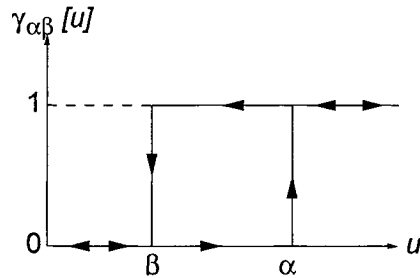


Bild 11: Hysterese-Operator

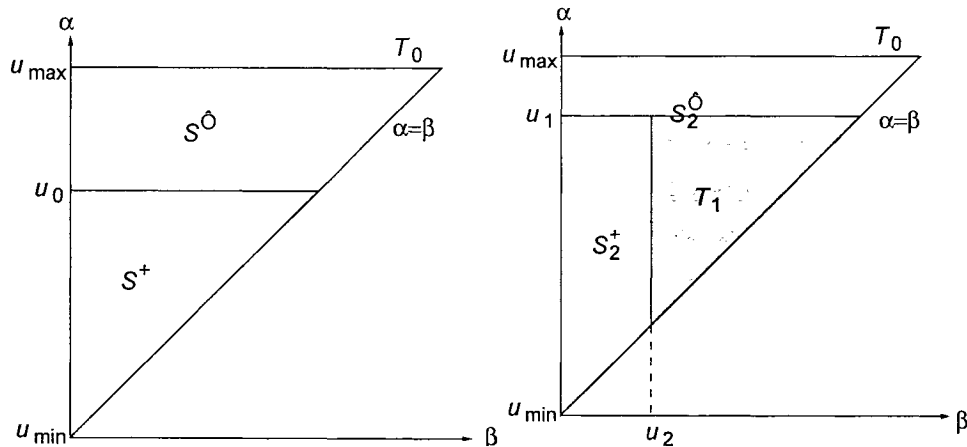


Bild 12: Begrenzungsdreiecke bei monoton wachsendem bzw. fallendem Input

Wenn die Eingangsspannung bis  $u_1$  monoton steigt und dann auf  $u_2$  monoton fällt, dann schalten alle Hysterese-Operatoren  $\gamma_{\alpha\beta}$  mit Umschaltpunkten  $\beta > u_2$  auf  $\gamma_{\alpha\beta} = 0$  (Region  $T_1$  in Bild 12). Die Begrenzungslinie verläuft nun vertikal und bewegt sich nach links.

Damit gilt für die Auslenkung  $f_{u_1}$  infolge des monoton wachsenden Eingangssignals

$$f_{u_1} = \iint_{S_1^+} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta$$

und für die Auslenkung  $f_{u_2}$  des monoton auf  $u_2$  fallenden Eingangssignals entlang einer Rückkehrkurve 1. Ordnung (Bild 13)

$$f_{u_2} = \iint_{S_2^-} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta.$$

Für die Differenz der beiden Auslenkungen gilt somit

$$F(u_1, u_2) = f_{u_1} - f_{u_2} = \iint_{T_1(u_1, u_2)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta.$$

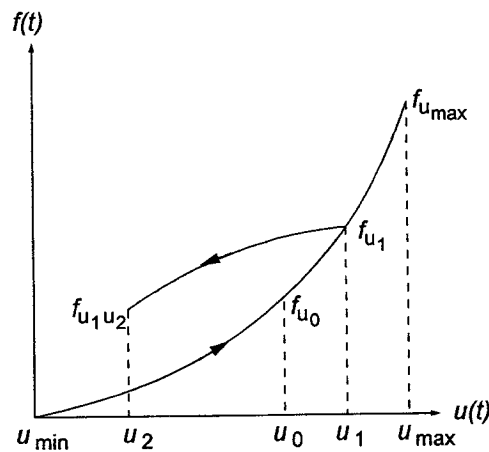


Bild 13: Aufsteigender Ast und Rückkehrkurve 1. Ordnung

Zur Veranschaulichung zeigt Bild 14 einen angenommenen Verlauf der Eingangsspannung und die zugehörigen  $\alpha$ - $\beta$ -Diagramme. Die Ausdehnung  $f(t)$  erhält man durch Integration über die Gebiete  $S_1$ ,  $S_2$  und  $S_3$ ,

$$f(t) = \iint_{S_1} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta + \iint_{S_2} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta + \iint_{S_3} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta$$

bzw.

$$f(t) = [F(M_1, m_0) - F(M_1, m_1)] + [F(M_2, m_1) - F(M_2, m_2)] + F(u(t), m_2).$$

Für den allgemeinen Fall folgt mit

$$\begin{aligned} F(M_k, m_k) &= f_{M_k} - f_{M_k m_k} \\ F(M_k, m_{k-1}) &= f_{M_k} - f_{M_k m_{k-1}} \end{aligned}$$

für wachsende Eingangsspannung ( $\dot{u}(t) > 0$ )

$$f(t) = \sum_{k=1}^{n-1} (f_{M_k m_k} - f_{M_k m_{k-1}}) + f_{u(t)} - f_{u(t) m_{n-1}}$$

und für fallende Eingangsspannung ( $\dot{u}(t) < 0$ )

$$f(t) = \sum_{k=1}^{n-1} (f_{M_k m_k} - f_{M_k m_{k-1}}) + f_{M_n u(t)} - f_{M_n m_{n-1}}.$$

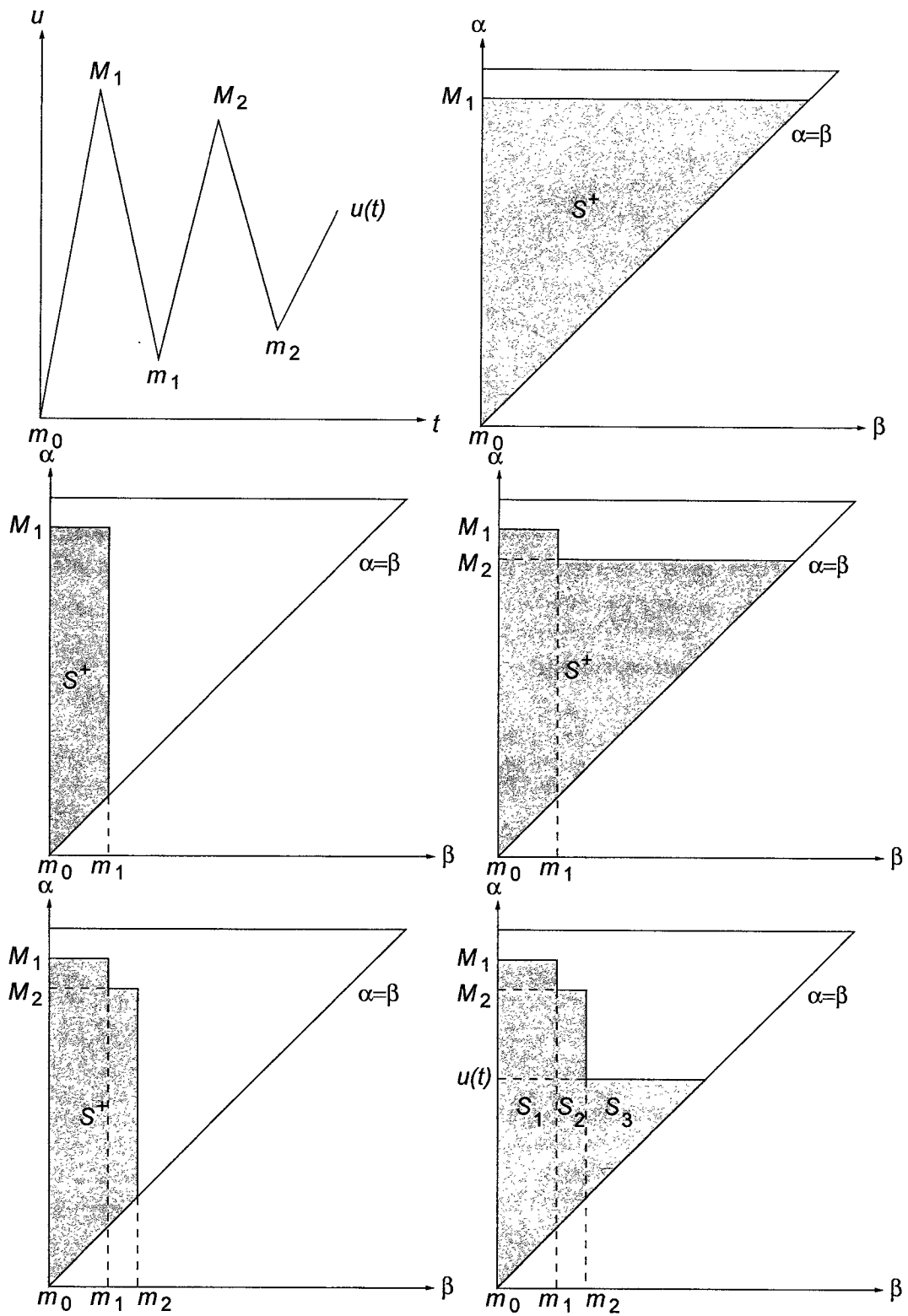


Bild 14: Beliebiger zeitlicher Verlauf der Eingangsspannung mit  $\alpha$ - $\beta$ -Diagramm

Man benötigt die Preisach-Funktion  $\mu(\alpha, \beta)$  also nicht explizit und muss auch keine Integrale berechnen. Stattdessen werden gemäß Bild 15 Messwerte aufgenommen. Das durch  $u_{\min}$ ,  $u_{\max}$  und  $\alpha = \beta$  bestimmte Dreieck soll dabei in allen Bereichen durch Messwerte

überdeckt werden, was z.B. durch ein äquidistantes Gitter erreicht wird. Dazu wird am Piezo-Aktor die Minimalspannung  $u_0 = u_{\min}$  angelegt und anschließend jeweils auf  $u_k = (u_{\max} - u_{\min})k/n$ ,  $k = 1, \dots, n$ , erhöht und wieder auf  $u_{\min}$  abgesenkt.

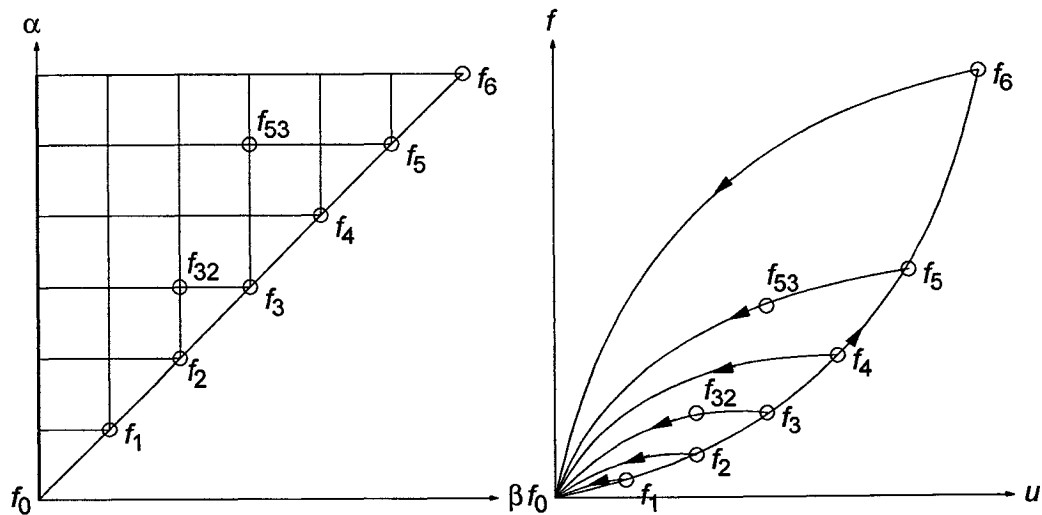


Bild 15: Lage der Messwerte

Die  $f_k$  und  $f_{jk}$  werden aus den Messwerten durch Interpolation über den Gitterpunkten berechnet.

Man muss dann nur noch über die Historie der Maxima  $M_i$  und Minima  $m_j$  der Spannungsverläufe Buch führen und kann die aktuelle Auslenkung aus den Messwerten durch Interpolation sowie Summation und Subtraktion der interpolierten Werte berechnen.

Da die Messwerte ohnehin mit einem Fehler behaftet sind, ist eine lineare bzw. bilineare Interpolation hinreichend genau. Sei  $p = (p_x, p_y)$  der Punkt, in dem der Funktionswert gesucht wird (Bild 16). Liegt er in einem Dreieck, so ist

$$f = \lambda f_i + \mu f_{i+1} + (1 - \lambda - \mu) f_{i+1,i} \quad \text{mit} \quad \lambda = \frac{p_{i+1} - p_y}{p_{i+1} - p_i} \quad \text{und} \quad \mu = \frac{p_x - p_i}{p_{i+1} - p_i}.$$

Im Rechteck erhält man

$$f = (1 - \mu) \left[ (1 - \lambda) f_{i,j} + \lambda f_{i,j+1} \right] + \mu \left[ (1 - \lambda) f_{i+1,j} + \lambda f_{i+1,j+1} \right] \quad \text{mit} \quad \lambda = \frac{p_x - p_j}{p_{j+1} - p_j}, \quad \mu = \frac{p_y - p_i}{p_{i+1} - p_i}.$$

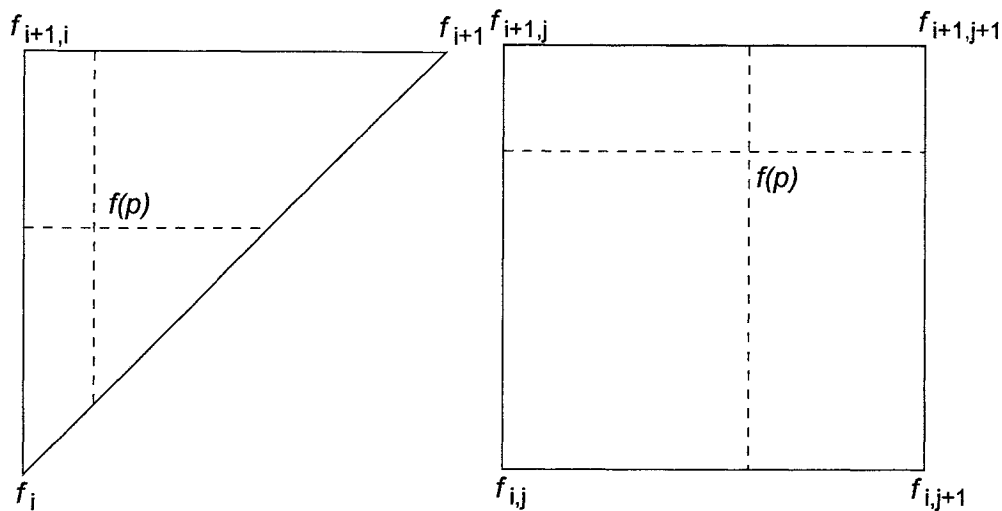


Bild 16: Interpolation im Dreieck und Rechteck

### Inverses Preisach-Modell

Das Preisach-Modell kann mathematisch invertiert werden [22] [25], es entsteht ein inverses Preisach-Modell. Mit dem gleichen Datensatz parametrisiert wie das Preisach-Modell und für eine gegebene Historie von Minima  $\{m_i\}$  und Maxima  $\{M_i\}$  bestimmt das inverse Modell zu einer vorgegebenen Auslenkung  $f$  die anzulegende Spannung  $u$ .

Das inverse Preisach-Modell ist damit in der Lage, die Hysterese zu kompensieren, wenn Preisach-Modell und inverses Modell hintereinander geschaltet werden. Dies eröffnet im Regelkreis die Möglichkeit, den Regler zu vereinfachen, indem das inverse Modell mit in den Regelkreis mit einem Piezoaktor aufgenommen wird. Es ist dann nicht mehr erforderlich, die Hysterese direkt auszuregeln.

### Umsetzung in ein simulationsfähiges C-Modell

Für Preisach- und inverses Preisach-Modell wurden innerhalb des Projektes Routinen in ANSI C geschrieben. Damit sind die Modelle für alle Simulationssysteme mit C-Schnittstelle verwendbar unabhängig von der jeweiligen Plattform. Außerdem können sie im realen System z.B. auf einem Microcontroller direkt zur Hysterese-Kompensation genutzt werden.

Um numerische Probleme zu vermeiden war es erforderlich, außerhalb des Hysterese-Bereichs, der normalerweise nicht zum Arbeitsbereich gehört, das Modell durch eine schwach ansteigende lineare Funktion fortzusetzen.

Für die Speicherung der Historie wurden zwei Möglichkeiten vorgesehen, welche durch eine Präprozessor-Anweisung umgeschaltet werden können: dynamische Allokation des Speichers oder Vorgabe eines Maximalwertes für die Feldgröße der Minima und Maxima. Die letztere Variante ist speziell für die Nutzung des Modells auf Microcontrollern gedacht. Werden z.B. durch abklingende Oszillationen wie im Bild 17 die Feldgrenzen erreicht, kann das Modell weiterbetrieben werden mit im groben noch akzeptablen Ergebnissen. Im Bild 17 sind die Abweichungen in der Bildmitte zwischen Gutverhalten und fehlerhaftem Verhalten zu erkennen. Wird der notwendige Speicherbereich z.B. infolge anwachsender Oszillationen klei-

ner, so werden wieder genaue Werte geliefert, sobald man sich innerhalb der Feldgrößen befindet (s. rechts im Bild 17).

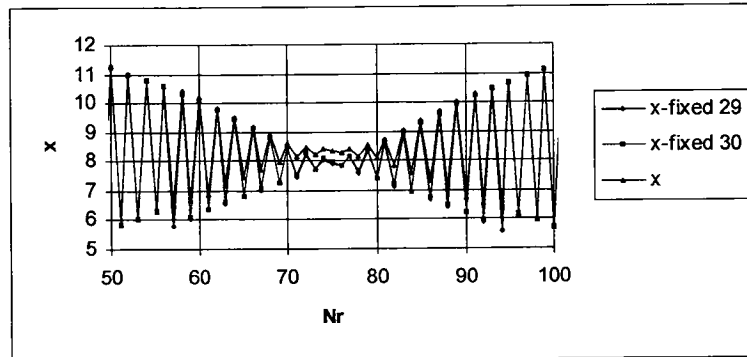


Bild 17: Mit einem Preisach-Modell ermittelte Auslenkungsverläufe bei ausreichender und nicht ausreichender Speichergröße

### 2.3.7 Gewinnung der Modellparameter durch Messung

Aus dem vorigen Abschnitt geht hervor, dass das Preisach-Modell durch Parameter an die aktuell zu modellierende Hysterese angepasst werden muss. Die Parameter stehen in einer Messwertdatei, in der die Messwerte nach einem vorgegebenem Schema abzulegen sind. Um die Kennlinie des Piezo-Aktors möglichst exakt und reproduzierbar vermessen zu können, wurden zwei voneinander unabhängige rechnergestützte Messplätze mit unterschiedlichen Messverfahren aufgebaut. Die Genauigkeit der Messungen sollte 1  $\mu\text{m}$  betragen, die Kosten für die Messplätze in einem ökonomisch vertretbaren Bereich liegen.

#### Messung mit einem Feinzeiger

Das erste Messverfahren basiert auf einem induktiven Meßprinzip und verwendet das Steuergerät Millitron 1240 sowie einen induktiven Meßtaster 1340, der in einem speziellen Stativ befestigt wird. Bild 18 zeigt die Module der Mahr GmbH.

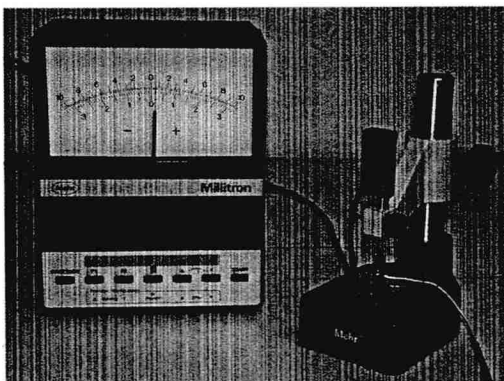


Bild 18: Messmodule Mahr GmbH

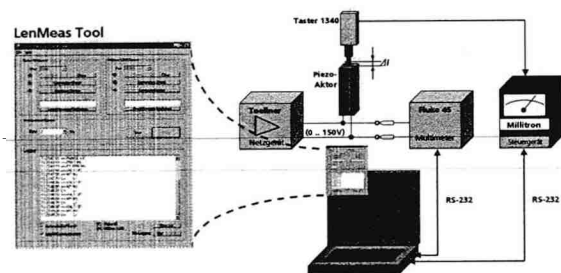


Bild 19: Blockschaltbild der Messeinrichtung

Die Gleichspannung, mit der der Piezo-Aktor angesteuert wird, muss in einem Bereich zwischen 0 V und 150 V liegen. Diese Spannung wurde durch eine handgesteuerte Laborstromversorgung bereitgestellt und durch ein Multimeter gemessen. Im Bild 19 ist das Blockschaltbild der kompletten Messeinrichtung dargestellt. Auf Grund der hohen Messgenauigkeit dieses Verfahrens (Auflösung 0,01  $\mu\text{m}$ , Wiederholgenauigkeit 0,02  $\mu\text{m}$ , Linearitätsabweichung < 0,01 %) kann die Kennlinie sehr exakt und reproduzierbar vermessen werden.

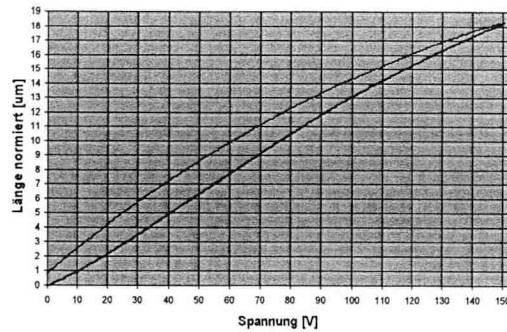


Bild 20: Kennlinie, ermittelt mit Feinzeiger

Die aufgenommene Kennlinie besteht aus 938 Messwerten, die in ca. 5 Minuten erfasst wurden (Bild 20).

**Messung mit einem Laserabstandssensor**

Der Laserabstandssensor ANR 1251 der Firma Matsushita arbeitet berührungslos in einem Messbereich von 50 mm bei geringerer Auflösung (1 µm) als der Feinzeiger. Der Sensor wird hauptsächlich in der Produktionsüberwachung und Qualitätssicherung eingesetzt. Das gesamte System wurde mit Modulen der Firma National Instruments realisiert. Die Steuerung und Datenaufzeichnung erfolgt rechnergestützt mit der Software LabView. Das nachfolgende Bild 21 zeigt das Blockschaltbild. Ein spezieller Verstärker erzeugt die für den Piezoaktor notwendige hohe Gleichspannung. Dieser Verstärker wird mit einer Eingangsspannung von 0 - 5 V betrieben.

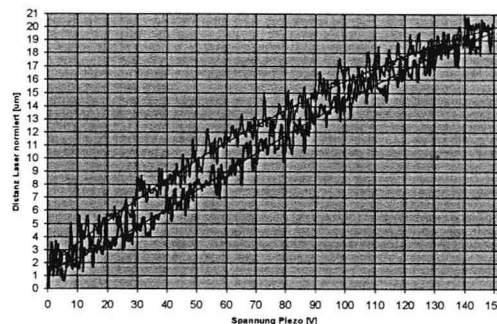
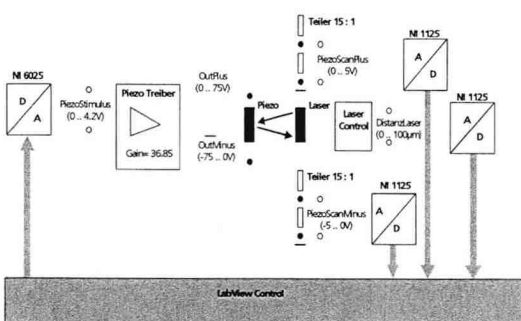


Bild 21: Blockschaltbild Laserabstandssensor Bild 22: Ergebnisse Laserabstandssensor

Der Messablauf wird vollautomatisch durch eine LabView-Applikation gesteuert. Bedingt durch die gegenüber dem Feinzeiger geringere Auflösung ist beim Laserabstandssensor der gemessenen Kennlinie ein Rauschanteil überlagert. Dieser beträgt ca. 1,5 µm (Bild 22). Die Parameter dieser Messung (Anzahl der Messwerte, Dauer der Messung) sind mit der Messung durch den Feinzeiger vergleichbar. Die Ergebnisse sind jedoch auf Grund der geringen Auflösung des Lasersensors deutlich schlechter. Erst eine Messung über einen sehr langen Zeitraum und Mittelwertbildung ergibt vergleichbare Ergebnisse beider Messverfahren (Bild 23).



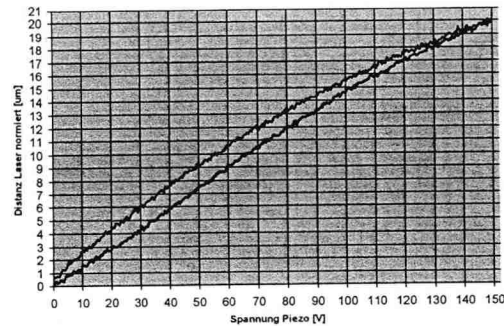


Bild 23: Nachbearbeitete Kennlinie Laserabstandssensor

### Vergleich

Das Messverfahren mit dem induktiven Feinzeiger liefert sofort sehr genaue Ergebnisse. Bei dem Laserabstandssensor kann eine vergleichbare Genauigkeit nur durch Mittelwertbildung erreicht werden. Dafür sind sehr viele Einzelmessungen nötig, die Messzeit ist erheblich länger. Spezielle Untersuchungen des Kriechverhaltens des Piezo-Elements sind deshalb nur mit dem induktiven Messverfahren sinnvoll.

Als Ergebnis dieser Untersuchungen steht damit ein durchgängiger Weg von der Messwertbestimmung am realen Objekt Piezoaktor bis zum Simulationsmodell, basierend auf dem Preisach-Ansatz, zur Verfügung.

### 2.3.8 Approximation mit radialen Basisfunktionen

#### Grundprinzip

Radiale Basisfunktionen sind besonders für die Interpolation und Approximation von unregelmäßig verteilten (scattered data) sowie von höherdimensionalen Daten geeignet [24].

Die Daten seien als Punkte  $x_i$  aus  $R^d$ ,  $i = 1, \dots, N$ , mit zugehörigen Funktionswerten  $f_i$  aus  $R$  gegeben. Gesucht ist eine interpolierende Funktion  $s$ , die  $R^d$  in  $R$  abbildet, so dass

$$s(x_i) = f_i, \quad i = 1, \dots, N.$$

Eine *radiale Basisfunktion* (RBF) hat die Form

$$s(x) = p(x) + \sum_{i=1}^N \lambda_i \phi(\|x - x_i\|),$$

wobei  $p$  ein Polynom kleinen Grades und die *Basisfunktion*  $\phi$  eine reellwertige Funktion auf  $[0, \infty)$  ist, für gewöhnlich unbeschränkt und mit nicht-kompaktem Träger. Die Punkte  $x_i$  werden *Zentren* der RBF genannt.

Häufig verwendete radiale Basisfunktionen sind:

- (1)  $\phi(r) = r^2 \log r$  (thin plate spline)
- (2)  $\phi(r) = \exp(-cr^2)$  (Gaussian)
- (3)  $\phi(r) = \sqrt{r^2 + c^2}$  (multiquadric)

$$(4) \quad \phi(r) = 1/\sqrt{r^2 + c^2} \text{ (inverse multiquadric)}$$

$$(5) \quad \phi(r) = r \text{ (biharmonic spline)}$$

$$(6) \quad \phi(r) = r^3 \text{ (triharmonic spline)}$$

Die Addition des Polynoms  $p$  kann für positiv definite Basisfunktionen ((2) für  $c > 0$ , (4)) sowie für (3) und (5) entfallen. Für (1) hat  $p$  die Gestalt  $p(x) = c_0 + \sum_{j=1}^d c_j x^j$ , wobei  $x^j$  die  $j$ -te Komponente von  $x$  ist.

Die Koeffizienten  $\lambda$  und  $c$  erhält man durch Lösung des Gleichungssystems

$$\begin{bmatrix} A & P \\ P^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ 0 \end{bmatrix},$$

wobei

$$A_{i,j} = \phi(\|x_i - x_j\|)$$

$$P_{i,k} = p_k(x_i)$$

mit  $i, j = 1, \dots, N$  und  $k = 1, \dots, m$  ist. Für (1) hat die  $i$ -te Zeile der Matrix  $P$  die Form  $[1 \ x_i^1 \ \dots \ x_i^d]$ .

Nachteilig bei RBF ist die dichte Besetztheit der Systemmatrix des linearen Gleichungssystems. Die Methode ist damit nur für Probleme mit höchstens wenigen tausend Punkten geeignet. Für gewisse Problemklassen (höchstens vierdimensional und polyharmonische Basisfunktionen) kann jedoch die schnelle Multipolmethode (FMM) [15] genutzt werden (Aufwand  $O(N \log N)$  statt  $O(N^3)$ ).

Für gewöhnlich werden alle Datenpunkte zur Interpolation und damit als Zentren der RBF genutzt. Häufig kann eine hinreichend genaue Approximation aber auch mit weniger Zentren erreicht werden.

### Erweiterungen des Tools MARABU

Das am EAS entwickelte Programm MARABU [30] dient zur Approximation von Daten mit radialen Basisfunktionen. Neben verschiedenen Basisfunktionen ist eine Technik zur Reduktion der Zentren in Abhängigkeit der vom Nutzer gewünschten Toleranz integriert. In MARABU wird eine angepasste (affin invariante) Norm genutzt, womit auch Daten stark unterschiedlicher Größenordnung (z.B.  $k\Omega$ ,  $\mu F$  dargestellt in SI-Einheiten) ohne numerische Probleme approximiert werden können.

In MODAN wurde MARABU um die Gaussian-Funktion (2) ergänzt. Damit sind jetzt alle oben angegebenen Basisfunktionen (1)–(6) nutzbar.

Weiterhin wurde MARABU in SimulationX integriert. Dazu mussten die entsprechenden Routinen aus dem bisher selbstständigen (stand-alone) Tool herausgelöst und eine Schnittstelle zur Interaktion geschaffen werden. Im Ergebnis wurde MARABU der ITI GmbH Dresden als DLL bereitgestellt.

### Anwendung für die Simulation des Formkörpers

Zur Einbindung des Formkörpers in die Gesamtsystemsimulation ist von ihm ein Verhaltensmodell notwendig. Geometrische Parameter des Modells sollten die Dicke  $d$  des Steges, der Anstieg  $x$  des Steges und die Restdicke  $k$  der Aussparungen sein. Simulationsgrößen sind die Auslenkung  $y_{\text{Piezo}}$  des Piezoaktors, die auf den Piezoaktor wirkende Kraft  $F_{\text{Piezo}}$ , die resultierende Auslenkung  $x_{\text{Aktor}}$  des Formkörpers, die wirkende Gegenkraft  $F_{\text{Gegen}}$  und die maximale mechanische Spannung  $S_{\text{max}}$  im Material (siehe Bild 24). Aufgrund der zu variierenden Parameter, der relativ komplexen Struktur und des nichtlinearen Verhaltens wurden keine analytischen Beziehungen im Modell hinterlegt, sondern eine Vielzahl von Simulationen in ANSYS [3] durchgeführt und diese Ergebnisse in MARABU mit radialen Basisfunktionen approximiert. Dabei wurden in ANSYS

- $d$  von 0,4mm bis 2mm,
- $x$  von -2mm bis 0,8mm,
- $k$  von 0,1mm bis 0,3mm,
- $y_{\text{Piezo}}$  von 0 $\mu\text{m}$  bis 21 $\mu\text{m}$  und
- $F_{\text{Gegen}}$  von -1N bis 1N

in kleinen Schritten variiert. Berechnet wurden dabei  $F_{\text{Piezo}}$ ,  $x_{\text{Aktor}}$  und  $S_{\text{max}}$ . Dies resultierte in annähernd 16000 Simulationen, die jedoch durch die Wahl des 2D-Viertelmodells in vertretbarem Zeitaufwand durchgeführt werden konnten. Die Approximationsergebnisse wurden als C-Code aus MARABU exportiert, welcher nachfolgend in ein SimulationX-Modell eingebunden wurde.

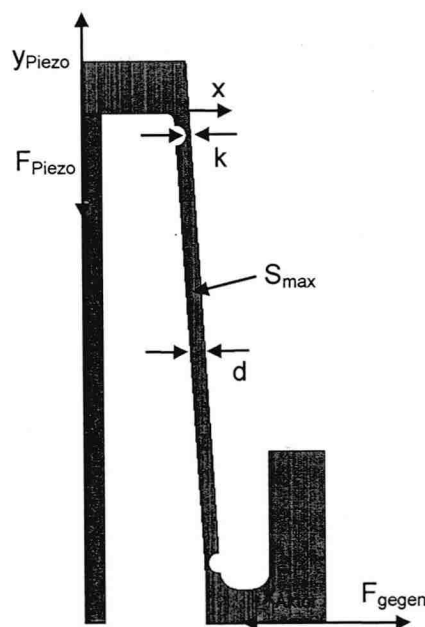


Bild 24: Formkörper mit Größen für die Parametervariation

Als problematisch erweist es sich, wenn die Anzahl der Daten noch höher als in diesem Beispiel ist und eine hohe Genauigkeit bei der Approximation verlangt wird. Dann steigt die Rechenzeit von MARABU unverträglich an. Für diese Fälle sind weitere Überlegungen zur Veränderung an MARABU notwendig.

Ergebnis der Approximation ist ein Simulationsmodell, das als Parameter noch Konstruktionsgrößen des Formkörpers enthält. Damit ist es möglich, noch in der Gesamtsimulation

Größen des Formkörpers zu ändern und beispielsweise eine Optimierung des Gesamtverhaltens vorzunehmen.

Der Modellierungsweg über die FEM-Modellierung mit ANSYS (oder einem anderen Tool), die Simulation von Varianten durch Parametervariation und die Approximation der Ergebnisse durch MARABU stellen einen gangbaren Weg dar, ein Verhaltensmodell für ein physikalisches Objekt wie diesen Formkörper zu erzeugen, das parametrisierbar ist.

### 2.3.9 Gesamtsystemsimulation mit SimulationX

Mit der Bereitstellung der einzelnen Modelle für Ansteuerschaltung, Piezoaktor und Übersetzungsformkörper können diese im Simulator SimulationX zur Gesamtsimulation des Mikroantriebes nach Bild 1 eingesetzt werden. Um den vollständigen Regelkreis zu simulieren, sind noch Modelle für den Sensor und den Regler erforderlich. Dafür wurden exemplarisch stark vereinfachte Modelle (identische Übergabe der gemessenen Größe, PID-Regler) angewendet, die jederzeit durch reale Modelle ersetzt werden können.

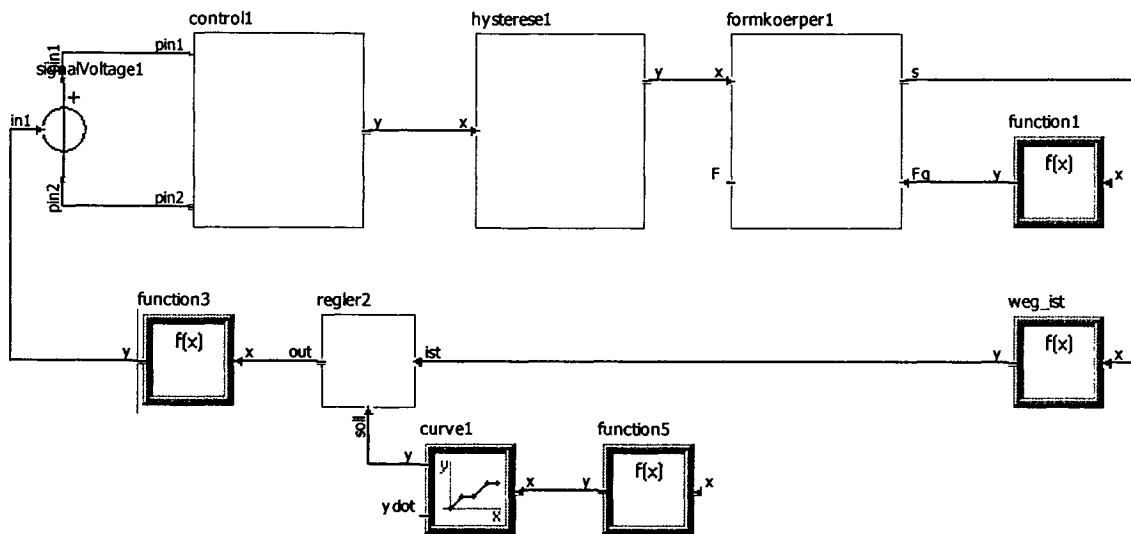


Bild 25: Schaltbild des Regelkreises in SimulationX

Der Block `control1` enthält die Ansteuerschaltung, deren Eingabespannung mittels einer gesteuerten Spannungsquelle aus dem Stellsignal des Reglers nach Anpassung in `function3` erzeugt wird. Hinter `hysteresel` verbirgt sich der Aufruf des Preisach-Modells für den Piezo-aktor als C-Funktion. Beim `formkoerper1` ist ebenfalls eine C-Funktion angekoppelt zu Beschreibung des Formkörpers, wobei Versatz und Stegdicke als Parameter eingestellt werden können. Als Funktion vorgebar ist eine Gegenkraft. Die Ausgabegröße `s` Formkörpermodells ist die zu regelnde Auslenkung, die im Block `weg_ist` gemessen und dann dem Regler zugeführt wird.

Die nachfolgenden Bilder 26 und 27 zeigen einige Simulationsergebnisse.

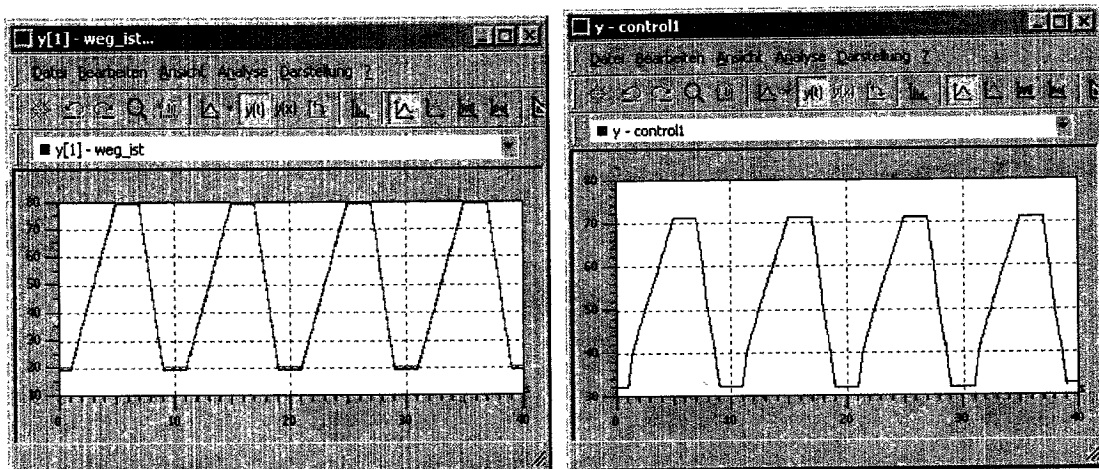


Bild 26: Simulationsergebnisse Weg (Soll und Ist in  $\mu\text{m}$ , links) und Ansteuerspannung des Aktors (in V, rechts)

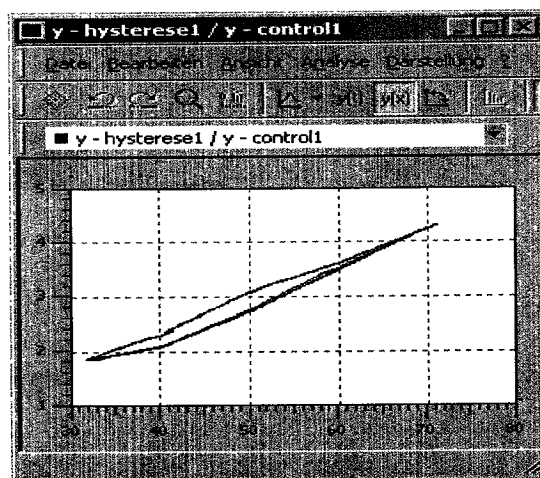


Bild 27: Simulationsergebnis Hysterese des Piezoaktors

Mit diesen Ergebnissen ist die prinzipielle Arbeitsfähigkeit der Modelle am Demonstrator nachgewiesen. Es können weitere Simulationsversuche auch mit anderen Anordnungen durchgeführt werden. Jedoch ist davon auszugehen, dass bei beliebiger Kopplung und Parametrisierung sowie Verwendung komplizierter Modelle im Detail noch Untersuchungen und viele Beispielrechnungen nötig sein werden, um das Simulationsverfahren für die Praxis reif zu entwickeln.

### 2.3.10 Modellgenerierung durch Reduktion von FEM-Modellen

Neben den unter 2.3.8 beschriebenen Möglichkeiten der Modellgenerierung für Modelle, die durch FEM-Tools beschrieben sind, wurde noch der folgende Weg erprobt: Aus den FEM-Tools werden die kompletten, hochdimensionalen Gleichungssätze extrahiert, die durch die FEM-Beschreibung entstehen [2] [4] [14] [16] [28] [32]. Diese Differentialgleichungssysteme werden einer Ordnungsreduktion (z.B. durch das ENOR-Verfahren) unterzogen, wobei niedrigdimensionale Systeme entstehen, die als Grundlage für die Modellbeschreibung mit einer Verhaltensbeschreibungssprache dienen. Auf diesem Gebiet liegen am EAS umfangreiche Erfahrungen vor. Im Projekt MODAN wurde exemplarisch eine zweiseitig rotatorisch gelager-

te Welle, die im linken Lager auch translatorische Bewegungen erlaubt, modelliert und einer Modellreduktion unterzogen. Das nachfolgende Bild 28 zeigt verschiedene Eigenschwingungen der Welle, die je nach Güte der Ordnungsreduktion im Modell erhalten bleiben. Diese Untersuchung dient der Ergänzung der für den Demonstrator bereitgestellten und erprobten Modellierungsverfahren.

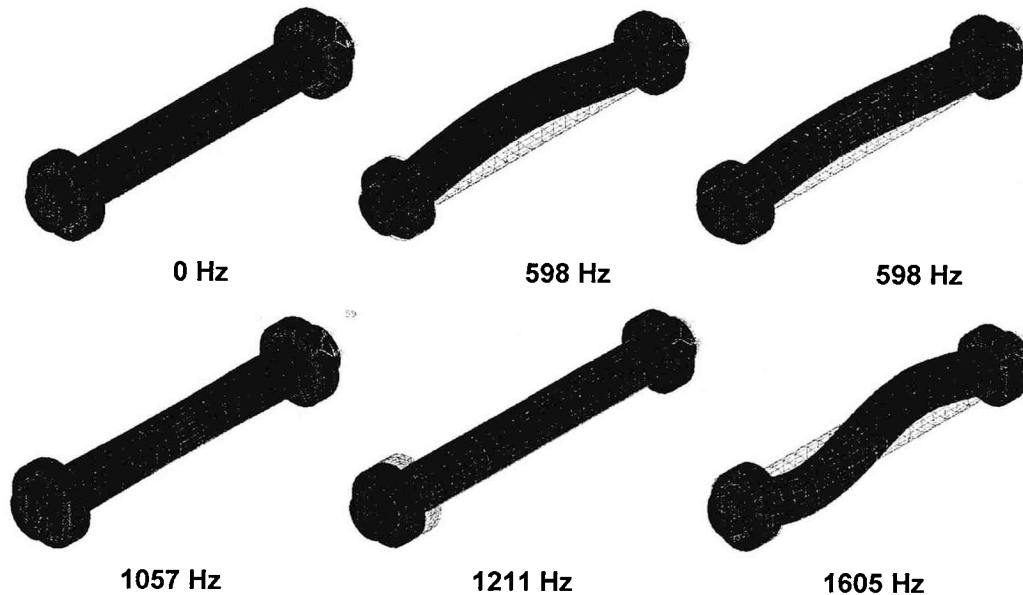


Bild 28: Eigenschwingungen einer Welle

#### 2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen

Nutzen und Verwertbarkeit treten vor allem bei den Partnerfirmen ITI GmbH Dresden und TETRA GmbH Ilmenau ein.

Bei ITI GmbH Dresden wurde für den Simulator SimulationX um die Möglichkeit der Simulation von SPICE-Modellen und –Netzlisten entwickelt und erprobt. Außerdem wurde das Approximationstool MARABU zur Verfügung gestellt und erweitert.

Bei TETRA GmbH Ilmenau kann die entwickelte Simulationsmethodik wirksam werden. Außerdem stellen die an den Modellen durchgeführten Untersuchungen (Optimierung) Möglichkeiten der perspektivischen Verwertung dar.

Eine unmittelbare Vermarktung der entstandenen Ergebnisse durch EAS (Produktverkauf) ist nicht zu erwarten, die weiterentwickelten Programme und Modelle werden jedoch in künftigen Projekten eingesetzt.

#### 2.5 Bekanntgewordene Fortschritte bei anderen Stellen

Es sind keine Fortschritte bei anderen Stellen bekannt geworden, die direkt die Projektarbeit tangieren.

#### 2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Es entstanden folgende Veröffentlichungen:

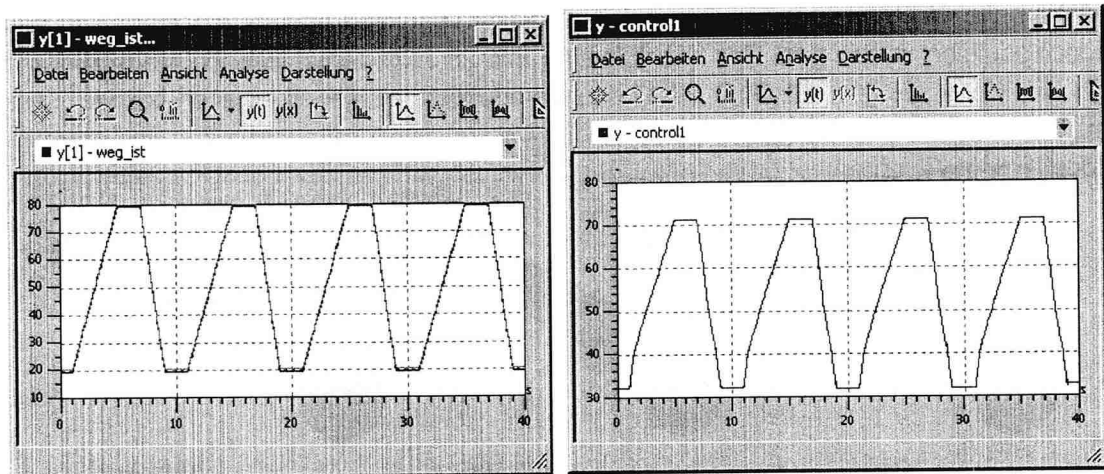


Bild 26: Simulationsergebnisse Weg (Soll und Ist in  $\mu\text{m}$ , links) und Ansteuerspannung des Aktors (in V, rechts)

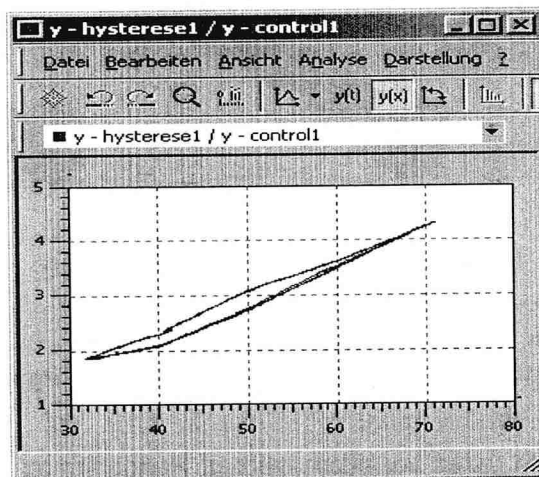


Bild 27: Simulationsergebnis Hysterese des Piezoaktors

Mit diesen Ergebnissen ist die prinzipielle Arbeitsfähigkeit der Modelle am Demonstrator nachgewiesen. Es können weitere Simulationsversuche auch mit anderen Anordnungen durchgeführt werden. Jedoch ist davon auszugehen, dass bei beliebiger Kopplung und Parametrisierung sowie Verwendung komplizierter Modelle im Detail noch Untersuchungen und viele Beispielrechnungen nötig sein werden, um das Simulationsverfahren für die Praxis reif zu entwickeln.

### 2.3.10 Modellgenerierung durch Reduktion von FEM-Modellen

Neben den unter 2.3.8 beschriebenen Möglichkeiten der Modellgenerierung für Modelle, die durch FEM-Tools beschrieben sind, wurde noch der folgende Weg erprobt: Aus den FEM-Tools werden die kompletten, hochdimensionalen Gleichungssätze extrahiert, die durch die FEM-Beschreibung entstehen [2] [4] [14] [16] [28] [32]. Diese Differentialgleichungssysteme werden einer Ordnungsreduktion (z.B. durch das ENOR-Verfahren) unterzogen, wobei niedrigdimensionale Systeme entstehen, die als Grundlage für die Modellbeschreibung mit einer Verhaltensbeschreibungssprache dienen. Auf diesem Gebiet liegen am EAS umfangreiche Erfahrungen vor. Im Projekt MODAN wurde exemplarisch eine zweiseitig rotatorisch gelager-

Clauss, C.; Haase, J.; Schneider, P.; Schwarz, P.: Einsatz von standardisierten Verhaltensbeschreibungssprachen für die Modellierung in der Mikrosystemtechnik. 9. GMM-Workshop, Paderborn, 31.3.-1.4.2003, 25-32

Clauss, C.: Simulation von SPICE-Netzlisten. ITI-Workshop 2003, Dresden, 13.-14.11.2003

Bastian, J.; Clauss, C.; Fritzsche, B.; Haiduk, F.: Modellierung und rechnergestützte Kennlinienermittlung eines Piezo-Aktors. Dresdner Arbeitstagung Schaltung- und Systementwurf (DASS), 13./14. April 2005, 115-120

Clauss, C.; Gube, M.: Verteilung von Workflows über Shellscrippte am Beispiel einer Monte-Carlo-Simulation mit SPICE. GI/ITG-Workshop „Grid-Technologie für den Entwurf technischer Systeme, Dresden, 22.4.2005, 44-47

Geplant ist folgende Veröffentlichung:

Clauss, C.; Neidhold, Th.: Modellierungsansätze für ein piezoaktorisches Antriebssystem. 8. ITI Simulation Workshop, Dresden, 29./30. September 2005

### **3 Fortschreibung des Verwertungsplans**

Die Verwertung der von FhG EAS Dresden geplanten Arbeiten war wie folgt vorgesehen:

- Die im Projekt erarbeitete Modellierungsmethodik steht den Anwendungspartnern zur Verfügung und kann von diesen in deren Entwurfsabläufe integriert werden. Ebenso fließen die für die Anwendungspartner erstellten Modelle in Vorlaufentwicklungen für neue Produkte ein.
- Die auf die Sprachen Modelica und VHDL-AMS bezogenen Arbeiten werden vor allem von der ITI GmbH Dresden für die Entwicklung neuer bzw. verbesserter Simulationswerkzeuge und Modellbibliotheken benötigt.
- Die im Projekt weiterentwickelten Modellierungs- und Optimierungswerkzeuge werden allen Partnern zur Nutzung zur Verfügung gestellt.

Die genannten Punkte wurden erfüllt.

Die ITI GmbH Dresden übergebenen Modelle und Konverter sowie das Approximationstool stellen einen wichtigen Bestandteil des Simulators SimulationX dieser Firma dar und werden damit einer Verwertung zugeführt.

Im Rahmen der Unterstützung der Projektpartner bei Modellierungsarbeiten wurden in Zusammenarbeit mit der TETRA GmbH Ilmenau Grundsatzuntersuchungen, Optimierungen und Verbesserungen an einzelnen Problemfällen erreicht. Die erarbeiteten und teilweise im Detail erprobten Modellierungswege bis hin zur Simulation stellen eine Basis für künftige Simulations- und Modellierungsarbeiten der Firma dar und können darüber verwertet werden.

Die erarbeiteten Modelle sowie die erprobten Modellierungsmethodiken bilden auch eine wichtige Basis für weitere Modellierungsarbeiten von FhG EAS Dresden und werden in zukünftige Arbeiten einfließen.

Durch die Verbindung der Modellierung von Piezoaktoren einschließlich der Gewinnung von Daten durch Messung wurde die Einrichtung in die Lage versetzt, die komplette Modellgenerierung für derartige und ähnlich geartete Modellierungsarbeiten als Dienstleistung anzubieten.



Darüber hinaus sind die Kompetenzen hinsichtlich der physikalischen Modellierung mit Modelica und des zugrunde liegenden Mehrpolansatzes durch die in MODAN erfolgten Arbeiten gestiegen, was das Angebot zur Erstellung von Verhaltensmodellen ermöglicht und fundiert.

# MODAN

**Forschungsverbundprojekt  
„Entwurf und Modellierung von Antriebssystemen  
für die Mikrosystemtechnik“**

**MODAN**  
**[www.modan.org](http://www.modan.org)**

*AGSV 1556*

**Abschlußbericht des Teilprojektes  
„Antriebslösung in 4 Koordinaten für die Flip-Chip-  
Technologie zur Herstellung von neuartigen mikro-  
mechanischen Systemen für Identifikations- und  
Sensorsysteme“  
der INA – Drives & Mechatronics GmbH & Co. oHG**

Verbund-Nr.: V2285  
Fördermittelgeber: BMBF  
Projekträger: VDI/VDE-IT Teltow  
Betreuer: Dipl. - Ing. Chr. Breckenfelder / Dipl. - Ing. S. Krüger

## Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellungen.....	3
1.1	Aufgabenstellung.....	3
1.2	Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens.....	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	3
1.4	Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand .....	4
1.4.1	Für das Vorhabens genutzte bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte.....	4
1.4.2	Verwendete Fachliteratur, genutzte Informations- und Dokumentationsdienste .....	4
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	4
2	Eingehende Darstellungen .....	5
2.1	Projektziel.....	5
2.2	Projektdurchführung .....	6
2.3	Erzielte Ergebnisse.....	8
2.3.1	Arbeitspaket Hub-Dreh-System mit integrierter Kraftregelung.....	8
2.3.2	Arbeitspaket X-Y-System (Baukasten).....	10
2.3.3	Arbeitspaket Gesamtsystem .....	12
2.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen.....	12
2.4.1	Präzisionsachssysteme .....	12
2.4.2	Hub-Dreh-System mit integrierter Kraftregelung .....	13
2.4.3	Gesamtsysteme.....	13
2.5	Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen.....	13
2.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse .....	13
3	Fortschreibung des Verwertungsplans.....	13

Anlage 1: Datenblatt Z-Phi VC 25/3

Anlage 2: Motordatenblatt L1F

Anlage 3: Datenblatt LSM-T24

## 1 Kurzdarstellungen

### 1.1 Aufgabenstellung

Antriebslösung in 4 Koordinaten für die Flip-Chip-Technologie zur Herstellung von neuartigen mikromechanischen Systemen für Identifikations- und Sensorsysteme. Grundlage ist ein System zur Bewegung in zwei Koordinaten in der horizontalen Ebene, welches Hub-Dreh-Systeme bewegt. Diese Hub-Dreh-Systeme dienen der genauen Aufnahme und Platzierung von Waferchips und mikromechanischen Baugruppen. Zur Erhöhung des Durchsatzes soll der Kreutztisch sehr schnell und genau arbeiten. Im Weiteren sollen die Hub-Dreh-Systeme leicht und kompakt sein, damit der Kreutztisch bis zu fünf solcher Systeme mit einem mal transportieren kann. Ähnlich einem Revolverkopf können dann mehrer Bauteile aus einem Magazin aufgenommen und dann im Zielgebiet abgelegt werden. Die Aufnahme und Ablage erfolgt in verschiedenen Ebenen (innerhalb von 25 mm) und entsprechend einem ermittelten Parameter im Winkel innerhalb von zehn Sekunden. Die Gesamtgenauigkeit in der Summe soll über 300 x 400 mm innerhalb von 5 µm bei 3 Sigma liegen. Eingeschlossen ist dabei die Abweichung durch die z- und φ- Achse. In der z- Achse darf das System max. 2 µm überschwingen. Es ist ein kraft geregelter Modus für z zum Absetzen der Bauteile zu implementieren, um Beschädigung der Bauelemente zu vermeiden. Die Antriebsmodule haben auch als Einzellbaugruppen einen Markt in der Präzisionslaserbearbeitung. Der Fahrweg soll modular bis 600 x 600 mm erweiterbar sein. Die Antriebsleistung soll skalierbar sein, um unterschiedlichen Arbeitsregimes gerecht zu werden.

Systembeschleunigung >20m/s<sup>2</sup>, Geschwindigkeit bis 2m/s.

### 1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

Know-How bei IDAM

- in feinmechanischen Konstruktionen
- Motorentwicklung und Fertigung
- Magnetkreisauslegung (im Unternehmen und bei Verbundpartnern)
- Feinmechanische Fertigung / Montage
- Inbetriebnahme / Regelungstechnik von Direktantriebssystemen

Meßtechnische Voraussetzung zur Überprüfung der Genauigkeit (Meßraum, Laser) sind gegeben

Simulationsverfahren bei Verbundpartnern vorhanden

Know How zur Entwicklung neuer hochauflösender Meßsysteme bei Verbundpartner vorhanden

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

September 2001	Beantragung
April 2002	Kooperationsvertrag mit allen Projektpartnern
April 2002	Zuwendungsbescheid
2002	Definition von Arbeitspaketen

	Erstellen Projektplan, Abstimmung mit den Verbundpartnern
	Beginn der Abarbeitung der Arbeitspakete
	Evaluierung des Konzeptes
2003	Abarbeitung Arbeitspaket Hub-Schwenk-System
	Neuausrichtung des Projektes hinsichtlich des X-Y-Systemes
	Erstellung Baukastensystem Linearachsensystem
	Aufbau und Test Demonstrator
2004	Optimierung Hub-Schwenk-System
	Überarbeitung Linearachsensystem
	Verschmelzung der Unternehmen LAT und Prätec zu IDAM
2005	Einarbeitung neuer MA
	Überarbeitung und Optimierung der Konstruktion des Baukastensystemes im neuen 3D-CAD PRO/E
	Abschluß des Projektes

#### **1.4 Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand**

##### **1.4.1 Für das Vorhabens genutzte bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte**

Bekannte Konstruktionen:

Hub-Dreh-Einheit ohne Kraftregelung von IDAM

Schutzrechtproblematik:

Hub-Dreh-Einheit ohne Kraftregelung von SMAC

##### **1.4.2 Verwendete Fachliteratur, genutzte Informations- und Dokumentationsdienste**

Messeanalysen, Patentrecherche Depanet

#### **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

## 2 Eingehende Darstellungen

### 2.1 Projektziel

Das IDAM-Teilprojekt umfasst eine Antriebslösung in vier Koordinaten für die Flip-Chip - Technologie zur Herstellung von neuartigen mikromechanischen Systemen für Identifikations- und Sensorsysteme. Grundlage ist ein Zweikoordinatensystem für eine horizontale Bewegung mit aufgesetzten Hub-Dreh-Systemen. Diese Hub-Dreh-Systeme dienen der genauen Aufnahme und Platzierung von Waferchips und mikromechanischen Baugruppen. Zur Erhöhung des Durchsatzes soll der Kreutztisch sehr schnell und genau arbeiten. Im weiteren sollen die Hub-Dreh-Systeme leicht und kompakt sein, damit der Kreutztisch bis zu fünf solcher Systeme mit einem mal transportieren kann. Ähnlich einem Revolverkopf können dann mehrer Bauteile aus einem Magazin aufgenommen und dann im Zielgebiet abgelegt werden. Die Aufnahme und Ablage erfolgt in verschiedenen Ebenen (innerhalb von 25 mm) und entsprechend einem ermittelten Parameter im Winkel innerhalb von zehn Sekunden. Die Gesamtgenauigkeit in der Summe soll über 300 x 400 mm innerhalb von 5 µm bei 3 Sigma liegen. Eingeschlossen ist dabei die Abweichung durch die z- und φ- Achse. In der z- Achse darf das System max. 2 µm überschwingen. Es ist ein kraft geregelter Modus für z zum Absetzen der Bauteile zu implementieren, um Beschädigung der Bauelemente zu vermeiden. Die Antriebsmodule haben auch als Einzellbaugruppen einen Markt in der Präzisionslaserbearbeitung. Der Fahrweg soll modular bis 600 x 600 mm erweiterbar sein. Die Antriebsleistung soll skalierbar sein, um unterschiedlichen Arbeitsregimes gerecht zu werden.

Systembeschleunigung  $>20\text{m/s}^2$ , Geschwindigkeit bis 2m/s.

- Grundlagenentwicklung (Konzept, Evaluierung, Berechnung, Vorversuche und Optimierung) des X-Y-Systemes als Baukastensystem aus direkt getriebenen Einzelachsen
- Konstruktion, Bau und Test eines Demonstrators einer Einzelachse
- Optimierung der Einzelachse hinsichtlich Funktion und Kosten
- Konzipierung und Entwicklung eines in Z kraftgeregelten Zweikoordinaten Hub-Schwenksystems mit folgenden Eigenschaften:
  - 25 mm Hub und 300° Drehung mit Außenabmessungen von ca. 30 x 100 x 140 mm
  - Abtrieb stirnseitig mit  $\geq 5\text{mm}$  Hohlwelle, die gleichzeitig eine Hub- und Drehbewegung realisiert
  - Auflösung Kraftregelung  $\leq 1\text{g}$  (0,01N)  
Positionierzeit für 20mm Hub mit Absetzkraft von 0,5N in 70ms und 0,1N in 200ms
  - Wellenende zur Aufnahme des Bauteils vorbereitet (Vakuum und / oder Mikrogreifer)
  - die Baugruppe sollte auch direkt angetrieben sein
  - die Auflösung soll linear 0,1 µm und rotativ 3" betragen
  - der Gesamtantrieb soll eine Masse kleiner 1100g haben, bewegte Masse  $<150\text{g}$

- die zu bewegende Nutz-Masse ist kleiner gleich 35 g
- Kraft in linearer Richtung ca. 15 N, Kraft in Drehrichtung ca. 40 bis 60 Nmm
- Beschleunigung in linearer Richtung bis 50m/s<sup>2</sup> und Vmax=1m/s
- Antriebsberechnung und Optimierung entsprechend dem geforderten Bauraum bei Einhaltung der Parameter
- Entwicklung einer entsprechenden Soft- und Hardware
- Test- und Optimierung des Systems, Vorbereitung der Fertigung
- Entwurf und Konstruktion eines entsprechenden Gesamtkonzeptes aus Achssystemen und Hub-Schwenksystemen
- Aufbau des Gesamtsystems mit 5 Hub- Drehmodulen für einen Fahrweg von 600 x 600 mm inklusive Steuerung und Software (Firmware)

## 2.2 Projektdurchführung

September 2001	Beantragung
April 2002	Kooperationsvertrag mit allen Projektpartnern
April 2002	Zuwendungsbescheid, Projektstartmeeting bei IDAM (vormals LAT)
Jahr 2002	Definition von Arbeitspaketen Erstellen Projektplan Abstimmung mit den Verbundpartnern Evaluierung des Konzeptes Beginn der Abarbeitung der Arbeitspakete
<p>Bei der Evaluierung des technischen Konzeptes des ursprünglichen X-Y-Systemes, bestehend aus einem X-Y-Planar-Reluktanzantrieb von IDAM gekoppelt mit einem elektrodynamischen Planarantrieb vom Verbundpartner IMMS, stellte sich heraus, daß damit die gewünschten Parameter hinsichtlich Beschleunigung, Endgeschwindigkeit und Nutzlast nicht erreichbar sind. Auch war der erforderliche Überkopfbetrieb nicht mit vertretbarem Aufwand möglich.</p>	
Jahr 2003	Abarbeitung Arbeitspaket Hub-Schwenk-System Neuausrichtung des Projektes hinsichtlich des X-Y-Systemes Erstellung eines Baukastensystemes von Linearachsen, Aufbau und Test des Demonstrators
Jahr 2004	Optimierung Hub-Schwenk-System Verbesserung Soft- und Hardware der Kraftregelung Verbesserung der mechanischen Genauigkeit in XY Verbesserung der Fertigbarkeit und des Montageablaufes zur Senkung der Kosten Überarbeitung Linearachsensystem Verwendung neuer effizienter Motoren Erstellung in 3D-CAD Inventor (statt ACAD 2D), auch als Basis für CAE-Simulationen)

Verschmelzung der LAT Suhl AG mit der Prätec GmbH zu IDAM  
Kapazitätsengpaß im Projekt

Jahr 2005

Einarbeitung eines neuen MA für das Linearachs- und Gesamtsystem  
Strategischer Wechsel auf das 3D-CAD-System PRO/E, Neuaufbau  
der CAD-Modelle und gleichzeitige Überarbeitung der Konstruktion (mit  
der neuen CAD-Software stehen umfangreiche Simulations- und Opti-  
mierungsmöglichkeiten innerhalb des Unternehmensverbundes auch  
nach Projektende zur Verfügung)

Demonstrator des Gesamtsystemes und der optimierte Linearachsen-  
baukasten wurden innerhalb der Projektlaufzeit nicht mehr aufgebaut,  
die Projektaufwände sind entsprechend niedriger ausgefallen.

Abschluß des Projektes



## 2.3 Erzielte Ergebnisse

### 2.3.1 Arbeitspaket Hub-Dreh-System mit integrierter Kraftregelung

Das Projektziel wurde erreicht:

- 25 mm Hub und 300° Drehung mit Außenabmessungen von ca. 34,5 x 100 x 140 mm, optional Stecker oder Kabelanschluss
- Abtrieb stirnseitig mit 5mm Hohlwelle, die gleichzeitig die Hub- und Drehbewegung realisiert
- Auflösung Kraftregelung  $\leq 1\text{g}$  (0,01N), kraftgeregeltes Absetzen 0,1N bis 5N  
Positionierzeit für 20mm Hub mit Absetzkraft von 0,5N in 70ms und 0,1N in 200ms werden erreicht
- Wellenende zur Aufnahme des Bauteiles mit Gewinde M5 oder Toolaufnahme Innendurchmesser 3,175mm
- Direktantrieb Hubachse mit Voice-Coil
- Auflösung linear 0,2  $\mu\text{m}$  (optional bis 0,05 $\mu\text{m}$ ) und rotativ 0,0225°
- Gesamtantrieb Masse 1100g haben, bewegte Masse 135g
- die zu bewegende Nutz-Masse ist kleiner gleich 35 g
- Spitzenkraft linear 12,5N, Spitzenmoment 60 mNm
- Beschleunigung in linearer Richtung bis 50m/s<sup>2</sup> und Vmax>1m/s
- Soft- und Hardware zur Ansteuerung im kraftgeregelten Betrieb
- Vorbereitete Fertigung für das System, Montagehilfsmittel, Prüfalgorithmen zur Qualitätssicherung vorbereitet (Hard- und Software)

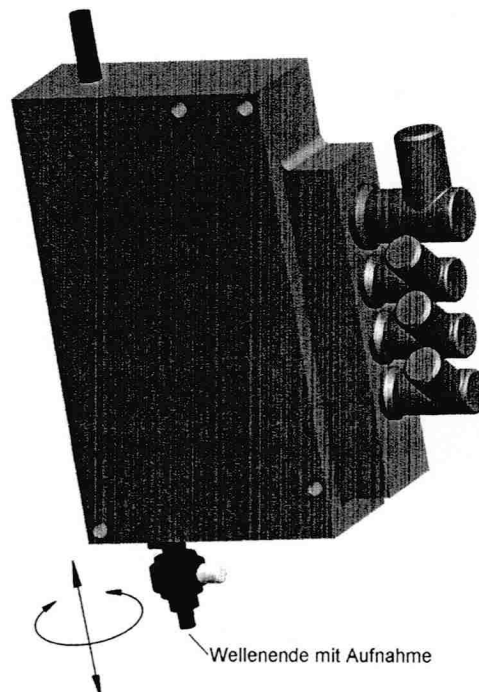


Bild 1 Hub-Dreh-System, Variante mit Steckeranschluß

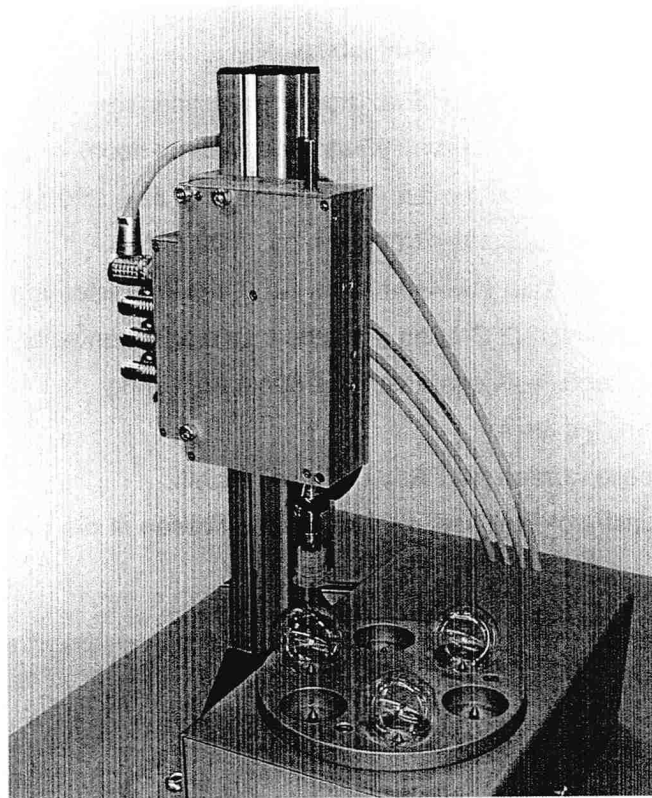
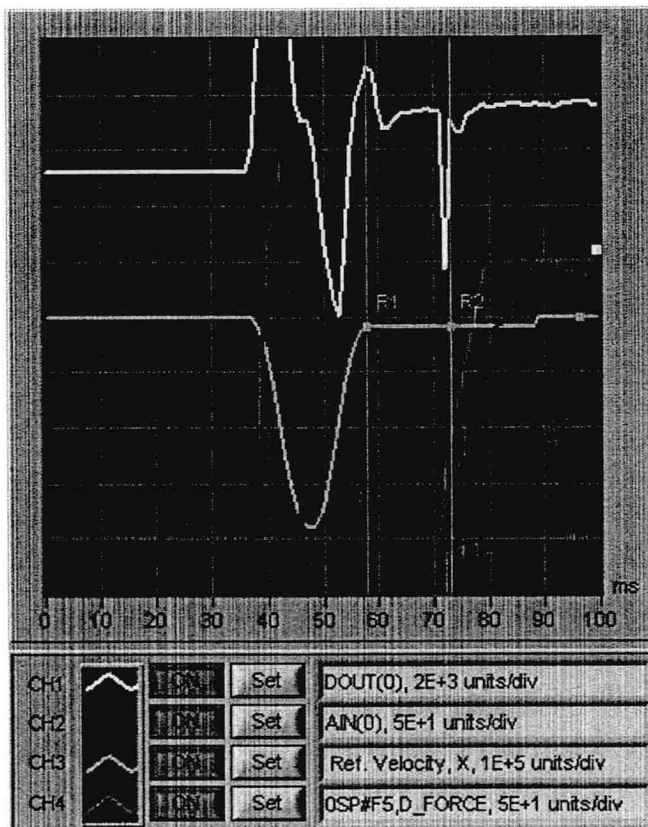


Bild 2 Demonstrator Hub-Dreh-System



gelb:

Stellgröße (Motorsollstrom)

rot: Kraftsignal 1 Raster = 0,1N

blau:

Sollgeschwindigkeit 1 Raster = 100 mm/s (bis „R2“ = Start Kraftregelung)

grün: Sollkraft

Hub 4,7mm mit  $v_{max}$  ca. 0,5m/s, danach ein Suchweg bis zum Aufsetzen von ca. 300  $\mu$ m mit  $v = 20$  mm/s

Bild 3 Hub-Dreh-System, Positioniervorgang mit 0,5N Absetzkraft

### 2.3.2 Arbeitspaket X-Y-System (Baukasten)

Es entstand ein Baukastensystem von Präzisionslinearachsen mit

- Zwei Breitenvarianten (160 bzw. 195 mm breit, 65mm hoch)
- Jeweils zwei Längenvarianten der Schlitten (160mm bzw. 260mm)
  - Das ergibt Motorspitzenkräfte von ca. 150-600N
- Vorzugslängenumstufungen von 440mm bis 1200 mm im Raster von 190mm
- Kugelumlauf Führungen (2 Größen angepasst an die Breitenvarianten)
- Optische inkrementelles Messsystem bis 50nm Auflösung
- Geschwindigkeit bis 3m/s
- Die CAD-Modelle wurden mit PRO/ Engineer erstellt.

Ein getesteter Demonstrator liegt vor, die Ergebnisse fließen in die optimierte Konstruktion ein.

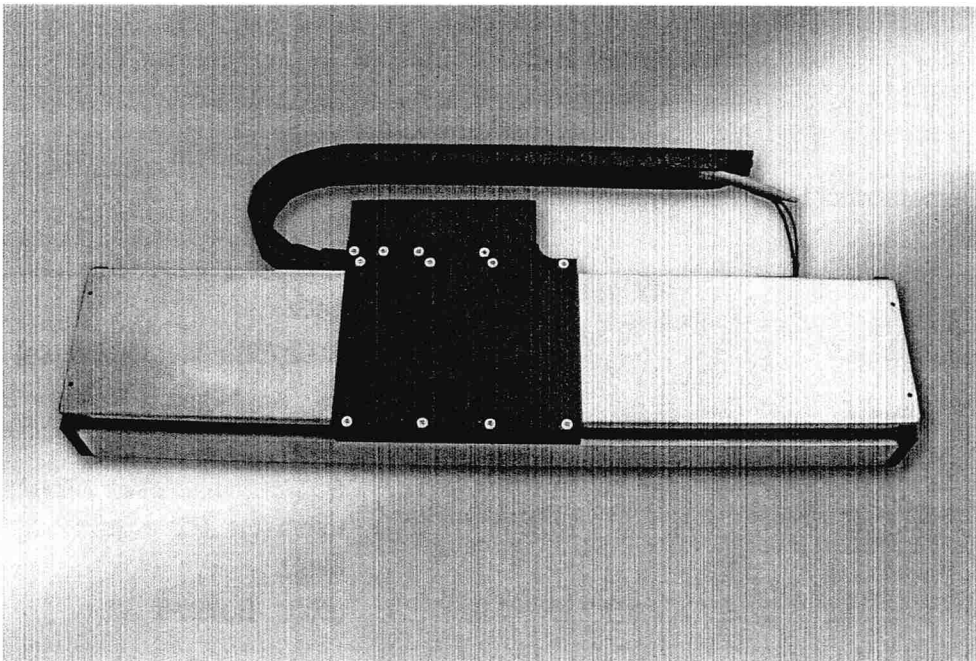


Bild 4 Demonstrator Präzisionsachse

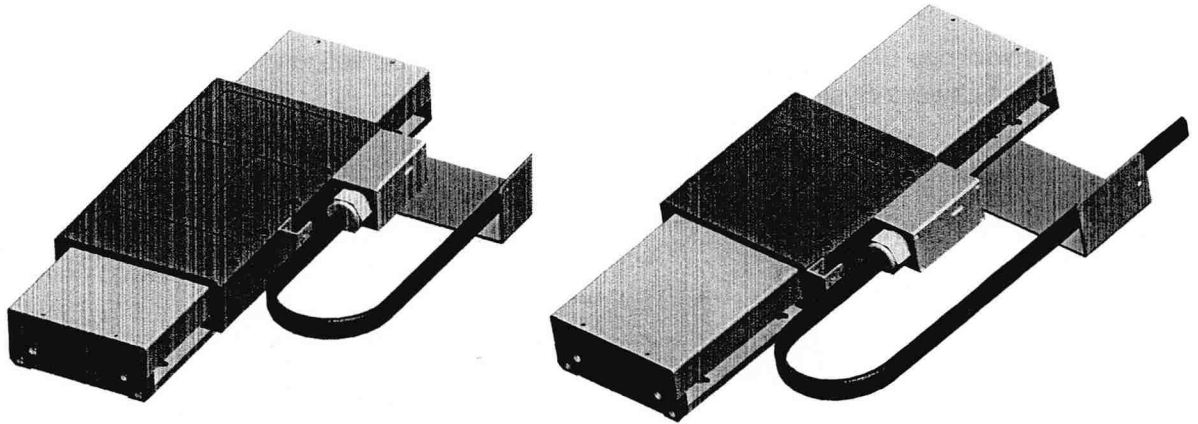


Bild 5 Baukasten: 2 Schlittenlängenvarianten 160 mm und 260 mm

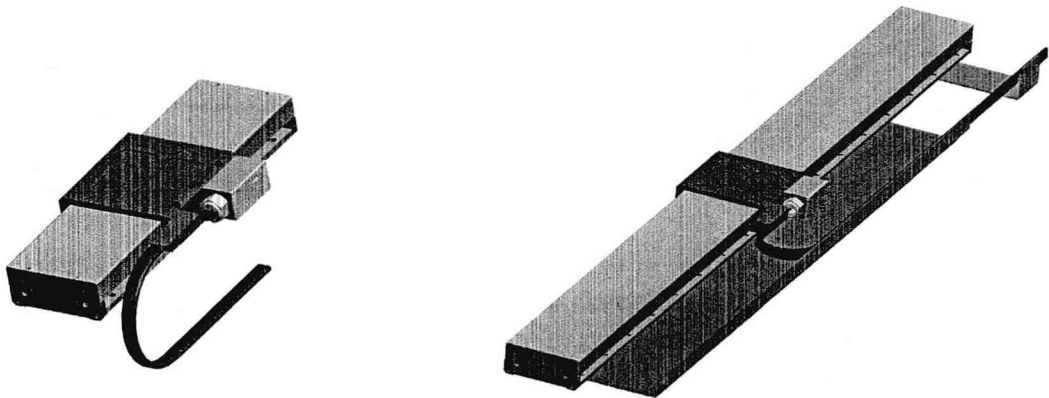


Bild 6 Baukasten: unterschiedliche Längenvarianten, Energiezuführung

### 2.3.3 Arbeitspaket Gesamtsystem

CAD-Entwurf des Gesamtsystemes als X-Y-System mit 4 Befestigungsplätzen für kraftgeregelte Hub-Schwenk-Systeme:

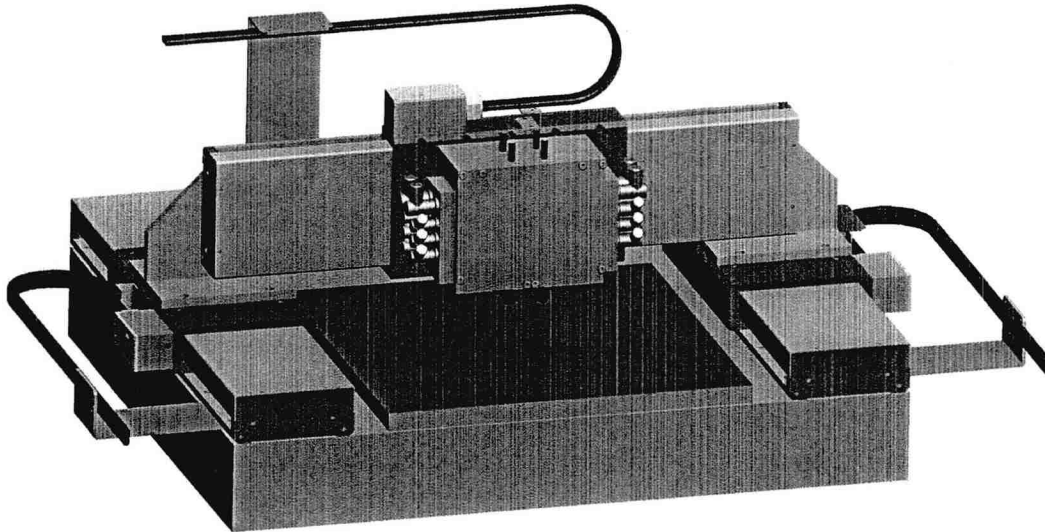


Bild 7 Gesamtsystem für Abdeckbereich 400mm x 400mm mit 4 Hub-Schwenk-Systemen

## 2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen

### 2.4.1 Präzisionsachssysteme

Das modulare Präzisions-Achssystem bietet die Basis für antriebstechnische Lösungen in X-Y bei der

- Laserpräzisionsbearbeitung für Nutzen bis 600 x 600 mm
- Mikromontage
- Bio-, Gentechnologie
- Implanter für Chipkartenfertigung
- schnelle Bonder für das direkte Bonden auf großen Nutzen und die Flip - Chip -Technologie
- Bestückungsmaschinen (Sonderbestücker für hohe Präzision)
- Leiterplattentester für bestückte und unbestückte Systeme
- schnelle optische Zweikoordinaten – Messmaschinen
- Antriebstechnik zur Montageautomatisierung in der Feinwerktechnik

Aufgrund des Baukastensystemes können Angebote sehr schnell erstellt werden und haben eine bessere Qualität. Das technische Risiko ist durch die Tests während des Projektes minimiert.

#### **2.4.2 Hub-Dreh-System mit integrierter Kraftregelung**

Das Hub-Dreh-System mit integrierter Kraftregelung kann Einsatz finden in den Branchen

- Mikromontage
- Bio- , Gentechnologie
- Implanter für Chipkartenfertigung
- schnelle Bonder für das direkte Bonden auf großen Nutzen und die Flip - Chip -Technologie
- Bestückungsmaschinen (Sonderbestücker für hohe Präzision)
- Leiterplattentester für bestückte und unbestückte Systeme
- schnelle optische Zweikoordinaten – Messmaschinen

#### **2.4.3 Gesamtsysteme**

Gesamtsysteme werden in der Regel kundenspezifisch konfiguriert. Durch die Baukastenelemente kann dies deutlich schneller als bisher erfolgen.

#### **2.5 Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen**

#### **2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse**

Projektstatusmeeting am 6/7.10.2004 in Fulda im Rahmen der Tagung „Elektrisch-mechanische Antriebssysteme“

Baukastensystem Präzisionslinearachse

- Hannover Messe Industrie 2003

Baukastensystem Präzisionslinearachse Hub-Dreh-Einheit

- Baukastensystem Präzisionslinearachse

Geplant sind Veröffentlichungen in Fachzeitschriften im Bereich Antriebstechnik und Konstruktion.

### **3 Fortschreibung des Verwertungsplans**

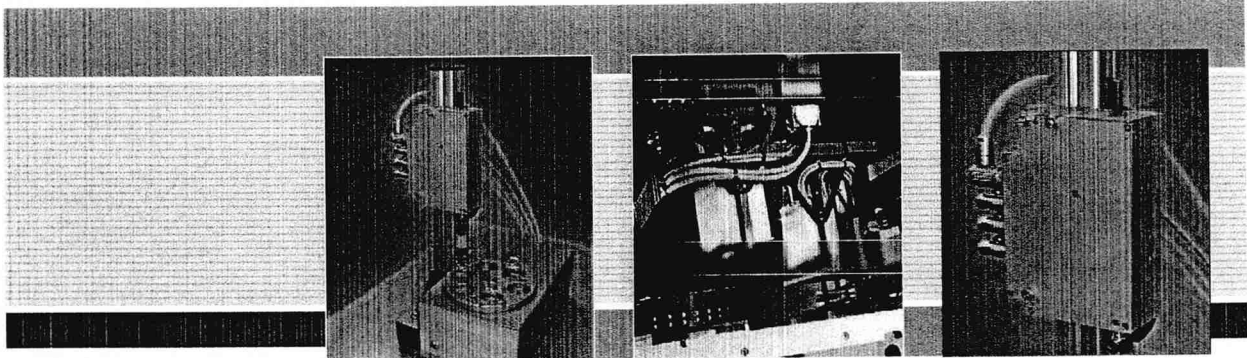
Absatzerwartung ca. 200 Präzisionsachsen/ Jahr

Absatzerwartung ca. 400 Hub-Dreh-Einheiten/Jahr

Umsatzerwartung ca. 3 Mio € (2006), Ablösung von Altprodukten mit ca. 1 Mio €

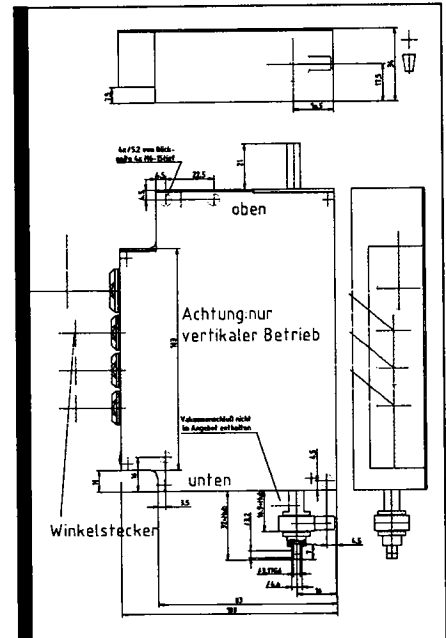
Umsatzpotential durch Verkauf von anderen Komponenten und Engineering für Gesamtsysteme ca. 1Mio €

## Linear-Rotations-Actuator • ZPhi-VC-25/3



### ■ Systemvorteile

- Kompakter Linear-Rotations-Actuator mit geringer Masse (ca. 1.100g)
- Linearer Direktantrieb mit Voice Coil-Motor
- Kraftgeregelte Bewegung - Absetzkkräfte von 0,1 - 5,0N
- Vollwelle (mit optionalem Vakuumanschluss) mit Präzisions-Toolaufnahme und Kraftsensor am unteren Wellenende
- Eigenbeschleunigung bis zu 50m/s<sup>2</sup> möglich
- Hochauflösende Messsysteme zum linearen und rotativen Positionieren
- Luftanschluss für Sperrluft
- Hochflexible Anschlussleitungen mit vibrationsfesten Steckverbindern - wahlweise mit abgewinkelten oder geraden Steckern
- Wartungsarme Arbeitsweise - mind. 50 Mio ZPhi-Bewegungen ohne Wartung
- Servomodul für lineare und rotative Achsen mit Analogsignalen für Kraftvorwahl (+10V), Kraftmesssignal und digitaler Messbereichsvorwahl



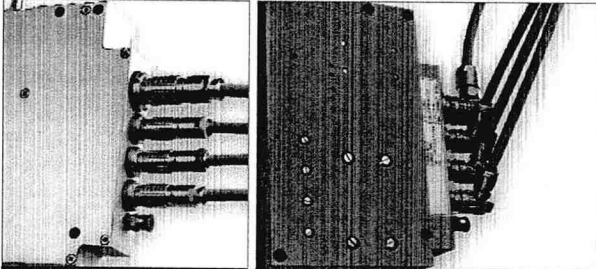
### ■ Anwendungen

- Für sehr schnelle und präzise Pick and Place-Aufgaben
- Präzisionsmontage mit Orientierung kleinster Bauteile, bis ca. 20g

## ■ Technische Daten: ZPhi-VC-25/3

Benennung	Maßeinheit	Wert	Bemerkung
<b>Allgemeine Daten</b>			
Außenmaße Gehäuse (HxTxB)	mm	140 × 100 × 34	Steckeranschluss
Gesamtmasse, ca.	g	1.100	
Präzisionswelle	mm	∅ 5	Vollwelle rechts (SSR) Vollwelle links (SSL)
Vakuumananschluss	mm	Vakuumananschluss am Abtrieb möglich	Wellenende mit Toolaufnahme (TF)
Nutzmasse (sinnvoll bis)	g	20	
Eigenbeschleunigung	m/s <sup>2</sup>	50	
<b>Linearantrieb</b>			
Motortyp			Voice Coil (VC)
Nutzhub der Z-Achse	mm	25	
Nennkraft des Motors	N	5	
Spitzenkraft des Motors	N	12,5	
Kraftkonstante	N/A	2,5	
Bewegte Masse (insgesamt)	g	135	mit Vakuumadapter / mit Kraftsensor
Messsystemauflösung	µm	0,2	Genauigkeitsklasse 5µm
Wiederholgenauigkeit (Endposition)	µm	±3	bis ±1µm möglich
Führungsgenauigkeit	µm	≤5	Wiederholgenauigkeit der Position
Reibkraft ca.	N	<1,5	typisch 1,3N
Federkraft	N	3,0	Gewichtskompensation
Max. Geschwindigkeit	m/s	<1,0	Rückholung in obere Lage
Kraftgeregelte Bewegung (Absetzkraft)	N	0,1 - 5,0	abhängig von Auswertelektronik
Kurzzeitig realisierbare max. Absetzkraft	N	10	einstellbare Kraft (FM) auf das Bauteil kraftgeregelte Bewegung
<b>Drehantrieb</b>			
Drehwinkel der Phi-Achse	°	ca. 300	ca. ±150° (mit Anschlag)
Nennmoment	mNm	22,4	Riementrieb 2:1
Spitzenmoment	mNm	60	elektronisch begrenzt
Trägheitsmoment	gcm <sup>2</sup>	46	
Reibmoment	mNm	6	
Messsystemauflösung	Impulse/U	16.000	
Max. Drehzahl der Phi-Achse	U/min	1.500	
<b>Lagerung der Präzisionswelle</b>			
Rundlauffehler	µm	≤20	10µm möglich
Axialfehler bei 180°	µm	≤20	
Wiederholgenauigkeit des Drehwinkels	°	0,06	

## ■ Bestellinformation

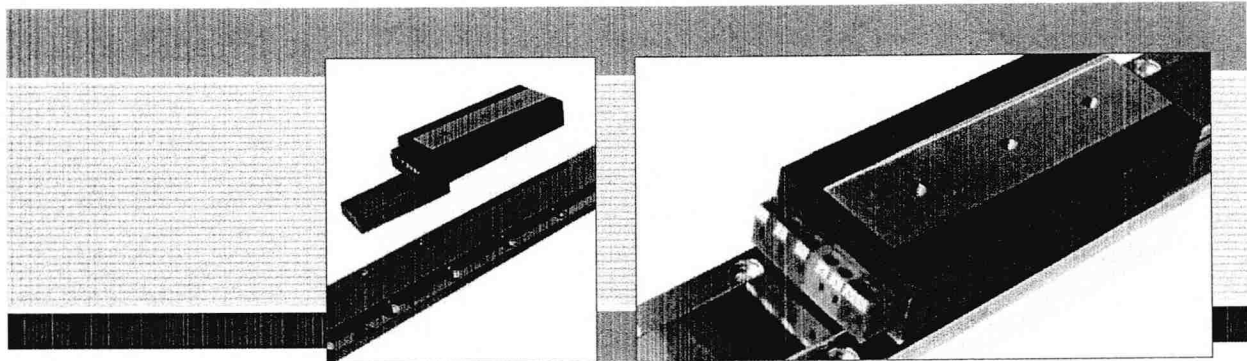
	Artikel-Nummer	
ZPhi-VC-25/3 mit Vollwelle rechts	L9831	
ZPhi-VC-25/3 mit Vollwelle links	L11923	
Kabelsatz für ZPhi-VC-25/3 mit Steckeranschluss 45° abgewinkelt	L12191	
Kabelsatz für ZPhi-VC-25/3 mit Steckeranschluss gerade	L12190	
Servomodul für ein ZPhi-VC-25/3	L11924	

Stand: November 2004 | Änderungen im Sinne des technischen Fortschrittes vorbehalten ohne Vorankündigung. | Fotos: IDAM GmbH & Co. oHG



## Übersichtsdatenblatt

# Lineare Synchronmotoren • Serie L1-3P



### ■ Beschreibung

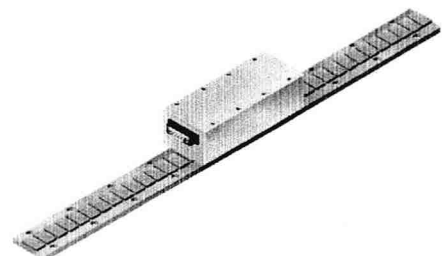
Die L1-Serie gehört zu den genutzten linearen Synchronmotoren. Dieser dreiphasige Motor wurde speziell für den Einbau in Kleinpositioniersysteme entwickelt. Durch seine kompakte Bauform ist dieser Linearantrieb prädestiniert für kleine und mittlere Positioniereinheiten. Mit einer Einbauhöhe von 30 mm bei der flachen Variante L1F und einer Breite von 48 mm hat dieser Motor eine sehr kompakte Bauform.

Das Primärteil des Motors hat ein Epoxidharzgehäuse. Der Motor ist für einen Betrieb ohne interne Kühlung vorgesehen, ein zusätzlicher Kühladapter ist möglich. Die Motorkonstruktion ist einfach und kostensparend.

Auf Wunsch können die Größenverhältnisse natürlich jederzeit entsprechend der kundenspezifischen Anforderungen modifiziert werden.

### ■ Anwendungen

- Kleinmaschinen und Module
- Handlingsysteme
- Bewegung von geringen und mittleren Massen
- Anwendungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen



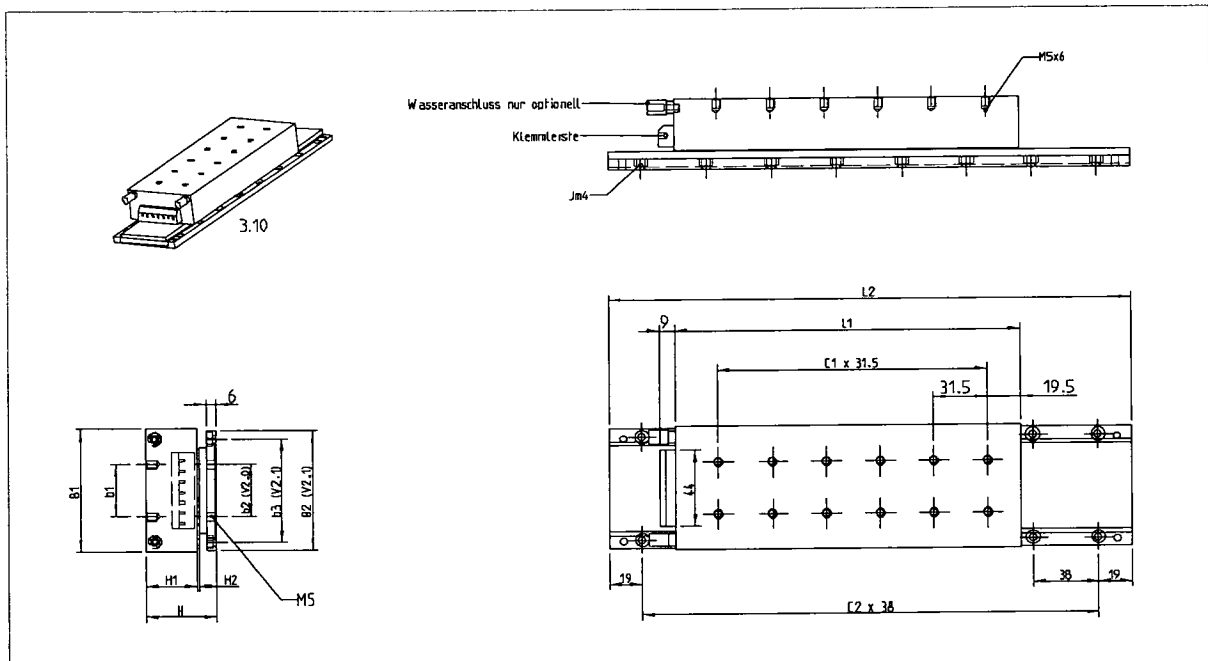
## Technische Daten: Serie L1H-3P

Motortyp	Spitzenkraft bei $I_p$ (Sättigungsbereich)	Spitzenkraft bei $I_{pl}$ (lin. Bereich)	Nennkraft bei $I_n$ (ungekühlt)	Nennkraft bei $I_k$ (gekühlt)	Lin. Grenzgeschwindigkeit bei		Blocklänge (im Verguss)	Breite (im Verguss)	Höhe ohne/mit Wasser- kühlung	Masse ohne Kühl- adapter	Gesamthöhe ohne/mit H <sub>2</sub> O-Kühlg.
					$U_{ZK} = 300V_{DC}$	$U_{ZK} = 600V_{DC}$					
					$F_p$ [N]	$F_{pl}$ [N]					
L1H-3P-100x48...	142	121	51	103	6,7	15,4	106	48	28,2/38,2	0,64	39-0,1/49-0,1
L1H-3P-200x48...	283	242	103	205	3,1	7,3	201	48	28,2/38,2	1,24	39-0,1/49-0,1
L1H-3P-300x48...	436	373	158	316	4,4	10,3	296	48	28,2/38,2	1,82	39-0,1/49-0,1
L1H-3P-100x72...	291	248	105	211	3,1	7,3	106	72	28,2/38,2	0,96	39-0,1/49-0,1
L1H-3P-200x72...	566	484	205	411	3,4	8,0	201	72	28,2/38,2	1,86	39-0,1/49-0,1
L1H-3P-300x72...	849	726	308	616	2,1	5,1	296	72	28,2/38,2	2,76	39-0,1/49-0,1

## Technische Daten: Serie L1F-3P

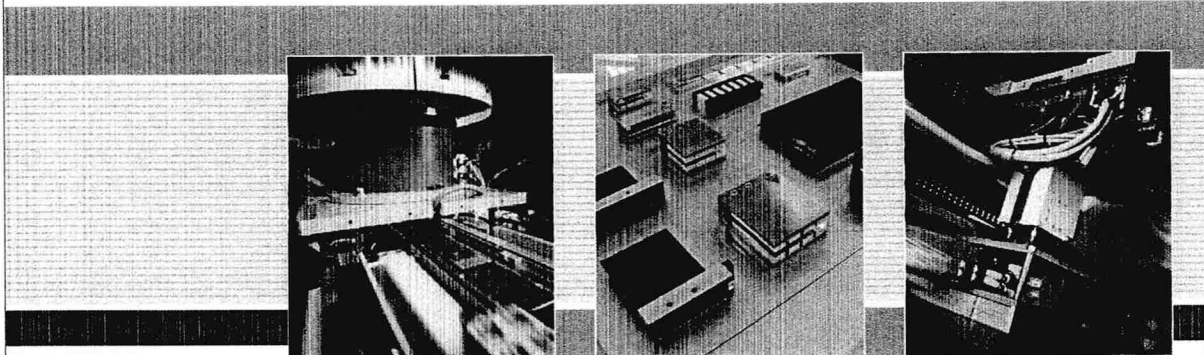
Motortyp	Spitzenkraft bei $I_p$ (Sättigungsbereich)	Spitzenkraft bei $I_{pl}$ (lin. Bereich)	Nennkraft bei $I_n$ (ungekühlt)	Nennkraft bei $I_k$ (gekühlt)	Lin. Grenzgeschwindigkeit bei		Blocklänge (im Verguss)	Breite (im Verguss)	Höhe ohne/mit Wasser- kühlung	Masse ohne Kühl- adapter	Gesamthöhe ohne/mit H <sub>2</sub> O-Kühlg.
					$U_{ZK} = 300V_{DC}$	$U_{ZK} = 600V_{DC}$					
					$F_p$ [N]	$F_{pl}$ [N]					
L1F-3P-100x48...	147	124	39	79	11,7	26,9	106	48	20,2/30,2	0,49	31-0,1/41-0,1
L1F-3P-200x48...	294	248	79	157	5,4	13,0	201	48	20,2/30,2	0,95	31-0,1/41-0,1
L1F-3P-300x48...	441	373	118	236	3,5	8,7	296	48	20,2/30,2	1,4	31-0,1/41-0,1
L1F-3P-100x72...	294	248	79	157	5,6	13,5	106	72	20,2/30,2	0,74	31-0,1/41-0,1
L1F-3P-200x72...	588	497	157	314	2,6	6,5	201	72	20,2/30,2	1,43	31-0,1/41-0,1
L1F-3P-300x72...	882	745	236	471	1,5	4,1	296	72	20,2/30,2	2,12	31-0,1/41-0,1

■ Technische Zeichnung: L1x-3P-...



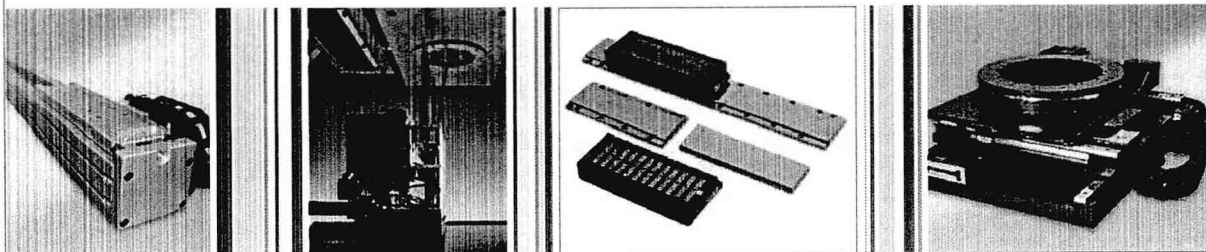
Weitere technische Daten und konstruktive Werte erhalten Sie gern auf Anfrage.

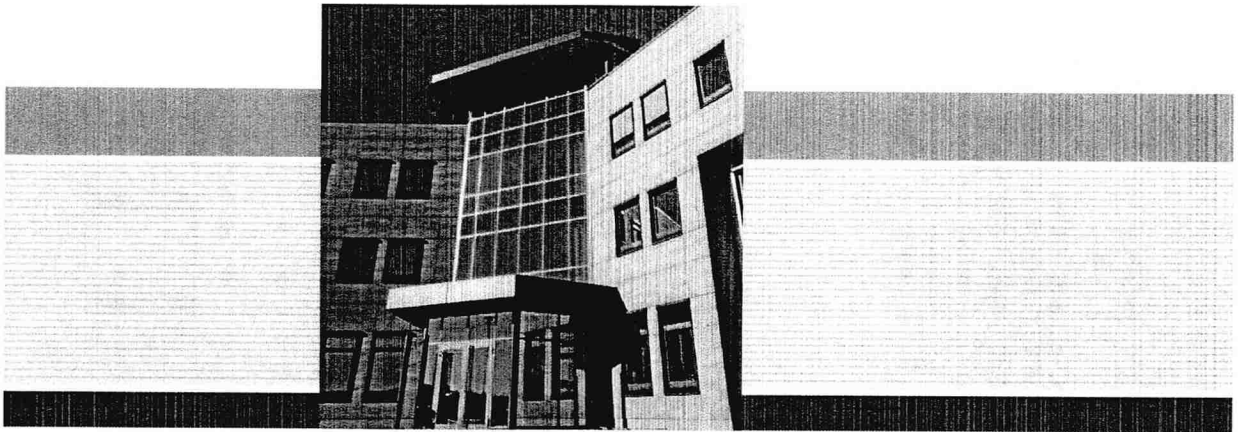
## IDAM - Systemkompetenz für Direktantriebstechnik



INA - Drives & Mechatronics GmbH & Co. oHG, ein Unternehmen der INA-Gruppe, ist Spezialist für Direktantriebstechnologie. Zum Portfolio gehören neben den linearen AC-Synchronmotoren rotative und planare Antriebe in einem breiten Größen- und Leistungsspektrum sowie alle zu deren Betrieb erforderlichen Elektronikbaugruppen wie Servoverstärker, Regler und Kompaktsteuerungen. Ein besonderes Augenmerk verdienen die Positionier- und die Multiachs-Systemlösungen.

Das Unternehmen besitzt umfangreiche Erfahrungen in den Branchen Werkzeug- und Produktionsmaschinen, Automatisierungstechnik, Productronic, Mess- und Medizintechnik.





**INA - Drives & Mechatronics**

**GmbH & Co. oHG**

Mittelbergstraße 2

D-98527 Suhl

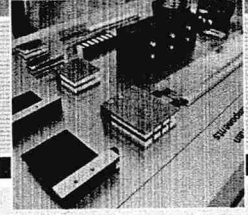
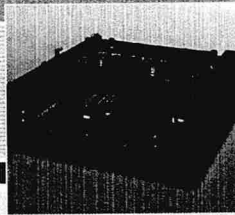
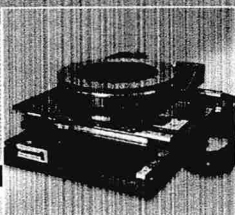
Telefon +49 (0) 36 81 | 75 74-0

Telefax +49 (0) 36 81 | 75 74-30

E-Mail [info@ina-dam.de](mailto:info@ina-dam.de)

Internet [www.ina-dam.de](http://www.ina-dam.de)

## Teilprojekt: "Antriebslösung in vier Koordinaten für die Flip-Chip-Technologie und zur Herstellung von neuartigen mikromechanischen Systemen für Identifikations- und Sensorsysteme"

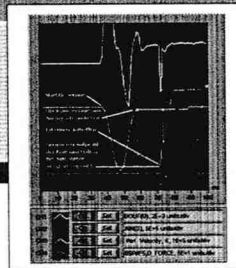


IDAM-Direktantriebe sind technologisch führend und bieten für jede Anwendung die perfekte Lösung.  
Somit ist IDAM der richtige Partner für Ihr wirtschaftliches Produkt.

### ■ Kraftgeregeltes Zwei-Koordinaten-Hub-Dreh-System

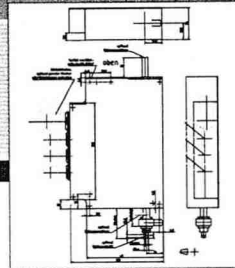


Prinzipbild



Positioniervorgang  
mit 0,5 N Absetzkraft

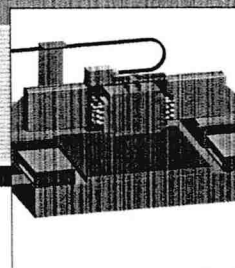
gelb: Stellgröße Motorstrom  
grün: Sollkraft  
rot: Istkraft - Raster 0,1 N  
blau: Sollgeschwindigkeit - Raster 0,1 m/s



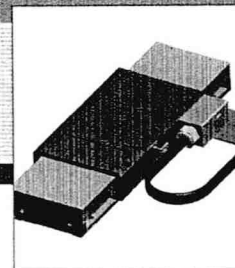
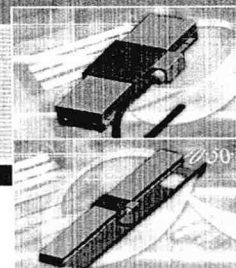
Maßskizze

- Kompakter Linear-Rotations-Actuator mit geringer Masse (ca. 1.100 g)
- Linearer Direktantrieb mit Voice Coil-Motor
- Kraftgeregelte Bewegung - Absetzkräfte von 0,1 - 5,0 N
- Eigenbeschleunigung bis zu 50 m/s<sup>2</sup> möglich
- Hub ≤ 25 mm, Drehung ≤ 300°
- Geschwindigkeit Hubbewegung > 1 m/s möglich
- für sehr schnelle und präzise Pick and Place-Aufgaben
- Präzisionsmontage mit Orientierung kleinster Bauteile, bis ca. 20 g

### ■ Modularer Baukasten: Präzisions-Linear-Achsen



X-Y-System mit  
4-Hub-Dreh-Systemen



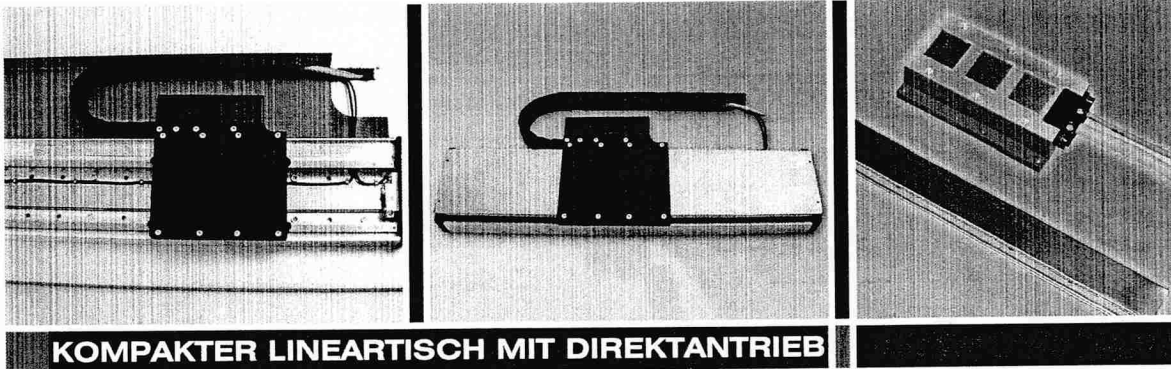
Beispiele Baukasten

- Zwei Breitenvarianten (160 bzw. 195 mm breit, 65 mm hoch)
- Jeweils zwei Längenvarianten der Schlitten (160 mm bzw. 260 mm) -> das ergibt Motorspitzenkräfte von ca. 150 - 600 N
- Vorzugslängienstufungen von 440 bis 1.200 mm im Raster von 190 mm
- Kugelumlauf Führungen (2 Größen angepasst an die Breitenvarianten)
- Optisches inkrementelles Messsystem bis 50 nm Auflösung
- Geschwindigkeit bis 3 m/s

## Umschalten auf Vorsprung.



**SUHL AG**  
*direct drive systems*



**KOMPAKTER LINEARTISCH MIT DIREKTANTRIEB**

### Baureihe LSM-T-24

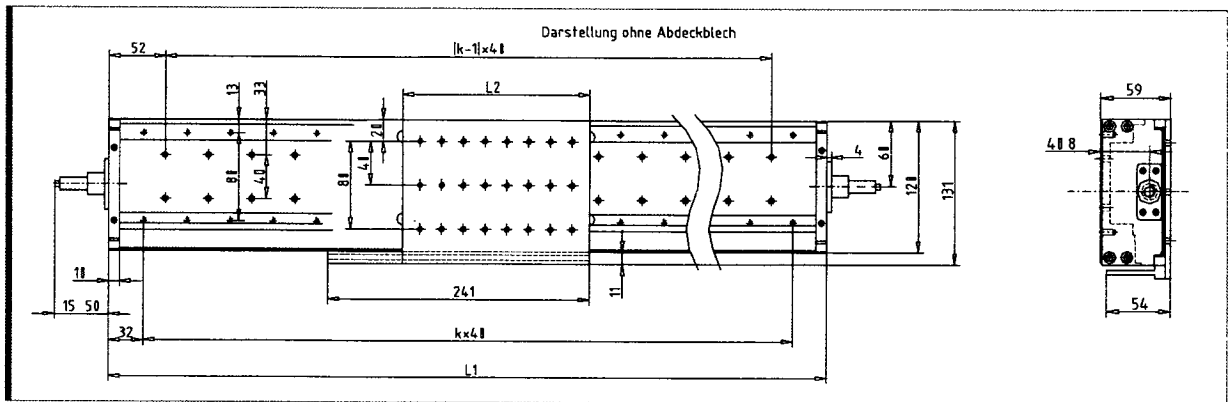
#### ■ Systemvorteile

- sehr hohe Dynamik und Regelsteifigkeit durch den Einsatz von Linearmotoren
- zwei Primärteile (Läufer) auf einem Sekundärteil platzierbar
- keine mechanischen Kraftübertragungsglieder notwendig
- kompakte, flache Bauform
- praktische Wartungsfreiheit (außer den Führungen gibt es keine Verschleißteile)
- durchgehende Metallabdeckung ohne zusätzliche Reibung
- integrierte Endlagenschalter und Index
- verschiedene Genauigkeitsklassen bezüglich Positionierung verfügbar
- Geschwindigkeit bis max. 3 m/s
- Beschleunigung bis max. 50 m/s<sup>2</sup>
- L-A-T SUHL AG liefert Einzelachsen oder komplette Achssysteme mit anwendungsspezifischen Steuerungssystemen.

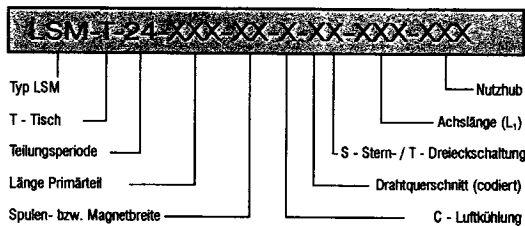
#### ■ Anwendungen

- Anwendungen finden Sie überall, in denen präzise und dynamische Positionierung gefragt ist, so z.B.
- in der Laserfeinbearbeitung
  - bei Präzisions-Handling-systemen
  - Portalanwendungen
  - Bestückungsautomaten
  - automatische Prüfeinrichtungen
  - in der Messtechnik

Ein Unternehmen  
der INA-Gruppe



## ■ Typenschlüssel



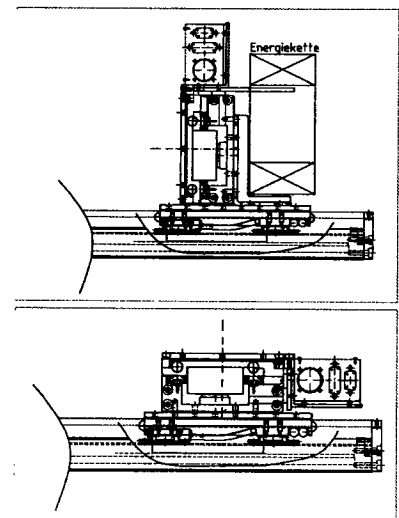
Detaillierte technische Unterlagen zur LSM-P-24-Motorenserie und zum Messsystem auf Anfrage.

## ■ Technische Daten

Achsstyp	Achslänge L1	Nutzhub	Spitzenkraft	Dauerkraft	Überstandsmaß Stoßdämpfer	k
[siehe Typenschlüssel]	[mm]	[mm]	[N]	[N]	[mm]	
LSM-T-24-110-25-C-XX-304-80	304	80	162	61	172	6
LSM-T-24-110-25-C-XX-544-320	544	320	162	61	172	12
LSM-T-24-110-25-C-XX-784-560	784	560	162	61	172	18
LSM-T-24-110-25-C-XX-1024-800	1024	800	162	61	172	24
LSM-T-24-206-25-C-XX-544-225	544	225	323	115	268	12
LSM-T-24-206-25-C-XX-784-465	784	465	323	115	268	18
LSM-T-24-206-25-C-XX-1024-705	1024	705	323	115	268	24

## ■ Optionen

- Stern- oder Dreieckschaltung
- Anschluss an übergeordnete Steuerung oder autark mit eigenem Controller
- Positionierung über optisches Messsystem mit dynamischer Offset- und Amplitudenregelung; Auflösung bis 50 nm, in Genauigkeitsklassen 3, 2, 1  $\mu\text{m}$ ; Wiederholgenauigkeit  $<< 1 \mu\text{m}$
- Befestigung der Achse wahlweise von oben über Rasterdurchgangsbohrungen M5 oder von unten über Gewinde M5 im Abstand 40 mm
- Schlittenplatten mit oder ohne Rasterbohrungen M5 für Applikation
- fertige Konstruktionselemente für X-Y-Systeme, auch in senkrechter Einbaulage (siehe nebenstehende Zeichnungen)
- Stoßdämpfer oder integrierte Anschläge aus Dämpfungsmaterial



Stand: September 2003 | Änderungen im Sinne des technischen Fortschrittes vorbehalten ohne Vorankündigung.



**Forschungsverbundprojekt  
„Entwurf und Modellierung von Antriebssystemen  
für die Mikrosystemtechnik“**

**MODAN**

**www.modan.org**

*16SV 1554*

**Abschlußbericht des Teilprojektes  
„Entwicklung modular aufgebauter  
elektrodynamischer Präzisionsdirektantriebe“  
der IMMS gGmbH**

Verbund-Nr.: V2285  
Fördermittelgeber: BMBF  
Projekträger: VDI/VDE-IT Teltow  
Betreuer: Dipl. - Ing. Chr. Breckenfelder / Dipl. - Ing. S. Krüger



## Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellungen.....	3
1.1	Aufgabenstellung.....	3
1.2	Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens.....	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	3
1.4	Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand .....	4
1.4.1	Für das Vorhabens genutzte bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte.....	4
1.4.2	Verwendete Fachliteratur, genutzte Informations- und Dokumentationsdienste .....	4
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	5
2	Eingehende Darstellungen .....	6
2.1	Projektdurchführung .....	7
2.1.1	Elektrodynamischer Planarantrieb PMS 100-3.....	7
2.1.2	Elektrodynamischer Linearantrieb LMS 20 .....	8
2.1.3	Arbeitsgruppenübergreifende Entwicklungen.....	9
2.2	Erzielte Ergebnisse.....	10
2.2.1	Elektrodynamischer Planarantrieb PMS 100-3.....	10
2.2.2	Elektrodynamischer Linearantrieb LMS 20.....	12
2.2.3	Simulation von Baugruppen und erstellen von Systemmodellen.....	13
2.3	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen.....	15
2.4	Bekanntgewordene Fortschritte bei anderen Stellen.....	15
2.5	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse .....	15
3	Fortschreibung des Verwertungsplans.....	17

Anlage 1:

Anlage 2:

Anlage 3:

## **1 Kurzdarstellungen**

### **1.1 Aufgabenstellung**

Die Aufgaben der IMMS gGmbH bezogen sich auf zwei Teilgebiete, einerseits der Entwicklung speziell angepasster modularer Antriebssysteme und andererseits der Validierung entwurfsunterstützenden Tools bzw. Simulationssoftware, der Definition von Anforderungen für die Weiterentwicklung und der Erstellung von Modellen zur Überprüfung der Weiterentwicklungsergebnisse. Im Rahmen der Projektbearbeitung wurden folgende Schwerpunkte bearbeitet:

- Entwicklung von elektrodynamischen Direktantrieben, die den Anforderungen der Partner entsprechen
  - planarer elektrodynamischer Direktantrieb PMS 100-3
  - linearer elektrodynamischer Direktantrieb LMS 20
- Unterstützung der Entwicklung von Antriebskomponenten und einem Mehrkoordinatenantriebssystem der IDAM GmbH
- Arbeitsgruppenübergreifende Entwicklungen
  - Erarbeiten von Anforderungen an die entwurfsunterstützenden Tools bzw. die Simulationssoftware
  - Erstellung der Komponenten- und Systemmodellen für die Validierung der entwurfsunterstützenden bzw. Simulations- und Optimierungstools (SESAM, ITI - SimulationX)
  - Vergleich der Entwurfs-, Simulations- und Optimierungsergebnisse mit den herkömmlichen Verfahren und den realen Antrieben.

### **1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens**

Die IMMS gGmbH besitzt langjährige Erfahrung auf dem Gebiet der Mikroelektronik, des System Designs elektronischer Komponenten und Systeme, der industriellen Elektronik und Messtechnik sowie der Mechatronik. In interdisziplinärer Zusammenarbeit entstehen im Rahmen der F&E - Tätigkeit der IMMS gGmbH auf der Basis von Modellierung und Simulation komplexe mechatronische Systeme. Die angewandten Modellierungs- und Simulationstools sind die aus dem Mikroelektronikdesign bekannten, sowie universell einsetzbare, wie MatLab / Simulink und ANSYS. Die langjährigen Erfahrungen im Entwurf komplexer mechatronischer Systeme in gemeinsamen F&E - Projekten mit unterschiedlichen Industriepartnern bildeten die Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens.

### **1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Die im Projektantrag erfolgte Definition von Teilaufgaben und Zwischenzielen wurden zu Projektbeginn und je nach Projektfortschritt präzisiert und in den detaillierten Arbeitsplänen festgehalten, die die Grundlage für die Projektbearbeitung waren. Die Arbeitspläne beinhalteten auch die Koordinierung der Arbeiten mit den Projektpartnern. So konnten die in Pkt. 2.1 genannten Schwerpunkte vollständig bearbeitet werden.

## 1.4 Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand

### 1.4.1 Für das Vorhabens genutzte bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte

Voraussetzung für die Entwicklungen der elektrodynamischen Direktantriebe im Rahmen des Projektes waren Vorarbeiten, die durch die IMMS gGmbH und die TU Ilmenau im Rahmen der Grundlagenforschung vor Projektbeginn realisiert wurden. Die wesentlichen Komponenten der Direktantriebe sind durch die IMMS gGmbH und die TU Ilmenau patentrechtlich geschützt.

Es kamen bekannte Simulationsverfahren zur Anwendung, die insbesondere auf den verwendeten Tools beruhen. Diese sind u.a.:

- ANSYS
- Matlab / Simulink
- SimulationX
- SESAM.

Außerdem wurden mathematische Grundverfahren (z.B. Approximationsverfahren, statistische Verfahren, Verfahren der Ordnungsreduktion), diverse Programmiersprachen (C, C++, ...), diverse Messverfahren (z.B. Laserinterferometrie) u.a. angewendet.

### 1.4.2 Verwendete Fachliteratur, genutzte Informations- und Dokumentationsdienste

Neben zahlreicher Fachliteratur, siehe unten, wurde das PATON, Patentinformationszentrum und Online-Dienste, der TU Ilmenau für Literatur- und Patentrecherchen in Anspruch genommen.

- [1] Achanta, S.; Celis, J.-P.; Mollenhauer, O.; Spiller, F.: A new tool for industrial tribology filling the gap between macro and nanotribology. 14<sup>th</sup> International Colloquium Tribology, Esslingen, 13-15 January, 2003
- [2] ANSYS Theory Reference, 8. Edition, SAS IP, 1997.
- [3] VDI-Richtlinien 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, VDI, 2004
- [4] Fischer, W.-J. (Hrg.): Mikrosystemtechnik. Vogel, Würzburg 2000
- [5] Bertram, T., J. Gausemeier, C. Germer, C. Jung, E. Kallenbach, F. Kallmeyer, S. Möhringer, O. Oberschelp, U. Oldendorf, D. Reiners, J. Seuss, J. Wulf und F. Zohm. Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI-Richtlinie 2206. Düsseldorf: VDI.
- [6] Kasper, M.: Mikrosystementwurf - Entwurf und Simulation von Mikrosystemen. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2000
- [7] Scherge, M.; Mollenhauer, O.: Nanoritzversuche mittels Mikrotribometer. GFT - Tagung, Göttingen, 2001
- [8] Völklein, F.; Zetterer, T.: Einführung in die Mikrosystemtechnik. Vieweg, Braunschweig 2000
- [9] Kallenbach, E.; Bögelsack, G.: Gerätetechnische Antriebe. Carl Hanser Verlag München Wien 1991
- [10] SESAM: Dokumentation, Technischer Universität Ilmenau 2003
- [11] SimulationX: Dokumentation und Bedienungsanleitung, ITI GmbH

- 
- [12] Heinrich Krahn, Dieter Eh, Thomas Lauterbach: 1000 Konstruktionsbeispiele für die Praxis. Hanser Verlag, 2005
  - [13] Roddeck: Einführung in die Mechatronik. Teubner Verlag, 2002
  - [14] Müller, Groth: FEM für Praktiker. Expert Verlag, 1997
  - [15] Groth: FEM für Praktiker - Temperaturfelder Expert Verlag, 2001
  - [16] Jung: Genaue Maschinen, Geräte und Anlagen. Expert Verlag, 1992
  - [17] Biran, Breiner: Matlab für Ingenieure. ADDISON-WESLEY Verlag, 1997
  - [18] Hoffmann: MATLAB und Simulink. ADDISON-WESLEY Verlag, 1997
  - [19] W. John, H. Luft, W. Groß: Methoden und Werkzeuge zum Entwurf von Mikrosystemen. 8. GMM - Workshop
  - [20] Trumbold, Beck, Richter: Toleranzsysteme und Toleranzdesign. Hanser Verlag, 1996

### **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die Zusammenarbeit erfolgte im Rahmen der Demonstratorentwicklung im wesentlichen mit den Projektpartnern TETRA GmbH, LLT GmbH und der IDAM GmbH sowie im Rahmen der Simulationstoolentwicklung mit der ITI GmbH und der TU Ilmenau.

## 2 Eingehende Darstellungen

Die Antriebstechnik stellt ein interdisziplinäres Teilgebiet dar, dessen Innovationskraft wesentlich durch die enge Wechselwirkung verschiedener Fachgebiete, z.B. dem Maschinen- und Anlagenbau, der Elektrotechnik und Automatisierungstechnik, der Mikroelektronik, der Systemtechnik und Informatik, bestimmt wird. Der konventionelle Entwurf von Antriebskomponenten erfolgte bislang weitgehend so, dass existierende technische Lösungen an die jeweiligen neuen Aufgaben angepasst wurden. Die zunehmende Komplexität der Antriebssysteme und die ständig steigenden Anforderungen an die Positioniergeschwindigkeit, die Genauigkeit (Positioniergenauigkeit, Bahngenauigkeit), das statische und dynamische Verhalten sowie an den Energieverbrauch und Bauraum sind mit traditionellen, weitgehend noch ohne CAD-Werkzeuge auskommenden Entwurfsmethoden praktisch nicht mehr sicher beherrschbar.

Als Lösung für die kostengünstige und wirtschaftliche Entwicklung und Herstellung von Antrieben für die Mikrotechnik wird die Modularisierung der Systeme angesehen. Das Modul-konzept vereinfacht die Entwicklung anwendungsspezifischer komplexer Systeme erheblich. Der Zugriff auf standardisierte Baukastenkomponenten, die in höheren Stückzahlen gefertigt werden können, verringert die Herstellungskosten und die Produktstückkosten beträchtlich.

Neben der Modularisierung ist ein besonderes Augenmerk auf spezielle Fertigungsanlagen und -einrichtungen für Mikrosysteme und vor allem auf die Verbesserung der Entwurfsunterstützung zu lenken. Dabei sind die Fertigungseinrichtungen selbst als komplexe Systeme zu betrachten, in welche Verfahrenstechnik, Gerätetechnik, Produktionstechnik, Fertigungsmanagement etc. mit einfließen. Systemmodellierung und -simulation als Methoden der Entwurfsunterstützung sind unverzichtbarer Bestandteil der anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Antriebstechnik sowie der kundenspezifischen Entwicklung modular aufgebauter Antriebssysteme. Vielfach ist aufgrund der Komplexität und Heterogenität der zu entwerfenden Systeme und Anlagen ein optimal arbeitendes System nur noch mit einem sehr hohen Modellierungs- und Simulationsaufwand zu realisieren, der nur durch die Bereitstellung wiederverwendbarer Modelle auf ein akzeptables Maß reduziert werden kann.

### **Ziele des Verbundvorhabens MODAN waren:**

- die Entwicklung (Modellierung, Entwurf, Aufbau und Test) von applikationsspezifischen Direktantrieben für die Fertigung mikro-elektro-mechanischer Systeme (MEMS) und die Laserfertigung
- Evaluierung, Weiterentwicklung und Optimierung der Entwurfs-, Simulations- und Modellierungstools entsprechend der Anforderungen der geplanten Antriebs- und Systementwicklungen.

Das Teilprojekt konzentrierte sich auf die Entwicklung konkreter Antriebslösungen für Fertigungs- und Messeinrichtungen für die Mikrosystemtechnik, da hochpräzise und energetisch günstig ausgelegte Antriebs- und Positioniersysteme mit den notwendigen Eigenschaften nicht zur Verfügung standen.

Für die Durchführung des Projektes wurden folgende Meilensteine definiert und realisiert:

- M1 Spezifizierung: Aufgabenstellung für die Demonstratoren der Antriebe; Definition der Anforderungen an die Entwurfssoftware

- M2 Evaluierung: Softwaretools, Ableitung der Anforderungen für die Weiterentwicklung der Tools
- M3 Entwicklung der verschiedenen Demonstratoren der Antriebssysteme und Weiterentwicklung der Softwaretools für Modellierung / Simulation / Optimierung der Demonstratoren
- M3 Aufbau und Erprobung der Demonstratoren der Antriebssysteme und der neu entwickelten Softwaretools (einschließlich Bereitstellung der verfeinerten Modelle für die Entwurfsoptimierung, Modellbibliotheken, Variantenuntersuchung für die Demonstratoren)
- M4 Dokumentation
- M5 nach Projektabschluss: Vorbereitung der Vermarktung der Entwurfstools und Weiterentwicklung der mechatronischen Antriebe bis zur Marktreife.

## 2.1 Projektdurchführung

Nach der Spezifizierung der Aufgabenstellungen für die Demonstratoren der Antriebssysteme erfolgte die Definition der Anforderungen an die Entwurfssoftware und eine erste Evaluierung der Softwaretools SimulationX und SESAM. Parallel zu letzterem Punkt begann die Entwicklung der Demonstratoren.

### 2.1.1 Elektrodynamischer Planarantrieb PMS 100-3

Im Rahmen der Entwicklung des Demonstrators PMS 100-3, einem planaren elektrodynamischen Direktantrieb, wurden folgende Arbeitsschritte absolviert:

- Definition der Anforderungen an das elektrodynamische Direktantriebssystem PMS 100-3
- Erarbeitung der Lasten- und Pflichtenhefte
- Konzeption der Mechanikhardware (Antriebsbaugruppen, Sensorik, Messtechnik, Führungen, Lagerungen, Gehäuse, Gestelle, Schwingungsdämpfung, periphere Systemtechnik)
- Konzeption der Software (Steuerung und Regelung, Lageregelung, Online-Bahnkorrektur, Einzel- und Gesamtsystemsteuerung, Bedieneroberfläche)
- Konzeption der Elektronikhardware (Steuerung, Leistungselektronik, Bussystem)

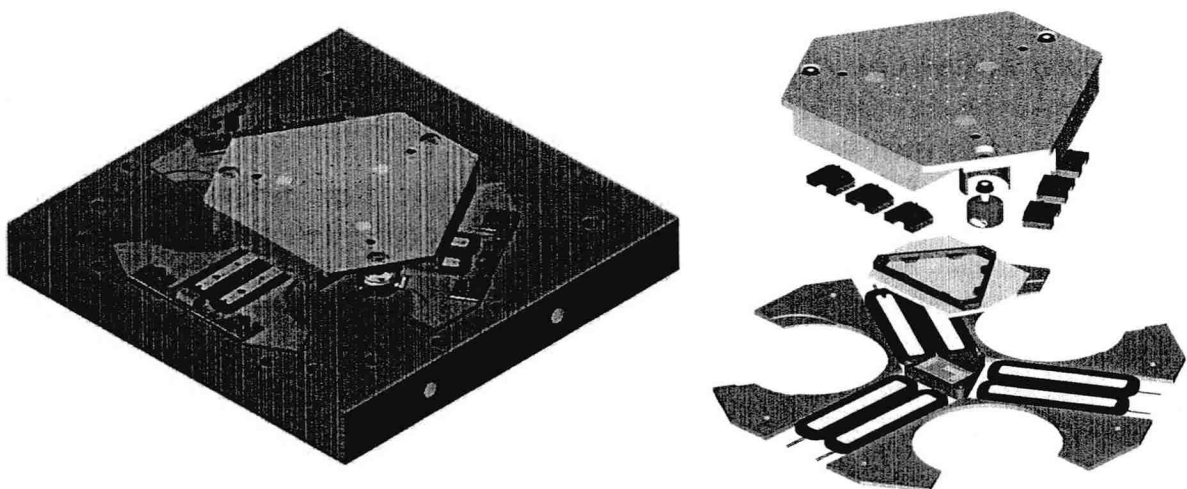


Abb. 1: Elektrodynamischer x - y -  $\Delta\phi$  - Planarantrieb PMS 100 - 3, CAD - Modell

- Konstruktion (Mechanik), siehe Abb. 1, Hardwaredesign (Elektronik) und Zusammenstellung der kompletten Fertigungsdokumentation
- FEM - Simulation und Optimierung des statischen, dynamischen bzw. thermischen Verhaltens für kritische Einzelteile und Baugruppen
- Entwurf und Implementierung des Steuerungskonzeptes
- Fertigung, Bauteilbeschaffung, Aufbau und Inbetriebnahme der Hauptkomponenten (Mechanik, Elektronik), Softwareprogrammierung
- Aufbau, Inbetriebnahme, Test und Erprobung des kompletten Demonstrationssystems unter realen Einsatzbedingungen
- Vergleich der Parameter mit dem Pflichtenheft und Definition der Anforderungen für die Weiterentwicklung
- Beschreibung des Demonstrationsantriebssystems und dessen Systemverhaltens für Modellierung und Simulation
- Anfertigen der vollständigen Gerätedokumentation.

Im folgenden wurden zahlreiche Optimierungen hinsichtlich des Erreichens einer höheren Positioniergenauigkeit und Geschwindigkeitskonstanz durchgeführt. Dazu gehörten u.a. die Vermessung der Maßverkörperung, Abb. 3, zur Erzeugung einer Bahnkorrekturtablette sowie Regleroptimierungen, die insgesamt zu einer wesentlichen Verbesserung der Bahn- und Positioniergenauigkeit führten.

### 2.1.2 Elektrodynamischer Linearantrieb LMS 20

Im Rahmen der Entwicklung des Demonstrators LMS 20, einem linearen elektrodynamischen Direktantrieb, wurden folgende Arbeitsschritte absolviert:

- Definition der Anforderungen an das elektrodynamische Direktantriebssystem LMS 20

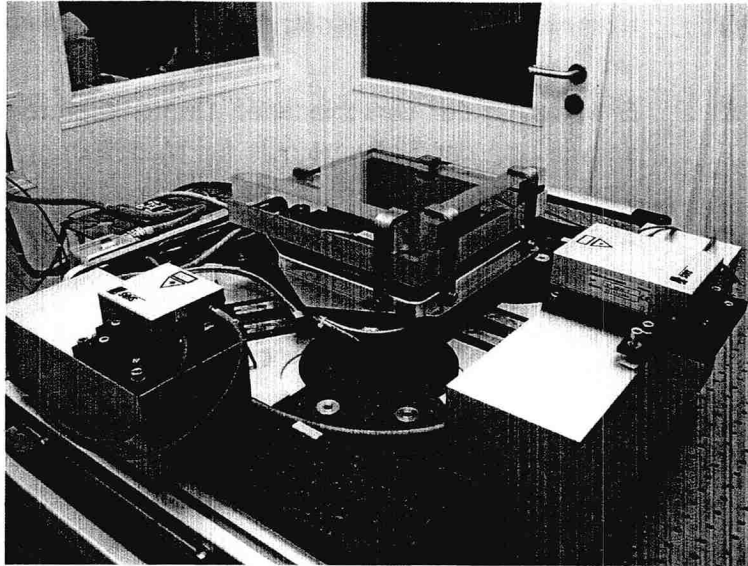


Abb. 2: Versuchsaufbau zur Vermessung der Maßverkörperung des PMS 100 - 3 mittels laserinterferometer

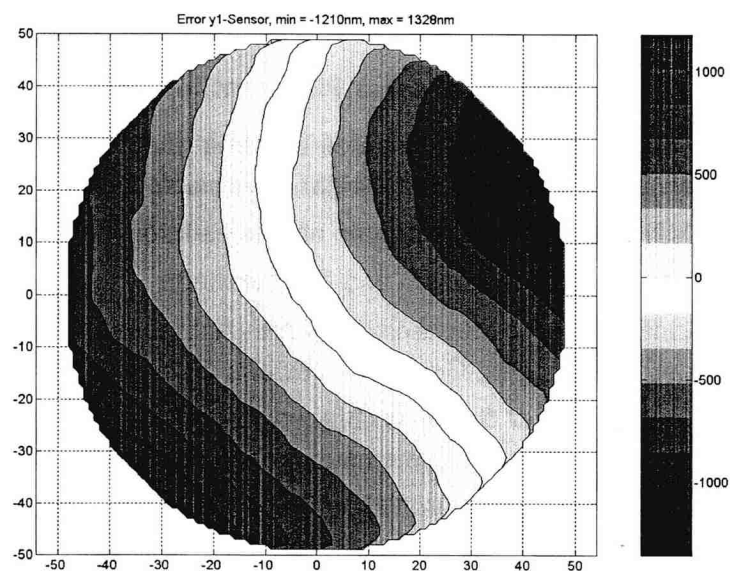


Abb. 3: Abweichung der Messergebnisse zwischen Messsystem des PMS 100-3 und der Vergleichsmessung mit Laserinterferometern

- Erarbeitung des Lasten- und Pflichtenheftes
- Gesamtkonzeption und konstruktiver Gesamtentwurf des Demonstrators
- Konzeption der Mechanikhardware (Antriebsbaugruppen, Sensorik, Messtechnik, Führungen, Gehäuse, periphere Systemtechnik)
- Konzeption der Software (Steuerung und Regelung, Lageregelung, Bedienoberfläche)
- Konzeption der Elektronikhardware (Steuerung, Leistungselektronik, Bussystem)
- Konstruktion (Mechanik), siehe Abb. 4, Hardwaredesign (Elektronik) und Zusammenstellung der kompletten Fertigungsdokumentation
- Fertigung, Bauteilbeschaffung, Aufbau und Inbetriebnahme der Hauptkomponenten (Mechanik, Elektronik), Softwareprogrammierung, siehe Abb. 5
- Test und Erprobung unter realen Einsatzbedingungen
- Vergleich der Parameter mit dem Pflichtenheft und Definition der Anforderungen für die Weiterentwicklung
- Re-Design, Entwicklung und Aufbau des zweiten Demonstrators des LMS 20
- Durchführung umfangreicher Tests mit beiden Versionen des LMS 20, siehe Abschnitt 2.2.2
- Beschreibung des Demonstrationsantriebssystems und dessen Systemverhaltens für Modellierung und Simulation
- Anfertigen der vollständigen Gerätedokumentation.

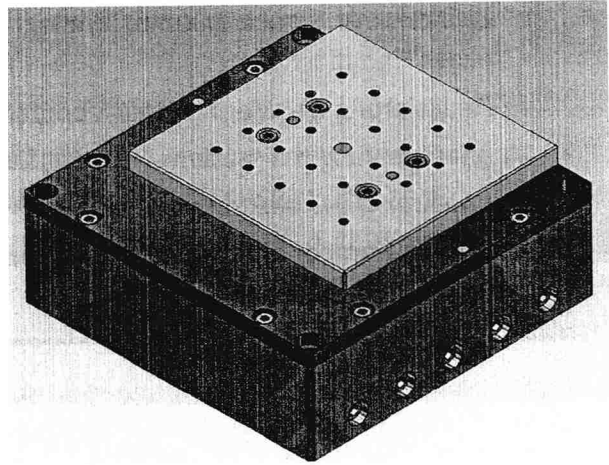


Abb. 4: CAD-Modell des LMS 20

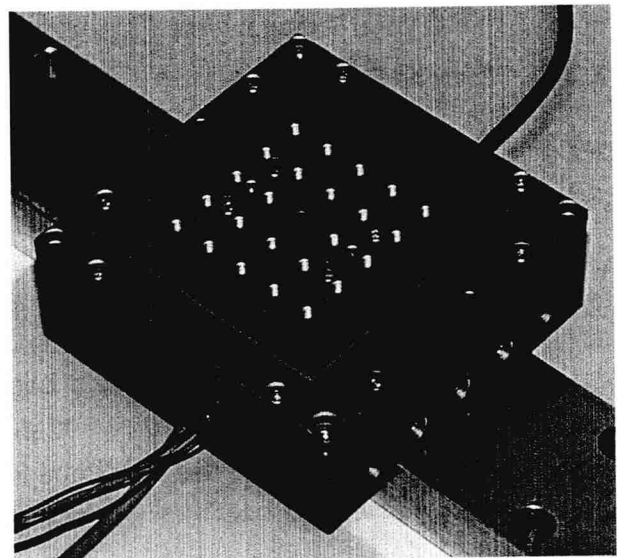


Abb. 5: Erste Version des Demonstrators des LMS 20

### 2.1.3 Arbeitsgruppenübergreifende Entwicklungen

Im Rahmen der Zusammenarbeit mit den anderen Partnern, insbesondere hinsichtlich der Evaluierung und der Weiterentwicklung der Simulationsverfahren und Tools wurden eine Reihe weiterer Arbeiten durchgeführt. Dies sind u.a.:

- projektbegleitende Literatur- und Patentrecherchen
- Erarbeiten von Aufgabenstellungen für die Weiterentwicklung der Simulationssoftware ITI - SimulationX
  - magnetisch gelagerte Welle: nicht mit Sesam realisierbar



- Zylindrische Eisenelemente (Welle); daraus resultierend Luftspalte mit zylinderförmiger Randfläche
- Realisierung der Magnetkreis-Vorspannung durch Permanentmagnete
- Magnetkupplung mit großem Luftspalt für den UHV - Einsatz
- Magnetkreise der elektrodynamischen Direktantriebe
- Erstellen der Komponenten- und Systemmodelle für die Simulation und Optimierung der Baugruppen und Systeme
- Test der Modelle mit dem Simulationsprogramm SimulationX der Fa. ITI GmbH
- FEM - Simulation und Optimierung des statischen, dynamischen bzw. thermischen Verhaltens für kritische Einzelteile und Baugruppen
- Überprüfen der Arbeitsweise der Simulationsprogrammsysteme und Zusammenstellung von weiteren Anforderungen an die Simulations- und Optimierungssoftware bzw. von Änderungswünschen.

## 2.2 Erzielte Ergebnisse

### 2.2.1 Elektrodynamischer Planarantrieb PMS 100-3

Der Krafterzeugung im Motor erfolgt durch Integration von drei rotationssymmetrisch angeordnete linearen Direktantrieben in einem luftgeführten Läufer. Daraus resultiert ein planares Antriebssystem für die Koordinaten  $x$ ,  $y$ ,  $\varphi_z$  mit höchster Struktursteifigkeit und exzellentem dynamischen Verhalten insbesondere bei Bahnverfolgungen. Das Motorkonzept vermeidet sowohl mechanische Führungs- und Lagerelemente als auch elektrische Zuleitungen zum Aktorelement und ist absolut spiel- und wartungsfrei.

Ein im Aktor unmittelbar unter der Objektebene angeordneter Flächenmassstab wird von drei Sensoren abgetastet und bestimmt die Relativlage der Achsen und die Genauigkeit in den Achsen.

Die Steuerung erfolgt vollsynchron mittels eines leistungsfähigen DSP - Systems und erlaubt damit eine mikrometergenaue Bewegung des Planarläufers bei hohen Bahngeschwindigkeiten. Durch ein integriertes look - ahead - System sind Bewegungen entlang einer Bahnkurve mit hoher Gleichmäßigkeit der Verfahrgeschwindigkeit möglich. Eine schleppfehlerfreie Bewegungsführung wird durch Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvorsteuerung erreicht. Für eine optimale Bewegungsführung beim Anfahren und an Ecken minimiert eine Ruckbegrenzung ein Schwingen der Maschine. Die Steuerung verarbeitet sowohl G - Code (DIN 66025) als auch HPGL - Code und ist unter WindowsNT bzw. Windows2000 lauffähig.

Die umfangreichen Tests mit dem PMS 100-3 ergaben Positi-

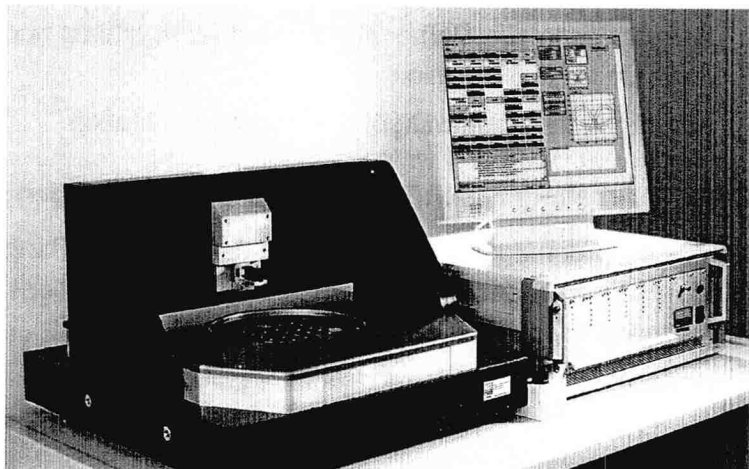


Abb. 6: PMS 100 - 3, Beispielapplikation aus der Oberflächenmesstechnik

oniergenauigkeiten von  $1\mu\text{m}$  und besser. Zur weiteren Verbesserung wurden Optimierungen in den Regleralgorithmen, Filtern u.ä. vorgenommen. Im Ergebnis konnten hervorragende Ergebnisse, z.B. beim Fahren von Kreisen mit einem Durchmesser von  $1\mu\text{m}$  bei einer Verfahrgeschwindigkeit von  $6,3\mu\text{m/s}$ , hinsichtlich Genauigkeit und Rundheit erreicht werden, siehe Abb. 7.

Auch die Realisierung kleinster Positionierschritte, z.B. von  $10\text{nm}$ , sind möglich, siehe auch Abb. 9.

Als Beispielapplikationen wären zu nennen:

- Oberflächeninspektion
- Messsysteme mit optischer und mechanischer Antastung
- tribologische und rheologische Untersuchungen von Materialpaarungen
- Mikromontagesysteme
- Waferinspektion und -bearbeitung
- schnelle Laserschneid- und -graversysteme mit höchster Genauigkeit

Mit der Realisierung des planaren elektrodynamischen Direktantriebs PMS 100 - 3 konnten folgende technische Parameter erreicht werden:

- Bewegungsbereich:  $\varnothing 100\text{ mm}$
- Drehwinkel:  $\varphi_z = \pm 0,5^\circ$
- Bewegungsgeschwindigkeit:  $0,5 \dots 200\text{ mm/s}$
- max. Beschleunigung:  $2\text{ m/s}^2$
- Positioniergenauigkeit:  $1\mu\text{m}$
- Wiederholgenauigkeit:  $200\text{nm}$

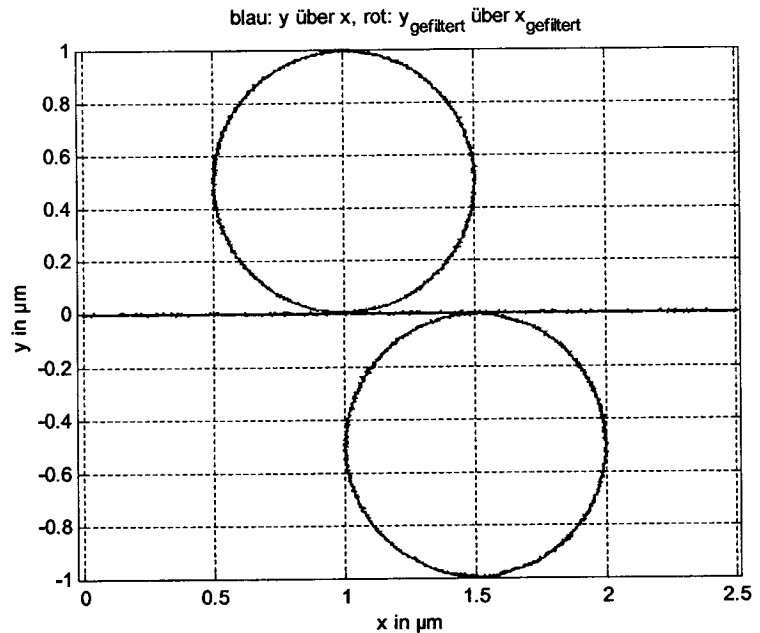


Abb. 7: Kreisfahrt mit einem Durchmesser von  $1\mu\text{m}$  und einer Geschwindigkeit von  $6,3\mu\text{m/s}$

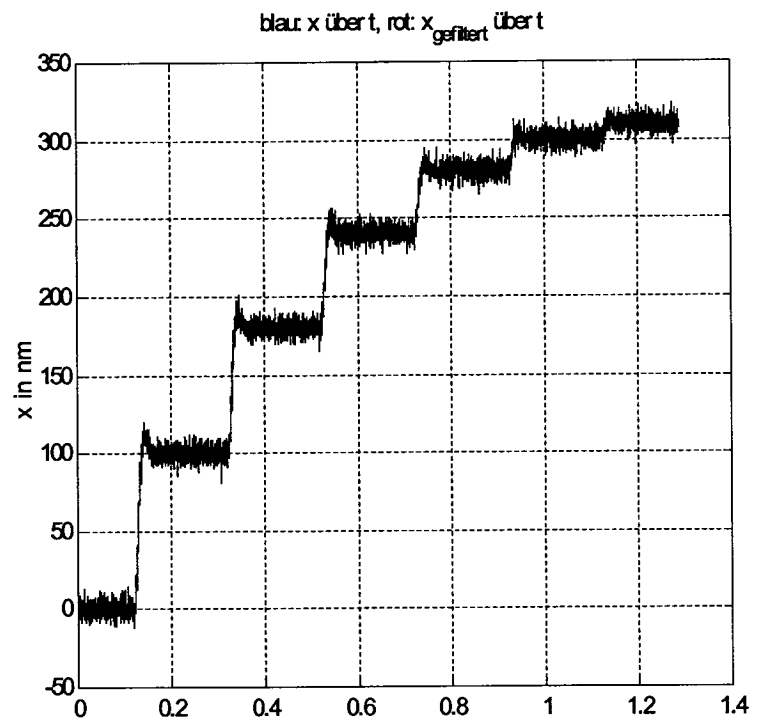


Abb. 9: Positionierung in Schritten von  $100\text{nm}$ ,  $80\text{nm}$ ,  $60\text{nm}$ ,  $40\text{nm}$ ,  $20\text{nm}$ ,  $10\text{nm}$

- Antriebskraft: 29N
- Normalkraft: 70N
- Nutzlast: 5kg
- Bauraum L x B x H: 600 x 600 x 220
- Programmzeilen G-Kode: unbegrenzt
- reinraumkompatibel

### 2.2.2 Elektrodynamischer Linearantrieb LMS 20

Der LMS 20, siehe Abb. 10, ist ein nach dem elektrodynamischen arbeitender Linearmotor. Seine ausgezeichneten Eigenschaften begründen sich auf dem einfachen Aufbau, den hochpräzisen Führungen und dem Motorprinzip mit bewegten Magneten, die elektrische Zuleitungen zum Aktor überflüssig machen.

Fotoelektrische Sensoren werden mit einem am Aktor angebrachten linearen inkrementalen Maßband zu einem Messsystem kombiniert. Dieses liefert, ausgehend von einer Referenzmarke, neben Relativwegen auch absolute Messergebnisse. Endlagenab-tastung und Anschläge komplettieren das System.

Aufgrund der Genauigkeit und Präzision wird der LMS 20 wie ein kommutierter Servomotor betrieben. Die kompakte, von der TETRA GmbH entwickelte, Steuerung liest über einen digitalen Encodereingang die momentane Position ein und berechnet die kommutierten Spulenströme. Die Endstufen werden dann entsprechend über einen PWM - Ausgang angesteuert.

Der LMS 20 wurde für die Positionierung von kleinen Proben, z.B. in Oberflächenmessgeräten, entwickelt und besitzt folgende Eigenschaften:

- Fahrbereich  $x = 20 \text{ mm}$
- Genauigkeit  $x = 1 \text{ }\mu\text{m}$
- Auflösung  $x = 50 \text{ nm}$
- Blockierkraft  $F_x = 2 \text{ N}$
- Beschleunigung  $a_x = 5 \text{ m/s}^2$
- Geschwindigkeit  $v_x = 30 \text{ mm/s}$
- Betriebsspannung  $U_B = 12 \text{ V}$
- reinraumkompatibel
- Einbaulage beliebig
- Motor mit kompakter Steuerung
  - Abmaße  $90 \times 90 \times 53,5 \text{ mm}^3$
  - Gewicht  $m = 730 \text{ g}$
  - Anschlussmöglichkeit von links, rechts oder rückseitig

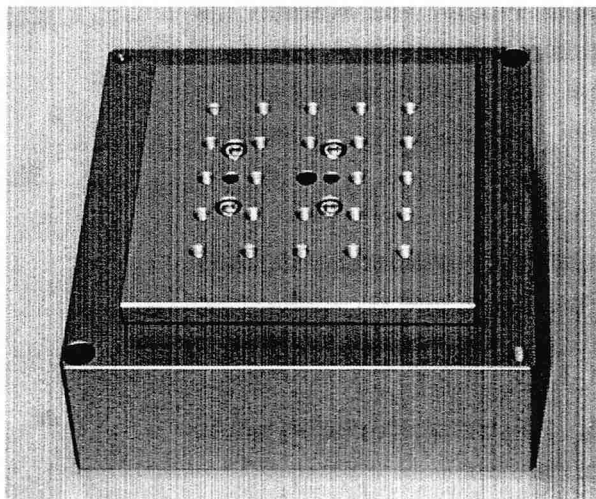


Abb. 10: Zweite Version des Demonstrators des LMS 20

- Kabellänge 150 mm oder ohne Kabel mit Steckverbinder
- Motor mit externer Steuerung
  - Abmaße 90 x 90 x 35 mm<sup>3</sup>
  - Gewicht m = 580 g

### 2.2.3 Simulation von Baugruppen und erstellen von Systemmodellen

Im Zusammenhang mit der Weiterentwicklung der Simulationssoftware SimulationX der Fa. ITI GmbH sowie dem Programm SESAM der TU Ilmenau wurden zunächst Anforderungen aus Sicht der Anwender formuliert, in die auch Erkenntnisse einer ersten Evaluierung einfließen. Daraus konnten Aufgabenstellungen für die Weiterentwicklung abgeleitet werden. Während der Projektbearbeitung entstanden Modelle von Baugruppen mechatronischer Systeme, die den Entwicklern der Tools zur Verfügung gestellt wurden:

- magnetisch gelagerte Welle, bestehend aus
  - zylindrischen Eisenelementen (Welle); daraus resultierend Luftspalte mit zylinderförmiger Randfläche
  - Realisierung der Magnetkreis-Vorspannung durch Permanentmagnete
- Magnetkupplung mit großem Luftspalt für den UHV - Einsatz
- Magnetkreise der elektrodynamischen Direktantriebe.

Die Erstellung der Komponenten- und Systemmodelle erfolgte in enger Zusammenarbeit mit den Simulations- und Optimierungstoolentwicklern.

Der Test der Modelle ergab, dass sich lediglich das Simulationsprogramm SimulationX für die Lösung der Aufgabenstellung der IMMS gGmbH eignet. Ein Vergleich der Modelle aus der FEM - Simulation und Optimierung, z.B. für die statische, dynamische bzw. thermische Verhaltensanalyse, siehe Abb. 11, zeigt die Unterschiede der Modellbildung (siehe hierzu auch den Abschlussbericht der ITI GmbH).

Der Vergleich der Ergebnisse einer ersten FEM - Simulation mit den Simulationsergebnissen von SimulationX, siehe Abb. 12, zeigt bereits eine gute Übereinstimmung, die durch weitere Optimierungen wesentlich verbessert wurde.

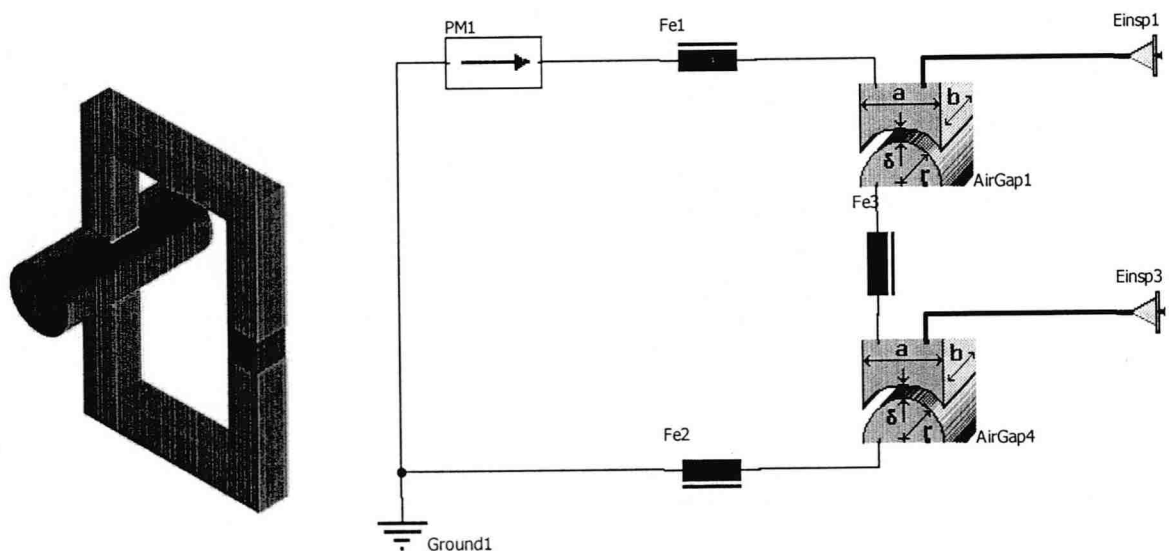


Abb. 11: Vereinfachte Modelle einer magnetisch gelagerten Welle; links: FEM-Modell, rechts: SimulationX-Modell

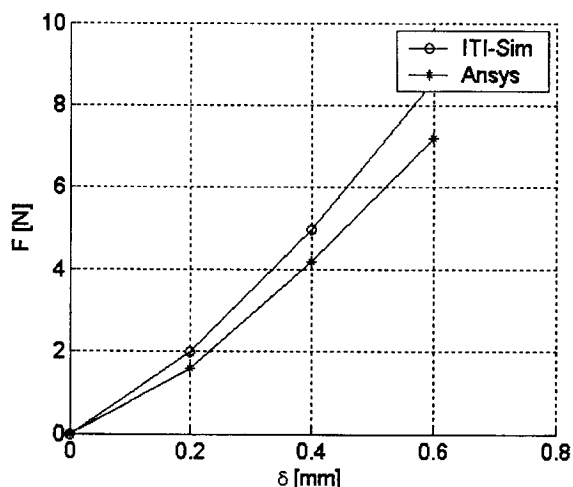


Abb. 12: Vergleich der Simulationsergebnisse der magnetisch gelagerten Welle zwischen ANSYS und SimulationX

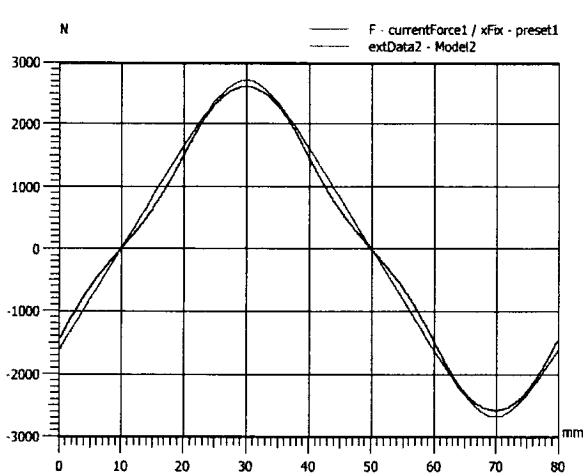


Abb. 13: Vergleich der Simulationsergebnisse eines elektrodynamischen Linearantriebs zwischen ANSYS und SimulationX

Auch die Simulation der Magnetkreise des Planarantriebs PMS 100-3 erbrachte eine sehr gute Übereinstimmung. In Abb. 13 ist ein Vergleich der FEM - Simulation und der SimulationX - Ergebnisse eines eindimensionalen Systems, also eines elektrodynamischen Linearantriebes, und in Abb. 13 die Magnetkreise und das SimulationX - Modell des eindimensionalen Direktantriebes dargestellt.

In die Magnetkreismodelle wurden im zweiten Schritt die Steuerung und Regelung einbezogen. Bis zum Projektende konnte Gesamtmodell des PMS 100-3 erstellt und erfolgreich getestet werden, siehe hierzu auch eine detaillierte Darstellung im Abschlussbericht der ITI GmbH.

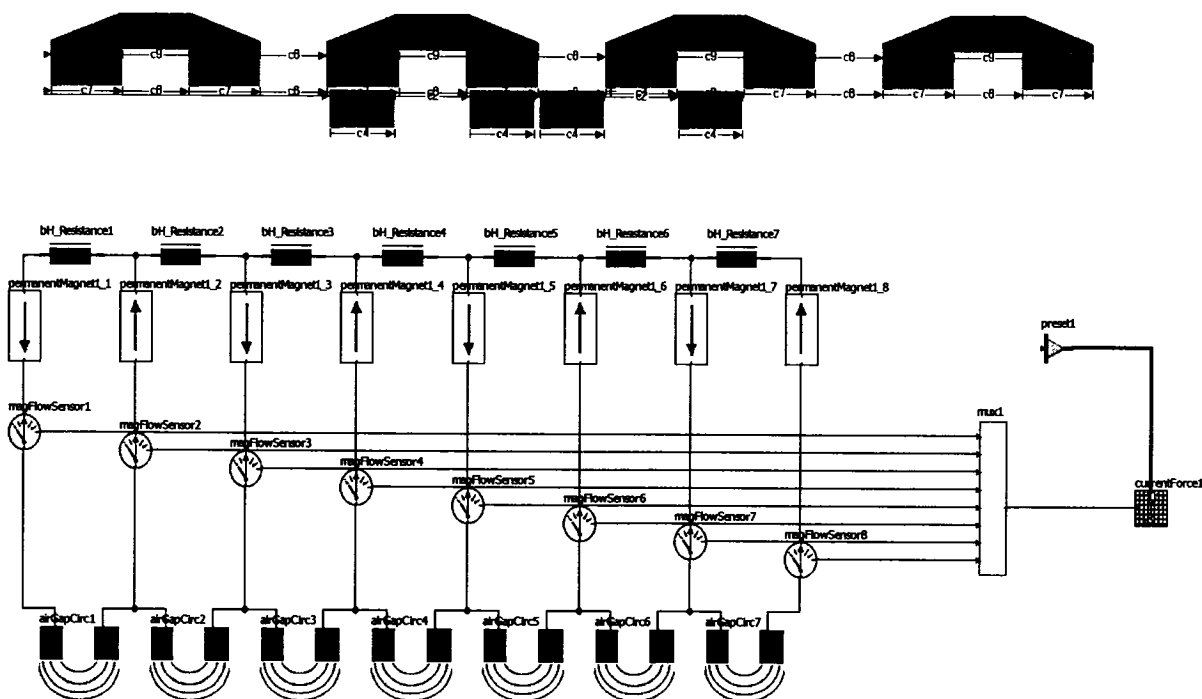


Abb. 14: Magnetkreise (oben) und SimulationX - Modell (unten) des eindimensionalen Direktantriebes

### **2.3 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen**

Im Ergebnis des Projekts entstanden Demonstratoren von elektrodynamischen Linear- und Planarantrieben. Sie sind die Grundlage für gemeinsame Weiterentwicklungen durch die TETRA GmbH und die IMMS gGmbH zu Produkten und deren Vermarktung durch die TETRA GmbH. Zielanwendungsgebiete sind hier die optische und taktile Oberflächenmesstechnik, die Tribologie und Rheologie sowie die Waferinspektion in der Mikroelektronikfertigung.

Die Weiterentwicklung der planaren Direktantriebe für die Laserpräzisionsbearbeitung erfolgt in Kooperation zwischen TETRA GmbH, LLT GmbH und IMMS gGmbH. Die Vermarktung erfolgt hier durch die LLT GmbH, wobei die TETRA GmbH als Hersteller und Lieferant der Planarantriebe fungiert.

Die Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse für die Weiterentwicklung des Programmsystems SimulationX erfolgt durch die ITI GmbH.

Für die IMMS gGmbH bestehen die Projektergebnisse vor allem in einem wesentlichen Wissenszuwachs bei der Entwicklung und Simulation derartiger komplexer mechatronischer Systeme. Das Projekt dient damit auch der Referenz für die Akquisition weiterer F&E-Projekte.

### **2.4 Bekanntgewordene Fortschritte bei anderen Stellen**

Weiterentwicklungen und Tendenzen auf dem Gebiet der Direktantriebe und der Simulationssoftware wurden während der Projektlaufzeit aufmerksam verfolgt. Bei den Simulationstools ist ein Trend hin zu standardisierten und damit herstellerunabhängigen Beschreibungsmitteln erkennbar. Die dabei verwendeten Programmiersprachen, wie VHDL-AMS oder Modelica werden bei anderen Entwicklungen sowohl der IMMS gGmbH als auch der ITI GmbH angewendet.

Im Bereich der ein- und mehrdimensionalen Direktantriebe gibt es zahlreiche Ansätze, deren Industrietauglichkeit z.T. gezeigt wurde, vgl. hierzu IDAM GmbH und LPKF GmbH, die jedoch andere Antriebsprinzipien bzw. Maschinenkonzepte verwenden. Die Entwicklungsergebnisse, die im Rahmen des Projektes erlangt wurden, haben insbesondere hinsichtlich Kompaktheit, hoher Bahn- und Positioniergenauigkeit bei vergleichsweise großen Verfahrbereichen einen großen Fortschritt erbracht. Dies entspricht auch den aktuellen Anforderungen des Marktes und muss nun in Produkte der beteiligten Partner umgesetzt werden

### **2.5 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse**

Erste Projektergebnisse wurden im Rahmen des öffentlichen Statusseminars am 6. Oktober 2004 in Fulda präsentiert, siehe unten. Im Mittelpunkt stand dort die Vorstellung gemeinsam mit der TETRA GmbH entwickelten Demonstratoren PMS 100-3 und LMS 20. Für das laufende Jahr ist eine gemeinsame Veröffentlichung mit der ITI GmbH geplant, die die Ergebnisse der Weiterentwicklung von SimulationX im Zusammenhang mit der Modellierung des Planarantriebs PMS 100 zum Inhalt hat. Im Projektzeitraum gab es folgende projektrelevante Veröffentlichungen:

- Mollenhauer, O; Spiller, F.; Ahmed, I.; Haefke, H.: High Precision Positioning and Measurement Systems for Microtribology. TRIMIS 2003, 01 - 03 June, 2003, Neuchâtel, Switzerland

- Mollenhauer, O.; Spiller, F.; Pause, S.; Rode, D.: Modulare Präzisionsantriebe für MEMS und Laserfertigung. Poster und Vortrag im Rahmen des Statusseminars zum Verbundprojekt "Entwurf und Modellierung von Antriebssystemen für die Mikrosystemtechnik - MODAN"; VDE / VDI - Tagung "Elektrisch - mechanische Antriebssysteme"; 6./7.10.2004; Fulda
- Spiller, F.; Zeike, N.; Katzschmann, M.: Planare und lineare Direktantriebssysteme - Stand der aktuellen Entwicklungen. Festschrift zum Ehrenkolloquium anlässlich der Emeritierung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Günter Höhne und Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Jürgen Schorcht, erschienen in: Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente und Konstruktion der TU Ilmenau, Band 12, S. 219-225, Verlag ISLE, Ilmenau, Mai 2005; ISBN 3-932633-97-0.

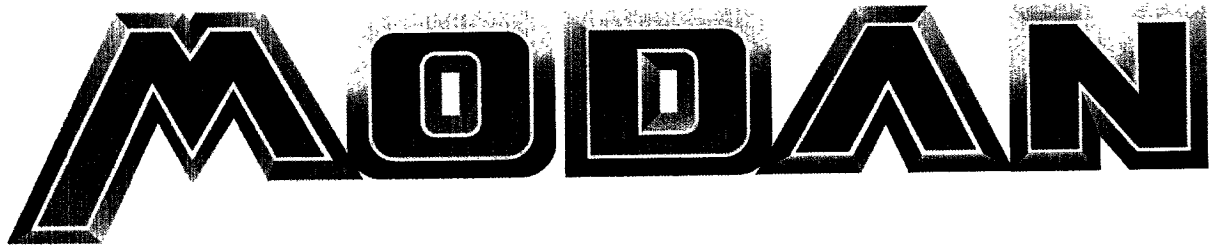
### **3 Fortschreibung des Verwertungsplans**

Die Verwertung der von der IMMS gGmbH geplanten Arbeiten war wie folgt vorgesehen:

- die Ergebnisse der Forschungs- und Entwurfsarbeiten auf dem Gebiet der Direktantriebssysteme fließen in die Vorentwicklungen der beteiligten Firmen (TETRA GmbH, LLT GmbH) ein und können auf diesem Weg vermarktet werden
- die entwickelten Modelle von Antriebssystemen sowie weiterer Komponenten fließen in die entwurfsunterstützenden Softwaretools der Fa. ITI GmbH, insbesondere in SimulationX, ein und tragen damit zu Erweiterung der Simulationsmöglichkeiten und zur Steigerung der Attraktivität der Software bei.

Das IMMS verzeichnet einen Know - How - Zuwachs auf den Gebieten der Präzisionsantriebstechnik und -steuerung und sichert sich damit gute Voraussetzungen für künftige Forschungs- und Entwicklungsaufträge aus der Industrie.





**Forschungsverbundprojekt  
„Entwurf und Modellierung von Antriebssystemen  
für die Mikrosystemtechnik“**

**MODAN  
www.modan.org**

*168V1551*

**Abschlussbericht des Teilprojektes  
„Evaluierung, Weiterentwicklung und Anwendung  
von Tools zur Modellierung und Simulation  
von Antriebssystemen für die MST“  
der ITI GmbH**

Verbund-Nr.: V2285  
Fördermittelgeber: BMBF  
Projekträger: VDI/VDE-IT Teltow  
Betreuer: Dipl. - Ing. Chr. Breckenfelder / Dipl. - Ing. S. Krüger

**Inhaltsverzeichnis**

1	Kurzdarstellungen.....	3
1.1	Aufgabenstellung.....	3
1.2	Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens.....	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	3
1.4	Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand .....	4
1.4.1	Für das Vorhaben genutzte bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte.....	4
1.4.2	Verwendete Fachliteratur, genutzte Informations- und Dokumentationsdienste .....	4
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	4
2	Eingehende Darstellungen .....	5
2.1	Projektziel.....	5
2.2	Projektdurchführung .....	6
2.3	Projektergebnisse.....	8
2.3.1	Neu- und Weiterentwicklung von Modellbibliotheken .....	8
2.3.2	Schnittstellen.....	13
2.3.3	Modellierungsunterstützung für Projektpartner.....	20
2.3.4	Prototyp eines Webinterfaces für den Zugriff auf SimulationX-Modelle.....	30
2.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen.....	32
2.5	Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen.....	33
2.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse .....	33
	Literatur.....	34

## 1 Kurzdarstellungen

### 1.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Technologieschwerpunktes Mikrosystemtechnik (MST) hatte das Verbundvorhaben MODAN speziell die Antriebstechnik und Aktuatorik zum Gegenstand. Während sich die Projektpartner mit dem Entwurf und der Entwicklung von Antriebssystemen für die MST beschäftigten, bestand die Aufgabe von ITI in der Bereitstellung, Evaluierung und Weiterentwicklung von Tools, Basismodellen und Standardabläufen für den Entwurfsprozess derartiger Komponenten.

### 1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

Die ITI Gesellschaft für ingenieurtechnische Informationsverarbeitung mbH ist ein international agierender Anbieter von CAE-Software. Das Unternehmen hat folgende Tätigkeitsschwerpunkte:

- Entwicklung und Vertrieb von Simulationssoftware (*ITI-SIM, SimulationX*) einschließlich Werkzeugen für die Auswertung und Optimierung. Einsatzgebiete sind neben Antriebstechnik und Mechatronik, die Fahrzeugtechnik, Hydraulik und Thermik sowie die Automatisierungs- und Regelungstechnik.
- Entwicklungs- und Projektierungsleistungen in den genannten Gebieten, vor allem Modellierungs- und Entwicklungsunterstützung
- Softwareentwicklung für die Auslegung von Antriebssystemen.

Mit dem zu Projektbeginn bereits in Entwicklung befindlichen Entwurfstool *SimulationX* stand ein ausbaufähiges Werkzeug zur Verfügung, welches konzeptionell prädestiniert war, den Anforderungen der Entwurfsprozesse für MST-Antriebe gerecht zu werden. Dies lässt sich durch folgende Eigenschaften des Programms unterstreichen:

- Möglichkeit der physikalischen Modellierung
- Unterstützung der Systemsimulation über mehrere physikalische bzw. technische Domänen
- Vorhandensein einer objektorientierte Modellbeschreibungssprache
- Integriertes Entwurfssystem

Damit verfügte ITI über gute Voraussetzungen für die Aufgaben des Vorhabens. Des Weiteren konnte auch auf Erfahrungen bei der Mitarbeit in anderen Verbundprojekten wie DEMIS und MIMOSYS zurückgegriffen werden.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Zur inhaltlichen und zeitlichen Planung der im Projekt vorgesehenen Arbeiten wurden die folgenden 5 Aufgabenbereiche formuliert:

- AB1 Toolbereitstellung für die Projektpartner
- AB2 Entwicklung von Zusatzbibliotheken und Modulen
- AB3 Ausbau von allgemeinen und projektspezifischen Schnittstellen
- AB4 Webbasierte Entwurfstools
- AB5 Verbreitung der Ergebnisse

Über die gesamte Laufzeit des Projekts wurde den Projektpartnern *SimulationX* kostenfrei zur Verfügung gestellt. Die aus der Evaluierung des Programms resultierenden Anforderungen führten zu einer Präzisierung der notwendigen Aktivitäten vor allem in den Aufgabenbereichen 2 und 3.

#### **1.4 Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand**

Die Situation im Bereich des rechnergestützten Entwurfs von Antriebssystemen in der MST zu Projektbeginn lässt sich durch folgende Einschätzung charakterisieren:

- Leistungsfähige Entwurfstools und Simulationswerkzeuge werden durch die Entwickler und Hersteller der Antriebskomponenten gar nicht oder nur isoliert eingesetzt. Die meisten der bisher eingesetzten Simulationsprogramme unterstützen entweder nur eine begrenzte Menge physikalischer Domänen oder sind für KMU aus wirtschaftlicher oder ergonomischer Sicht uninteressant.
- Fehlende oder nur unzureichend zugängliche Schnittstellen erschweren den Austausch von Modellen und Daten zwischen den eingesetzten CAE-Tools und verhindern so einen durchgängigen rechnergestützten Entwurfsprozess.
- Die Akzeptanz von Simulationstools wird in hohem Maße durch die Art und Qualität der vorhandenen Modellbeschreibungsmittel bestimmt. Häufig eingesetzte Tools wie z.B. Simulink haben sehr allgemeine, am mathematischen Modell angelehnte Beschreibungsmittel. Für eine ingenieurmäßige Anwendung vermisst man hier jedoch Mittel für eine fachbereichsbezogene, sog. physikalische Modellierung, die die implizite Bezugnahme bzw. Definition von Erhaltungssätzen unterstützt.
- Die Nutzung von Standardsoftware über das Medium Internet gewinnt wegen der damit verbundenen Flexibilität für den Anwender zunehmend an Aktualität. CAE-Tools werden fast ausschließlich als klassische Einzelplatz- oder Unternehmenslösung angeboten. Das ist unter anderem auf den hohen Anteil grafisch-interaktiver sowie experimentell-iterativer Tätigkeiten zurückzuführen.

##### **1.4.1 Für das Vorhaben genutzte bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte**

Durch die ITI GmbH wurden im Zusammenhang mit dem Vorhaben keine Erfindungen oder Schutzrechte angemeldet oder in Anspruch genommen.

##### **1.4.2 Verwendete Fachliteratur, genutzte Informations- und Dokumentationsdienste**

Es wurden keine speziellen Informations- oder Dokumentationsdienste genutzt. Verweise auf verwendete Fachliteratur, die im unmittelbaren Zusammenhang mit dem Verbundprojekt stehen, finden sich im Literaturverzeichnis.

#### **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die Komplexität der aus den Projektzielen resultierenden Arbeitsaufgaben bot ein vielfältiges Kooperationspotenzial mit nahezu allen Projektpartnern. Über die Bereitstellung der Simulationssoftware *SimulationX* wurde die Möglichkeit einer einheitlichen Modellierungsbasis für die am Vorhaben beteiligten Institute und Unternehmen geschaffen. Von den Partnern IMMS und TETRA wurde die Software intensiv eingesetzt. Im Verlaufe des Projekts entstanden so Basismodelle von im Rahmen des Projekts entwickelten Antriebskomponenten. Eine beson-

ders enge und kontinuierliche Kooperation wurde mit dem Projektpartner FhG-IIS/EAS praktiziert. Hier konnte auf die langjährige Kompetenz des Institutes bei der Weiterentwicklung und Anwendung modernster Berechnungsmethoden und Modellbibliotheken zurückgegriffen werden.

## **2 Eingehende Darstellungen**

### **2.1 Projektziel**

Im Rahmen des Technologieschwerpunktes Mikrosystemtechnik (MST) beschäftigte sich das Verbundvorhaben MODAN mit Entwurf und Modellierung von Antriebssystemen für die Mikrosystemtechnik. Dabei wurde davon ausgegangen, dass konventionelle Entwurfstechniken für Antriebe und deren Komponenten den steigenden Anforderungen an die Komplexität der Antriebssysteme insbesondere an Beschleunigung und Positioniergenauigkeit nicht mehr gerecht werden. Die gewachsene Komplexität verlangt eine Modularisierung der Antriebe. Ziel des Projekts war es, die Entwicklung effizient einsetzbarer, computergestützter Modellierungs-, Simulations- und Entwurfstechniken voranzutreiben.

Für die Firma ITI bot sich hier eine Möglichkeit, ihre langjährigen Erfahrungen bei der Entwicklung, Vermarktung und Anwendung von Simulationswerkzeugen einzubringen und ihre Softwareprodukte an die speziellen Erfordernisse der MST anzupassen. Ein besonderes Potenzial wurde in der Möglichkeit gesehen, direkt mit den Entwicklern und Herstellern der genannten Systeme und Komponenten zusammenzuarbeiten und so die Erfahrungen der Anwender unverzüglich zurück in den Entwicklungsprozess der Software fließen zu lassen.

Die im Projekt vorgesehenen Entwicklungsarbeiten zielten auf die Gestaltung der ITI-Werkzeuge als offenes Softwaresystem. Dies betraf vor allem die Verbesserung des Modellierungskomforts durch die Neu- und Weiterentwicklung von Bibliotheken sowie allgemein verfügbarer Schnittstellen zu anderen CAE-Tools. Darüber hinaus sollte die Möglichkeit geprüft werden, Entwurfs- und Simulationstools über das Internet einem breiten Anwenderkreis verfügbar zu machen.

Die durch die Firma ITI zu realisierenden Arbeiten wurden in entsprechenden Aufgaben formuliert und in 5 Bereiche unterteilt:

#### **AB1 Toolbereitstellung für Projektpartner**

Den am Projekt beteiligten Partnern wird mit *SimulationX* ein Simulationstool bereitgestellt, anhand dessen sich die Projektpartner mit den Möglichkeiten des computergestützten Entwurfsprozesses vertraut machen können. ITI unterstützt die beteiligten Projektpartner mit einer entsprechenden Einführung sowie Hilfe bei der Modellierung. Ergebnisse der Evaluierung fließen direkt in den weiteren Entwicklungsprozess von *SimulationX* ein.

#### **AB2 Entwicklung von Zusatzbibliotheken und Modulen**

Entsprechend den durch die Projektpartner formulierten Anforderungen aus AB1 werden bestehende Modelbibliotheken erweitert oder neue Bibliotheken entwickelt. Für die Entwurfsarbeiten im Projekt ist insbesondere die Unterstützung von elektromagnetischen Modellen erforderlich. Der Aufgabenbereich ist während der Projektlaufzeit entsprechend dem Feedback durch die Anwender wiederholt zu aktualisieren.

#### **AB3 Ausbau von allgemeinen und projektspezifischen Schnittstellen**

Da das Hauptziel des Verbundvorhabens MODAN in der Demonstration der Durchgängigkeit des Entwicklungsprozesses besteht, sind allgemein zugängliche Schnittstellen ein zentrales

Thema. Durch Schnittstellen wird der Austausch von Daten oder auch Algorithmen zwischen unterschiedlichen Konstruktions- und Entwurfswerkzeugen realisiert. Dadurch wird die prinzipielle Weiterverwendbarkeit bestehender System- und Anlagenmodelle mit *SimulationX* ermöglicht.

#### **AB4 Webbasierte Entwurfstools**

Der Einzug des Internets in viele Bereiche der Computeranwendung wird auch die Entwurfswerkzeuge erreichen. Neben dem Modell des Application Service Providers (ASP), das den vollen Umfang eines Programms über das Internet bereitstellt, sind webbasierte Teillösungen zu untersuchen, die ein begrenztes Leistungsspektrum der Entwurfstools einem breiten Anwenderkreis zur Verfügung stellen. Dazu ist ein Anwendungsszenarium zu erarbeiten und als Prototyp zu implementieren.

#### **AB5 Verbreitung der Ergebnisse**

Eine permanente Aufgabe besteht in der Verteilung des aktuellen Arbeitsstandes zur weiteren Evaluierung bzw. Nutzung an die Projektpartner. Darüber hinaus sind die Entwicklungen über Veröffentlichungen, Vorträge und Workshops einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Begleitend zu den inhaltlichen Arbeiten ist die Vermarktung der Projektergebnisse vorzubereiten.

## **2.2 Projektdurchführung**

Unmittelbar nach Projektbeginn wurde die Möglichkeit geschaffen, den Projektpartnern eine Evaluierungsversion des von ITI entwickelten Simulationsprogramms *SimulationX* kostenfrei zur Verfügung zu stellen. Um den Projektpartnern einen raschen Einstieg in die Arbeit mit *SimulationX* zu ermöglichen wurde am 24. September 2002 von ITI ein Einführungsseminar durchgeführt. Von diesem Angebot machten 10 potentielle Anwender aus dem Kreis der Projektpartner gebrauch. Die Evaluierung von *SimulationX* bei den Projektpartnern erfolgte erwartungsgemäß mit unterschiedlicher Intensität. Bis zum Ende des Projekts nutzten zwei der Partner (IMMS, Tetra) ihre Lizenz zur Modellierung von im Rahmen des Vorhabens entwickelten Komponenten. Eine Nutzung der Software über die Laufzeit des Projekts hinaus wird derzeit geprüft. Weitere zwei Partner (LLT, STZ) testeten die Möglichkeiten des Programms anhand kleinerer Problemstellungen, sahen aber im Moment keine Möglichkeit für einen breiteren Einsatz dieses Werkzeugs. Einen besonderen Stellenwert nimmt der Einsatz von *SimulationX* bei der FhG- IIS/EAS ein. Neben dem Erstellen von Modellen für Antriebskomponenten der Firma TETRA beteiligte sich das Institut aktiv an der Weiterentwicklung von Modellbibliotheken und Schnittstellen für *SimulationX*. Im Verlauf des Projekts wurde den beteiligten Projektpartnern durch mehrmalige Updates das jeweils aktuelle Release von *SimulationX* zur Verfügung gestellt.

Aufbauend auf den aus AB1 zurückgeflossenen Informationen wurden entsprechend den Anforderungen der Anwender die Schwerpunkte des AB2 gemäß den im Projektantrag formulierten Arbeitspaketen neu gewichtet. Die Erweiterung der Basisbibliothek Mehrkörpersysteme sowie die neu entwickelte Modellbibliothek Magnetik stellten in diesem Bereich den Hautanteil der Entwicklungsarbeit. Andere ursprünglich für diesen Bereich geplante Arbeiten, wie die Weiterentwicklung der Modellbibliothek Thermik sowie die Erweiterung des Moduls Eigenschwingungen und Zustandsraumbeschreibung wurden zugunsten einer intensiveren direkten Modellierungsunterstützung für einzelne Projektpartner innerhalb des Projekts nicht realisiert.

Auch im AB3 orientierten sich die tatsächlich ausgeführten Arbeiten an den aus der Evaluierung in AB1 gewonnenen Erkenntnissen. So wurde mit federführender Unterstützung des FhG-IIS/EAS ein Importfilter für SPICE-Netzwerkmodelle als Ergänzung der bestehenden SPICE-kompatiblen Elektronikbibliothek entwickelt. Anwendern wird so die direkte Übernahme bestehender Schaltungsmodelle in *SimulationX* ermöglicht. Ein CAD-Importfilter erlaubt die Übernahme von CAD-Daten im STL-Format. Neben einer erhöhten Anschaulichkeit wird auch die Übernahme von Schwerpunkt- und Trägheitsinformationen unterstützt.

Ein besonderer Schwerpunkt wurde auf die Schnittstelle zur Einbindung externer Funktionen in *SimulationX* gelegt. Viele Anwender auch aus dem Kreis der Projektpartner benutzen selbst programmierte Tools, um spezielle technische bzw. physikalische Effekte, auch im Zusammenspiel mit anderen Modellierungswerkzeugen wie MATLAB Simulink zu modellieren. Im Hinblick auf eine Optimierung des Entwurfsprozesses ist eine nahtlose Übernahme solcher Programmmodule eine unabdingbare Voraussetzung.

Zur Übernahme von Messergebnissen und Katalogdaten haben sich die bereits zu Projektbeginn in *SimulationX* integrierten Schnittstellen als gut geeignet erwiesen.

Um die Werkzeuge zum Entwurf und der Modellierung von Antriebssystemen einem breiteren Anwenderkreis zu erschließen, bietet sich das Medium Internet an. Dabei hat sich die Akzeptanz so genannter „Application Service Provider“ (ASP) im Projektzeitraum nicht wie erwartet entwickelt. Oftmals ist es auch nicht erforderlich oder auch nicht erwünscht, den gesamten Funktionsumfang einer für den Desktop konzipierten Anwendung über das Web verfügbar zu machen. Mit überschaubaren, funktionell abgegrenzten Applikationen lassen sich vielmehr gezielt neue Anwendungsprofile erschließen. So kann auf der Basis eines *SimulationX*-Modells eines neu entwickelten Antriebssystems ein webbasiertes Auslegungstool für den Einsatz im Intranet zur Kundenberatung oder für den Verkauf entstehen. Ein öffentlicher Zugang für interessierte Kunden im Internet ist ebenfalls denkbar. Der Prototyp einer solchen Applikation wird unter 2.3 vorgestellt.

Erste Ergebnisse der Arbeit innerhalb des Projekts wurden im Rahmen des Statusseminars am 6. Oktober 2004 in Fulda vorgestellt. Eine gemeinsame Veröffentlichung mit dem Projektpartner IMMS zu dem in 2.3 beschriebenen Modelle eines Planarantriebs ist geplant.

## 2.3 Projektergebnisse

### 2.3.1 Neu- und Weiterentwicklung von Modellbibliotheken

#### 2.3.1.1 Bibliothek Magnetik

Innerhalb des Arbeitsbereichs 2 (Entwicklung von Bibliotheken und Zusatzmodulen) wurden die physikalischen und algorithmischen Grundlagen zur Modellierung magnetischer Systeme erarbeitet und in der Modellbibliothek „Magnetik“ implementiert.

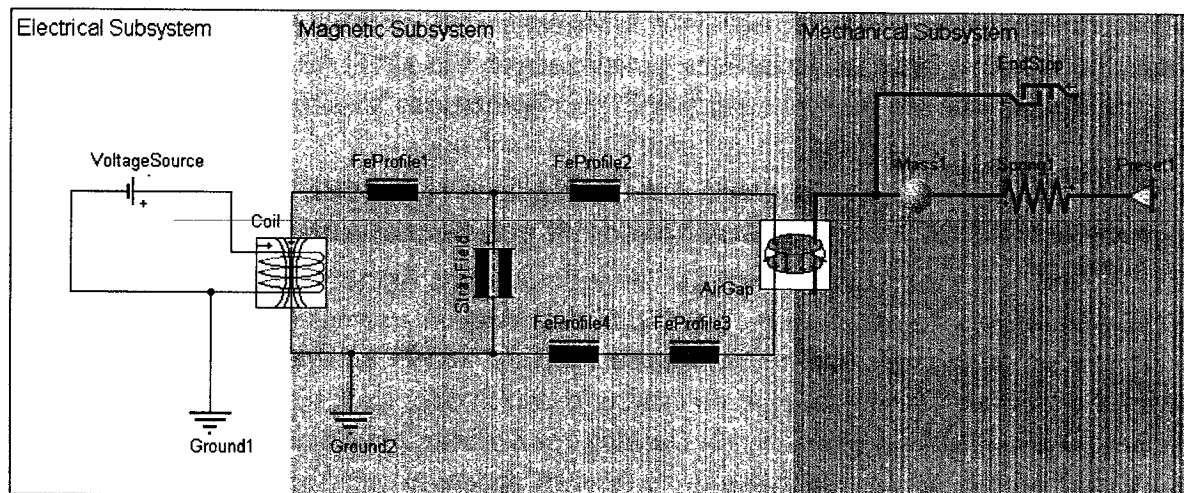


Abbildung 1: *SimulationX*-Modell mit elektrischen, magnetischen und mechanischen Komponenten

Grundlage bildet die Theorie magnetischer (Widerstands-)Netzwerke, d.h. als Potenzialgröße wird die magnetische Spannung und als Flussgröße wird der magnetische Fluss betrachtet. Die Bibliothek (Abbildung 1) enthält Elemente zur:

- Umwandlung elektrischer Energie in magnetische Energie (und umgekehrt),
- Beschreibung des magnetischen Flusses in Eisenwerkstoffen auf der Basis einfacher geometrischer Grundformen,
- Beschreibung des magnetischen Flusses in Luft auf der Basis einfacher geometrischer Grundformen,
- Umwandlung magnetischer Energie in mechanische Energie (und umgekehrt) auf der Basis einfacher geometrischer Grundformen,
- Beschreibung der Wirbelstromverluste in magnetischen Antrieben.



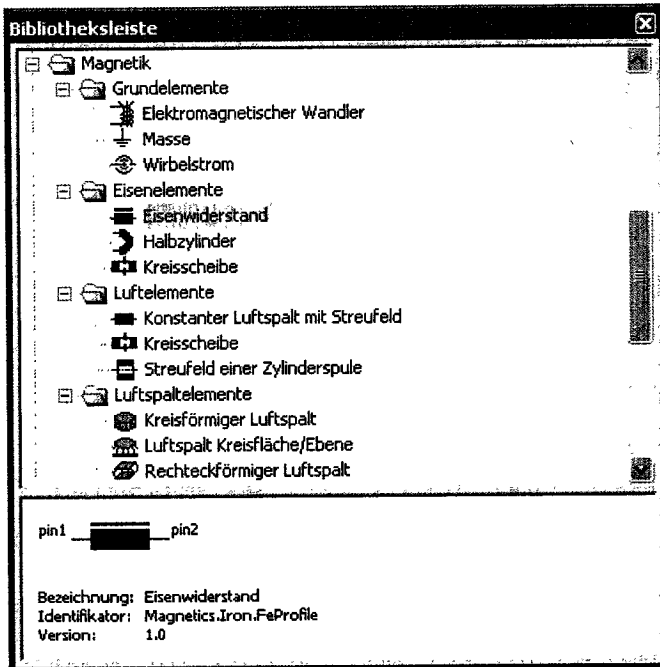


Abbildung 2: SimulationX-Modellbibliothek Magnetik

Die Bibliothek umfasst weiterhin eine erweiterbare Datenbank vordefinierter Eisenmaterialien (Abbildung 3). Mit dem in *SimulationX* integrierten Optimierungsmodul können aus vorliegenden Messdaten die Koeffizienten für neue Materialien selbst bestimmt und in die Datenbank aufgenommen werden. Materialkennwerte können auch direkt im Simulationsmodell mit einer importierten Kennlinie hinterlegt werden (Abbildung 4 und Abbildung 5).

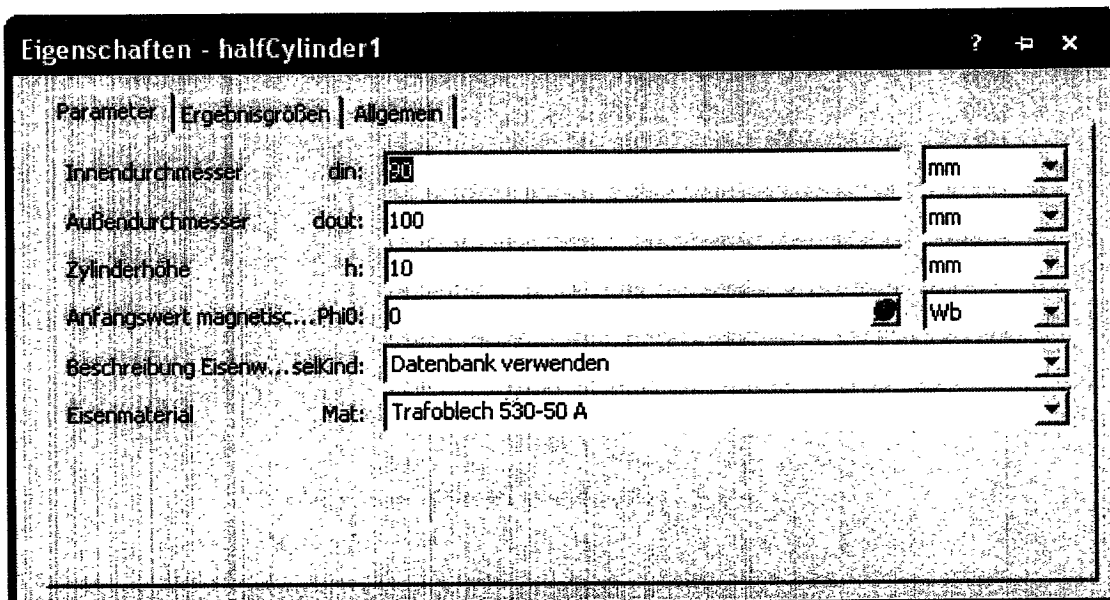


Abbildung 3: Verwendung der Materialdatenbank zur Parametrierung eines Eisenelementes

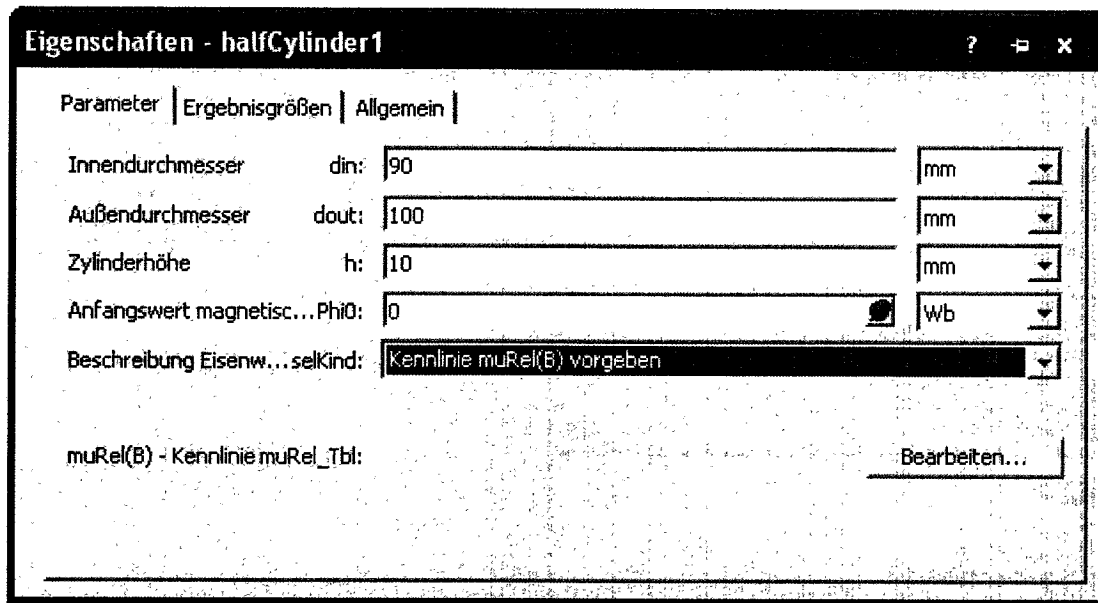


Abbildung 4: Parametrierung eines Eisenelementes mittels Kennlinie

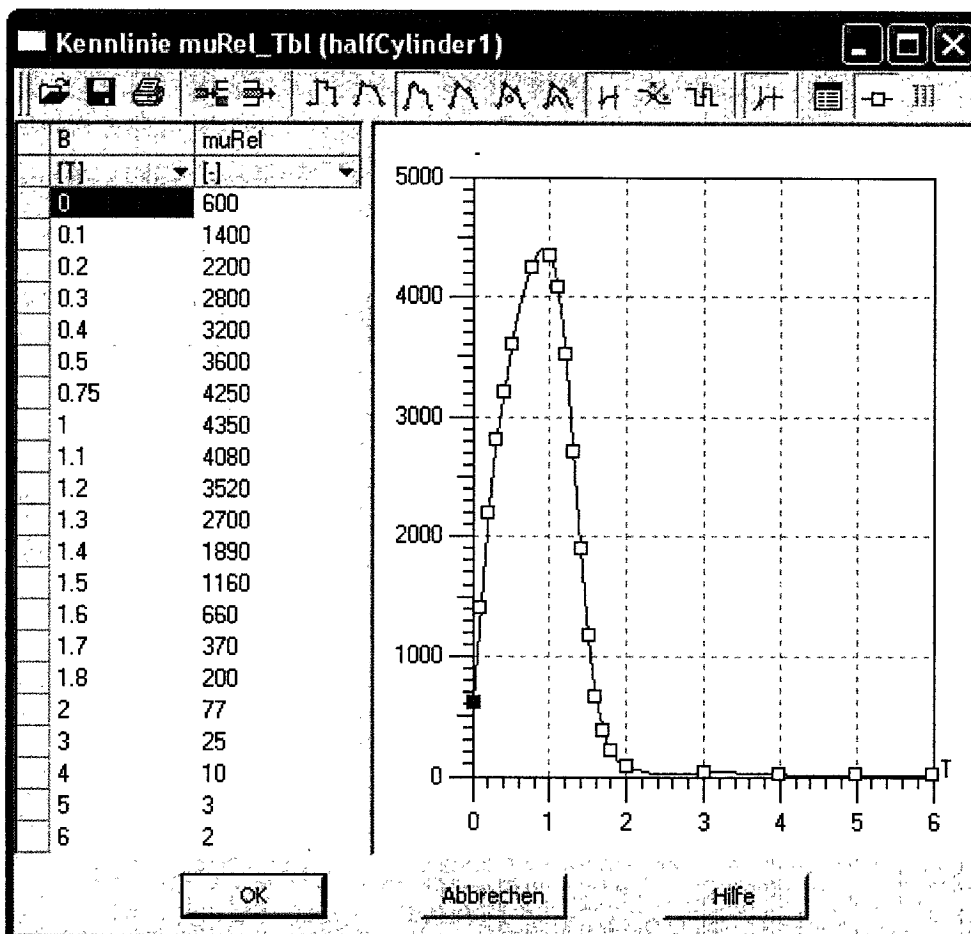


Abbildung 5: Kennlinie zur Beschreibung des Eisenwiderstands  $\mu_{Rel}(B)$

### 2.3.1.2 Bibliothek Mehrkörpersysteme

Die Bibliothek Mehrkörpersysteme umfasst Modellobjekte zur Modellierung der Dynamik von Starrkörpern im Raum. Die Bibliothek enthält gegenwärtig folgende Elementgruppen (Abbildung 6):

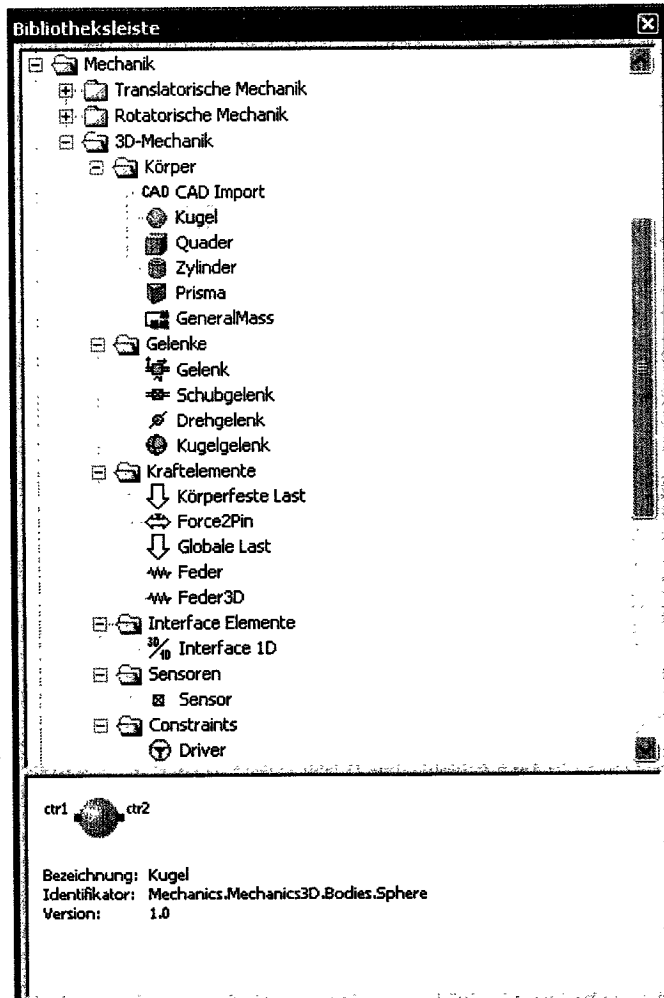


Abbildung 6: *SimulationX*-Modellbibliothek Mehrkörpersysteme

#### Körper

Neben einfachen Grundgeometrien wie Kugel, Quader, Zylinder und Prisma besteht die Möglichkeit, die Körpergeometrie im STL-Format zu importieren (siehe Abschnitt 2.3.2.2). Ein weiteres Körperelement gestattet die Beschreibung hierarchisch zusammengesetzter Geometrien über Scripte. Dazu stellt das COM-Interface (Component Object Model) von *SimulationX* die entsprechenden Funktionen bereit.

#### Gelenke

Als vordefinierte Gelenke stehen Schub, Dreh- und Kugelgelenk zur Verfügung. Über ein allgemeines Gelenk können andere Gelenkformen definiert werden.

#### Kraftelement

Neben körperfesten und globalen Lasten sowie Lasten zwischen zwei Punkten stehen Federelemente (Feder zwischen zwei Punkten und 3D-Feder) zur Verfügung.

#### Interface-Elemente

Die Elemente dieser Gruppe ermöglichen das Zusammenspiel von Objekten der Bibliothek

Mehrkörpersysteme mit Modellelementen der Bibliothek Mechanische Grundelemente. Damit wird die Einbindung von Antriebskomponenten wie Motoren oder Hydraulikzylinder ermöglicht.

### Sensoren

Die Elemente dieser Gruppe ermöglichen den Abgriff sowie die Weiterverarbeitung von Bewegungsgrößen an beliebigen, körperfesten Punkten.

### Constraints

Constraints oder auch Zwangsbedingungen werden für die Vorgabe von Bewegungsgrößen benötigt.

*SimulationX* bietet neben dem blockorientierten Modelleditor eine zusätzliche 3D-Ansicht, die neben der interaktiven 3D-Modellierung auch die Animation der Berechnungsergebnisse parallel zur Simulation oder im Anschluss an die Rechnung ermöglicht (Abbildung 7). Im Rahmen des Verbundprojekts wurde die Bibliothek zur Modellierung eines Planarantriebs, der vom Projektpartners IMMS entwickelt wird eingesetzt (siehe Abschnitt 2.3.3.2).

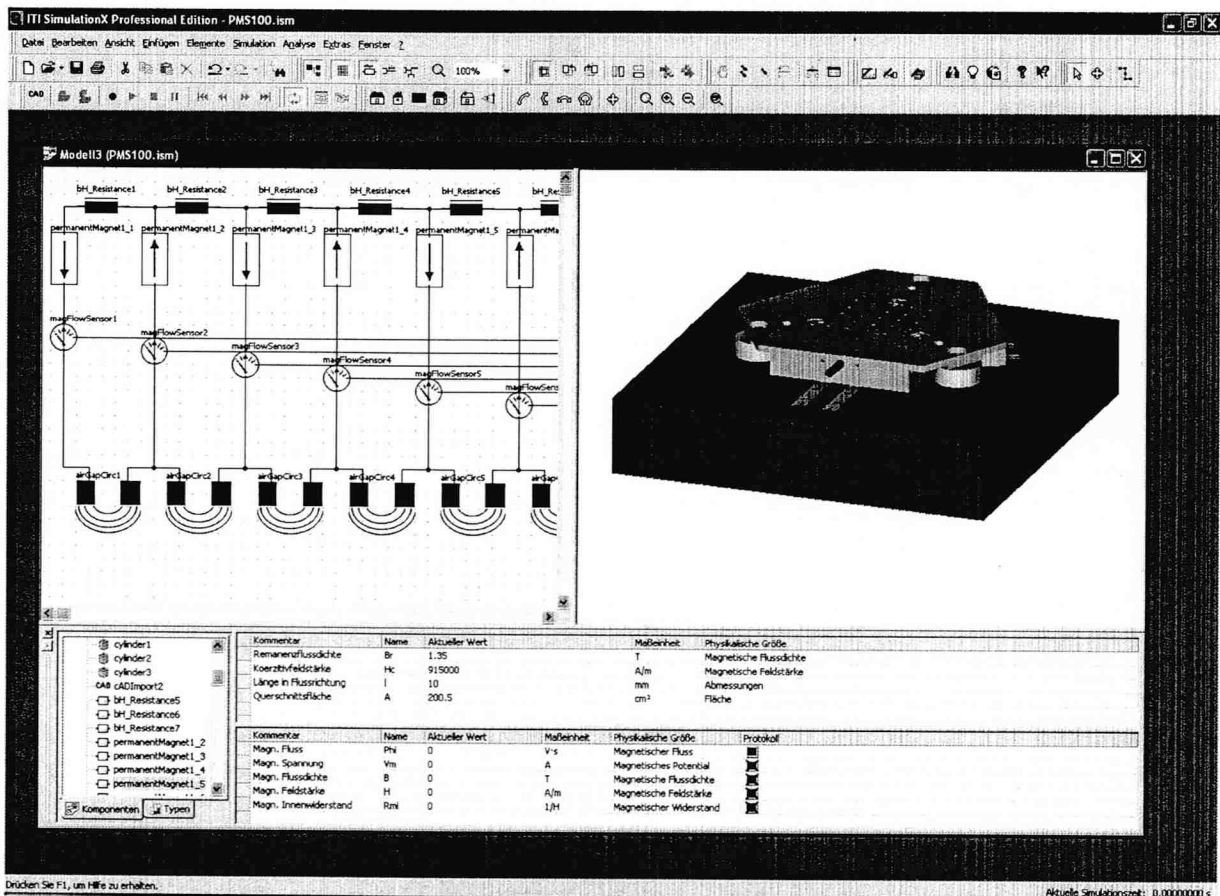


Abbildung 7: Modell- und 3D-Ansicht in *SimulationX*

## 2.3.2 Schnittstellen

### 2.3.2.1 SPICE-Importfilter

SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) ist eine Software zur Simulation analoger, digitaler und gemischter elektrischer Schaltungen. SPICE wurde ursprünglich am Electrical Engineering and Computer Sciences (EECS) Fachbereich der Universität von Berkeley entwickelt und steht heute im Quellcode zur allgemeinen Verfügung [1].

Auf dem Gebiet der Modellierung und Simulation elektronischer Schaltungen gilt SPICE als Industriestandard. Aufbauend auf der SPICE-kompatiblen Elektronikbibliothek, die im Rahmen des Verbundprojekts durch den Projektpartner FhG-IIS/EAS für *SimulationX* entwickelt wurde, ermöglicht der SPICE-Importfilter das Einlesen vorhandener Schaltungen. Ein SPICE-File (\*.cir) beschreibt die elektronische Schaltung in Form einer Netzliste (Abbildung 8).

```
Ansteuerung mit Spannungsgesteuerter Spannungsquelle

R13 1 0 1Meg
R19 1 2 1K
R9 3 0 3.9K
R10 6 3 68K
R11 6 9 68K
R12 8 9 68K
R18 0 10 5.1K
R17 6 18 100
R16 8 17 100
C10 0 2 330n
C8 0 5 10u
C9 10 9 220p
C13 7 0 10u
C14 18 7 330p
C15 17 7 330p
VDAC_K0 1 0 dc 0 ac 1.0 pulse(0.5 4.5 0 50 50 1 600)
V1 5 0 DC 90
V2 7 0 DC -90
D1 21 2 mdiode
V21 21 0 0
EIC3 6 7 2 3 10000
EIC2 8 7 0 9 10000

.MODEL mdiode D

.TRAN 0.001 101
.END
```

Abbildung 8: SPICE-Netzliste einer elektronischen Schaltung

Da die Netzliste keinerlei Information über die Topologie der Schaltung, d.h. die Lage der Bauteile sowie die Führung der Verbindungen zwischen den Bauteilen enthält, erhält man als Resultat des Importvorgangs noch nicht das erwartete Schaltungsbild. Vielmehr liegen die einzelnen Bauteile quasi übereinander gestapelt im Modell (Abbildung 9).

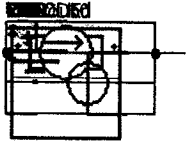


Abbildung 9: SPICE-Netzlisten enthalten keine topologische Information

Für die Simulationsrechnung ist dies ohne Bedeutung. Für eine bessere Anschaulichkeit muss das Modell noch von Hand nachbearbeitet werden. Dabei ist es meist ausreichend, die importierte Schaltung als Compound (Zusammenfassung von Teilmodellen zu einem neuen Modellobjekt) zu kapseln. Die für die Kommunikation mit anderen Teilmodellen erforderlichen Anschlüsse können im *SimulationX-TypeDesigner* nach außen geführt werden (Abbildung 10).

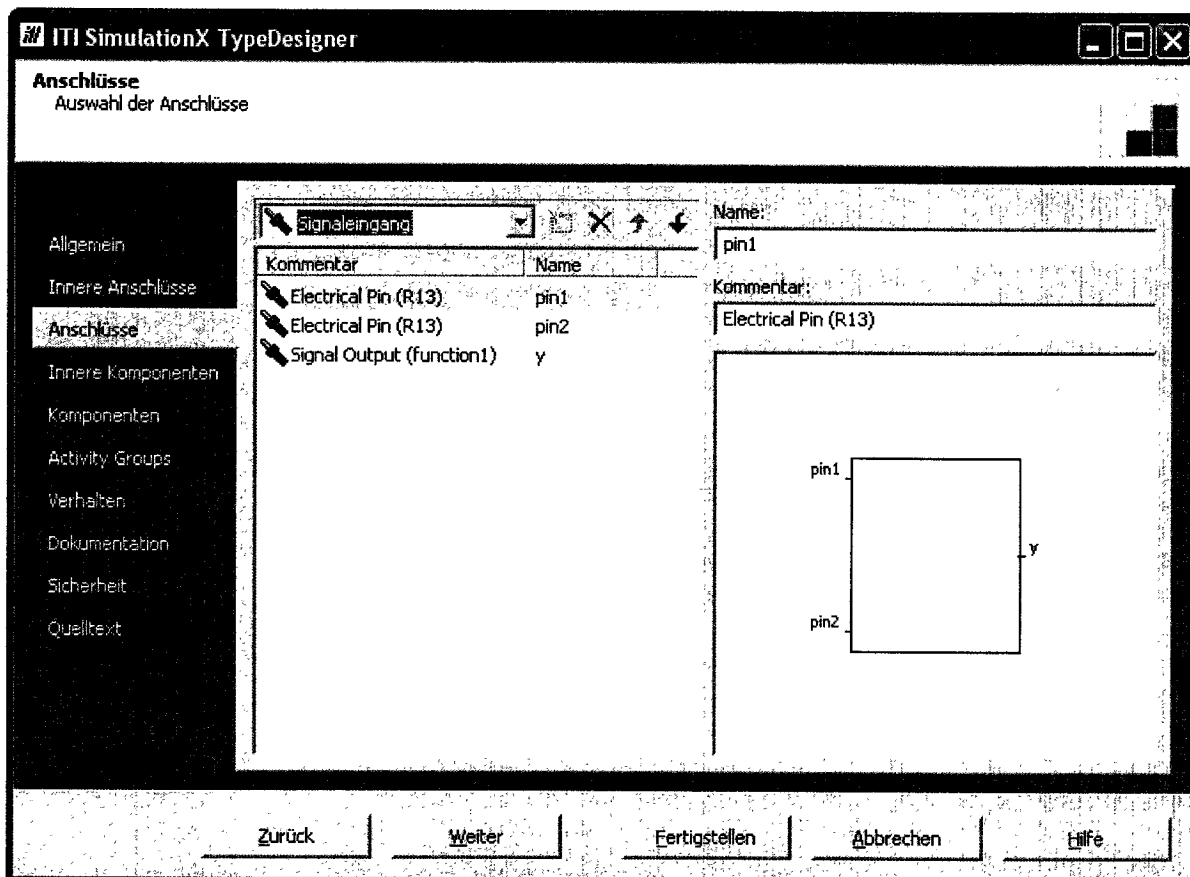


Abbildung 10: Kapselung der importierten SPICE-Netzliste als Compound

Das manuelle Neuordnen der Bauteile und Verbindungslinien ist zwar prinzipiell möglich, jedoch vor allem bei größeren Schaltungen sehr zeitaufwendig. Zu Demonstrationszwecken wurde dies für das gezeigte Beispiel durchgeführt (Abbildung 11).

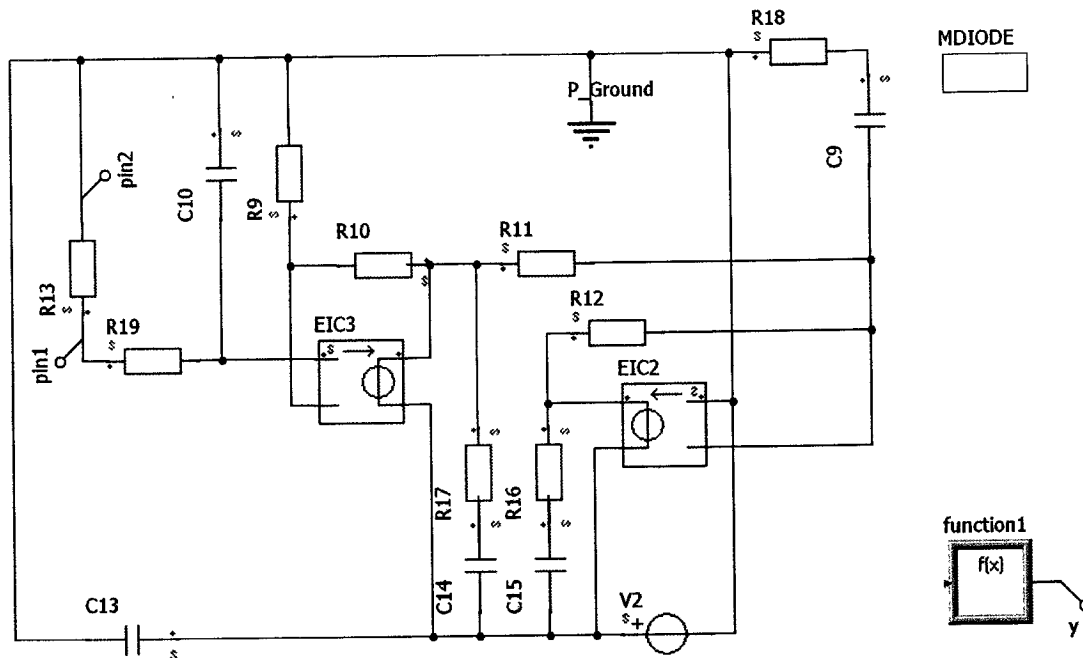


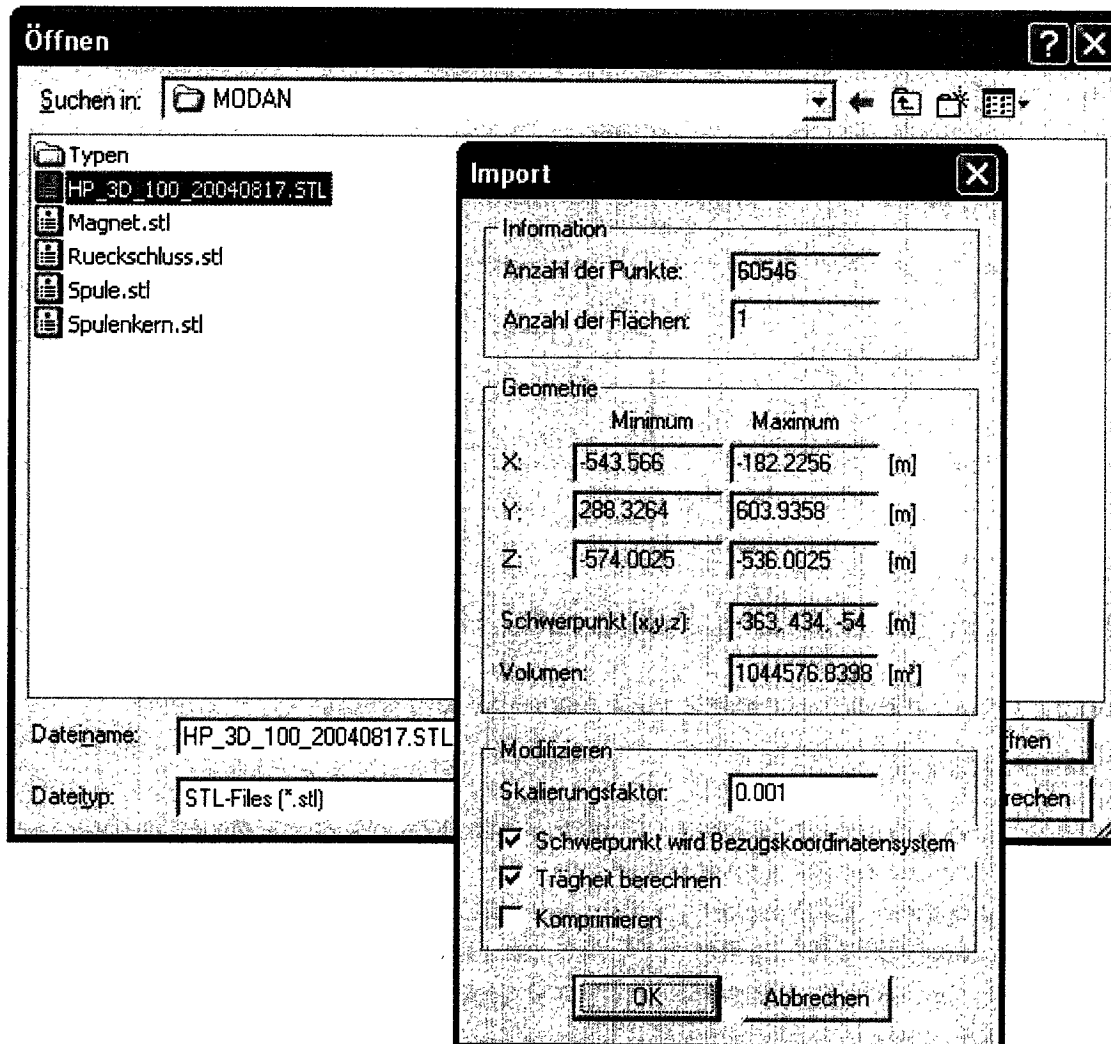
Abbildung 11: Importierte SPICE-Netliste nach manueller Nachbereitung

### 2.3.2.2 STL-Importfilter

Zur Gewährleistung einer durchgehenden Entwurfsunterstützung wurde ein CAD-Filter entwickelt, der den Import von 3D-Körper-Geometrien aus CAD-Dateien ermöglicht. Der Filter wurde in das Modellobjekt *CAD-Import* der *SimulationX*-Bibliothek *Mehrkörpersysteme* integriert (siehe auch Abschnitt 2.3.1.2). Bei der Entscheidung über das zu unterstützenden Austauschformat viel die Wahl auf die herstellerunabhängige STL-Sprache (Standard Transformation Language).

Dieses, auch als Stereolithografie-Schnittstelle bezeichnete Format dient hauptsächlich der Bereitstellung geometrischer Informationen aus dreidimensionalen Datenmodellen heraus für die Fertigung mittels generativer Fertigungsverfahren oder Rapid Prototyping-Anlagen [2] und wird von allen namhaften CAD-Systemen unterstützt. STL-Files beschreiben die Oberfläche eines Körpers durch ein Netz aus Dreiecken.

Der Anwender wählt zunächst das zu importierende File aus dem für MS Windows üblichen Dateidialog. In dem dann angezeigten Dialogfeld (Abbildung 12) können verschiedene Einstellungen vorgenommen werden, die im Folgenden näher beschreiben werden.

Abbildung 12: Datei- und Einstellungsdialog für den STL-Import in *SimulationX*

Da das STL-Format keine Maßeinheiten unterstützt, ist über die Angabe eines **Skalierungsfaktors** die Größenanpassung des importierten Bauteils möglich. Standardmäßig werden alle eingelesenen Größen als Meter interpretiert. Die Angabe eines Skalierungsfaktors von 0.001 ermöglicht so den Import eines Körpers, dessen Abmessungen in Millimetern gespeichert sind.

Aus den importierten Informationen können außerdem die **Schwerpunkt-** sowie **Trägheitseigenschaften** des Körpers berechnet werden. Optional kann das Bezugskoordinatensystem des Körpers in seinen Schwerpunkt verlagert werden. Durch Aktivierung der **Komprimierung** werden gemeinsam genutzte Punkte identifiziert sowie für jeden Punkt der Normalenvektor berechnet. Dies führt zwar zu einer deutlichen Verlangsamung des Importvorgangs spart jedoch Speicherplatz gespart und ermöglicht eine höhere Darstellungsqualität (Abbildung 13).



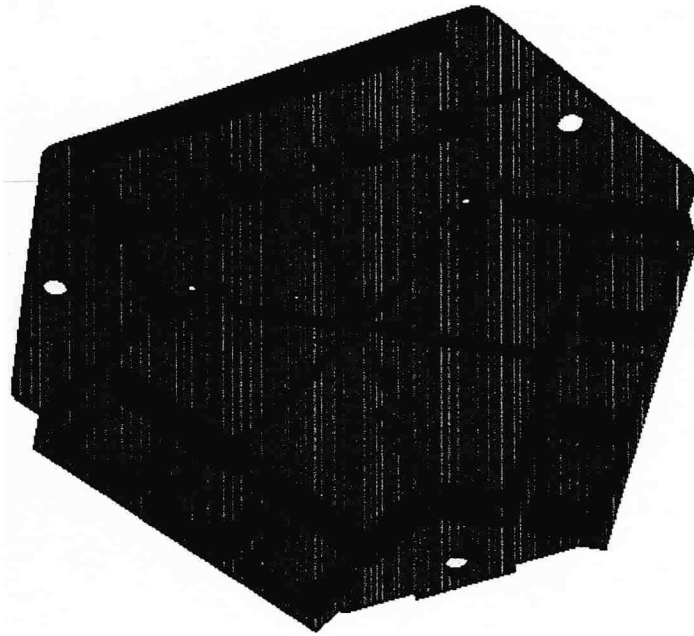


Abbildung 13: 3D-Darstellung eines importierten Bauteils in *SimulationX*

### 2.3.2.3 External Function Interface

Zur Einbindung externer Routinen wurde in *SimulationX* eine allgemeine Schnittstelle für externe Funktionen und Prozeduren integriert. Diese gestattet den Aufruf beliebiger DLL-Funktionen und damit beim Anwender der Simulationssoftware die Nachnutzung bereits vorhandener Programmteile. Die Schnittstelle stützt sich auf das in *Modelica*<sup>®1</sup> [3] beschriebene *External Function Interface*. Für eine benutzerfreundliche Beschreibung der Aufrufparameter wurde ein entsprechender Assistent implementiert. Innerhalb des Verbundprojekts wurden externe Funktionen für die unterschiedlichsten Modelle eingesetzt. An einem einfachen Beispiel soll die Anwendung dieses Features beschreiben werden.

Ausgangspunkt ist eine in der Programmiersprache C formulierte Prozedur, die auf der Basis des Preisachmodells [4], [5] das Hystereseverhalten eines Piezoaktors abbildet. Die Deklaration dieser Funktion ist denkbar einfach und sieht wie folgt aus:

```
// Funktion preisach
// Input (s) :
// x Spannung U[V]
// Output (s) :
// y Auslenkung s[mm]
void preisach(double x, double* y);
```

Zur Verwendung der Funktion innerhalb der ITI-MDL muss im betreffenden Modellobjekttyp mit dem *TypeDesigner* zunächst eine Funktions-Komponente angelegt werden (Abbildung 14).

<sup>1</sup> *Modelica*<sup>®</sup> ist ein eingetragenes Markenzeichen der „Modelica Association“

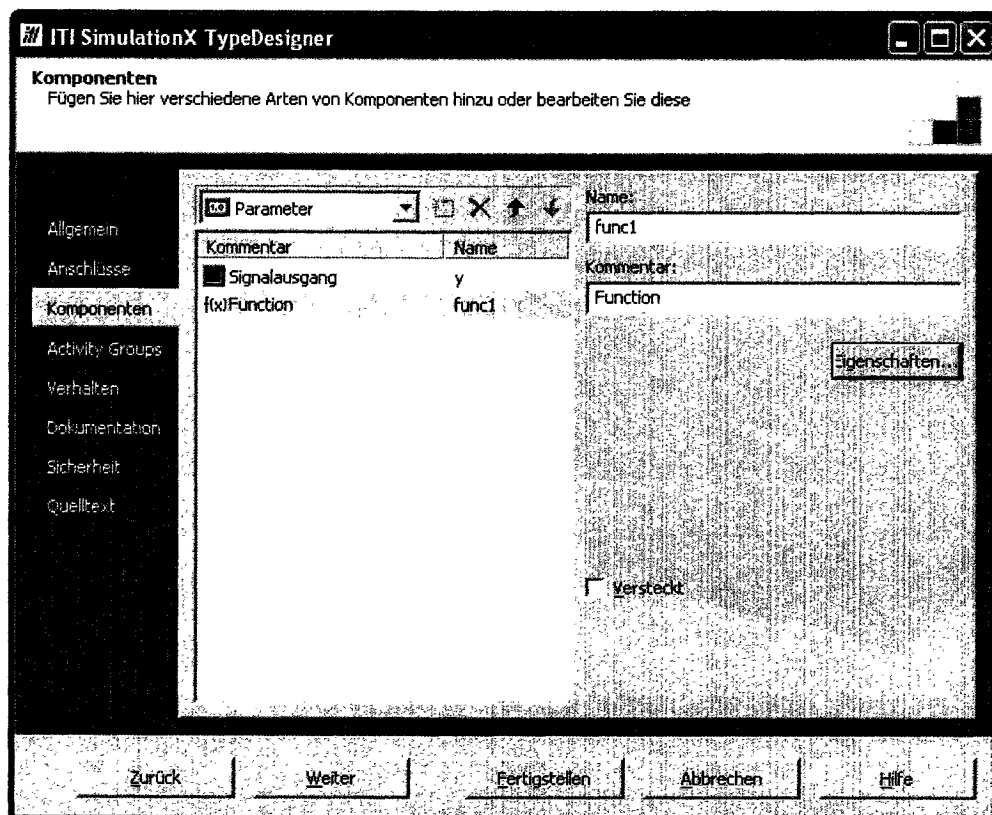


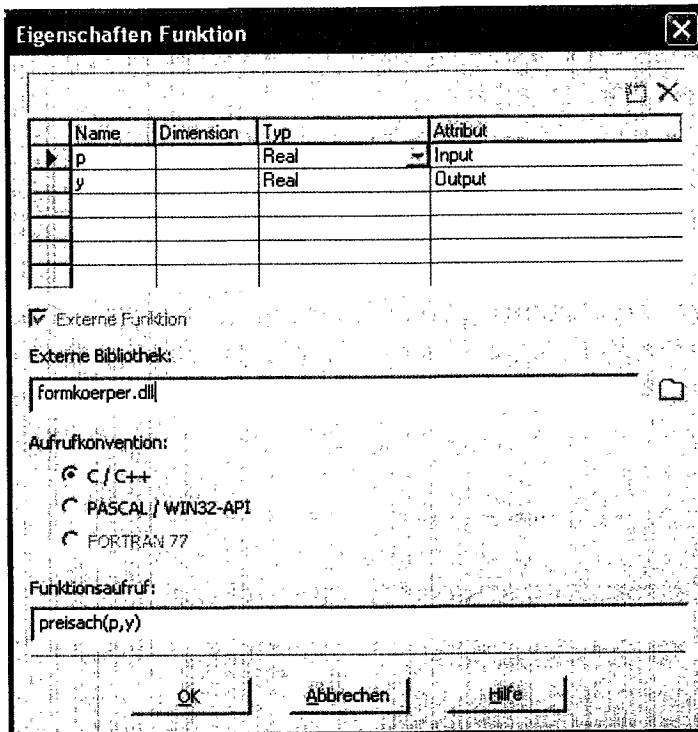
Abbildung 14: Anlegen einer Funktions-Komponente im *SimulationX-TypeDesigner*

Über den Eigenschaftsdialog dieser Komponente (Abbildung 15) können nun die erforderlichen Einstellungen vorgenommen werden. In der Tabelle werden die formalen Parameter der Funktion deklariert. Der Name wird für die Formulierung des Funktionsausdrucks benötigt. Für skalare Größen kann der Eintrag in der Spalte Dimension freigelassen werden. Werden als Parameter mehrdimensionale Datenstrukturen verwendet, ist hier die korrekte Dimension (z.B. 2 für Matrizen) anzugeben. Als Datentypen werden neben *Real* auch *Integer* und *Boolean* unterstützt. In der Spalte Attribut kann zwischen Input und Output gewählt werden. Damit wird festgelegt ob der betreffende Parameter als Argument oder Ergebnisgröße zu interpretieren ist.

Nachdem der Name der DLL (Dynamic Link Library), welche die aufzurufende Funktion enthält, angegeben wurde, kann noch die Aufrufkonvention (C/C++ bzw. PASCALWIN32-API) festgelegt werden.

Besonderer Sorgfalt bedarf die Formulierung des Funktionsaufrufs, insbesondere dann, wenn neben skalaren Größen auch Vektoren und Matrizen übergeben werden sollen.

Im Wesentlichen orientieren sich Syntax und Semantik am Aufruf der Funktion in der Programmiersprache C. Eine ausführliche Beschreibung einschließlich der Verwendung mehrdimensionaler Daten findet man im *SimulationX-Handbuch* [6] oder in der *Modelica-Sprachbeschreibung* [3]. Abbildung 15 zeigt den korrekt ausgefüllten Eigenschaftsdialog für die oben beschriebene Funktion.

Abbildung 15: Eigenschaftsdialog für externe Funktionen im *SimulationX-TypeDesigner*

Die so definierte Funktion kann nun innerhalb der Verhaltensbeschreibung des Modellobjekts verwendet werden. In Abbildung 16 ist die betreffende Dialogseite im *TypeDesigner* für das Modell „Piezoaktor“ dargestellt.

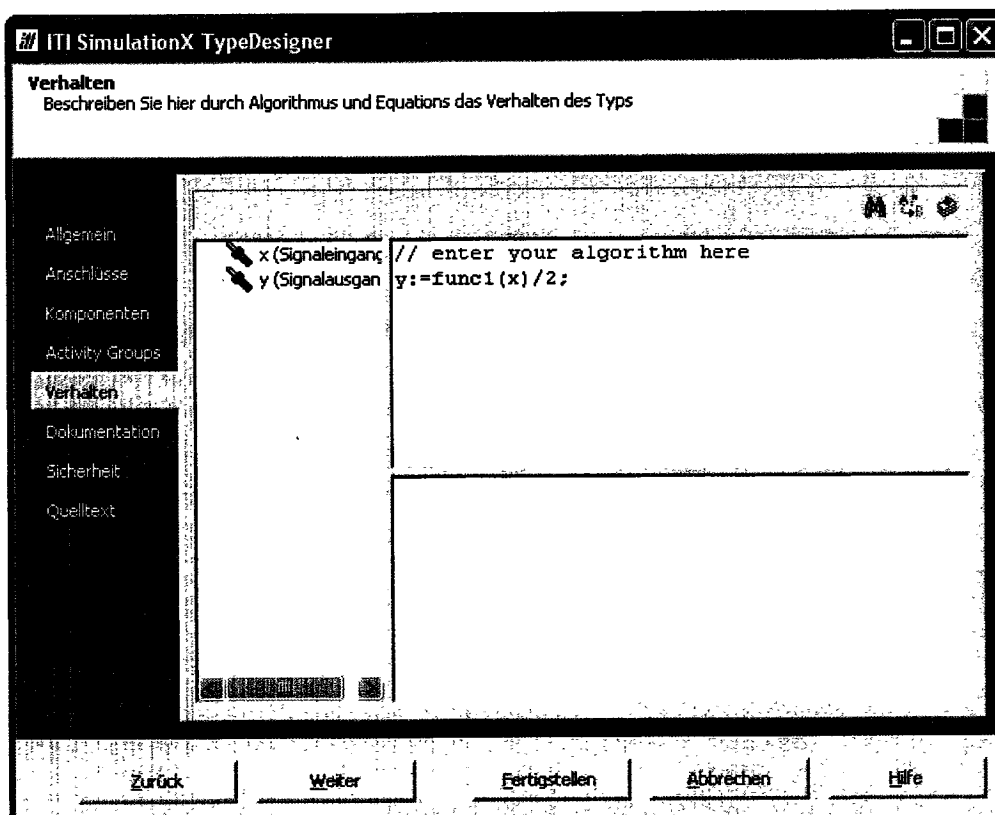


Abbildung 16: Aufruf der externen Funktion in der Verhaltensbeschreibung

### 2.3.3 Modellierungsunterstützung für Projektpartner

Die Unterstützung von Projektpartner bei der Erstellung und Evaluierung von Modellen für Antriebskomponenten in der MST nahm im Projekt einen bedeutenden Umfang ein. Neben Basismodellen für konkrete Antriebsformen wurden zwei komplexe Modelle geregelter Antriebssysteme entwickelt. Der Grundaufbau eines geregelten Antriebssystems lässt sich durch ein Blockdiagramm (Abbildung 17) beschreiben. Diese Grundstruktur kann als Ausgangspunkt für die Entwicklung entsprechender Simulationsmodelle genutzt werden. Damit wird von vornherein die Modularität des Modells und damit die Austauschbarkeit einzelner Blöcke gewährleistet.

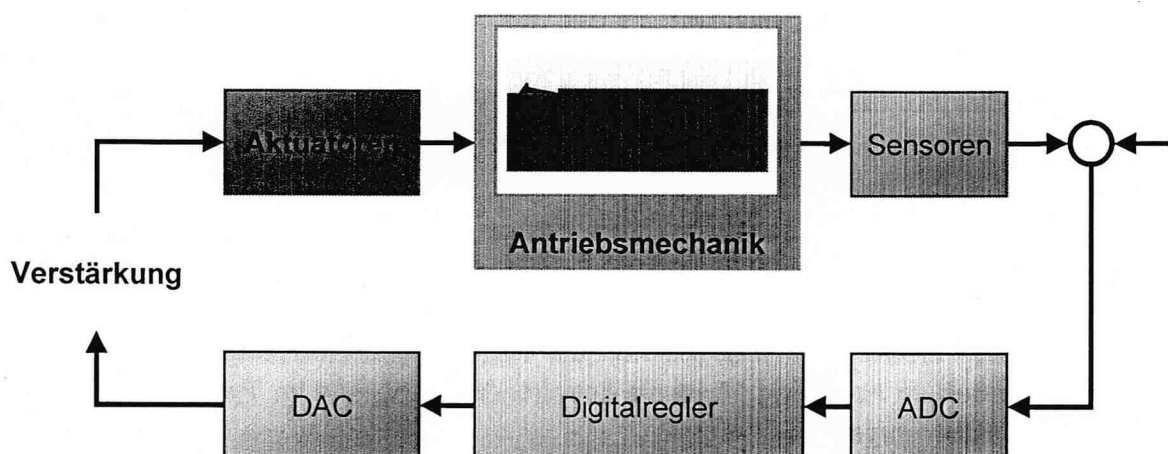


Abbildung 17: Allgemeine Struktur eines geregelten Antriebssystems

#### 2.3.3.1 Modelle für konkreter Antriebsformen

Für folgende Antriebskomponenten wurden im Rahmen des Projekts Referenzmodelle erstellt.

##### Magnetisch gelagerte Antriebswelle

Für die Modellierung einer Antriebswelle mit Verdichter der Firma IMMS in *SimulationX* war es notwendig, die Standardbibliothek Mechanik um die für die Berücksichtigung von Biegeschwingungen erforderlichen Elemente zu erweitern. Abbildung 18 zeigt ein einfaches Modell einer elastischen Welle mit zwei diskreten Elementen. Die innere Struktur der diskreten Elemente wurde mit Hilfe der vorhandenen Grundelemente abgebildet (Abbildung 19).

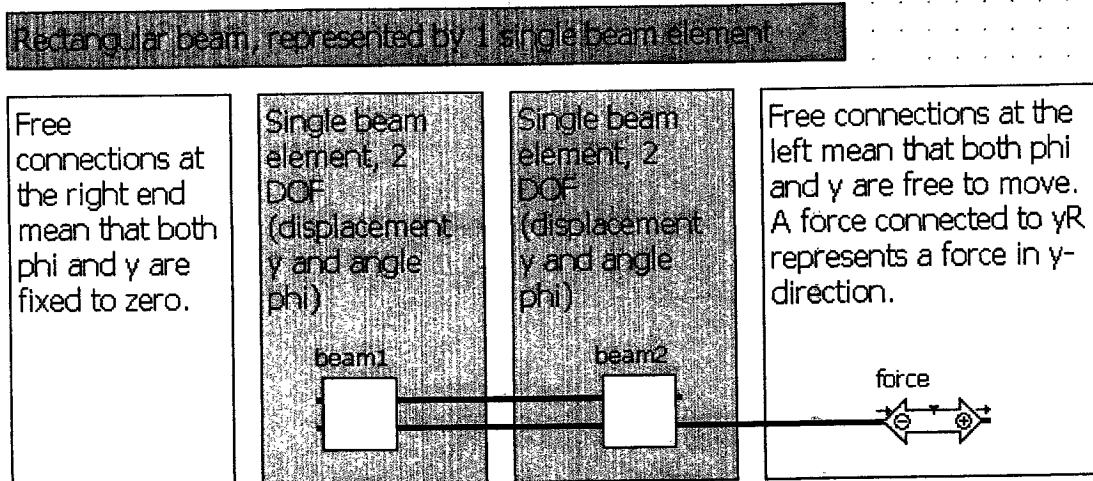


Abbildung 18: Modellierung einer elastischen Welle mit zwei diskreten Elementen

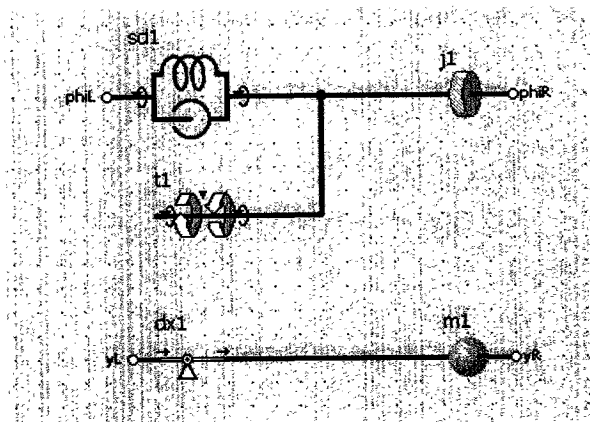


Abbildung 19: Interne Struktur des diskreten Elementes zur Modellierung von Biegung

### Magnetische Kupplung

Für das *SimulationX*-Modell einer rotatorischen Magnetkupplung der Firma IMMS wurden mit dem *TypeDesigner* zwei neue Modellelemente erstellt (Abbildung 20):

- Permanentmagnet (berücksichtigt Remanenzflussdichte und Koerzitivfeldstärke)
- Radiales Luftspaltelement (berücksichtigt Streuflüsse und mechanische Kraftwirkung)

Beide Modelle wurden auf der Basis der ITI Model Description Language (ITI-MDL) mit dem *TypeDesigner* erstellt (Abbildung 21).

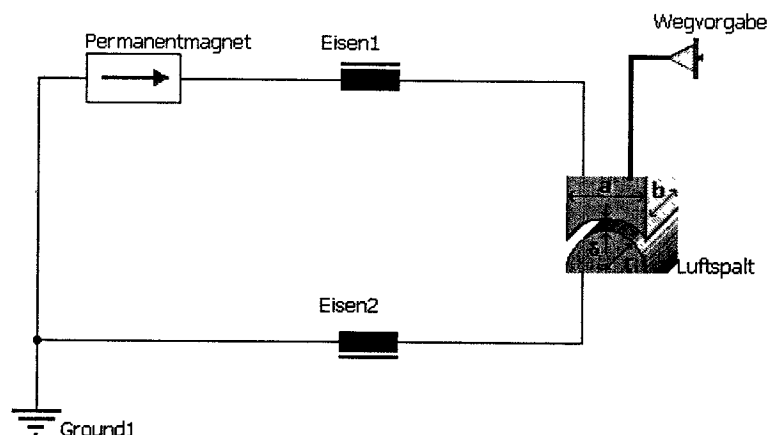


Abbildung 20: Einfaches Modell eines Magnetlagers

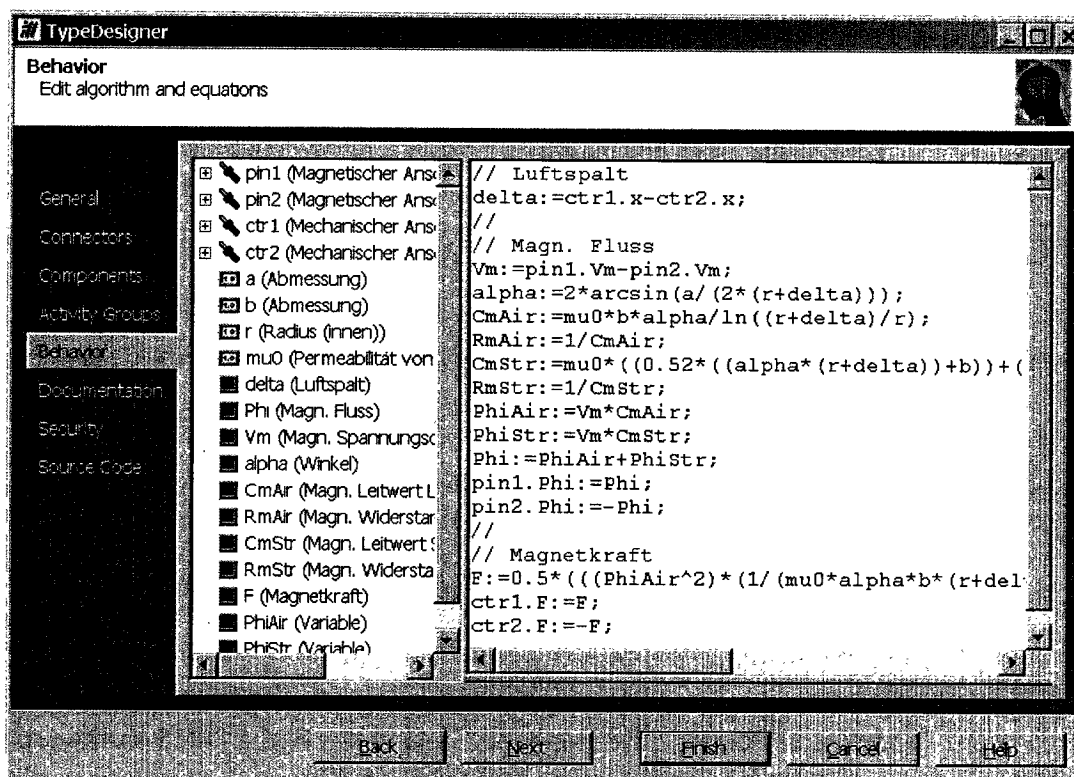


Abbildung 21: Verhaltensbeschreibung des Modellobjekts "Luftspalt"

### 2.3.3.2 Modell eines Planarantriebs des Projektpartners IMMS

Für den beim Projektpartner IMMS entwickelten Planarantrieb PMS 100 (Abbildung 22) wurde im Verlaufe des Projekts ein Modell für *SimulationX* entwickelt. Damit konnte der Nachweis geführt werden, dass es mit *SimulationX* möglich ist, ein heterogenes System dieser Größenordnung zu modellieren und zu simulieren. Das betrachtete System enthält magnetische, elektrische, mechanische sowie regelungstechnische Komponenten.

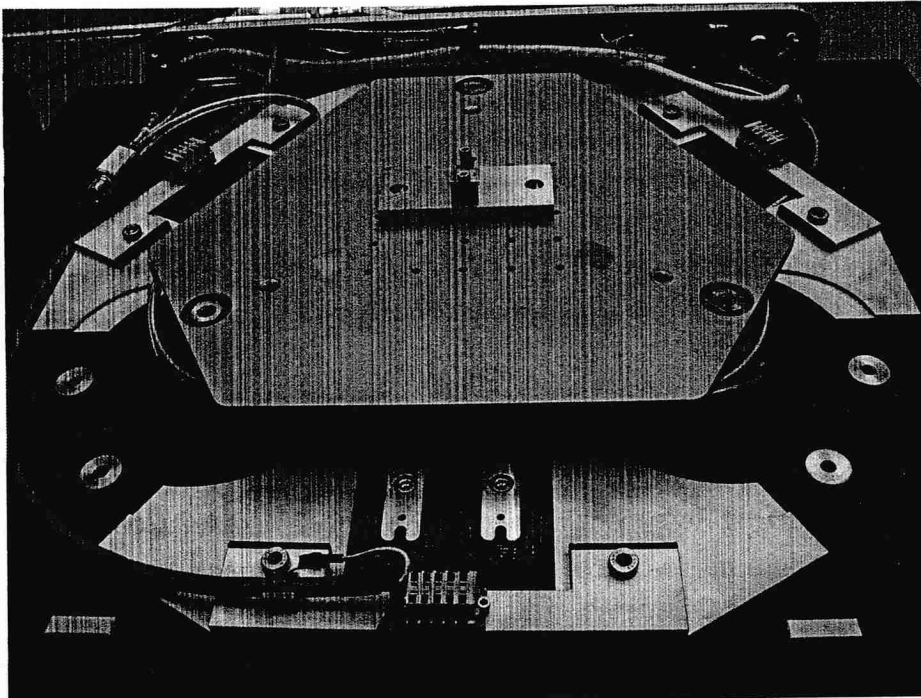


Abbildung 22: Planarantrieb PMS 100

IMMS stellte ITI die technische Beschreibungen des Magnetkreises, CAD-Dateien im STL-Format von Ständer und Läufer sowie ein bereits vorhandenes Simulink-Modell des Positionierungsreglers zur Verfügung. Abbildung 23 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Gesamtsystems.

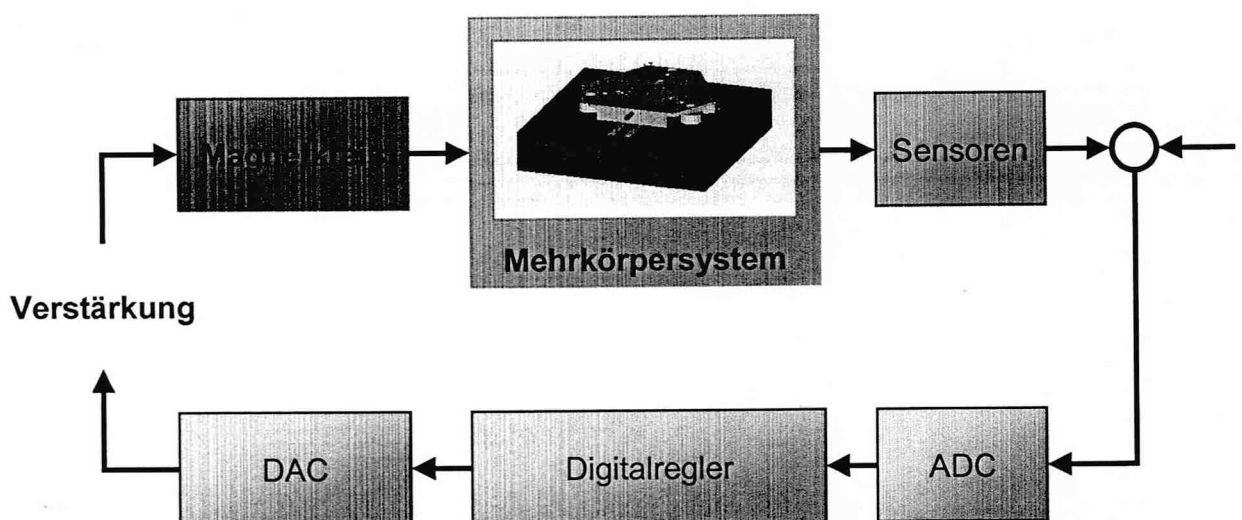


Abbildung 23: Blockdiagramm für geregeltes Antriebssystem für Planarantrieb PMS 100

### 2.3.3.2.1 Magnetkreismodellierung

Der betrachtete Planarantrieb verwendet 3 permanenterregte Linearmotoren, die jeweils 120° zueinander versetzt angeordnet sind. In der Grundplatte (Stator) sind für jeden Antrieb zwei einzeln ansteuerbare Spulen eingelassen. Da die Spulen auf Aluminiumkerne gewickelt sind, können sie als Luftspulen betrachtet werden. Im Läufer befinden sich Permanentmag-

neten, die senkrecht ausgerichtet und über den Statorwicklungen angeordnet sind. Auf der Tisch-abgewandten Seite sind die Magneten mittels Eisenrückschlüssen verbunden.

Über den Magnetkreis erfolgt die Kraftwirkung auf den Läufer bei Stromfluss in den Spulen. Die auftretenden Kräfte variieren stark mit der relativen Lage von Stator und Läufer und ändern sich damit dynamisch mit der Bewegung des Antriebs. Damit ist eine Einbindung des Magnetkreises in das Simulationsmodell sinnvoll.

Der Aufbau des Magnetkreismodells erfolgt auf der Grundlage der Magnetik-Bibliothek in *SimulationX*. Damit wird für den Magnetkreis ein Netzwerkmodell mit konzentrierten Elementen erstellt. Funktionsrelevant sind dabei:

- Permanentmagnete (Modelliert als lineare Magnetflussquellen mit magnetischem Innenwiderstand – dieses lineare Modell gilt, solange der Magnet bei im Vergleich zur Koerzitivfeldstärke kleinen magnetischen Feldstärken betrieben wird, was der normale Betriebsbereich ist); Parametriert mit Remanenzflussdichte, Koerzitivfeldstärke, Geometrie
- Eisenrückschlüsse (nichtlineare magnetische Widerstände mit Sättigungsverhalten) parametrisiert über B-H-Kennlinie und Geometrie
- Luftspaltelemente (Streifelder an den offenen Schenkeln der Permanentmagneten)
- Koppелеlement zur Mechanik (Berechnung einer Kraftwirkung auf die Spulen anhand der magnetischen Flüsse im Kreis, der Feldverteilung an den offenen Schenkeln, der relativen Lage von Stator und Läufer und der Spulenströme)

Da es sich bei den Spulen um Luftspulen handelt, ist der erzeugte Fluss im Vergleich zu dem der Permanentmagneten gering und wird in der Modellierung nicht berücksichtigt. Damit beruht die Kraftwirkung auf die Spulen ausschließlich auf den Flüssen der Streifelder an den Schenkeln der Permanentmagneten. Abbildung 24 zeigt ein Simulationsmodell für den Magnetkreis.

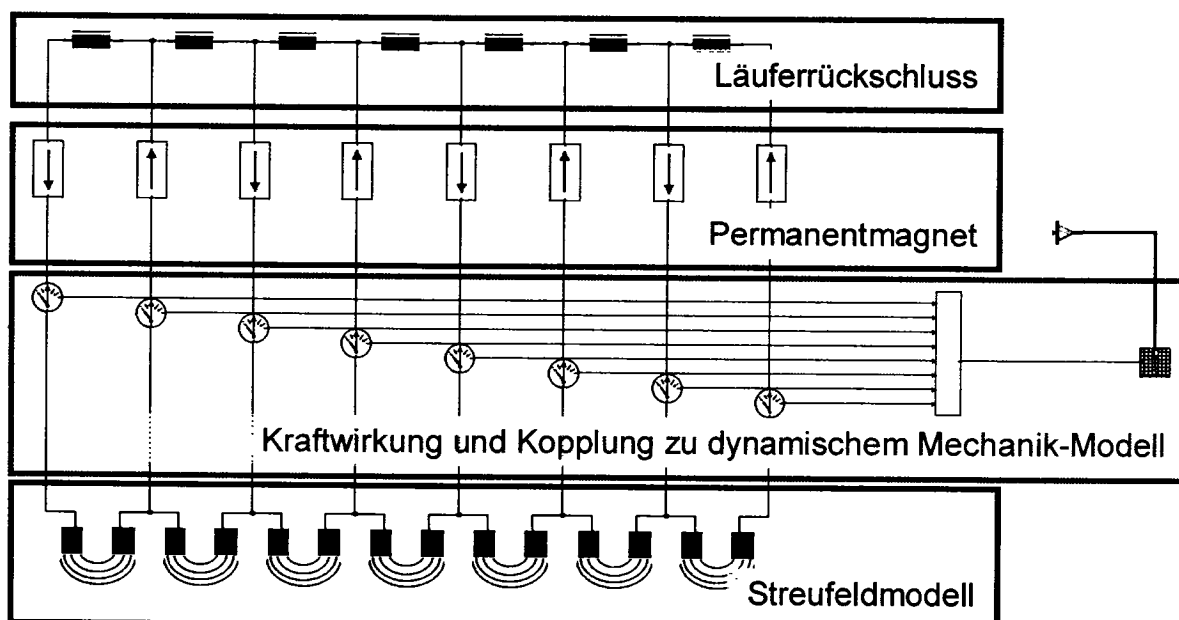


Abbildung 24: Magnetkreismodell



Das Simulationsmodell wurde im Vergleich mit FEM-Rechnungen der Magnetfeldverteilungen und daraus berechneter Kraftwirkungen zwischen dem Läufer und den stromdurchflossenen Spulen für unterschiedliche Lagen des Läufers verifiziert. Dabei hat sich gezeigt, dass die Modellierung als Magnetkreis mit diskreten Elementen trotz des hohen Vereinfachungsgrades eine sehr gute Approximation des detailliert mittels FEM modellierten Verhaltens liefert. Abbildung 25 zeigt die Ergebnisse dieses Vergleichs.

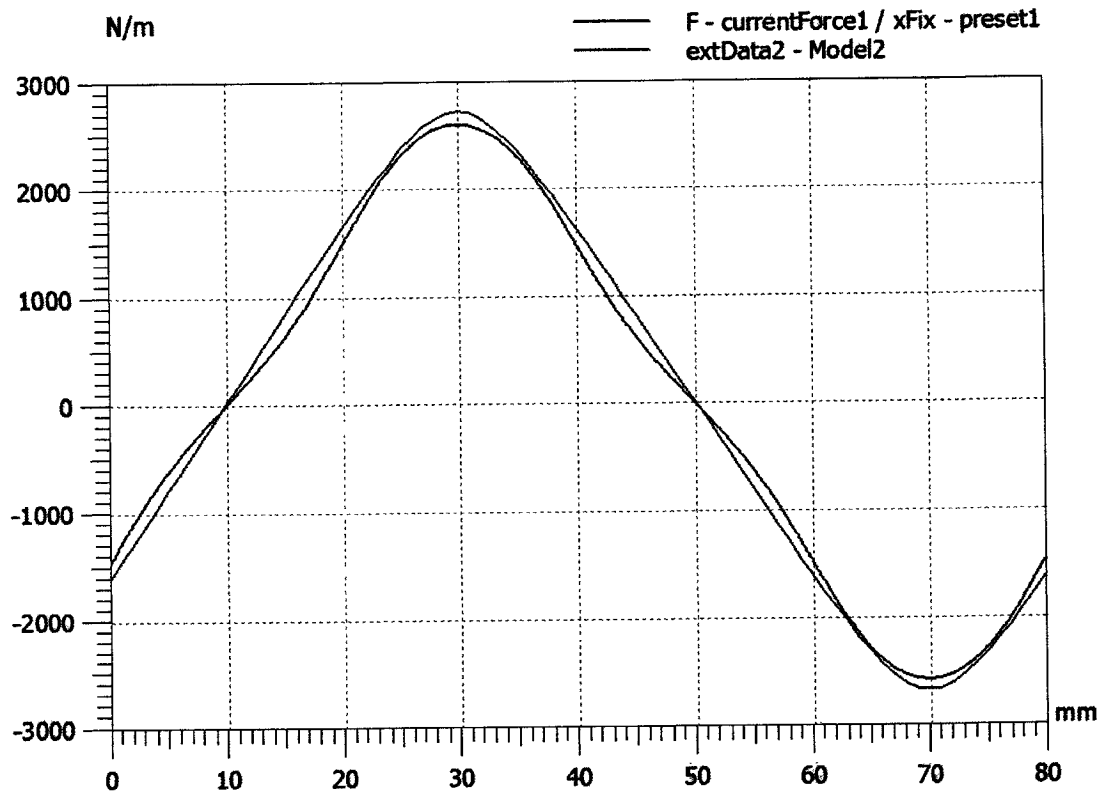


Abbildung 25: Vergleich des Magnetkreismodells aus diskreten Elementen mit einer FEM-Magnetfeldberechnung. Verglichen werden die Kraftwirkung zwischen Spulen und Läufer (Kraftwirkung normiert auf die Magnetlänge)

### 2.3.3.2.2 Modellierung des Mehrkörpersystems

Die Modellierung des Motors in allen mechanischen Freiheitsgraden erfordert die Erstellung eines Mehrkörper-Simulationsmodells, wobei der luftgelagerte Läufer die wesentliche Funktionskomponente im Modell darstellt. Um die dynamischen Eigenschaften des Läufers so genau wie möglich zu beschreiben, wurde die CAD-Import-Funktion von *SimulationX* genutzt (siehe Abschnitt 2.3.2.2) Abbildung 13 zeigt das importierte CAD-Modell des Läufers in 3D-Ansicht. Damit werden Massen und Drehträgheiten anhand der Materialeigenschaften und der CAD-Daten exakt berechnet.

In der hier beschriebenen Simulation wird davon ausgegangen, dass sich der Läufer in konstanter Höhe über dem Stator bewegt und der 3D-Körper des Läufers wird im Modell entsprechend geführt. Eine Abstützung auf als Federn modellierten Luftlagern ist ebenfalls umsetzbar.

### 2.3.3.2.3 Modellierung der Positionsregelung

Das Simulink-Modell des Positionierungsreglers besitzt einen hierarchischen Aufbau. Beim Umsetzen in ein *SimulationX*-Modell wurde diese Struktur weitgehend übernommen. Dazu wurden jeweils mehrere Komponenten eines *SimulationX*-Modells als Compound zusammengefasst. Die so gekapselten Teilmodelle entsprechen den benutzerdefinierten Subsystemen in Simulink. Ein Beispiel für einen Compound innerhalb des *SimulationX*-Modells der Positionierungsregelung ist der in Abbildung 26 dargestellte Controller. Zum Vergleich ist auch das entsprechende Subsystem aus dem Simulink-Modell dargestellt.

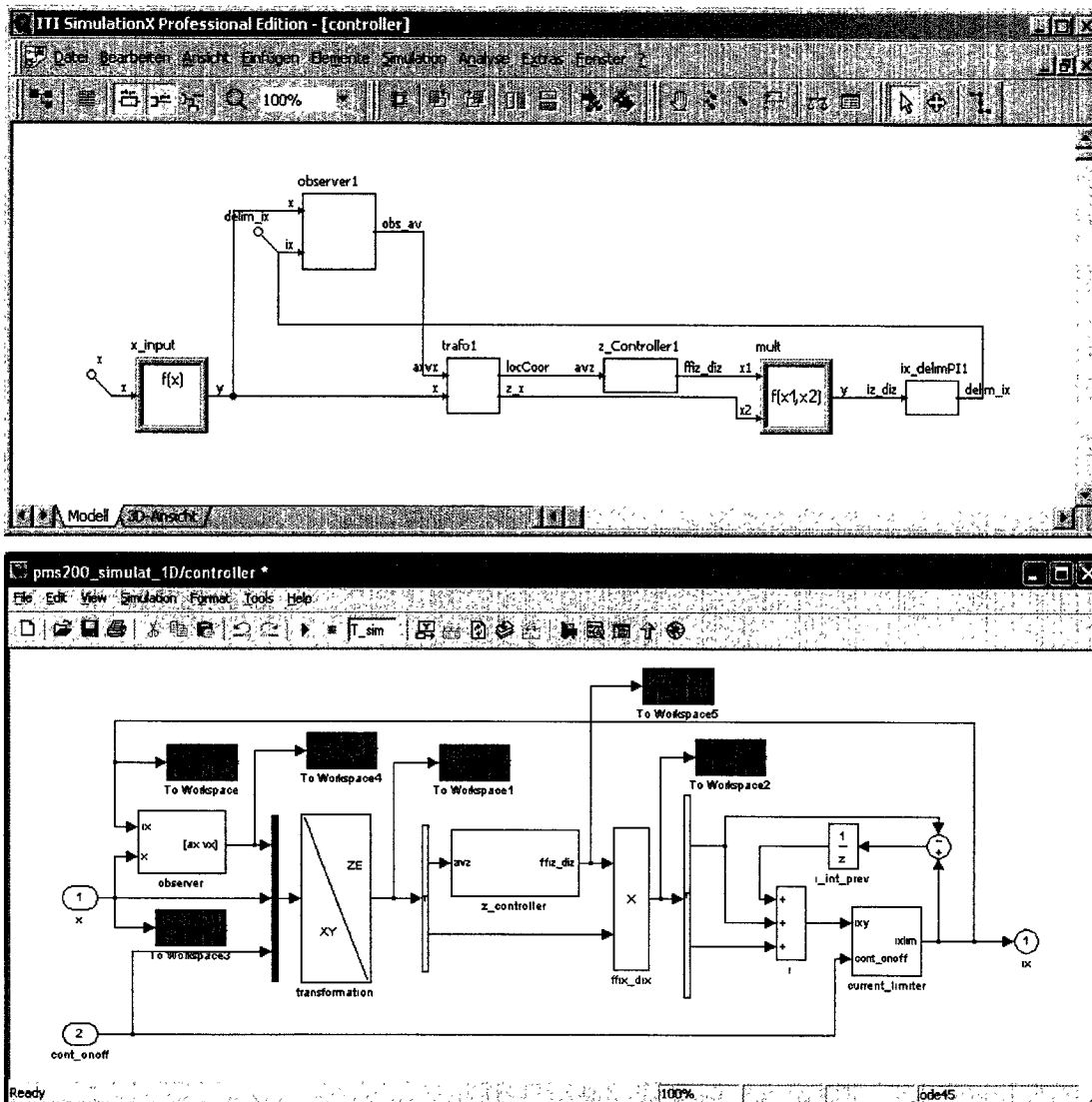


Abbildung 26: Der Controller der Positionierungsregelung PMS100; *SimulationX*-Modell (links) und Simulink-Modell (rechts); im Simulink-Modell wurden die grün gekennzeichneten Blöcke zum Auslesen von Testdaten ergänzt.

*SimulationX* bietet weiterhin eine einfache Möglichkeit, vorhandene Modellobjekttypen durch Ableiten zu modifizieren und eigene Typen über eine Verhaltensbeschreibung zu definieren. Beim Generieren neuer Typen wird der Anwender durch das komfortable Tool *TypeDesigner* unterstützt. Für die Verhaltensbeschreibung kommt die an *Modelica* angelehnte Sprache ITI-MDL zum Einsatz. Von allen diesen Möglichkeiten wurde bei der Umsetzung des Ge-

samtmodell des PMS100 Gebrauch gemacht. Selbstdefinierte Typen können innerhalb des Modells, in dem sie benutzt werden, oder als externe Typen in einem speziell dafür vorgesehenen Verzeichnis gespeichert werden. Im *SimulationX*-Modell des Positionierungsreglers kommen ausschließlich externe Typen zum Einsatz. Das erleichtert das Testen einzelner Teilmodelle des Reglers und den schrittweisen hierarchischen Aufbau des Reglermodells.

Das PMS100-Gesamtmodell ist ein stark nichtlineares System. Nur bei seinen linearen Teilsystemen kann man die Funktionalität durch einen Vergleich der Impuls-, Sprung- oder Rampenantworten des Simulink- mit denen des *SimulationX*-Modells testen. Für den Test der nichtlinearen Teilsysteme sind sinnvolle Eingangssignale zu wählen. Dazu wird das Simulink-Modell des Positionierungsreglers zusammen mit dem Kennlinienmodell des Planantriebs als Regelstrecke und der vorgegebenen Solltrajektorie simuliert. Die Signalverläufe an den Ein- und Ausgängen des zu testenden Blocks werden dabei in Dateien geschrieben. In *SimulationX* lassen sich die so aufgezeichneten Daten in Kennlinien-Blöcke importieren. So ist ein direkter Vergleich der Ergebnisse möglich (Abbildung 27).

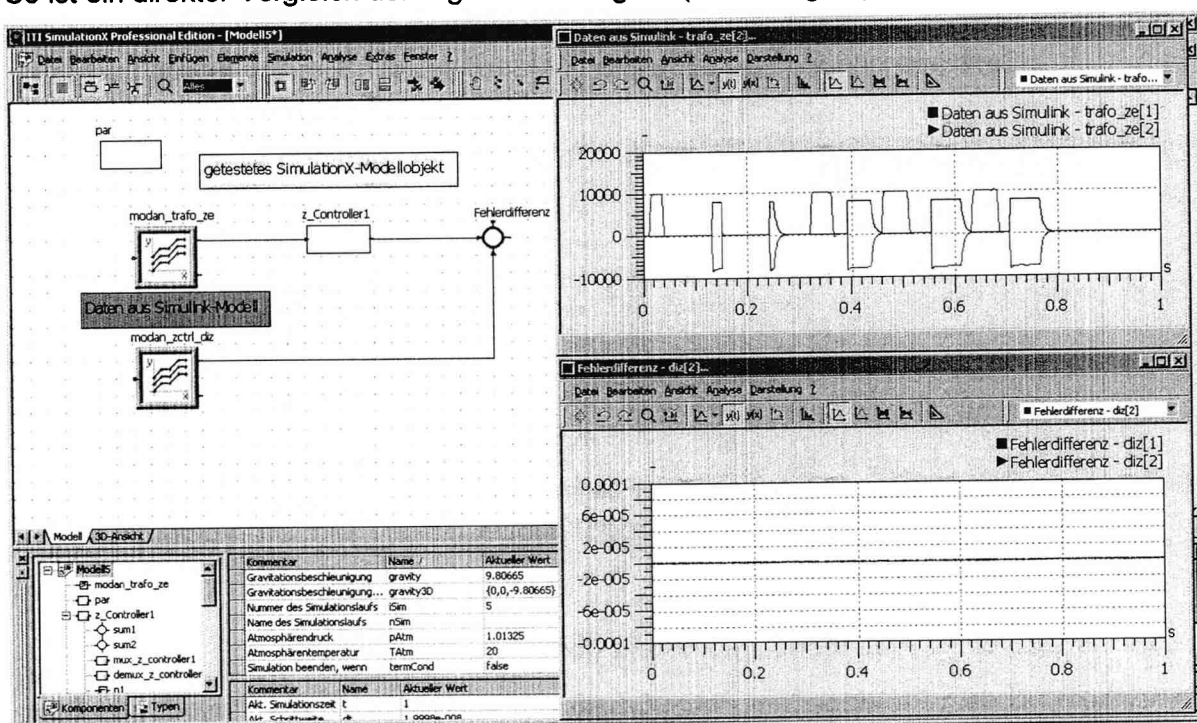


Abbildung 27: Test eines einzelnen Modellobjektes des *SimulationX*-Modells anhand der Daten aus dem Simulink-Modell

Das Gesamtmodell des PMS100 ist ein Beispiel für ein gemischtes zeitkontinuierliches und zeitdiskretes System. Bei der Simulation wird neben dem Algebra-Differentialgleichungssystem für Magnetkreis und Mechanik auch das zeitdiskrete System für den digitalen Positionierungsregler gelöst. Algebraische Schleifen im zeitdiskreten System stellen dabei ein besonderes Problem dar, das in *SimulationX* durch eine spezielle Event-Iteration gelöst wird. Während der Arbeit am Modell des PMS100 konnte einen Fehler in der Event-Iteration aufgespürt und behoben werden.

Das Gesamtmodell wurde erfolgreich mit *SimulationX* simuliert. In Abbildung 28 sind die dabei ermittelten Spulenströme als Stellgrößen der Positionierungsregelung zu sehen,

Abbildung 29 zeigt die x-Koordinate des Läufers als zugehörige Regelgröße. Zum Vergleich sind jeweils die Simulationsergebnisse für das Simulink-Modell mit abgebildet. Die noch vorhandenen leichten Abweichungen in den Stellgrößen liegen offenbar in der physikalischen Modellierung des Magnetkreises begründet. Eine genauere Untersuchung diesbezüglich steht noch aus.

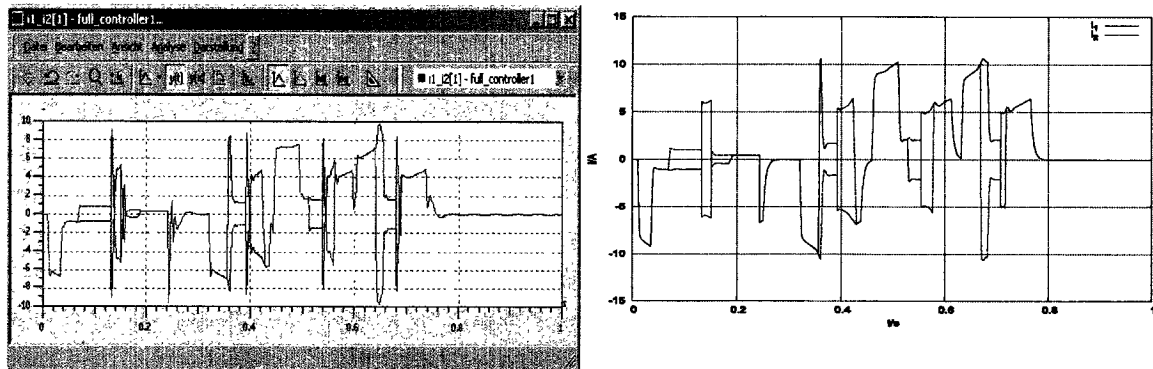


Abbildung 28: Stellsignale (Spulenströme) der Positionierungsregelung PMS100  
Simulationsergebnisse *SimulationX*-Modell (links) / Simulink-Modell (rechts)

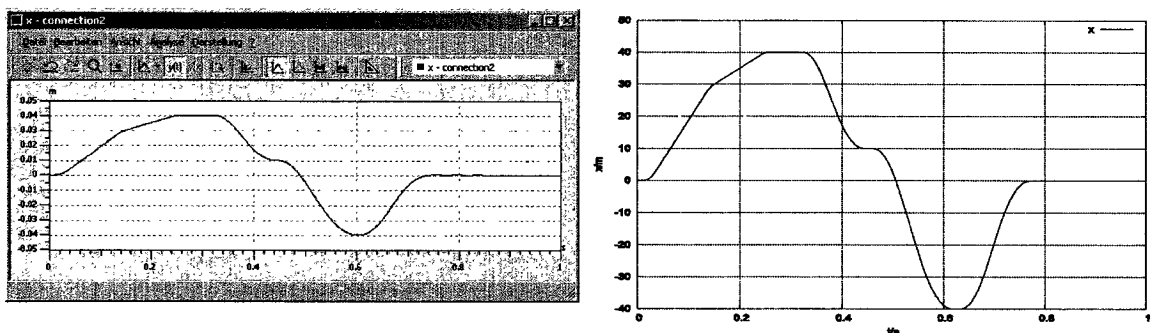


Abbildung 29: Regelgrößen (x-Position) der Positionierungsregelung PMS100  
Simulationsergebnisse *SimulationX*-Modell (links) / Simulink-Modell (rechts)

### 2.3.3.3 Modell eines Präzisionstribometers der Firma TETRA

Gemeinsam mit dem Projektpartner FhG-IIS/EAS wurde im Verlaufe des Projekts ein *SimulationX*-Modell für ein Präzisionstribometer der Firma TETRA entwickelt. Ausgangspunkt war wiederum das allgemeine Modell eines geregelten Antriebs aus Abschnitt 2.3.3. Ein auf das konkrete Problem angepasste Diagramm ist in Abbildung 30 zu sehen. Das Modell setzt sich aus folgenden Einzelkomponenten zusammen:

- Piezoaktor
- Verformungskörper
- Sensoren
- Regler (inkl. AD- bzw. DA-Wandlung)
- Verstärkung

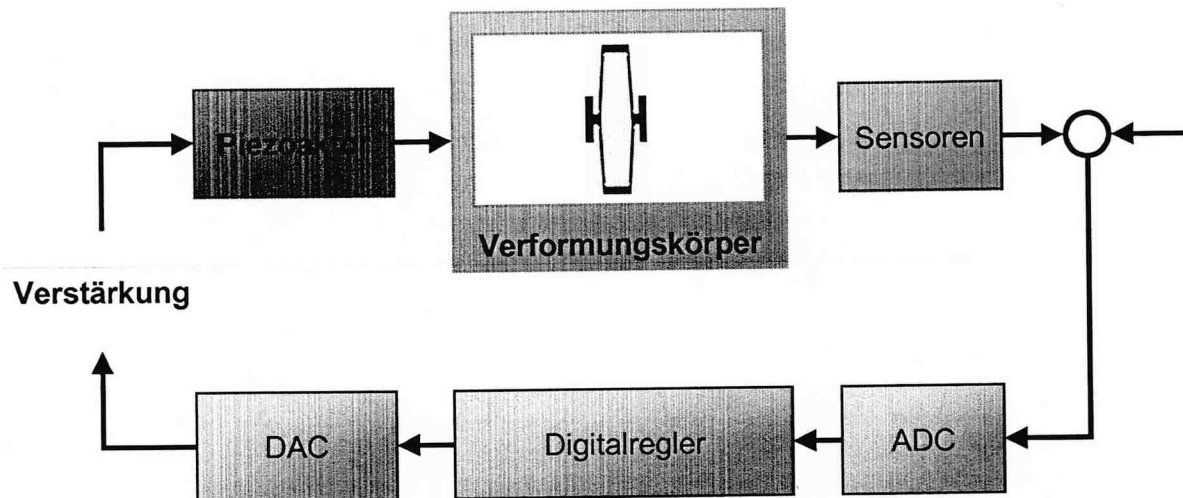


Abbildung 30: Blockdiagramm für geregeltes Antriebssystem für ein Präzisionstribometer

Die einzelnen Komponenten wurden durch den Projektpartner FhG-IIS/EAS entwickelt und durch ITI zu einem Gesamtmodell zusammengefügt. Für den Verformungskörper wurden durch FhG-IIS/EAS umfangreiche FEM-Berechnung durchgeführt, anhand derer die Bauform optimiert werden konnte. Aus den Ergebnissen der FEM-Rechnung wurde durch Approximation mit dem Tool MARIBU [7], [8] ein Ersatzmodell entwickelt welches über das *External Function Interface* in das *SimulationX* Modell integriert werden konnte.

Das Hystereseverhalten des Piezoaktors wird durch ein Preisachmodell [4] beschrieben, welches ebenfalls als externe Funktion eingebunden wurde.

Die Block *Verstärkung* wird durch eine Ansteuerschaltung realisiert, die als SPICE-Netzliste in *SimulationX* importiert werden konnte.

Als Regler wurde zunächst ein analoger PID-Regler eingesetzt. Das Messsystem wurde im Modell bereits mit vorgesehen. Derzeit beschränkt sich diese Komponente auf das Weiterleiten der entsprechenden Bewegungsgrößen. Das daraus resultierende Modell sowie einige Simulationsergebnisse sind in den Abbildung 31 bis Abbildung 33 zu sehen.

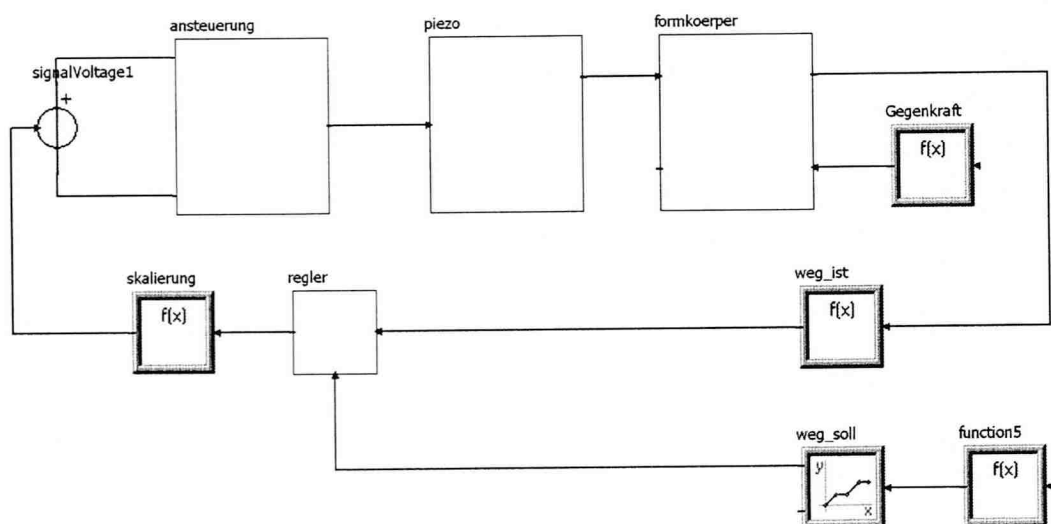


Abbildung 31: Gesamtmodell des geregelten Antriebs für ein Präzisionstribometer

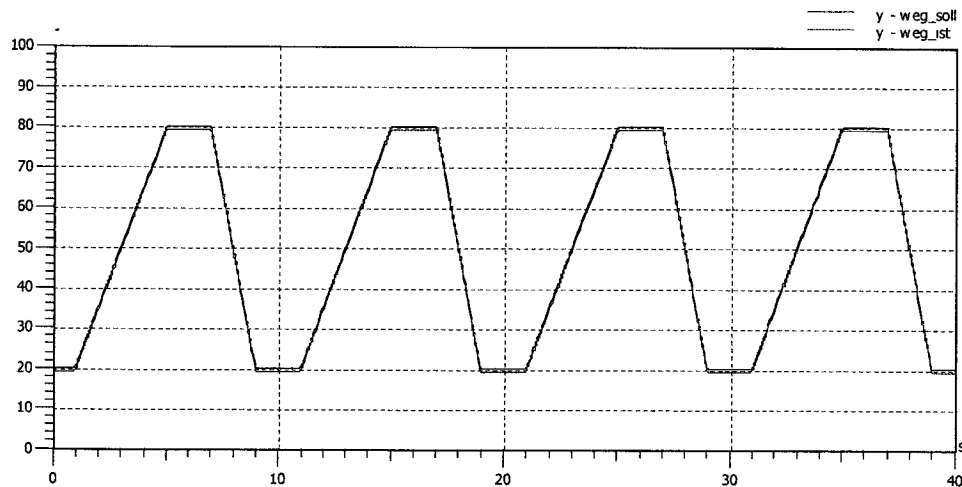
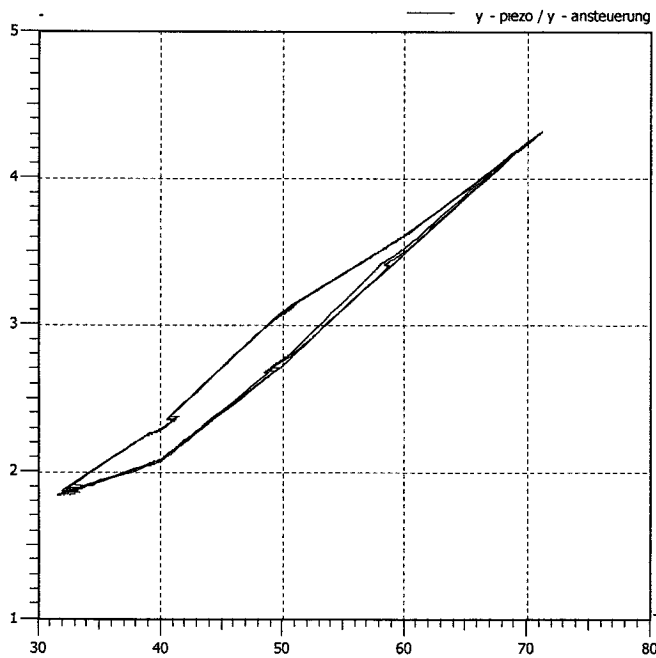
Abbildung 32: Vergleich Soll- und Ist-Auslenkung in  $\mu\text{m}$ 

Abbildung 33: Hysterese kennlinie des Piezoaktors

### 2.3.4 Prototyp eines Webinterfaces für den Zugriff auf *SimulationX*-Modelle

Der Prototyp eines Webinterface für den Zugriff auf *SimulationX*-Modelle sollte folgenden Leistungsumfang bieten:

- Auswahl eines Modells aus einer List oder einem Baum
- Ansicht der Modellstruktur
- Interaktive Anzeige und Änderung von Modellparametern über Tabelle oder durch Klick auf das Modellobjekt in der Modellansicht

- Starten, Unterbrechen und Rücksetzen der Simulationsrechnung
- Visualisierung der Berechnungsergebnisse in Diagrammen
- Download der Berechnungsergebnisse im ASCII-Format

Implementierungsbasis bildet ASP.Net, eine Technologie für die Entwicklung aktiver Webinhalte auf der Basis des .Net-Frameworks der Firma Microsoft. Die grundlegende Architektur der realisierten Anwendung ist in Abbildung 34 dargestellt.

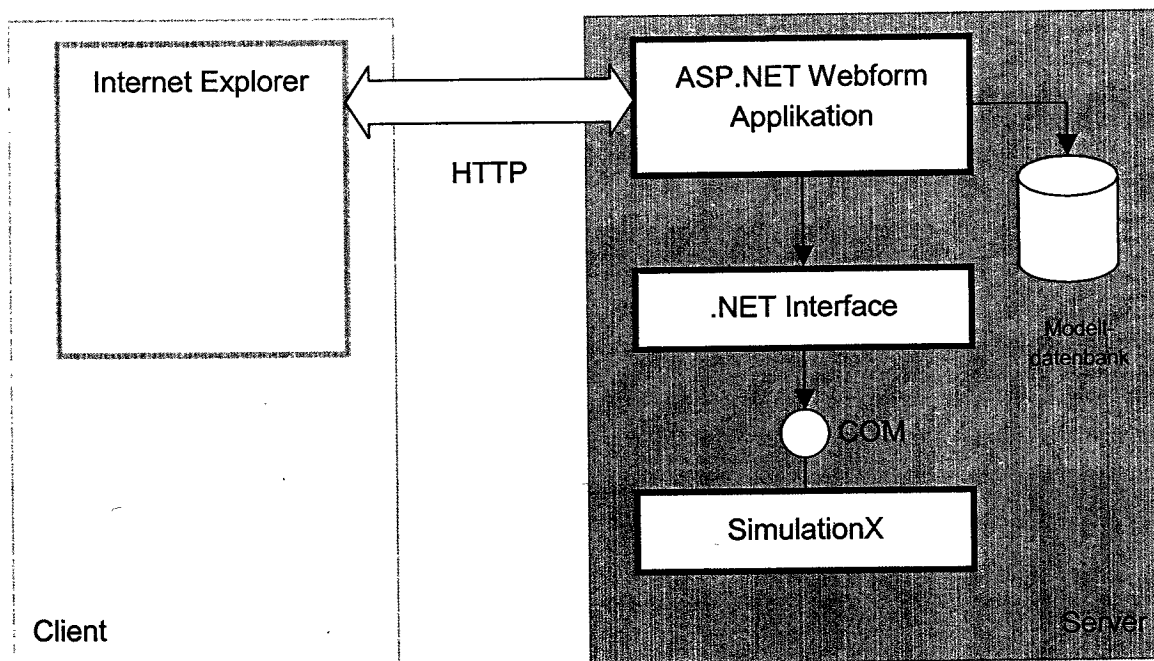


Abbildung 34: Architektur des Webinterface für *SimulationX*-Modelle

Die Server-Komponente verwaltet die zur Verfügung stehenden Modelle in einer Datenbank. Nach dem Einrichten einer Verbindung durch einen Anwender werden die Modelle hierarchisch geordnet angezeigt. Nach der Auswahl eines Modells wird die entsprechende Modell-datei aus der Datenbank geladen und an das auf dem Server im Hintergrund agierende *SimulationX* übergeben. Die Kommunikation zwischen Server und Simulator wird über das COM-Interface von *SimulationX* realisiert. Das COM-Interface bietet die Möglichkeit, die vollständige Funktionalität der Anwendung von außen zu steuern. Die Einbindung von COM-Komponenten in eine .Net-Applikation wird über entsprechende Wrapper-Klassen erleichtert. Der Client nutzt jedoch dieses Interface zur Kommunikation mit *SimulationX* nicht direkt, sondern wendet sich über das HTTP-Protokoll ausschließlich an die Serverkomponente der Applikation, welche die entsprechenden Anfragen an das im Hintergrund laufende Simulationsprogramm weiterleitet.

Um den wiederholten Seitenaufbau während des Austauschs von Informationen zwischen Client und Server auf ein Mindestmaß zu reduzieren, wird ein spezielles ActiveX-Control eingesetzt, das über ein Callback-Mechanismus die gezielte Änderung von Formularinhalten zu-

lässt, ohne die komplette Seite jedes Mal neu aufbauen zu müssen. Dass dies auf Kosten der Plattformunabhängigkeit geschieht, wurde dabei in Kauf genommen.

Der erste Entwurf der Benutzeroberfläche orientiert sich stark am GUI von *SimulationX*. Die Bibliotheksleiste wurde durch einen „Modellbaum“ ersetzt. Modellansicht sowie Modellexplorer wurden fast unverändert auf die Web-Oberfläche portiert. Ergebnisverläufe werden in eigenen Fenstern angezeigt, die entsprechend des Berechnungszustands aktualisiert werden (Abbildung 35).

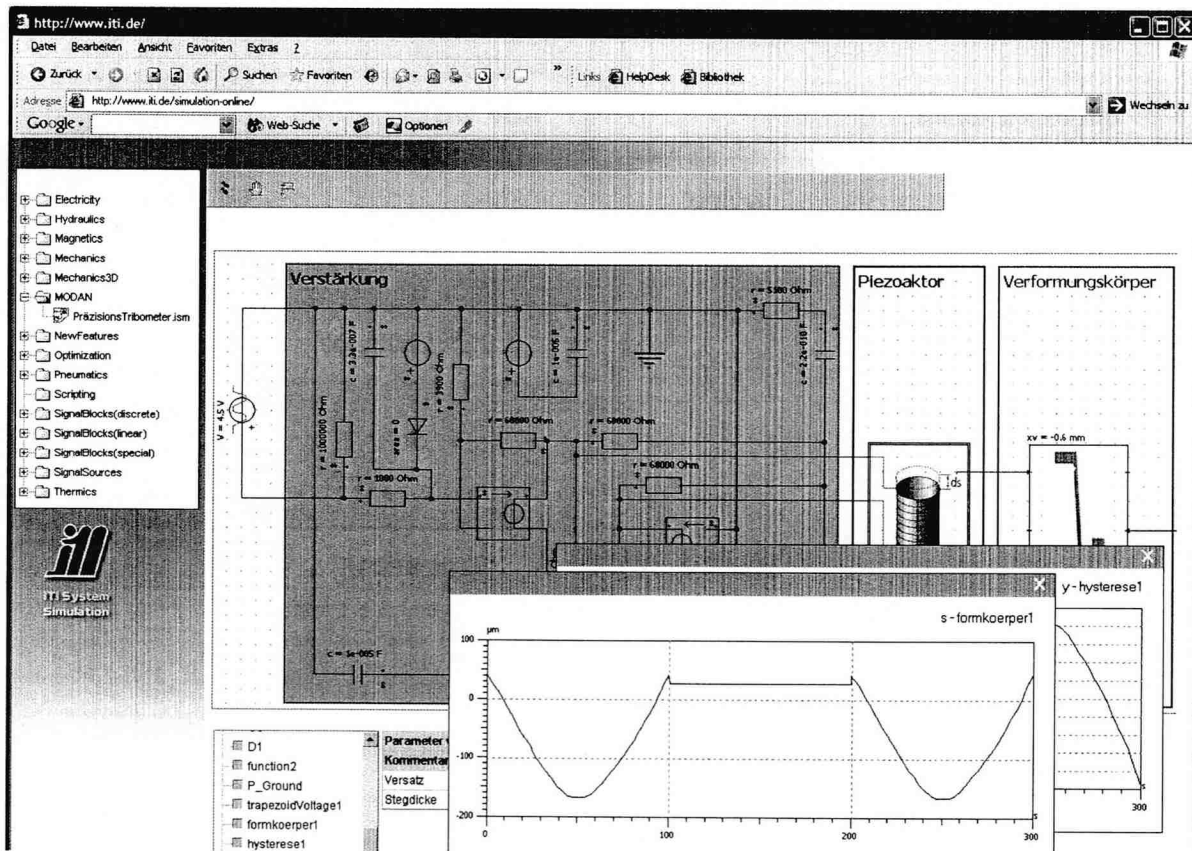


Abbildung 35: Weboberfläche für *SimulationX*-Modelle

Im Nachhinein hat sich gezeigt, dass die Erwartungen, die durch eine ähnlich zur Desktopapplikation gestaltete Oberfläche geweckt werden, in diesem Rahmen nicht zu erfüllen sind. Der Einsatz von Technologien wie Flash oder Java-Applets könnte hier weiterführen.

## 2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen

Mit den Ergebnissen des Projekts werden anwendungsfreundliche und damit leichter nutzbarer rechnergestützter Modellierung-, Simulations- und Entwurfstechniken für die Entwicklung von MST-Komponenten und Fertigungseinrichtungen insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen zugänglich gemacht. Die Vorteile des effizienten Einsatzes produktgruppenspezifisch aufbereiteter Tools (Simulatoren, Modelle) konnte anhand von konkreten Zielprodukten demonstriert werden.



Mitte 2005 wird eine neue Version der Simulationssoftware *SimulationX* am Markt eingeführt, in die wesentliche Ergebnisse des Verbundprojekts einfließen werden. ITI erwartet mit diesem Produkt die Erweiterung von Marktanteilen nicht nur bei den traditionellen Zielgruppen im Fahrzeug und Anlagenbau sondern vor allem bei Anwendern im Bereich der MST. Um diese Ziele zu erreichen, sind unter anderem die aktive Teilnahme an Messen und anderen Fachveranstaltungen im In- und Ausland geplant.

Für angepasste Lösungen auf der Basis von *SimulationX* (z.B. speziell angepasste Modelle mit Webinterface) bieten vor allem kleiner Unternehmen, einen wachsenden Absatzmarkt. Dieses Potential wird von ITI in den nächsten Jahren verstärkt genutzt werden.

## **2.5 Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen**

Weiterentwicklungen und Tendenzen auf dem Gebiet der Entwurfs- und Simulationssoftware wurden während der Projektlaufzeit aufmerksam verfolgt. Erkennbar ist ein Trend hin zu standardisierten und damit herstellerunabhängigen Beschreibungsmitteln. Sprachentwicklungen wie VHDL-AMS oder *Modelica* gehen in diese Richtung. Während VHDL-AMS mittlerweile von einer ganzen Reihe von Toolanbietern unterstützt wird, gibt es für *Modelica* mit dem Programm *Dymola* der Firma *Dynasim* derzeit nur ein kommerziell verfügbares Tool.

Die Sprache *Modelica* baut auf modernen objektorientierten Paradigmen auf und wurde – anders als VHDL-AMS - von vornherein unabhängig von einer bestimmten physikalischen Domäne entwickelt. Sie bietet damit eine gute Basis zur Formulierung ganzheitlicher Systemmodelle auch für die MST. Mit der in *SimulationX* implementierten Modellbeschreibungssprache (MDL), die sich bereits weitgehend an *Modelica* orientiert, wurde ein wichtiger Schritt zur Etablierung von *Modelica* als Standardbeschreibungsmittel getan.

## **2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse**

Erste Projektergebnisse wurden im Rahmen des öffentlichen Statusseminars am 6. Oktober 2004 in Fulda präsentiert. Im Mittelpunkt stand dort die Vorstellung der Modellierungsarbeiten für geregelte Antriebssysteme der Projektpartner IMMS und TETRA. Für das laufende Jahr ist eine gemeinsame Veröffentlichung mit IMMS geplant, die sich mit der Modellierung des Planarantriebs PMS 100 befassen wird.

## Literatur

- [1] WikiMedia GmbH: SPICE (27.04.2005). <http://de.wikipedia.org/wiki/SPICE>
- [2] WikiMedia GmbH: STL-Schnittstelle (27.04.2005). <http://de.wikipedia.org/wiki/STL-Schnittstelle>
- [3] Modelica Association: Modelica – A Unified Object-Oriented Language for Physical System Modeling, Language Specification, Version 2.2. Modelica Association, 2005.
- [4] Mittal, S.; Menq, C.-H.: Hysteresis compensation in electromagnetic actuators through preisach model inversion, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 5, No. 4, December 2000, S. 394-409
- [5] Kuhnen, K.; Janocha, H.: Inverse Steuerung für den Großsignalbetrieb von Piezoaktoren. Automatisierungs-technik 50 (2000) 9, S. 439-450
- [6] ITI GmbH: ITI SimulationX Manual. ITI GmbH Dresden 2004.
- [7] Parodat, S.: MARABU - Ein Werkzeug zur Approximation nichtlinearer Kennlinien mit radialen Basisfunktionen. Proceedings 6. Workshop „Methoden und Werkzeuge zum Entwurf von Mikrosystemen“, Paderborn, 4. und 5. 12. 1997, 49-58.
- [8] Mees, A. I.; Jackson, M. F.; Chua, L. O.: Device Modeling by Radial Basis Functions. IEEE Transactions on CAS-I 39(1992)1, 19-27.



**Forschungsverbundprojekt  
„Entwurf und Modellierung von Antriebssystemen  
für die Mikrosystemtechnik“**

**MODAN**  
**www.modan.org**

16.02.1049

**Abschlußbericht des Teilprojektes  
„Integration von intelligenten Präzisionsantriebs-  
komponenten in Präzisions-  
Laserbearbeitungssysteme“  
LLT Applikation GmbH**

Verbund-Nr.: V2285  
Fördermittelgeber: BMBF  
Projektträger: VDI/VDE-IT Teltow  
Betreuer: Dipl. - Ing. Chr. Breckenfelder / Dipl. - Ing. S. Krüger

## Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellungen .....	3
1.1	Aufgabenstellung .....	3
1.2	Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens .....	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	4
1.4	Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand.....	5
1.4.1	Für das Vorhaben genutzte bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte .....	5
1.4.2	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Verbundprojektes .....	6
1.4.3	Verwendete Fachliteratur, genutzte Informations- und Dokumentationsdienste.....	6
2	Eingehende Darstellungen .....	8
2.1	Projektziel .....	8
2.2	Projektdurchführung.....	8
2.2.1	Analyse des Standes der Technik.....	8
2.2.2	Charakterisierung des Reglerverhaltens am Kreuztisch mit Linearmotoren.....	10
2.2.3	Charakterisierung der Wechselwirkung von Läufern in luftlagergeführten Achsen in Kreuztischen.....	13
2.2.4	Zusammenfassung der Ergebnisse zu den Untersuchungen am Kreuztisch .....	16
2.2.5	Untersuchungen am Planarantrieb.....	16
2.2.6	Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchungen am Planartisch.....	19
2.2.7	Vergleichende Untersuchungen zur Dynamik des Demonstrators.....	19
2.2.8	Einsatz neuer Strahlquellen für die Präzisions- und Mikrobearbeitung .....	21
2.3	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	22
2.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen .....	23
2.5	Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen .....	23
2.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	24
3	Fortschreibung des Verwertungsplans .....	24

Anlage 1: Berichtsblatt

Anlage 2: Document Control Sheet

Anlage 3: Erfolgskontrollbericht

## 1 Kurzdarstellungen

### 1.1 Aufgabenstellung

Zielstellung des Teilprojektes von LLT Applikation GmbH im Rahmen des Verbundvorhabens MODAN war die Mitarbeit bei der Entwicklung eines modularen Systems intelligenter Präzisionsantriebs- und Steuerungskomponenten und insbesondere die Integration solcher Komponenten in Laser-Präzisionsbearbeitungssysteme verbunden mit dem Einsatz neuer Laserstrahlquellen. Auf dieser Basis sollten die Projektergebnisse dazu beitragen, vorhandene Maschinenkonzepte hinsichtlich ihrer funktionalen Eigenschaften wie Prozessgenauigkeit, Dynamik, Langzeitstabilität u.a. zu verbessern bzw. neue Konzepte und Systemkomponenten für die Laser-Präzisions- und Mikrobearbeitung zu entwickeln. Dazu wurden während der Projektlaufzeit unter Einbeziehung der anderen Projektpartner mehrere Demonstratoren aufgebaut und erprobt und eine Vielzahl von Applikationsuntersuchungen zur Laserpräzisions- und Mikrobearbeitung durchgeführt.

Es wurden folgende Schwerpunkte bearbeitet:

- Definition der Anforderungsprofile für verschiedene mehrachsige Präzisions-Positioniersystemanordnungen mit Translations- und Rotationsbewegungen für die Anwendung in Laser-Präzisionsbearbeitungssystemen (Mechanik, Elektronik, Software),
- F&E - begleitende Beratung bei Entwurf und praktischer Umsetzung von mehrachsigen Präzisionspositioniersystemen insbesondere bei den Projektpartnern LAT Suhl AG und TETRA GmbH,
- Integration der Funktionsmuster verschiedener Antriebs- und Steuerungskomponenten in Laser-Präzisionsbearbeitungssysteme, Inbetriebnahmen und Erprobung der Komponenten sowie der Gesamtsysteme der Demonstratoren,
- Erstellung von Systemkomponenten und technologischem Equipment (Spannmittel, Schneidtische usw.) für den Test der Demonstratoren,
- Überprüfung der Arbeitsweise mit den Programmsystemen und Ableitung von weiteren Anforderungen an die Simulations- und Optimierungssoftware bzw. von Änderungswünschen,
- Applikationsuntersuchungen und Prozessoptimierung für die mehrachsigen Präzisions-Positioniersysteme.

### 1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

Ausgangspunkt für die Durchführung des Verbundprojektes bzw. die Beteiligung von LLT Applikation GmbH an diesem Vorhaben, waren einerseits das im Unternehmen vorhandene, umfangreiche technologische Know how auf dem Gebiet der Laser-Präzisions- und Mikrobearbeitung und andererseits die aus verschiedenen vorausgegangenen Entwicklungsprojekten gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen. Insofern war die Mitwirkung von LLT Applikation am Verbundprojekt MODAN eine zielgerichtete Weiterführung von Entwicklungsauf-

gaben für den Präzisionsmaschinenbau und ein weiterer Baustein zur Umsetzung der strategischen Zielstellungen des Unternehmens.

Mit einigen der am Verbundprojekt MODAN beteiligten Unternehmen gab es bereits Forschungsk Kooperation auch bei früheren Entwicklungsvorhaben. Dies trifft insbesondere auf die Firmen LAT Suhl AG, TETRA GmbH und IMMS gGmbH zu, mit denen eine Zusammenarbeit im Rahmen eines InnoRegio-Projektes „Innosko“ erfolgte. Letztlich flossen auch bei diesem Vorhaben gewonnene Erkenntnisse und Erfahrungen in das MODAN-Projekt ein.

Eine weitere wichtige Voraussetzung für die Durchführung des Vorhabens bei LLT Applikation war eine im Zeitraum 2001 bis 2003 durchgeführte, umfangreiche Investition, bei der neben dem Bau eines neuen Firmengebäude im Industriegelände „Am Vogelherd“ auch eine Reihe von Systemkomponenten für den Aufbau von neuen Maschinenkonzepten beschafft wurden, ohne die das Projekt nicht hätte durchgeführt werden können.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Durchführung des Projektes erfolgte auf der Grundlage einer umfangreichen und komplexen Projektbeschreibung und eines zwischen den Projektpartnern abgestimmten detaillierten Rahmenplanes. In diesem Rahmenplan waren die inhaltlichen Schnittstellen zwischen den Teilprojekten der Partner, die den Gesamterfolg des Vorhabens maßgeblich bestimmenden Zwischenergebnisse (Meilensteine) und die Laufzeit des Projektes definiert. Die Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern zu Fragen der gegenseitigen Nutzung von Teilergebnissen aus dem Projekt, zur Behandlung von Schutzrechtsmaßnahmen und Patenten und letztlich zum Geheimmissschutz wurde im Rahmen einer Kooperationsvereinbarung geregelt. Die Bearbeitung des Teilprojektes von LLT Applikation war in folgende 6 Teilaufgaben gegliedert:

- Definition der Anforderungsprofile an Positioniersysteme und Steuerungen für die Laser-Präzisions- und –Mikrobearbeitung,
- Mitarbeit am Entwurf von Antriebs- und Steuerungskomponenten,
- Applikationsuntersuchungen an konkreten Systemen,
- Aufbau eines Demonstrators,
- Experimentelle Untersuchungen und Vergleich mit den Ergebnissen der Simulationssoftware,
- Erprobung und Applikation

Die Koordinierung des Gesamtvorhabens lag in den Händen von Firma TETRA GmbH. Der offizielle Projektstart erfolgte im April 2002. Die ersten Teilergebnisse wurden im Rahmen eines 1. Verbundtreffens am 08.10.2002 bei Firma TETRA GmbH vorgestellt. Im Verlaufe der Projektbearbeitung wurden insgesamt 8 Projektberatungen unter Teilnahme aller Projektpartner durchgeführt.

- 08.10.2002 TETRA GmbH Ilmenau,
- 23.01.2003 IMMS gGmbH Ilmenau,
- 13.05.2003 FhG-IIS/EAS Dresden,

- 20.11.2003 ITI Dresden,
- 30.03.2003 STZ Mechatronik, Ilmenau,
- 14.09.2004 Technische Universität Ilmenau,
- 18.01.2005 LLT Applikation GmbH,
- 16.03.2005 FhG-IIS/EAS Dresden,
- 07.07.2005 TETRA GmbH, Abschlusspräsentation

Darüber hinaus wurden wesentliche Teilergebnisse des Vorhabens im Rahmen der VDE-/VDI-Fachtagung „Elektrisch-mechanische Antriebssysteme“ am 06./07.10.2004 in Fulda, in deren Umfeld ein öffentliches Statusseminar für das Verbundprojekt MODAN durchgeführt wurde, einem Fachpublikum präsentiert.

#### 1.4 Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand

##### 1.4.1 Für das Vorhaben genutzte bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte

Technische Basis für die von LLT Applikation durchzuführenden experimentellen Arbeiten an verschiedenen Antriebs- und Steuerungskomponenten waren einerseits ein im Unternehmen vorhandener Zwei-Koordinaten-Direktantrieb PMS 200 und ein Kreuztisch vom Typ 4, der LAT Suhl AG mit einem Verfahrbereich von 500 x 300 mm, ausgestattet mit Linearmotoren, inkrementalen Wegmesssystemen und einer Steuerung CNC 300 der Firma Procom. In der Anfangsphase des Projektes war dieser Kreuztisch von Firma LAT Suhl AG leihweise für das Projekt zur Verfügung gestellt worden. Um eine Weiterführung der begonnenen Arbeiten abzusichern und weil diese Ausrüstung auch noch für andere Vorhaben eingesetzt werden sollte, wurde dieser Kreuztisch später von LLT Applikation übernommen. In den beiden folgenden Bildern sind die Präzisionspositioniersysteme dargestellt.

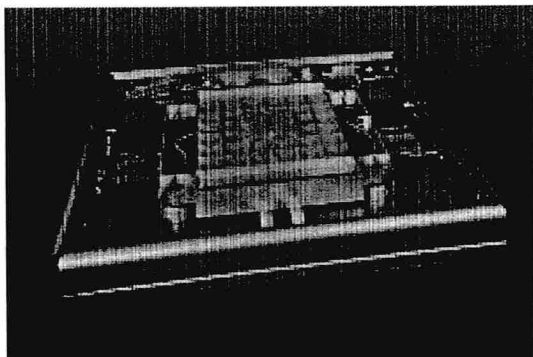


Bild 1: Planartisch PMS 200 ohne Abdeckung

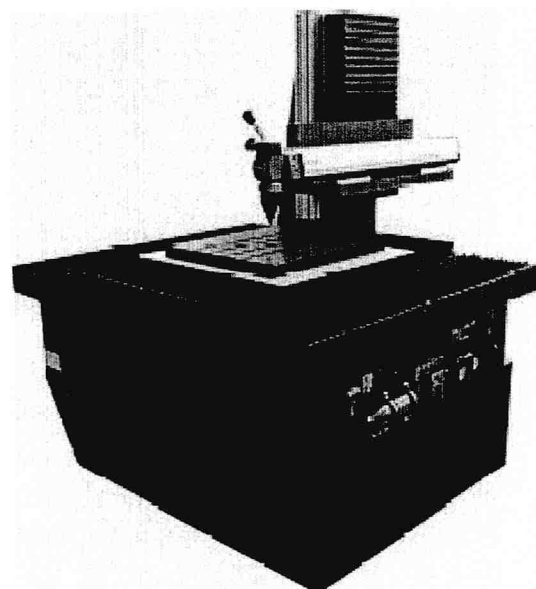


Bild 2: Kreuztisch mit Linearmotoren

#### 1.4.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Verbundprojektes

Weitere wichtige Arbeitsgrundlage für das Projekt waren verschiedene Versionen der Simulationssoftware SIMULATION X, die von der Firma ITI den Projektpartnern für die Laufzeit des Vorhabens kostenfrei zur Verfügung gestellt wurden. Ein weiterer Arbeitsschwerpunkt für LLT war die Analyse der von den Projektpartnern ITI und TU Ilmenau zu entwickelnden Simulations-Software-Pakete hinsichtlich einer unmittelbaren Nutzung im Rahmen der Projektbearbeitung. Im November wurde eine erste Version des Simulationsprogrammes „Simulation X“ von ITI zur Verfügung gestellt. Die Simulationssoftware wurde bei LLT insbesondere dazu genutzt, um die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zur Dynamik, Positioniergenauigkeit und auftretenden Schwingungen an den Positioniersystemen zu analysieren und Zusammenhänge mit den konstruktiven Gegebenheiten festzustellen. Hier zeigte sich jedoch, dass dieses Programm für die Simulation von technologischen Prozessen der Laserbearbeitung nicht konzipiert worden ist, bzw. diese Prozesse für eine Simulation zu komplex sind. Insofern war in der Weiterführung der Arbeiten für LLT GmbH nur eine mittelbare Nutzung in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern für die Präzisions-Antriebskomponenten sinnvoll.

Eine weitere wesentlich technische Voraussetzung für die Durchführung des Projektes war ein interferometrisches, externes Meßsystem, das von der Firma SIOS Messtechnik GmbH für durchzuführende umfangreiche messtechnische Untersuchungen an den Präzisions-Positioniersystemen leihweise zur Verfügung gestellt wurde. Mit Hilfe dieser messtechnischen Basis wurden die Herstellerangaben zur Genauigkeit der Positioniersysteme verifiziert und die maschineninternen Messsysteme evaluiert. Weiterhin konnten mit Hilfe dieser Ausrüstungen die Steuerungen und Positionsregler charakterisiert und Ursachen für festgestellte Lageabweichungen ermittelt werden.

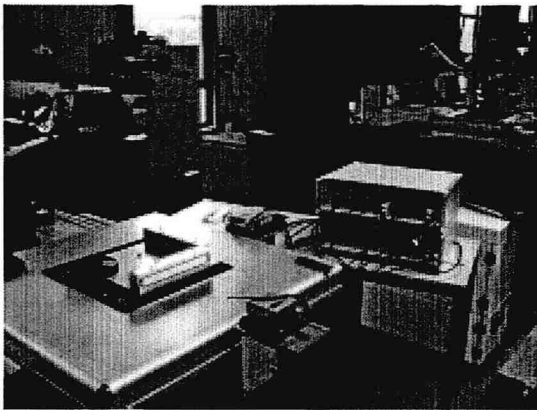


Bild 3: Interferometer die Firma SIOS Messtechnik GmbH, montiert am Planartisch PMS 200; kompletter Messaufbau  
Genauigkeit bis zu  $10^{-8}$ , höchste Linearität einschließlich Temperaturkompensation

#### 1.4.3 Verwendete Fachliteratur, genutzte Informations- und Dokumentationsdienste

Weitere Grundlage für die im Rahmen des Projektes durchzuführenden Arbeiten war eine umfangreiche Patent- und Literaturrecherche zum Stand der Technik auf den Gebieten der Präzisionsantriebs- und Steuerungstechnik, wobei hier auch Rechercheergebnisse des Projektpartners IMMS genutzt wurden. Der Schwerpunkt der eigenen Rechercharbeiten lag auf dem Gebiet der Laser-Präzisions- und –Mikrobearbeitung. Die eigenen Recherchen wurden



im Wesentlichen über das Internet und unter Nutzung der Bibliothek der Technischen Universität sowie der Datenbank des Paton-Institutes der TU Ilmenau durchgeführt. Da es erklärtes Ziel des Teilprojektes von LLT Applikation war, eigenes technisches Know-how auf dem Gebiet der Steuerungstechnik im Unternehmen aufzubauen, wurde darüber hinaus auch eine umfangreiche Marktrecherche zu mehr als 30 Herstellern von CNC-Steuerungen und Antriebssystemen auf dem deutschen Markt durchgeführt.

## 2 Eingehende Darstellungen

### 2.1 Projektziel

Die Aufgabenstellung der Entwicklung komplexer Fertigungssysteme in der Laser-Präzisionsbearbeitung in kürzester Zeit setzt ein funktionsfähiges System von Anlagenkomponenten und Baugruppen voraus. Die Anpassung und Optimierung von Modulen, insbesondere der Präzisionspositioniersysteme, an kundenspezifische technologische Problemstellungen erfordert die Entwicklung zuverlässiger Simulationsmodelle. Untersuchungen an vorhandenen Systemen sollen die Weiterentwicklung des Simulationswerkzeuges durch die Ermittlung von Fehlern und deren Ursachen unterstützen, der Einsatz der Simulationssoftware wiederum sollte Zusammenhänge klären helfen und die Entwicklung von geeigneten Maßnahmen zur Fehlerkompensation unterstützen. Ein zweiter wesentlicher Schwerpunkt des Teilprojektes von LLT Applikation GmbH war die konstruktive und steuerungstechnische Integration verschiedener Strahlquellen in die Demonstratoren sowie die Durchführung von Applikationsuntersuchungen an Teilen aus den Bereichen der Mikromechanik, Medizintechnik sowie der Feinwerktechnik. Aus der Sicht der Anwendung der verschiedenen Antriebssysteme in Laser-Präzisionsbearbeitungsanlagen ist darüber hinaus eine möglichst einheitliche Bedienerplattform zu fordern, die sich letztlich an den Standards für CNC-Steuerungen orientiert.

### 2.2 Projektdurchführung

#### 2.2.1 Analyse des Standes der Technik

Im Ergebnis der im Rahmen des Arbeitspaketes 1 durchgeführten Recherchearbeiten wurden die Anforderungsprofile an Präzisionspositioniersysteme für die Laser-Mikrobearbeitung abgeleitet. Die wesentlichen Eingangsgrößen ergeben sich einerseits aus dem zu fertigenden Teilespektrum und andererseits aus den für die Fertigung einzusetzenden Maschinenkonzepten und deren Parameter.

#### Zielgrößen:

- Teilegeometrie (Komplexität),
- Teilegröße,
- Fertigungsgenauigkeit,
- Bearbeitungsgeschwindigkeit,
- Prozessstabilität,

#### Einflussfaktoren:

- Maschinenkonstruktion,
- Art der Führungen,
- Art des Antriebes
- Zu bewegende Massen,
- Steuerungskonzept

Die für die Laser-Präzisionsbearbeitung zum Einsatz kommenden Positioniersysteme und Steuerungen wurden in drei Kategorien klassifiziert, die sich im Wesentlichen hinsichtlich der Positioniergenauigkeit, der Dynamik und der Verfahrbereiche unterscheiden.

**Kategorie 1** Linearachsen auf der Basis von Kugelgewindetrieben, AC-, DC- oder Schrittmotorantrieben und Gleit- bzw. Wälzführungen

- Verfahrbereiche bis 1.000 x 600 mm,
- Meßsystemauflösung > 1 µm,
- Beschleunigungen < 1 G,
- Geschwindigkeit < 10 m/min,
- zu bewegende Massen bis 100 kg,
- Positioniergenauigkeiten > 0,02 mm

**Kategorie 2** Linearachsen auf der Basis von Linearmotoren mit Wälzführung und/oder Luftlagerung

- Verfahrbereiche bis 500 x 300 mm,
- Meßsystemauflösung < 1 µm,
- Beschleunigungen > 1 G,
- Geschwindigkeit > 20 m/min,
- zu bewegende Massen bis 50 kg,
- Positioniergenauigkeiten < 0,01 mm,

**Kategorie 3** planare, luftgelagerte direkte Antriebssysteme ohne mechanische Führungskomponenten,

- Verfahrbereiche bis 200 x 200 mm,
- Meßsystemauflösung < 0,1 µm,
- Beschleunigungen > 2 G,
- Geschwindigkeit > 20 m/min,
- zu bewegende Massen bis 5 kg,
- Positioniergenauigkeiten < ±1 µm,

Das Hauptaugenmerk bei der Weiterentwicklung dieser Systeme richtet sich auf die Erhöhung von Genauigkeit und Dynamik. Der Stand der Technik zu Beginn des Projektes ist in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Positioniersystem	Spindeltrieb		Linearmotor		Planarantrieb	
	x	y	x	y	X	Y
Verfahrweg mm	500	350	500	300	204	204
Positioniergenauigkeit µm	> ±20		< ±10		< ±3	
max. Pos.-Geschw. mm/s	130		500		200	
max. Beschleunigung m/s <sup>2</sup>	0,3		6		20	

Insbesondere der Kreuztisch mit Linearmotorantrieb und der Planarantrieb bieten prinzipbedingt gegenüber dem mechanisch geführten System noch ein deutliches Entwicklungspotential, weswegen der Schwerpunkt der Untersuchungen auf diese beiden Systeme gelegt wurde. Eine Genauigkeit von  $\pm 1 \mu\text{m}$  und besser bei mindestens gleich bleibender oder höherer Dynamik wird angestrebt. Damit einhergehende negative Erscheinungen wie z.B. verstärkte Resonanzen und das Auftreten von Schwingungen müssen minimiert werden. Diesbezügliche Anforderungen sind bereits in der Phase der Entwicklung des Positioniersystems zu berücksichtigen. Damit kann vermieden werden, dass nachträglich aufwändige Maßnahmen zur Schwingungsdämpfung getroffen werden müssen.

Um die vorhandenen Positioniersysteme mit ihren Besonderheiten genauer charakterisieren zu können, wurde neben umfangreichen messtechnischen Untersuchungen zumindest für den Kreuztisch mit Linearmotoren ein einfaches Simulationsmodell erstellt, das vor allem einen Erkenntniszuwachs zu den Ursachen von auftretenden Positionsabweichungen dienen sollte.

### 2.2.2 Charakterisierung des Reglerverhaltens am Kreuztisch mit Linearmotoren

Im folgenden Bild ist der prinzipielle Aufbau des Demonstrators Kreuztisch mit Linearmotoren schematisch dargestellt.

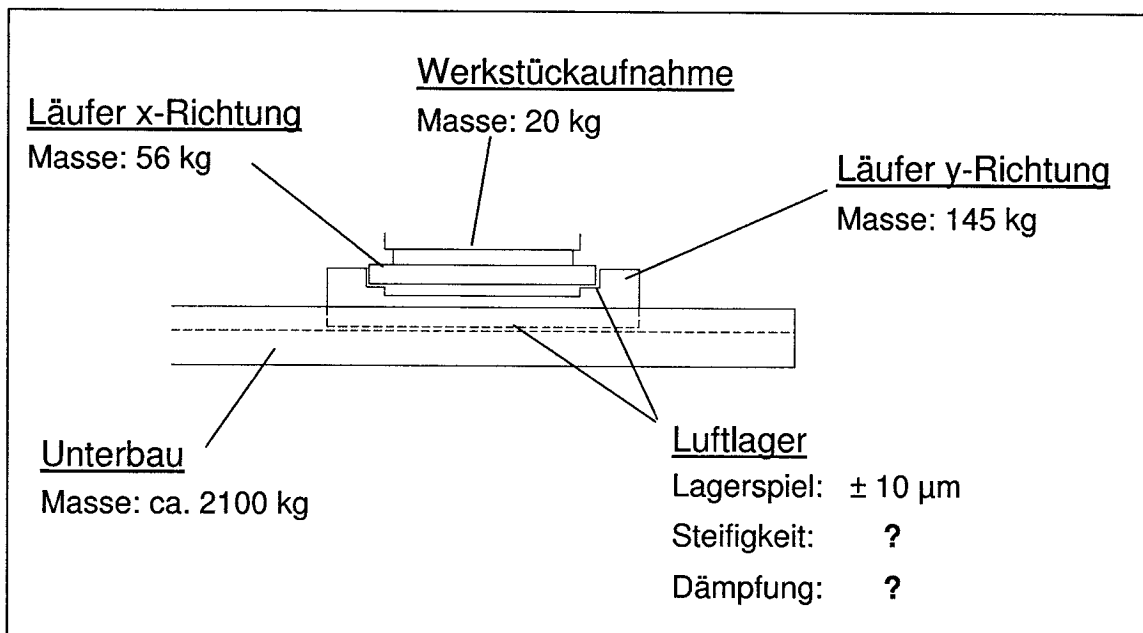


Bild 4: Schematischer Aufbau des Kreuztisches mit Linearmotoren

Grundproblem bei diesem Aufbau ist: Der Regler erfasst bei der Positionierung in x-Richtung auch nur die Position des x-Läufers und kann die Bewegung des y-Läufers nur über die Rückwirkung ausgleichen. Das gleiche Problem besteht bei der Positionierung in y-Richtung. Die Folge sind nahezu unvermeidbar auftretende Schwingungen, die das Bearbeitungsergebnis beim Durchfahren einer Ecke verschlechtern. Im nachfolgenden Bild ist dieser Effekt dargestellt.

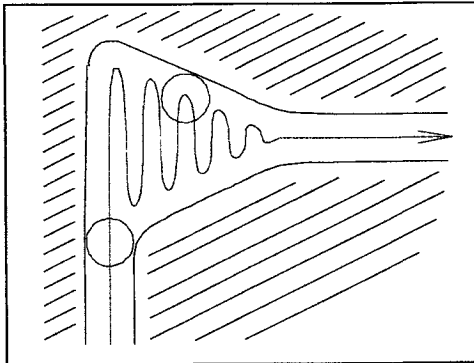


Bild 5: Überschwingen beim Durchfahren einer Ecke

Bei unten dargestelltem Modell wird die Bremskraft anhand einer Kennlinie vorgegeben. Erfasst wird bei diesem System ausschließlich die Lage des unteren Läufers, die Bremskraft wird nur in diesen eingeleitet. Daraus ergeben sich durch Spiel, Steifigkeit und Dämpfung des Luftlagers Lageänderungen der Läufer relativ zueinander. Der Regler kann diese nur indirekt an der Wechselwirkung zwischen den Läufern erkennen. Um den Modellierungsaufwand zu minimieren, wurde auf die Berücksichtigung des Reglerverhaltens bei der Korrektur der sich durch die Wechselwirkungskräfte ergebenden Lageabweichungen des unteren Läufers beim Abbremsen verzichtet.

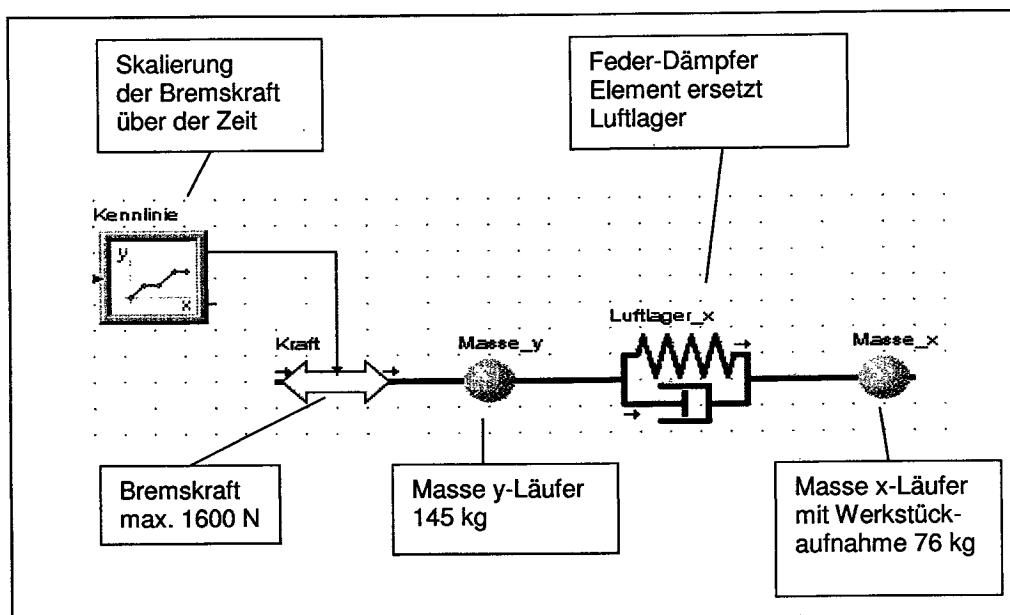


Bild 6: Modell: Konstante Geschwindigkeit von 1 m/s in y-Richtung;  
Abbremsen bei Erreichen der Zielposition bis auf 0 m/s.

Den Messergebnissen am nächsten kommt eine rampenförmige Bremskraftkennlinie. Die Bremskraft wird vor dem Erreichen der Zielposition in voller Höhe beaufschlagt, nimmt linear mit der Zeit ab und ist im Moment des Erreichens der Zielposition gleich 0. Daraus ergibt sich eine Geschwindigkeitsänderung die sich asymptotisch der 0 nähert, was bewirkt, dass die Zielposition praktisch ohne Überschwingen erreicht wird. Schwingungen in Bewegungsrichtung

tung beim Beaufschlagen der Bremskraft sind zumindest beim Laserstrahlschneiden nur von geringer Bedeutung. Will man auch diese vermeiden, muss dem entsprechend auch die Zunahme der Bremskraft rampenförmig gesteuert werden. Die blauen Linien jeweils rechts in den folgenden zwei Abbildungen grenzen den tolerierbaren Bereich des Überschwingens ein. In Bild 7 ist beim Anlegen einer rechteckförmigen Bremskennlinie eine deutliche Überschreitung und damit ein Überschwingen erkennbar.

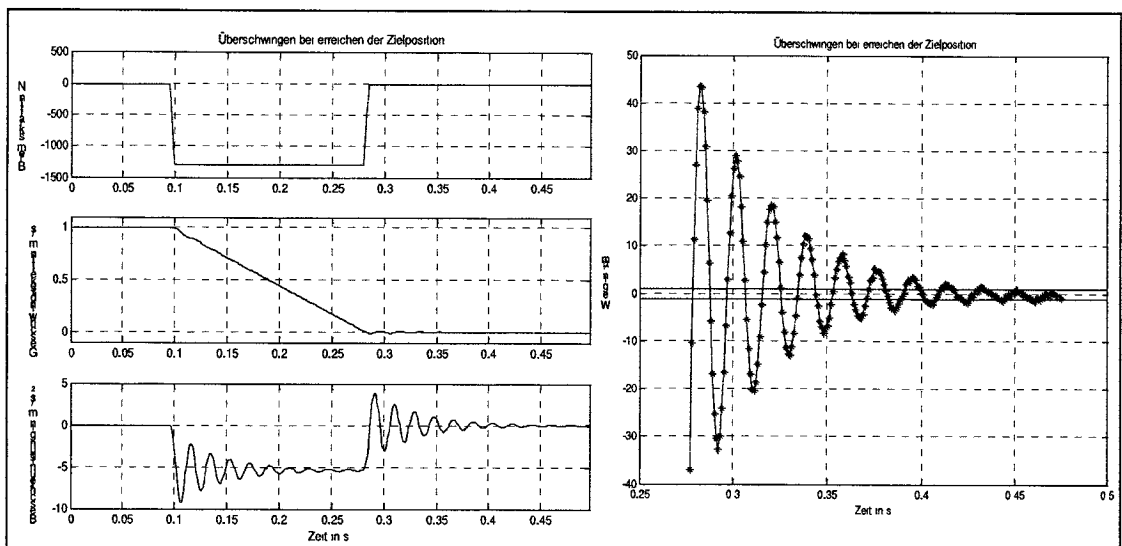


Bild 7: Simulation mit rechteckförmiger Bremskennlinie: links: Bremskraft, Geschwindigkeit, Beschleunigung  
rechts: Überschwingen an der Zielposition

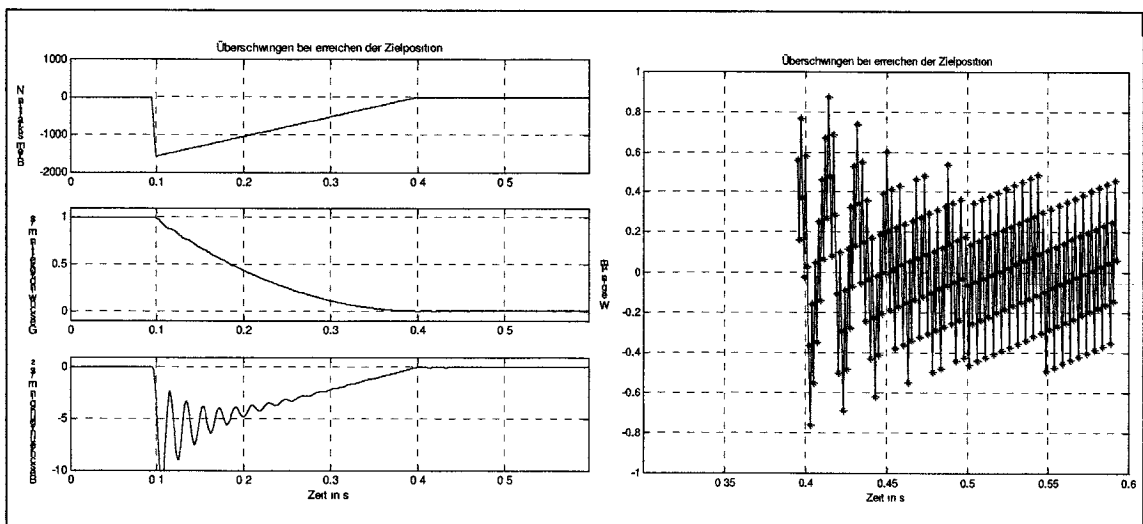


Bild 8: Simulation mit rampenförmiger Bremskennlinie: links: Bremskraft, Geschwindigkeit, Beschleunigung  
rechts: Überschwingen an der Zielposition

Dagegen wurde beim Anlegen einer rampenförmigen Bremskennlinie kein Überschwingen beim Erreichen der Zielposition festgestellt. Die Skalierung im Bild 8 ist gegenüber Bild 7 geändert, um die minimalen Schwingungen deutlich zu machen. Die blauen Begrenzungslinien geben jeweils den gleichen tolerierbaren Bereich an.

Unten abgebildet ist das Verhalten des x-Läufers in der Mitte des Verfahrbereiches bei Positionierung in x-Richtung. Die Messergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit der Simulation. Kurzes Beschleunigen nach Einleitung des Bremsvorganges lässt sich mit den Wechselwirkungen zwischen den Läufern bzw. der Reaktion des Lagereglers auf diese erklären.

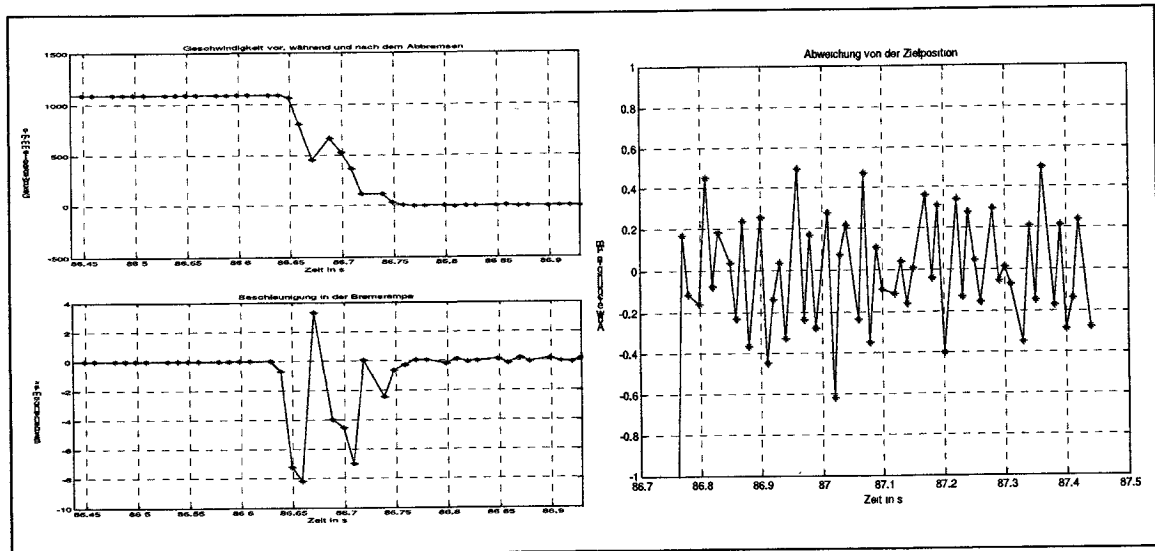


Bild 9: Messergebnisse beim Abbremsen von 1 m/s bis in den Stand  
links: Geschwindigkeit und Beschleunigung,  
rechts: minimales Überschwingen an der Zielposition

### 2.2.3 Charakterisierung der Wechselwirkung von Läufern in luftlagergeführten Achsen in Kreuztischen

Oben gezeigter Zusammenhang ist repräsentativ für das Erreichen einer vorgegebenen Position in der Mitte des Verfahrbereiches. Jeder anderen Position sind weitere Effekte überlagert, die daraus resultieren, dass neben Spiel, Steifigkeit und Dämpfung, der Schwerpunkt des Gesamtsystems nicht mehr mit der Lage des Antriebs und des Messsystems übereinstimmt. Dies bewirkt zu den Schwingungen in Bewegungsrichtung eine zusätzliche Drehung der Läufer um die vertikale Achse, woraus wiederum Abweichungen von der Sollposition resultieren können.

Der Regler erfasst die Position in der Mitte des Läufers. Dabei wird eine Drehung des Läufers um die senkrechte Achse (möglich durch Spiel in den Luftlagern) nicht erfasst (Bild 10 links). Diese Drehungen können beispielsweise beim Beschleunigen durch eine außermittig angeordnete Last entstehen oder durch Kräfte z.B. von den Faltenbälgen oder aufgrund von Rückwirkungen von den Antrieben selbst.

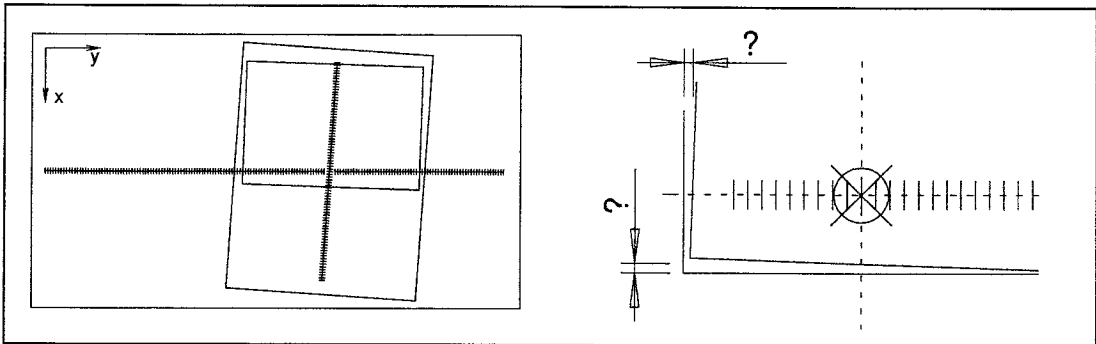


Bild 10: Modell zu Ursachen weiterer Lageabweichungen aufgrund von Spiel, Steifigkeit und Dämpfung der Linearachsen mit Luftlagern

Im Modell (Bild 11) wird mit guter Näherung angenommen, dass der Luftdruck im Luftlager bei zunehmender Abweichung von der Ruhelage auf den Läufer eine überproportional zunehmende Kraft bewirkt, zusammengefasst wird dies in verschiedenen Kennlinien.

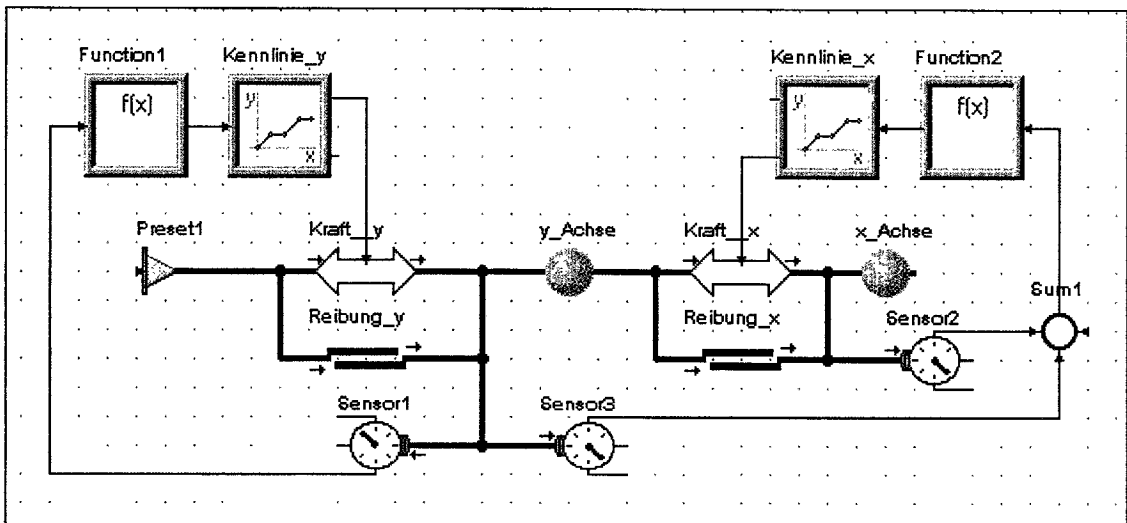


Bild 11: Simulationsmodell fasst alle Einflussgrößen wie Luftlager, Kraft der Faltenbälge, Trägheitsmomente in Kennlinie zusammen

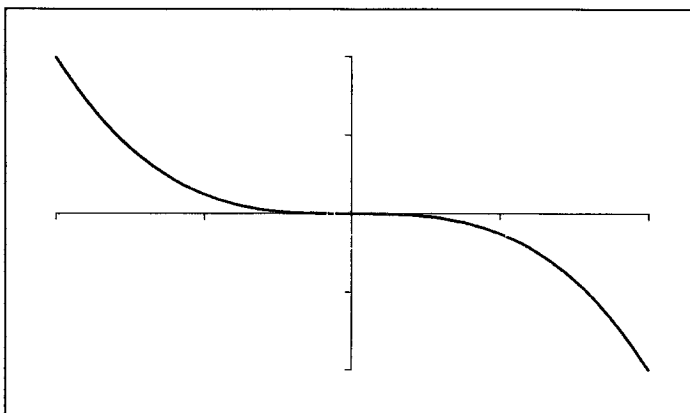


Bild 12: Möglicher Kennlinienverlauf



Reibung, hervorgerufen von z.B. Faltenbälgen oder Energieketten, bewirkt eine unkorrigierte Lageabweichung im Stillstand, was sich auf die Genauigkeit beim nächsten Positionierschritt als Zufallskomponente auswirkt. Je nach Wahl der Parameter des Ausgangszustandes - entsprechend der vorgegebenen Grenzen - zeigen sich verschiedene Simulationsergebnisse.

Ausgangszustand für folgende Simulation:

- Abbremsen beim Erreichen der Zielposition bis in den Stand, y-Läufer an Sollposition
- Position x-Läufer ungleich Arbeitspunkt oder x-Läufer noch in Bewegung

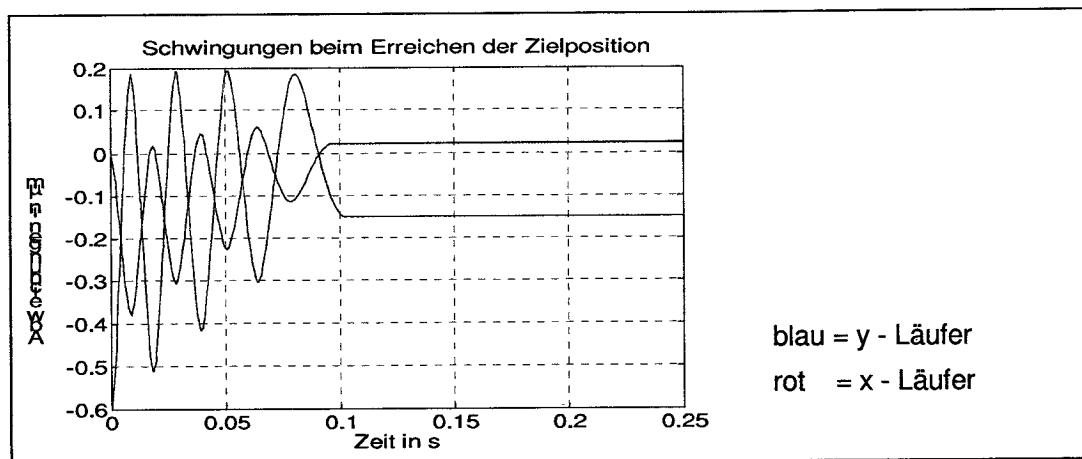


Bild 13: Simulationsergebnisse mit oben genanntem Model: Schwingungen mit etwa 60 Hz; die erreichte Position ist ungleich der Sollposition

Die Überprüfung dieser Simulationsergebnisse erfolgte an einem Testteil. Die Bewegung erfolgt zunächst bezogen auf die Abbildung von oben nach unten, d.h. in y-Richtung, beim Erreichen der Zielposition wird senkrecht zur ursprünglichen Bewegungsrichtung mit dem x-Läufer mit 2000 mm/min weiter verfahren. Für ein Konturelement von 1,2 mm Länge wurden über ein externes Mikroiinterferometer die Schwingungen senkrecht zur Bewegungsrichtung ermittelt. Die gemessene Amplitude, d.h. die Abweichung von der vorgegebenen Bahn beträgt ca. 1,0 µm.

Erkennbar sind aus der vorangegangenen Bewegung in y-Richtung resultierende Schwingungen. Diese sind bei der Bewegungsfolge x-y praktisch nicht vorhanden.

Bei der Auswertung der Messergebnisse war zunächst jedoch in beiden Achsen eine nahezu lineare Abweichung von der Absolutposition von ca. 12 µ / 160 mm in der y-Achse bzw. 5 µ / 160 mm in der x-Achse festzustellen. Dies resultiert offensichtlich aus der fehlenden Temperaturkompensation des Messsystems bzw. aus der Art und Weise der Montage der Maßstäbe (→ Skalierungsfehler).

Die korrigierten Messwerte zeigen eine Abweichung von deutlich kleiner 1 µm in der y-Achse gegenüber dem Fehler der x-Achse von fast 2 µm, wobei der Fehler der y-Achse in der Fertigungsgenauigkeit des Maßstabes zu suchen ist (→ Restfehler), der Fehler der x-Achse ist von oben beschriebenem zufälligen Fehler zusätzlich überlagert.

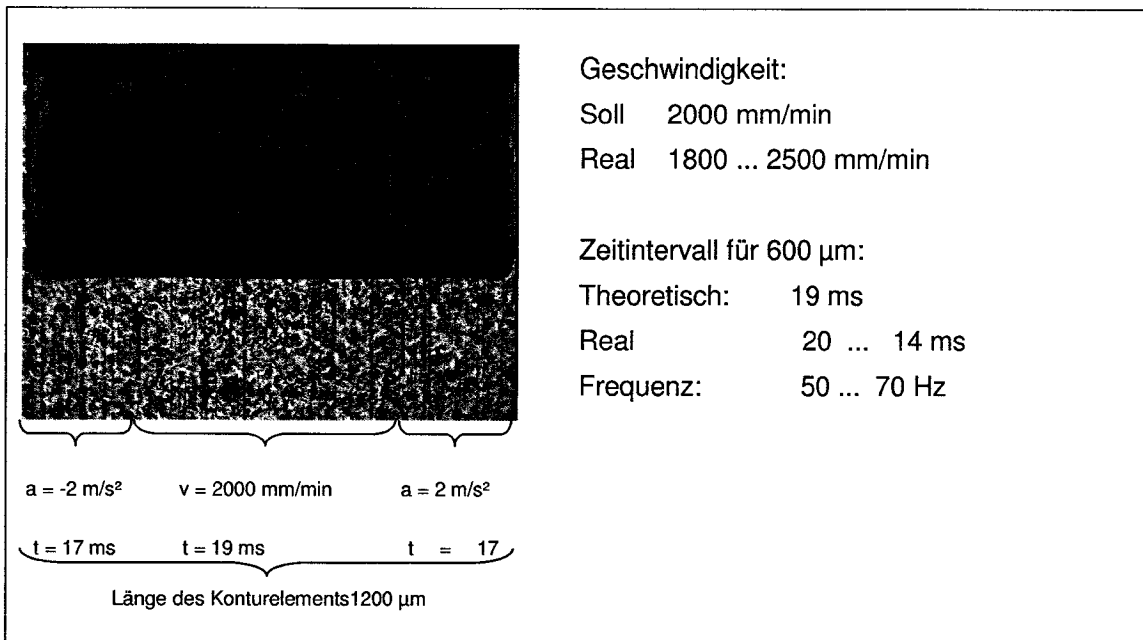


Bild 14: Messergebnisse zur Bahngenauigkeit anhand eines Testteils

### 2.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse zu den Untersuchungen am Kreuztisch

Offensichtlich kann mit dem oben beschriebenen System mittels geeigneter Maßnahmen, wie z.B. steuerungsseitige Temperaturkompensation eine hohe Genauigkeit von einigen Mikrometern erreicht werden. Jedoch summieren sich aus den Eigenschaften der Führungen resultierende, vom Messsystem nicht erfasste und damit nicht korrigierbare Lageabweichungen, so dass die gewünschte Genauigkeit von kleiner  $\pm 1 \mu\text{m}$  bei Beibehaltung des Gesamtkonzeptes wahrscheinlich nicht erreichbar ist. Möglicherweise kann durch die Erhöhung der Vorspannung der Luftlager die Genauigkeit weiter verbessert werden, jedoch muss dann dafür Sorge getragen werden, dass z.B. durch verbesserte Temperaturstabilisierung die Freigängigkeit der Läufer stets gewährleistet ist. Umfassendere Maßnahmen betreffen sowohl Messsystem als auch die Antriebe und somit alle peripheren Geräte bis hin zur Steuerung.

### 2.2.5 Untersuchungen am Planarantrieb

Ausgehend von den Ergebnissen der umfangreichen messtechnischen Untersuchungen am Kreuztisch mit Linearmotoren, wurden vergleichende Untersuchungen auch an einem planaren Antriebskonzept durchgeführt. Im Planarantrieb sind keine mechanischen Führungselemente vorhanden. Auf das Erstellen von Simulationsmodellen zum Reglerverhalten wurde aufgrund der erhöhten Komplexität des Gesamtsystems verzichtet. Beim Projektpartner IMMS war darüber hinaus die Simulationssoftware für die Optimierung der Läuferkonstruktion angewendet worden. Es wurde wiederum die gleichen Messtechnik wie beim Kreuztischdemonstrator eingesetzt, zwei Interferometer mit einem bzw. drei Messkanälen. Der Aufbau des Messplatzes ist im nachfolgenden Bild dargestellt.

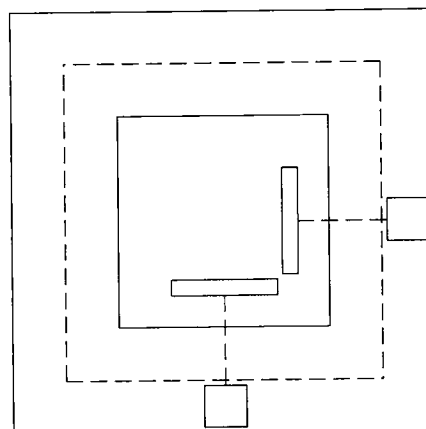
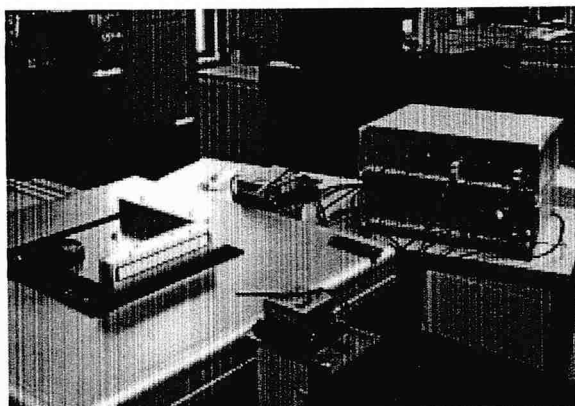


Bild 15: Messaufbau mit zwei Interferometern am Planartisch

Es wurde spiralförmig von innen nach außen ein Messpunkttraster mit einem Abstand von jeweils 10 mm über den gesamten Verfahrbereich von 200 x 200 mm angelegt.

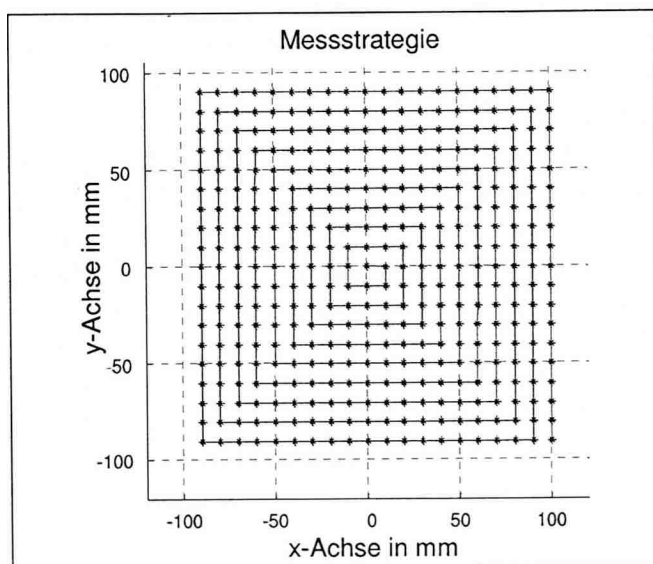


Bild 16: Messstrategie am Planartisch

Die Auswertung der Messungen ergab auch hier einen temperaturbedingten, linearen Skalierungsfehler. Der Glasmaßstab hat einen Temperaturexpansionskoeffizienten von ca. 10 bis 12  $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{K}$ .

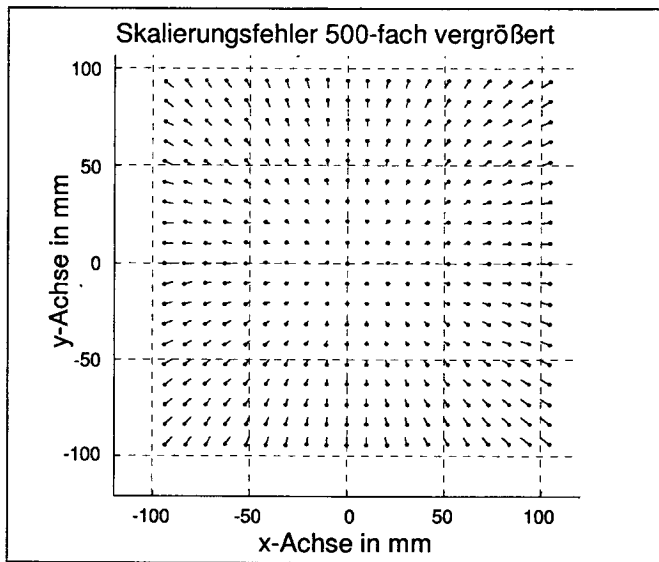


Bild 17: Temperaturabhängiger Skalierungsfehler des Messsystem in beiden Achsen

Neben dem temperaturabhängigen Skalierungsfehler wurden mit Hilfe der verschiedenen Messreihen auch Nick- und Gierfehler für den Planartisch bestimmt. Der ermittelte Nickfehler ist mit  $< 1,5 \mu\text{m} / 180 \text{ mm}$  etwa eine Größenordnung kleiner als der Skalierungsfehler. Er resultiert im Wesentlichen aus der geringfügig ballig geschliffenen Oberfläche der Läuferbasis. Die detaillierten Ergebnisse dieser Untersuchungen sind ausführlich im Rahmen der Projektberatung am 14.09.2004 vorgestellt und diskutiert worden.

Es wurde im Weiteren gezeigt, dass aufgrund des nahezu linearen Zusammenhanges zwischen Skalierungs- und Nickfehler und der Temperatur, die steuerungssseitige Kompensation dieser beiden Fehlerarten mit relativ einfachen Mitteln (Fehlertabelle zur Korrektur der Istposition) möglich ist.

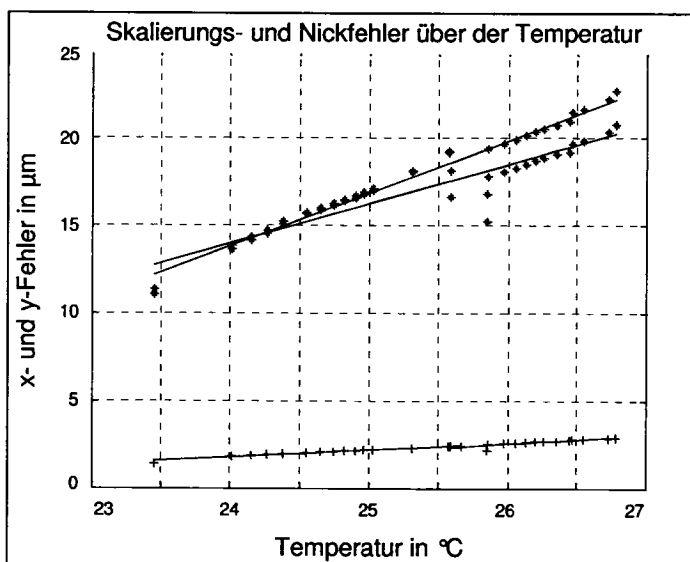


Bild 18: Linearer Zusammenhang von Skalierungs- und Nickfehler von der Temperatur (rot= x-Achse, blau = y-Achse)

### 2.2.6 Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchungen am Planartisch

Im Ergebnis der durchgeführten umfangreichen Untersuchungen konnten drei ursächliche Fehlerquellen beim Planarantrieb ermittelt werden, die letztlich die Prozessgenauigkeit einer Maschine mit diesem Positioniersystem limitieren.

- |                                       |                   |
|---------------------------------------|-------------------|
| • Wärmedehnung des Glasmaßstabes      | Skalierungsfehler |
| • Unebenheit der Läuferbasis          | Nickfehler        |
| • Fertigungstoleranzen im Glasmaßstab | Restfehler        |

Es wurde gezeigt, dass die beiden erstgenannten Fehler mit vergleichsweise einfachen Mitteln erfasst und steuerungsseitig kompensiert werden können. Deutlich schwieriger und aufwändiger ist die Erfassung und Kompensation des Restfehlers. Dies erfordert immer eine Vermessung des Glasmaßstabes. Dies kann sowohl als „externes Mapping“, also vor der Montage des Messsystems erfolgen oder auch als „internes Mapping“, also im fertig montierten Zustand. Im zweiten Fall würde immer ein „Summenrestfehler“ ermittelt, der nicht nur aus den Fertigungstoleranzen des Glasmaßstabes resultiert. Letztlich ist es fragwürdig, ob sich eine solche Verfahrensweise in der Praxis durchführen lässt. Einerseits sind die Anforderungen an den Messaufbau sehr hoch, andererseits wird die Genauigkeit durch die Toleranzen des Messaufbaus begrenzt. Und letztlich ist mit vertretbarem Aufwand auch nur eine begrenzte Anzahl von Messpunkten erfassbar, so dass in der Praxis immer ein Kompromiss zwischen der Forderung nach höchster Positionier- und Wiederholgenauigkeit und wirtschaftlich herstellbaren Systemkomponenten gefunden werden muss. Für höchste Anforderungen an die Planartische, die zukünftig durchaus deutlich unter  $\pm 1 \mu\text{m}$ , selbstverständlich eingeschränkt auf kleine Verfahrbereiche, liegen können, wird möglicherweise auch der Einsatz von Laserinterferometern als direktes Wegmesssystem interessant. Letztlich wird dies auch davon abhängen, wie sich in der Zukunft das Preis-/Leistungsverhältnis solcher Messsysteme entwickeln wird.

### 2.2.7 Vergleichende Untersuchungen zur Dynamik des Demonstrators

Parallel zu den messtechnischen Untersuchungen wurden zum Zweck der Validierung der Maschine als Gesamtsystem umfangreiche Applikationstests zum Laserschneiden an diversen Versuchsteilen durchgeführt. Eine dabei untersuchte Problematik war das Auftreten von Schwingungen, die von außen auf den Demonstrator einwirken können. Im nachfolgenden Bild sind solche typischen Schwingungen an einer Testkontur künstlich erzeugt worden.

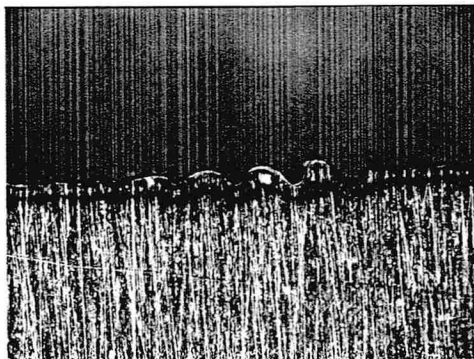


Bild 19: künstlich erzeugte Schwingungen

Mit einem von außen einwirkenden Stoß konnten trotz der relativ hohen Masse des Aufbaus von ca. 700 kg Schwingungen mit einer Frequenz von ca. 10 Hz und einer maximalen Amplitude von 20 µm erzeugt werden. In der Praxis würde ein solcher Fall zu einem unbrauchbaren Bearbeitungsergebnis führen.

Letztlich wurden als Schwachpunkt des Systems die Füße des Maschinenunterbaus erkannt (siehe Bild 20). Diese Schwingungen führen zu einer Relativbewegung zwischen Strahlquelle und Positioniersystem. Nach diesen gewonnenen Erkenntnissen wurden die Justierschraubfüße des Maschinenunterbaues durch großflächig aufliegende Keilplatten ersetzt.

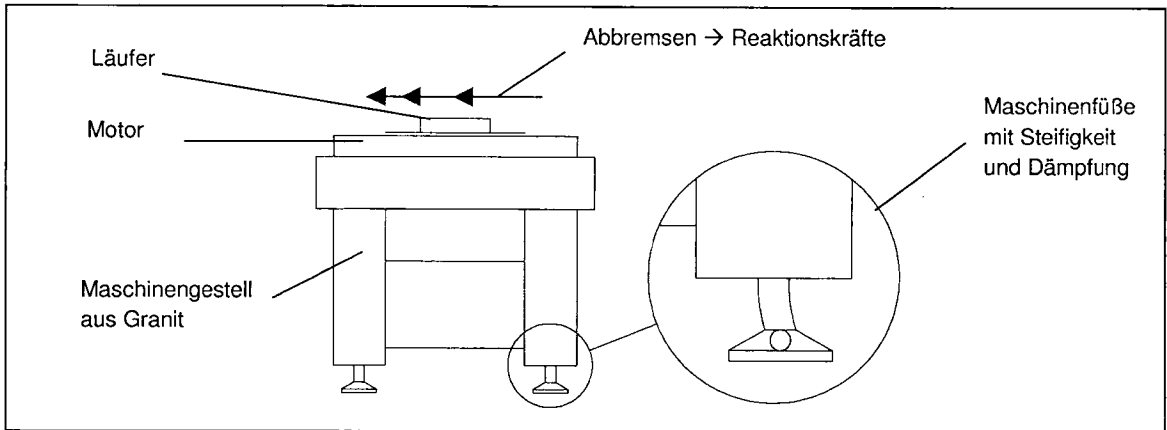


Bild 20: Maschinenfüße als Ursache von Schwingungen

Abschließend wurden in einem Vergleich mit einer Kreuztischvariante mit Linearmotoren an einer komplexen und filigranen Teststruktur Untersuchungen zur Dynamik des Gesamtsystems, unter Einsatz jeweils der gleichen Strahlquelle durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Bild 21 zusammengestellt. Deutlich ist erkennbar, dass bereits bei einer programmierten Geschwindigkeit von 250 mm/min die Bearbeitungszeit für die Teststruktur bei etwa der Hälfte des konventionellen Antriebssystems liegt. Der Kreuztisch kommt bei den filigranen Strukturen und den überwiegend kurzen Verfahrwegen praktisch aus den Start- und Bremsrampen nicht mehr heraus. Bereits bei einer programmierten Geschwindigkeit von ca. 350 mm/min ändert sich die effektive mittlere Geschwindigkeit praktisch nur noch unwesentlich, bzw. das Bearbeitungsergebnis wird unbrauchbar.

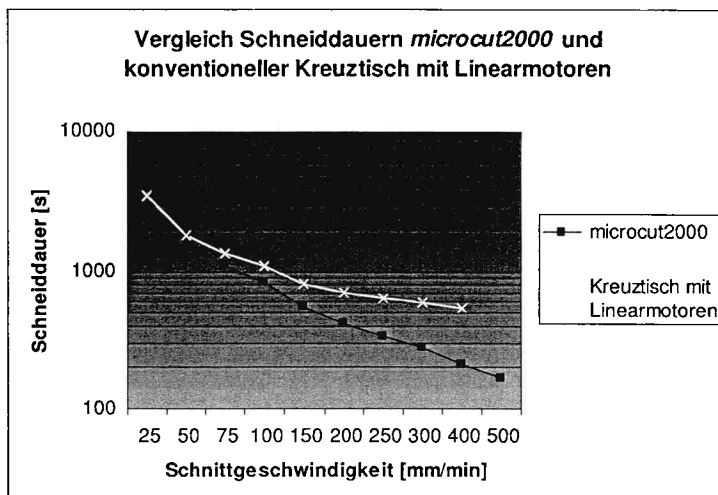


Bild 21: Vergleich Schnelldauern zwischen *microcut 2000* und konventionellem Kreuztisch mit Linearachsen

Zusammenfassend ist festzustellen, dass im Vergleich mit konventioneller Antriebstechnik die Dynamik des Planarantriebes deutlich besser ist. Mit den Untersuchungen zur Dynamik wurde eindeutig bestätigt, dass der Planartisch in Bezug auf Genauigkeit und Dynamik das leistungsfähigste Konzept ist, das gegenwärtig am Markt verfügbar ist. Damit wurde in besonderem Maße seine Eignung als Positioniersystem für die Präzisions- und Mikrobearbeitung eindeutig unter Beweis gestellt.

### 2.2.8 Einsatz neuer Strahlquellen für die Präzisions- und Mikrobearbeitung

Das letzte Arbeitspaket beinhaltete die konstruktive und steuerungsseitige Integration von neuen Strahlquellen vorzugsweise in den Demonstrator mit Planarantrieb. Alle voraus gegangenen experimentellen Untersuchungen wurden mit einem Feinschneidlaser KLS 246 040 FC der Firma LASAG AG durchgeführt. Im Rahmen der Projektlaufzeit standen darüber hinaus zwei alternative Laserstrahlquellen für Testzwecke zur Verfügung.

- Yb:YAG-Scheibenlaser von Firma PrenovaTec GmbH,
- Faserlaser der Firma SPI (Southampton Photonics LTD)

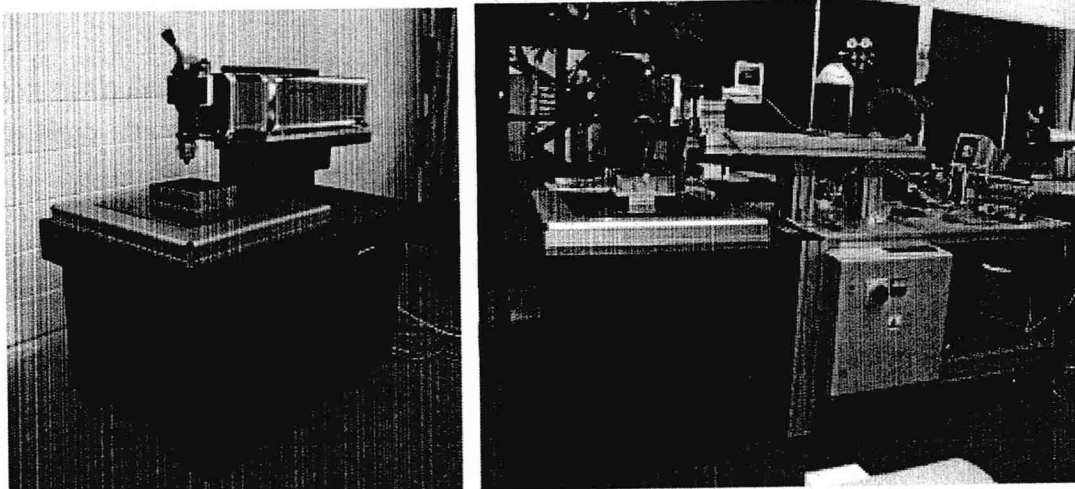


Bild 22: links: Versuchsaufbau mit Scheibenlaser; rechts: Versuchsaufbau mit Faserlaser

Der im Rahmen des MODAN-Projektes zu bearbeitende Schwerpunkt lag in der steuerungsseitigen Integration der Strahlquelle. Die mit diesem Versuchsaufbau durchgeführten umfangreichen Applikationstests und deren Ergebnisse gehörten nicht unmittelbar zu den im Rahmen des Projektes durchzuführenden Aufgaben.

Mit dem Faserlaser der Firma SPI wurde eine weitere neue Laserstrahlquelle, für die die Präzisionsbearbeitung aufgrund Ihrer hervorragenden Strahlqualität besonders geeignet ist, in den Demonstrator integriert. Mit diesem System in Verbindung mit einer kurz Brennweitigen Fokussieroptik wurden erstmals Schnittspalte bei dünnen Edelstahlfolien von kleiner als 10  $\mu\text{m}$  erreicht. Aufgrund der außerordentlich interessanten Teilergebnisse wurde zum Ende des Projektes mit einem beim Projektpartner TETRA GmbH verfügbaren Planarantrieb PMS 100 (Verfahrbereich  $\varnothing$  100 mm) ein Kompaktmaschinenkonzept entwickelt.

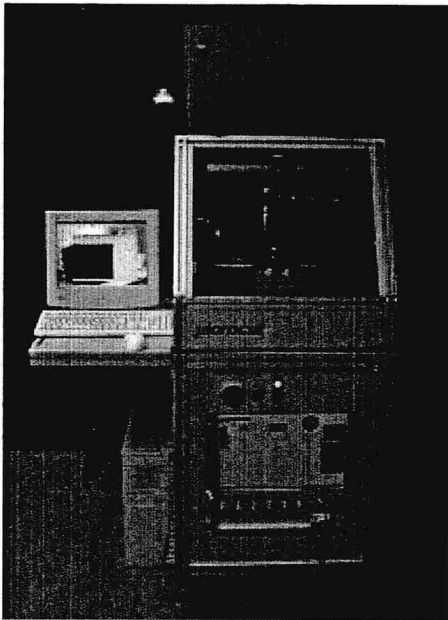


Bild 23: Kleinste Laser-Präzisionsschneidanlage der Welt mit integriertem Yb-Faserlaser

Dieser letzte Demonstrator wurde im Rahmen der Abschlusspräsentation am 07.07.2005 bei Firma TETRA in Funktion vorgestellt. Mit diesem Maschinenkonzept wurde praktisch die kleinste und kompakteste Laserschneidanlage der Welt kreiert.

### 2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die wichtigsten Aufgaben, die von LLT Applikation GmbH im Rahmen des Verbundprojektes MODAN bearbeitet wurden, sind :

- Messtechnische Untersuchungen zur Erfassung der Eigenschaften von Systemkomponenten, wie z.B. Steifigkeit, Dämpfung, Eigenfrequenz (Hilfsmittel: Interferometer).
- Simulation von Positionieraufgaben, Bestimmung der Größe des Einflusses von Veränderungen an wesentlichen Systemkomponenten (Reglerverhalten), Hilfsmittel: Simulation X.
- Ableitung geeigneter Maßnahmen zur Verbesserung von Genauigkeit und Dynamik.

Die aus dem Projekt entstandenen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Know-how-Zuwachs auf dem Gebiet der Entwicklung und Fertigung von Laser-Präzisionsbearbeitungssystemen, speziell zu Fragen der CNC- und SPS-Steuerungen sowie der steuerungseitigen Integration neuer Strahlquellen.
- Die Evaluierung der vorhandenen Antriebs- und Steuerungskonzepte ergab bezüglich Genauigkeit und Dynamik die Überlegenheit des Planartischkonzeptes gegenüber allen derzeit am Markt bekannten Systemen.



- Waren bisher die Strahlquellen (lampengepumpte Nd:YAG-Laser) in den Laser-Präzisionsbearbeitungsanlagen die die Prozessgeschwindigkeit und Dynamik der Gesamtmaschine begrenzende Systemkomponente, so konnte durch die Integration der neuen Strahlquellen, Yb:YAG-Scheibenlaser und Yb-Faserlaser, das Potential des planaren Antriebskonzeptes bezüglich dieser Eigenschaften deutlich besser ausgeschöpft werden.
- Aus den umfangreichen messtechnischen und experimentellen Untersuchungen und dem Vergleich mit den Simulationsergebnissen wurden Maßnahmen zur Verbesserung der statischen und dynamischen Genauigkeit der evaluierten Systeme und Anforderung für die Entwicklung neuer Maschinenkonzepte abgeleitet.
- Es wurden insbesondere mit den in den Demonstratoren integrierten neuen Strahlquellen zahlreiche Applikationsuntersuchungen in erster Linie zum Laser-Präzisionsschneiden von verschiedenen Materialien (Edelstahlfolien, Silizium, Keramik u.a. durchgeführt,) die hinsichtlich der erzielbaren Fertigungsgenauigkeit, kleinster fertiger Strukturen und kritischer Konturelemente zu neuen Erkenntnissen führten.

#### **2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen**

Für LLT Applikation GmbH ergeben sich aus den erzielten Projektergebnissen folgende Nutzeffekte:

- Know-how-Zuwachs, der unmittelbar in die Weiterentwicklung der Maschinenkonzepte und Systemkomponenten für Laser-Präzisionsbearbeitungssysteme bei LLT Applikation GmbH einfließt.
- Aus den umfangreichen Applikationsuntersuchungen zum Laser-Präzisionsschneiden sind neue Erkenntnisse gewonnen worden, die im Bereich der Lohnfertigung unmittelbar umgesetzt werden können.
- Letztlich hat sich im Rahmen des Verbundprojektes MODAN eine Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern, insbesondere zu den Firma TETRA GmbH, IDAM GmbH & Co. OHG und der IMMS gGmbH entwickelt, die weit über die reine Projektarbeit hinausging, und auch zukünftig erfolgreich weitergeführt werden wird.

Aus heutiger Sicht kann eingeschätzt werden, dass die ursprünglichen Zielstellungen des Projektes auch hinsichtlich der Verwertung der Projektergebnisse erreicht werden. Die in den Folgejahren geplanten Zuwächse im Bereich des Präzisions-Maschinenbaues sind realistisch. Die schrittweise Umsetzung der Projektergebnisse wird zu einer weiteren erfolgreichen Entwicklung des Unternehmens beitragen.

#### **2.5 Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen**

Schon zu Beginn des Projektes wurde festgestellt, auf dem Gebiet der Laser-Präzisionsbearbeitungssysteme unter Integration von planaren Antriebskonzepten keine Wettbewerber agieren. Letztlich hat dies seine Ursache auch darin, dass die Forschungsaktivitäten der TU Ilmenau, des IMMS und der Firma TETRA GmbH auf dem Gebiet der planaren Antriebs- und

Steuerungstechnik ein Alleinstellungsmerkmal besitzen. Auch während der Projektlaufzeit wurden keine Fortschritte auf diesem Gebiet von anderen Stellen bekannt. Aus diesem Grund ergeben sich auch für die in der Weiterführung der Arbeiten bei den unmittelbar beteiligten Projektpartnern geplanten Produktentwicklungen und deren Vermarktung gute Chancen für eine Markteinführung.

## **2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse**

Die im Rahmen des Projektes erzielten Ergebnisse sind in einer abschließenden Projektberatung aller beteiligten Projektpartner am 07.07.2005 bei Firma TETRA GmbH im Zusammenhang mit der Einweihung eines neuen Firmengebäudes zusammenfassend vorgestellt und beraten worden. Übereinstimmend wurde festgestellt, dass die Zusammenarbeit der beteiligten Firmen im Rahmen des Projektes, sieht man vom leicht verzögerten Beginn des Projektes ab, außerordentlich positive Ergebnisse erbrachte. Eine erste Veröffentlichung von Teilergebnissen ist im Rahmen der VDE/VDI-Fachtagung „Elektrisch-mechanische Antriebe,“ im Oktober 2004 bereits erfolgt. Die öffentliche Vorstellung der Projektergebnisse ist in Form eines Abschluss-Statusmeetings im Rahmen des 50. Internationalen Wissenschaftlichen Kolloquiums der TU Ilmenau „Maschinenbau von Makro bis Nano“ im Zeitraum vom 19. bis 23.09.2005 vorgesehen.

## **3 Fortschreibung des Verwertungsplans**

Die Projektbearbeitung des Teilprojektes im Rahmen des Verbundvorhabens MODAN ist ein Bestandteil der langfristigen Entwicklungsstrategie von LLT Applikation GmbH. Die bisherigen Entwicklungsaktivitäten von LLT Applikation GmbH wurden mit der Mitwirkung am Verbundprojekt MODAN zielstrebig weitergeführt.

Auf dem Gebiet die Präzisions- und Mikrobearbeitung liegt das größte Wachstumspotential in der Laserbranche für das nächste Jahrzehnt. Dies ist spätestens seit den Marktanalysen von Optech Consulting aus dem Jahr 2001 bekannt. Selbst die Marktführer in der Laserbranche wie die Firmen Trumpf und Rofin Sinar haben ihre Konzernstrukturen in Mikro- und Makro-Bereiche neu ausgerichtet. Die konsequente Orientierung des Produkt- und Dienstleistungsspektrum bei LLT Applikation GmbH auf die Laser-Präzisions- und Mikrobearbeitung hat sich als richtig erwiesen. Die ständige Verbesserung und Weiterentwicklung der Maschinenkonzepte und Komponenten von Laser-Präzisionsbearbeitungsanlagen ist eine Voraussetzung, um erfolgreich am Markt zu operieren. Die Umsatzerwartungen für LLT GmbH beruhen dabei darauf, dass sowohl im Bereich der Entwicklung und Fertigung von Systemen als auch auf dem Geschäftsfeld der Lohnbearbeitung in den kommenden Jahren ein deutlicher Leistungszuwachs erreicht wird. Durch die Nutzung der Ergebnisse des Forschungsverbundvorhabens MODAN wird ab dem Jahr 2005 eine weitere Steigerung der Umsatzanteile aus dem Sondermaschinenbau erwartet. Insbesondere die gewonnen Erkenntnisse und Erfahrungen aus der Integration neuer Strahlquellen in die vorhandenen Maschinenkonzepte und die Projektergebnisse zu Verbesserung von Genauigkeit und Dynamik der in den Maschinen eingesetzten Antriebe und Steuerungen wird sich bei zukünftigen konkreten Maschinenprojekten positiv auswirken.

# MODAN

**Forschungsverbundprojekt  
„Entwurf und Modellierung von Antriebssystemen  
für die Mikrosystemtechnik“**

**MODAN**

**[www.modan.org](http://www.modan.org)**

*168V1555*

**Abschlußbericht des Teilprojektes  
„Lufttaktventil“**

---

**der Mahle International GmbH**

Verbund-Nr.: V2285  
Fördermittelgeber: BMBF  
Projekträger: VDI/VDE-IT Teltow  
Betreuer: Dipl. - Ing. Chr. Breckenfelder / Dipl. - Ing. S. Krüger

**Inhaltsverzeichnis**

1	Kurzdarstellungen.....	3
1.1	Aufgabenstellung.....	3
1.2	Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens.....	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	3
1.4	Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand .....	4
1.4.1	Für das Vorhabens genutzte bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte.....	4
1.4.2	Verwendete Fachliteratur, genutzte Informations- und Dokumentationsdienste .....	4
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	4
2	Eingehende Darstellungen .....	5
2.1	Projektziel.....	5
2.2	Projektdurchführung .....	6
2.3	Erzielte Ergebnisse.....	7
2.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen.....	13
2.5	Bekanntgewordene Fortschritte bei anderen Stellen.....	13
2.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse .....	13
3	Fortschreibung des Verwertungsplans.....	14

Anlage 1:

Anlage 2:

Anlage 3:

## **1 Kurzdarstellungen**

### **1.1 Aufgabenstellung**

Ein innovatives Antriebsmodul für ein äußerst schnelles Lufttaktventil für Hubkolbenmotoren mit Schaltzeiten um 2 ms sollte in einem Zeitraum von 3 Jahren bis zum Einsatz in der Großserienerprobung bereit und dann entsprechend der spezifischen Kundenanforderungen adaptierbar sein. Mit diesem unmittelbar vor dem Zylinderkopf befindlichen Zusatzventil im Saugrohr, das in jedem Saughub den Ansaugquerschnitt äußerst schnell verschließt und wieder freigibt, werden über den gesamten Drehzahlbereich, vor allem aber bei geringen Motordrehzahlen, erhebliche Drehmomentsteigerungen durch Impulsaufladung erreicht. Da es sich hierbei um ein neues Produkt handelt war es erforderlich eine umfassende Datenbasis über die notwendigen Zusammenhänge und Möglichkeiten erstellt zu haben, um die Relevanz verschiedener Einflussgrößen und Randbedingungen auf das Betriebsverhalten des Aktuators ableiten zu können.

Die Arbeiten umfassen folgende Bereiche:

1. Entwicklung leistungsfähiger Simulationsverfahren
2. Antriebsentwicklung:
3. Herstellbarkeitsanalyse
4. Erprobung des Aktors und Funktionsprüfung am Verbrennungsmotor

Die geplanten Arbeiten im Rahmen des Projektes fanden in direkter Zusammenarbeit mit dem Steinbeis-Transfer-Zentrum Ilmenau und der Universität Ilmenau statt. Die Ergebnisse der Untersuchungen flossen dort unmittelbar in den Know-How-Aufbau ein.

### **1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens**

MAHLE hatte bereits im Jahr 2000 begonnen einen ersten Prototypen des Lufttaktventils aufzubauen und an einem Einzylindermotor zu applizieren. Damit wurde schon im Vorfeld des MODAN-Projekts ein prinzipieller Potentialnachweis des Systems „Lufttaktventil“ erbracht. Auf der Basis intensiver Kundenkontakte wurde die Entscheidung zur weiteren Arbeit an diesem Vorentwicklungsthema mit dem Ziel einer methodischen Entwicklung getroffen.

Bei MAHLE stehen zahlreiche Test- und Prüfeinrichtungen für mechatronische Produkte zur Verfügung sowie auch Motorprüfstände, um die realitätsnahe Demonstratorerprobung am Verbrennungsmotor durchführen zu können.

Weiterhin werden bei Mahle ein Grossteil der notwendigen Bauteile und Vorrichtungen gefertigt, sowie die Aktoren im eigenen Musterbau montiert und in Betrieb genommen.

### **1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Die Arbeiten wurden in drei „Pakete“ über die Projektlaufzeit aufgeteilt:

1. Konzeptauswahl des Aktorprinzips und Simulation bzw. Auslegung der erforderliche Abmessungen und Eigenschaften.
2. Fertigung und Erprobung von Prototyp I mit entsprechender Elektronik und Ansteuerungssoftware für den Motorbetrieb sowie dessen Funktions- und Motorerprobung

3. Fertigung und Erprobung von Prototyp II, der eine optimierte Version des Prototyp I darstellt, mit entsprechender Elektronik und Ansteuerungssoftware für den Motorbetrieb sowie dessen Funktions- und Motorerprobung.

#### **1.4 Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand**

##### **1.4.1 Für das Vorhabens genutzte bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte**

Als Basis für die Entwicklung dienten die Patente zum Lufttaktventil von Dr. Schatz (z.B. Patent DE 37 37 828 (1987) und Patent DE 43 08 931 (1993)). MAHLE hat mit dem Erfinder einen Exklusiv-Nutzungsvertrag geschlossen. Konstruktive Vorlagen oder angewandte Verfahren gab es auf Grund der Innovation der Produktidee nicht.

##### **1.4.2 Verwendete Fachliteratur, genutzte Informations- und Dokumentationsdienste**

Berücksichtigt wurden bei der Auslegung insbesondere die Veröffentlichungen bei der Entwicklung elektromagnetischer Ventiltriebsysteme (EMVT), die eine ähnliche Problemstellung (große Wege, schnelle Schaltzeiten, hohe Robustheit gegenüber Störeinflüssen) besitzen. Dabei konnte auf eine breite Basis von im Haus MAHLE vorhandener zurückgegriffen werden.

#### **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die Arbeiten wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Steinbeis Transferzentrum für Mechatronik in Ilmenau und der Uni Ilmenau durchgeführt, siehe auch Abschnitt 2.2.

## 2 Eingehende Darstellungen

### 2.1 Projektziel

Ein innovatives Antriebsmodul für ein äußerst schnelles Lufttaktventil für Hubkolbenmotoren mit Schaltzeiten um 2 ms sollte in einem Zeitraum von 3 Jahren bis zum Einsatz in der Großserienerprobung bereit und dann entsprechend der spezifischen Kundenanforderungen adaptierbar sein.

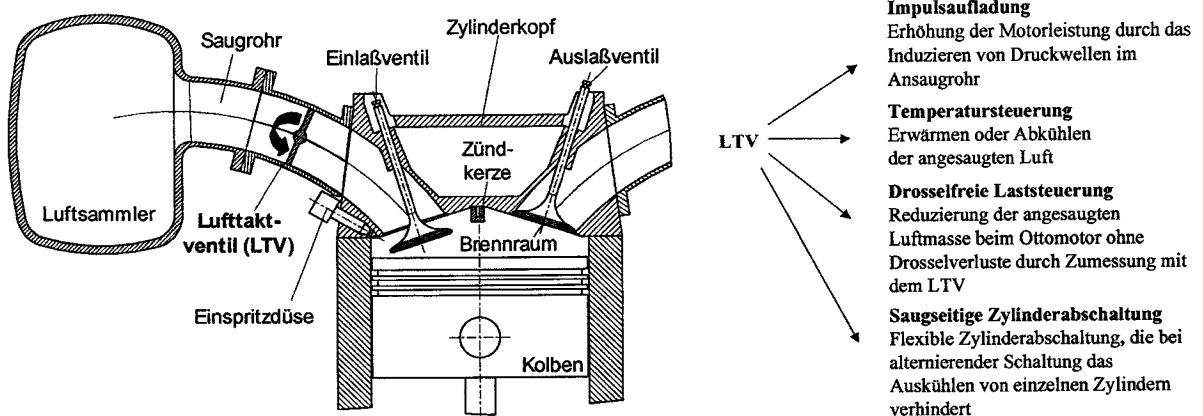


Abbildung 2-1: Lufttaktventil am Ottomotor

Mit diesem unmittelbar vor dem Zylinderkopf befindlichen Zusatzventil im Saugrohr, das in jedem Saughub den Ansaugquerschnitt äußerst schnell verschließt und wieder freigibt, werden über den gesamten Drehzahlbereich, vor allem aber bei geringen Motordrehzahlen, erhebliche Drehmomentsteigerungen durch Impulsaufladung erreicht.

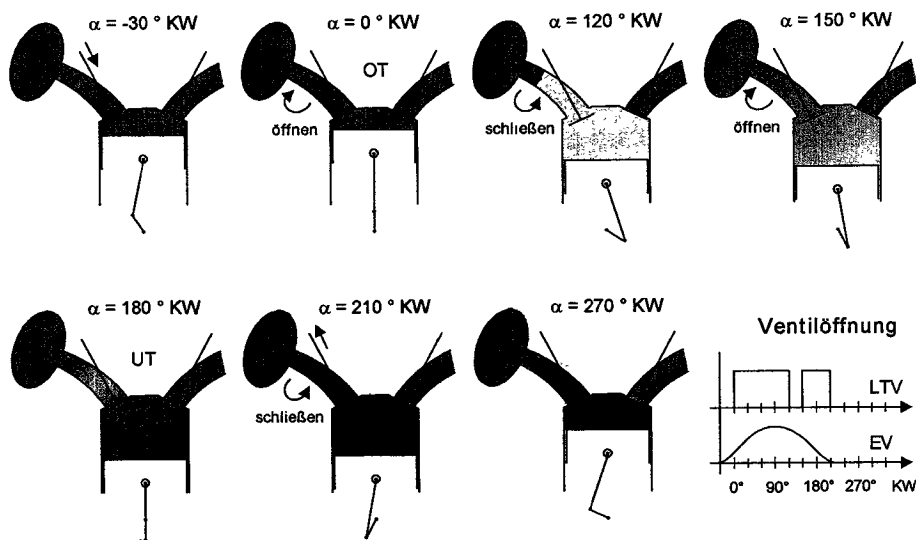


Abbildung 2-2: Verfahren der Impulsaufladung mit dem LTV

Da es sich hierbei um ein neues Produkt handelt war es erforderlich eine umfassende Datenbasis über die notwendigen Zusammenhänge und Möglichkeiten erstellt zu haben, um die Relevanz verschiedener Einflussgrößen und Randbedingungen auf das Betriebsverhalten des Aktuators ableiten zu können.

Die im Kraftfahrzeug notwendigen Eigenschaften des benötigten Antriebs sind insbesondere durch minimale Abmessungen, minimalen Leistungsbedarf und kurze Schaltzeiten bestimmt. Durch MAHLE werden die Voraussetzungen und die Randbedingungen für die Aktorent-

wicklung eingebracht. Im Rahmen dieser Zusammenarbeit sollte die Basis für eine zukünftige Produktion solcher Magnetaktoren erstellt werden. Die MAHLE-Gruppe beabsichtigt die Programmmodule sowie die Demonstratoren für die an das Projekt anschließende Produktentwicklung und dessen Erprobung zu nutzen. Es sind die insbesondere fertigungstechnische Anforderungen zu detaillieren, Lösungen und Alternativen für eine spätere Produktion zu entwickeln und diese Antriebe zu produzieren.

Dabei stehen vier Bereiche im Vordergrund:

#### 1. Entwicklung leistungsfähiger Simulationsverfahren:

Wichtig bei der Auslegung für Erprobungsträger in Kundenfahrzeugen ist die genaue und zuverlässiger Vorhersage der Antriebseigenschaften bei Änderung geometrischer oder steuerungstechnischer Randbedingungen. Dazu müssen vorhandene Simulationsmodelle zur schnellen und effizienten Auslegung magnetischer Antriebssysteme verifiziert und gegebenenfalls neu entwickelt werden. Verbesserte Vorhersagen der Aktuatoreigenschaften sind notwendig, um eine Betrachtung des jeweiligen Anwendungsfalles bzw. die Anpassung an die Kundenkonfiguration mit einer geringen Anzahl von Versuchsmustern durchführen zu können.

#### 2. Antriebsentwicklung:

Hier stehen geeignete Werkstoffe, optimierte Stelldynamik, geringer Energieverbrauch und die Dauerhaltbarkeit an erster Stelle. Weiterhin sind noch Probleme hinsichtlich der Leistungselektronik, der Ansteuerungslogik und der Geräuschentwicklung zu lösen.

#### 3. Herstellbarkeitsanalyse:

Betrachtung bzgl. Kosten, erreichbarer Qualität, Fertigungstiefe bei MAHLE.

#### 4. Erprobung:

Umfangreiche Erprobung der Eigenschaften und der Dauerhaltbarkeit des Demonstrators am Motor bei MAHLE.

Die geplanten Arbeiten im Rahmen des Projektes fanden in direkter Zusammenarbeit mit dem Steinbeis-Transfer-Zentrum Ilmenau und der Universität Ilmenau statt. Die Ergebnisse der Untersuchungen flossen dort unmittelbar in den Know-How-Aufbau ein.

## **2.2 Projektdurchführung**

Die Arbeiten wurden in drei „Pakete“ über die Laufzeit aufgeteilt:

#### 1. Konzeptauswahl / Simulation / Auslegung

Zunächst war insbesondere eine detaillierte Spezifikation der Aktuatoreigenschaften in Zusammenarbeit mit Kfz-Motorenherstellern (Schaltzeiten, Bauraum, Anbindung an das Motormanagement, Betriebstemperatur, Haltbarkeit) erforderlich, um ein Lastenheft des Antriebs und der Steuerelektronik zu erstellen. Anschließend erfolgte die Beurteilung und Auswahl des physikalischen Wirkprinzips für den Aktuator sowie Vorauslegungsberechnungen in Zusammenarbeit mit STZ Mechatronik Ilmenau und Universität Ilmenau. Schwerpunkte waren hierbei die Modellbildung des Aktuators, die Simulation mit Parametervariationen, die Bestimmung einer optimalen Geometrie, die Festlegung von Werkstoffen und der Konstruktionsmerkmale

#### 2. Fertigung und Erprobung Prototyp I

Ziel dieser Arbeiten war die Erstellung eines Funktionsmusters, um einen Nachweis der Funktion der neuen Aktorbauart am Motor zu erbringen. Dazu wurde die Konstruktion von



Aktuator und Luftversorgung durchgeführt, sowie die Steuer- und Leistungselektronik in Zusammenarbeit mit STZ Mechatronik Ilmenau und Universität Ilmenau entworfen.

Nach der Fertigung von Prototyp I incl. der Steuer- und Leistungselektronik und der erforderlichen Steuer-Software erfolgte dessen Erprobung. Dabei wurde die Stelldynamik, die relevanten Kräfte und der Leistungsbedarf ermittelt und die erfolgreiche Funktionserprobung am Mehrzylinder-Verbrennungsmotor durchgeführt. Die Daten wurden zum Modellabgleich der Simulation der realen Aktuator-Situation, sowie zur Abschätzung und Korrektur zusätzlicher Störeinflüsse in Zusammenarbeit mit STZ Mechatronik Ilmenau verwendet.

### 3. Fertigung und Erprobung Prototyp II

Im letzten Schritt wurde ein bzgl. Leistungsbedarf, Herstellbarkeit und Haltbarkeit optimierter Demonstrator aufgebaut. Die Arbeiten umfassten die Konstruktion des überarbeiteten Aktuators, sowie eine Überarbeitung der Steuer- und Leistungselektronik in Hardware und Software in Zusammenarbeit mit STZ Mechatronik Ilmenau. Parallel dazu wurde bei MAHLE eine Kosten- und Herstellbarkeitsanalyse durchgeführt.

Der Prototyp II mit zugehöriger Steuer- und Leistungselektronik wurde gefertigt und eine Steuer-Software mit kundenfähiger Oberfläche erstellt. Dieser Prototyp II wurde wiederum hinsichtlich Stelldynamik, Kräfte, Leistungsbedarf und Haltbarkeit erprobt. Abschließend wurde die Funktionserprobung am Kfz-Motor sowie ein Abgleich mit den Simulationsmodellen am STZ Mechatronik Ilmenau durchgeführt.

#### **2.3 Erzielte Ergebnisse**

Die von MAHLE in Zusammenarbeit mit dem Steinbeis-Transferzentrum Mechatronik in Ilmenau verfolgte Ausführungsform für das Lufttaktventil ist eine Drehklappe mit einer symmetrischen Drehachse. Diese Bauweise erlaubt einen Direktantrieb der Klappenwelle mit einem Schwenkanker, der mit zwei Magneten geschaltet wird. Das Gesamtsystem ist als Feder-Masse-Schwinger konzipiert, bei dem der Magnetanker und die Klappe die Masse darstellen. Zur Energiespeicherung wird eine separate Feder verwendet. Dies stellt für schnell-schaltende Systeme eine energetisch günstige Lösung dar, da bezogen auf den Aktor nur die während der Schwingung durch Reibung und Störkräfte verbrauchte mechanische Energie zugeführt werden muss. Da am Fahrzeug die elektrische Energie nur mit sehr geringen Wirkungsgraden aus der eingesetzten Primärenergie gewonnen werden kann, steht eine Aktorauslegung mit möglichst kleiner Verlustleistung im Vordergrund, da sonst schnell die verfügbaren thermodynamischen Potentiale des Verbrennungsmotors zur Energieeinsparung wieder egalisiert werden können. Weitere wichtige Aspekte sind der geringe Bauraum und geringes Gewicht sowie ein großes Fernfeld der Fangmagnete, um geregelten „Soft-Landing“-Konzepten ein frühzeitiges Eingreifen in die Ankerbewegung beim Umschaltvorgang zu ermöglichen. Der prinzipielle Aufbau des Antriebssystems ist in Abbildung 2-3 dargestellt.

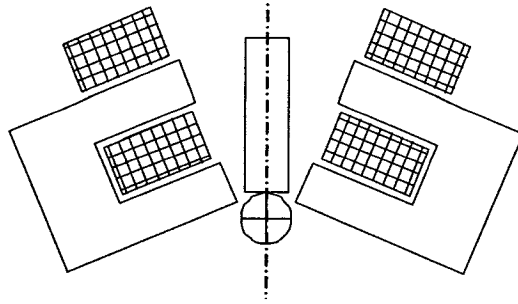


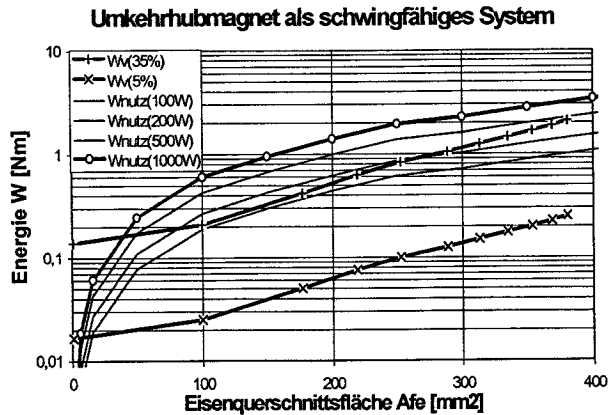
Abbildung 2-3: Klappanker-U-Magnet als Direktantrieb für das Lufttaktventil

Ein Umkehrhubmagnet, dessen Anker mit der Feder und der Klappe ein schwingfähiges System darstellt, kann mit einem vergleichsweise geringen Aufwand die Verluste durch Reibung, Dämpfung o.ä. kompensieren. Dieses System hat allerdings die Eigenschaft, dass es zum Zeitpunkt  $t = 0$  aus dem stabilen Arbeitspunkt in der Mittelstellung durch Anschwingen mit Resonanzfrequenz in eine der beiden Endlagen (Magnetanker haftet am Pol einer der beiden Magnete) „aufgeschaukelt“ werden muss. In den Endlagen kann der Magnetanker mit geringer Verlustenergie gehalten werden. Zum Umschalten wird der Magnet 1 abgeschaltet und die Feder bewegt die Klappe zum gegenüberliegenden Magnet 2. Dieser muss in der Lage sein, in kürzester Zeit die Energieverluste des Schwingers zu kompensieren sowie das Haltemoment aufzubauen.

Das Ziel der Dimensionierung ist die Bewegung des Ankers und der Klappe von Magnet 1 zu Magnet 2 innerhalb einer festgelegten Zeit  $t_1$  um einen bestimmten Winkel  $\varphi_0$ . Wie die folgende Gleichung zeigt, wird unter der Vernachlässigung von Reibungs- und Dämpfungsverlusten, die durch das Magnetsystem kompensiert werden, das Bewegungsverhalten in erster Linie durch die Federsteifigkeit  $c$  und die Summe der Massenträgheitsmomente  $J_i$  bestimmt.

$$t_1 = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{c}{\sum J_i}}} = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{M_H / \varphi_0}{J_{\text{Luftklappe}} + 0,33 \cdot J_{\text{Feder}} + J_{\text{Welle}} + J_{\text{Anker}}}}} \leq 2ms$$

Die Massenträgheitsmomente von LTV-Klappe, Feder und Welle sowie der Drehwinkel  $\varphi_0$  seien konstant und bekannt. Zwischen dem Haltemoment  $M_H$  und dem Massenträgheitsmoment  $J_{\text{Anker}}$  gibt es keinen expliziten Zusammenhang. Es wird von einem bekannten Klappankersystem ausgegangen. Durch Skalierung dieser Systeme erhält man die in **Bild 5** dargestellten Kurven  $W_{\text{nutz}} = f(A_{\text{Fe}}, P_v)$ . Es werden je ein verlustarmes System mit 5% Verlust durch Reibung und Dämpfung  $W_v(5\%)$  und ein verlustbehaftetes System mit 35% Verlust  $W_v(35\%)$  in die Untersuchung einbezogen. Es zeigt sich, dass sich die Kurven  $W_{\text{nutz}}(100W)$  und  $W_v(35\%)$  bei einer Eisenquerschnittsfläche von  $100 \text{ mm}^2 < A_{\text{Fe}} < 150 \text{ mm}^2$  berühren.



$W_{nutz}$

Nutzenergie des Magneten bei unterschiedlichen Verlustleistungen

$W_v$

Verlustenergie des Feder-Masse-Schwingers durch Reibung, Dämpfung (5% Verlust für ein dämpfungsarmes und 35% Verlust für ein stark gedämpftes System)

Abbildung 2-4: Energetische Untersuchungen am Umkehrhubmagneten

Das erste Versuchsmuster von MAHLE wurde als klassischer Klappankermagnet mit konstanter Eisenquerschnittsfläche von  $A_{fe} = 100 \text{ mm}^2$  statisch grobdimensioniert und erprobt (siehe Abbildung 2-3). Versuche zeigten, dass der magnetische Kreis sehr weit im Sättigungsbereich betrieben werden muss um die geforderten Randbedingungen zu erfüllen. Trotz der hohen Anforderungen beim Betrieb dieses Magnetsystems - hohe impulsförmige Spitzenströme von 25 ... 30 A, sehr hohe thermische Belastung der Spulen und damit notwendige Zwangskühlung der Magnetspulen sowie große Rückwirkungen des mechanischen und magnetischen Kreises auf die elektronische Ansteuerung - wurde der Nachweis der Drehmomenterhöhung durch das LTV am Hubkolbenmotor bei niedrigen Drehzahlen erbracht.

Für den verbesserten Aktor „Prototyp I“ wurde im Rahmen des MODAN-Projekts das vorhandene Magnetsystem optimiert, wobei an der prinzipiellen Magnetform festgehalten wurde. Die Eisenquerschnittsfläche des gestellfesten Eisenrückschlusses und das Spulenfenster wurden vergrößert. Der Abstand des Magnetankers vom Drehpunkt wurde beibehalten, die Länge des Magnetankers wurde jedoch stufenweise reduziert. Dabei wurde gleichzeitig der dem Drehpunkt abgewandte Schenkel des Eisenrückschlusses in Richtung Drehpunkt herangezogen (vgl. Abbildung 2-5). Aus der anfänglichen Magnetgrundform wurden sieben konstruktiv unterschiedliche Varianten abgeleitet, die ihrerseits proportional in der Größe skaliert untersucht wurden. Dabei wurden für alle Varianten  $V_{ij}$  statische Magnetsimulationen mit unterschiedlicher Durchflutung und Ankerstellung durchgeführt. Die berechneten Magnetmomente wurden mit dem für das jeweilige Massenträgheitsmoment notwendigen Federmoment verglichen. In der Auswahlphase wurde die Magnetvariante gewählt, welche die geringste Federsteifigkeit zum Erreichen der geforderten Schaltzeit benötigt.

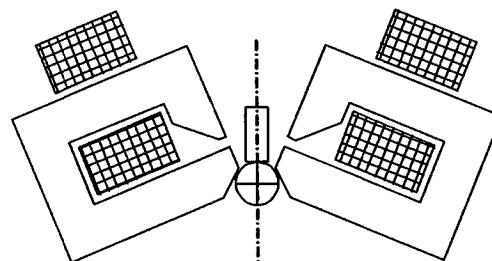


Abbildung 2-5: Optimierte Form des Umkehrhubmagneten

An Verbrennungsmotoren unterschiedlicher Art (hinsichtlich Zylinderzahl, Brennverfahren)

und Hersteller) wurden Verfahren zur Ladungswechselbeeinflussung mit dem Lufttaktventil in der Praxis erprobt. Unter anderem wurden die Prinzipien Impulsaufladung und Wärmeladung untersucht und ihre Wirkung erfolgreich nachgewiesen.

Als Beispiel für die Motormessungen wird hier ein Versuch zur Impulsaufladung vorgestellt. Eine Erhöhung der für die Verbrennung zur Verfügung stehende Luftmasse ist mit unterschiedlichen Schaltstrategien des LTV-Antriebes möglich, die auch zugleich die verschiedenen Anforderungen an das Lufttaktventil und dessen Antrieb aufzeigen (höherer Druck auf der Saugrohrseite, höherer Druck auf der Zylinderkopfseite, Schließen gegen starke Luftströmung). Während der Ansaugphase kann die LTV-Klappe den Öffnungs- und Schließvorgang („Takten“) ein- oder zweimal durchführen. Abbildung 2-6 zeigt die dabei gemessenen Druckverläufe.

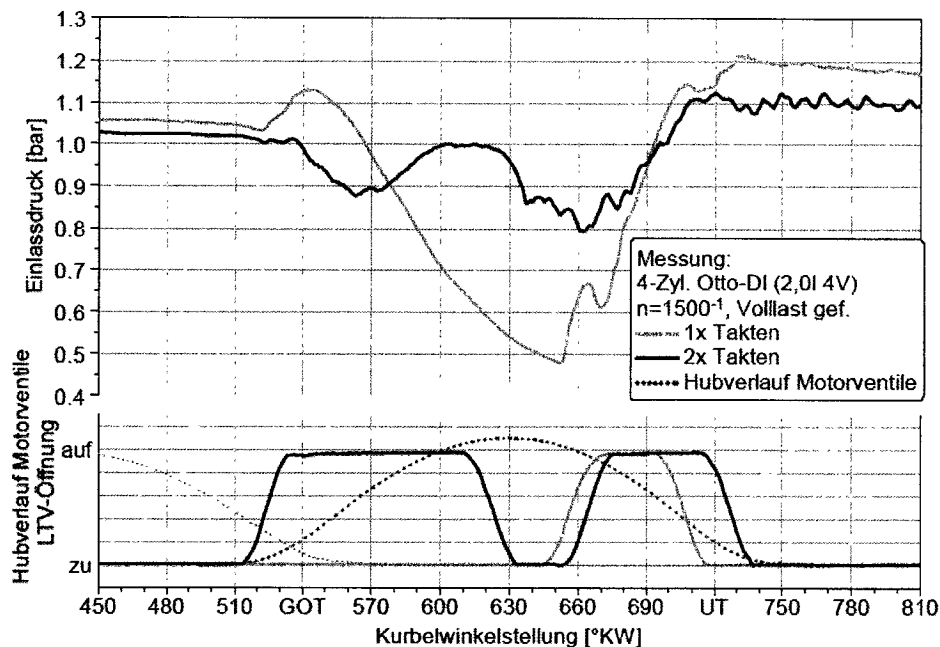


Abbildung 2-6: Druckverläufe mit ein- und zweimaligen Takten am DI-Ottomotor

Beim 1x Takten wird schnell ein großer Unterdruck erzeugt, der durch das Öffnen des Lufttaktventils ausgeglichen wird. Die Unterdruckwelle wird am Sammler reflektiert und läuft als Druckwelle wieder in den Brennraum, wo sie durch das schließende Lufttaktventil eingefangen wird. Durch Leckagen über das Lufttaktventil sinkt der Druck in dem Raum zwischen LTV und Einlassventil bis zum nächsten Zyklus wieder bis auf das Niveau des Saugrohrdrucks ab.

Das 2x Takten unterscheidet sich dabei grundsätzlich dadurch, dass die Druckdifferenzen über das Lufttaktventil sehr viel geringer sind. Im aufgezeigten Fall wird zunächst eine Impulsaufladungswelle mit einer geringen Druckamplitude durch das Geschlossenhalten des Lufttaktventils ausgelöst. Der darauf folgende Ansaugvorgang wird durch das Schließen des Lufttaktventils kurzzeitig unterbrochen und ein zweiter Impulsaufladevorgang mit einer noch kleineren Amplitude schließt sich daran an. Zwar ist u.U. der erzeugte Überdruck weniger hoch als mit dem 1x Takten. Vorteilhaft sind hier aber die Verminderung der notwendigen Ladungswechselarbeit und die moderaten Gasgeschwindigkeiten.

Welche der Schaltvarianten im Einzelfall effektiver ist, hängt von Parametern wie Drehzahl, Gemischbildung und Brennverfahren, sowie Einlasskanalgestaltung ab. Der erfolgreiche

Nachweis der Impulsaufladung durch das Lufttaktventil wird u.a. durch eine Luftmassensteigerung von ca. 20% gegenüber Serienstand dargestellt.

- Nachweis der Funktion am Vierzylinder-Ottomotor erfolgreich
- Anhebung des Drehmomentes im niederen Drehzahlbereich um ca. 10 - 15 % gegenüber dem Motor mit Serien-Sauganlage
- Aktoren auch im realen Motorbetrieb funktionssicher

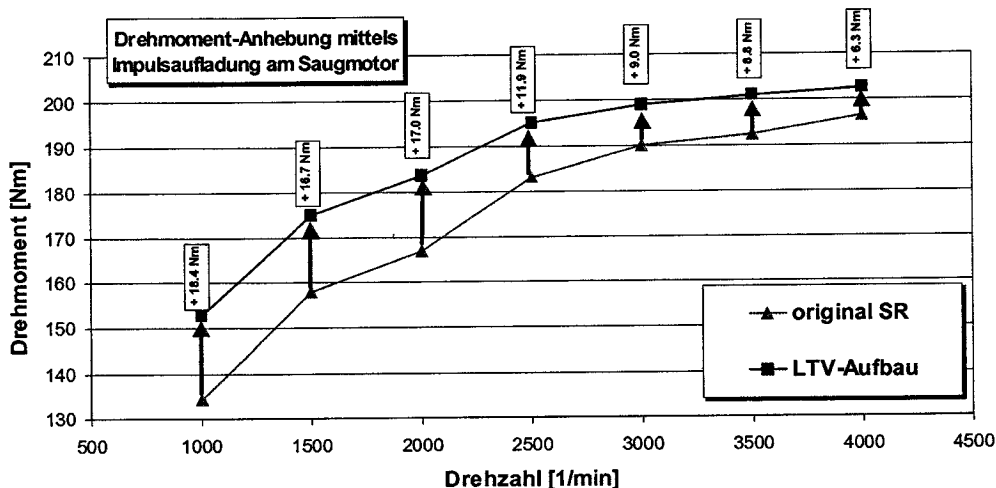


Abbildung 2-7: Drehmomentanhebung am Ottomotor mit Lufttaktventil

Ein weiteres wichtiges mit dem Lufttaktventil realisierbares Verfahren ist die sogenannte Wärmeladung zur Unterstützung von Kaltstart und Warmlauf. Dabei wird das Lufttaktventil sehr spät im Ansaugzyklus nahe am unteren Totpunkt des Kolbens einmal kurz geöffnet, was zu hohen Strömungsgeschwindigkeiten und einer Gaserwärmung führt. Aufgrund dessen treten über der Lufttaktventil-Klappe extreme Druckdifferenzen in Verbindung mit einem kürzest möglichen Öffnen und Schließen des Ventils auf. In Abbildung 2-8 ist der Vorgang kurbelwinkelaufgelöst zusammen mit der konventionellen Ansaugung mit vollständig geöffnetem Lufttaktventil aufgetragen.

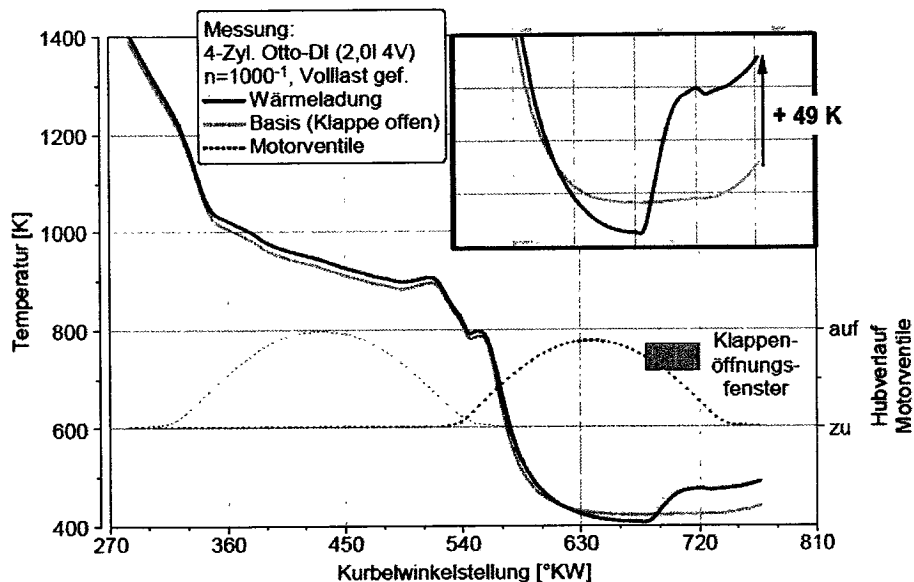


Abbildung 2-8: Temperaturerhöhung der Luft im Brennraum durch Wärmeladung

Unter Einhaltung der elektrischen, mechanischen und geometrischen Randbedingungen wurde daher mit systematischer Suche wesentlich verbesserte Magnetsystem (Abbildung

2-9) entworfen, das mit wesentlich geringerer Steuerleistung die notwendigen hochdynamischen Klappenbewegungsvorgänge schalten kann. Die systematische Optimierung des Magnetsystems ausgehend von der Grundform in Abbildung 2-5 stellt das Programmsystem SESAM dar, das gemeinsam von der TU Ilmenau in Zusammenarbeit mit der innomas GmbH entwickelt wurde. SESAM ist ein Entwurfssystem zur Dimensionierung und Optimierung von Magnetaktoren und basiert auf der Netzwerkmethod.

Durch die Festlegung unterschiedlicher Optimierungsziele, z.B. schnellster Aktor, Aktor mit weichster Feder, Aktor mit kürzestem Anker und Aktor mit besten Fangereigenschaften bzw. durch die Änderung des Magnetmaterials oder anderer Randbedingungen (Bauraum, zulässige Verlustleistung) können die Hauptabmessungen der Aktoren berechnet werden.

In Abbildung 2-9 und Abbildung 2-10 sind beispielhaft die Geometrien und die Momenten-Winkel-Kennlinien eines Aktors mit gutem Fangverhalten dargestellt. Ein gutes Fangverhalten bedeutet dabei eine möglichst große Fernwirkung des Magneten um den Anker frühzeitig beeinflussen zu können, was zur Realisierung einer Flugregelung („Soft-Landing“) vorteilhaft ist. Dabei liegen die Details hauptsächlich im günstigen Verhältnis der Abmessungen von Eisenquerschnittsflächen und Spulenfenster zur Masse des bewegten Ankers.

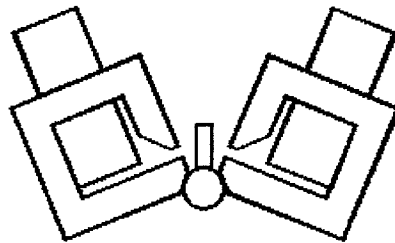


Abbildung 2-9: Magnetsystem eines Aktors mit gutem Fangverhalten

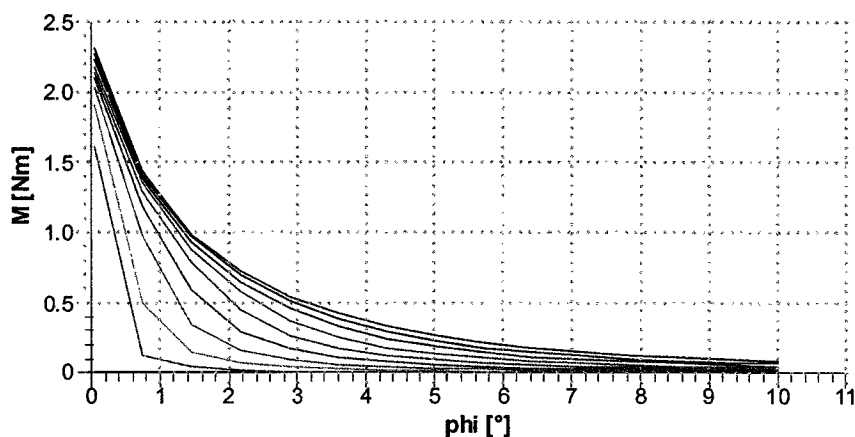


Abbildung 2-10: M-φ-Kennlinien eines Aktors mit gutem Fangverhalten

Das optimierte Magnetsystem für den „Prototyp II“ wurde aufgebaut und erprobt, um die Funktion des Aktors mit der geänderten Magnetgeometrie zu verifizieren. Dabei konnten die Vorhersagen sehr gut umgesetzt und ein sichererer Betrieb am Verbrennungsmotor erreicht werden, was die Leistungsfähigkeit der vom STZ Mechatronik Ilmenau verwendeten Synthesoftware SESAM eindrucksvoll unterstreicht.

## **2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen**

Die Ergebnisse der Forschungs- und Entwurfsarbeiten fließen in ein neuartiges Konzept kleiner und schneller Antriebsmodule für Lufttaktventile ein, welche bei einer erfolgreichen Entwicklung für MAHLE einen erheblichen Produktionszuwachs in Aussicht stellen. MAHLE gewinnt damit einen Know-How-Zuwachs und Vorsprung auf den Gebieten Antriebstechnik und Antriebssteuerung und sichert sich damit künftige Aufträge aus der Kfz-Industrie.

Die bisher bei Funktionsüberprüfungen am Aktuator und am Motorprüfstand erzielten Ergebnisse bestätigen die theoretischen Überlegungen und Simulationen weitgehend. Damit ist ein weiterer Schritt zu einer Verbesserung der Modellbildung und zur gesicherten Vorhersage von Systemeigenschaften komplexer mechatronischer Gesamtsysteme gegeben.

Mit den hier durchgeführten Arbeiten eine fundierte Basis geschaffen werden, um im Projekt Lufttaktventil und auch allgemein günstigere Erfolgsaussichten im Bezug auf die Entwicklung von Magnetantrieben zu erlangen, welche im Bereich der Kfz-Zulieferindustrie einen zunehmend wichtigeren Stellenwert einnehmen.

## **2.5 Bekanntgewordene Fortschritte bei anderen Stellen**

Zur Internationalen Automobilausstellung (IAA) in Frankfurt im September 2003 hat der Wettbewerber Siemens VDO ein eigenes Impulsaufadesystem vorgestellt. Die veröffentlichten Leistungsdaten dieses Ventils sind jedoch insbesondere bezüglich der erreichbaren Schaltzeiten (Siemens VDO → 3 ms; MAHLE → 1,8 ms) deutlich geringer, was die Anwendbarkeit in verschiedenen Betriebspunkten oder die Funktionalität bei einigen Verfahrensweisen aus heutiger Sicht einschränkt. Damit wird wiederum die fundamentale Bedeutung einer Optimalauslegung von Antrieb und Magnetsystem in enger Verbindung mit der Gesamtkonstruktion des Aktors hervorgehoben

## **2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse**

Elsäßer, A., Schilling, W., Schmidt, J., Kallenbach, E., Beyer, F.:

Schnelle magnetische Aktoren für die Impulsaufladung von Hubkolbenmotoren.

47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau, 2002.

Elsäßer, A., Schilling, W., Schmidt, J., Kallenbach, E., Beyer, F., Baumbach, J.:

Entwurf schnellwirkender magnetischer Aktoren für Lufttaktventile.

Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, 6. EGT-/GMM-Fachtagung, Darmstadt, 3.+4.03. 2004.

Elsäßer, A., Dingelstadt, R., Kallenbach, E., Beyer, F., Baumbach, J., Kucera, U.:

Entwurf schnellwirkender magnetischer Aktoren für Lufttaktventile.

MODAN-Statusseminar, Fulda, 06.10.2004.

Dingelstadt, R., Elsäßer, A., Schilling, W., Schmidt, J., Kallenbach, E., Beyer, F., Baumbach, J., Otto, R., Kucera, U.:

Modellbasierte Optimierung von Magnetantrieben für Lufttaktventile.

Tagung „Mechatronik 2005 – Innovative Produktentwicklung“, Wiesloch, 1.+2.06.2005.

### 3 Fortschreibung des Verwertungsplans

Ziel von MAHLE ist die Entwicklung von Gesamtsystemen zur "motorische Luftversorgung" mit allen technisch erreichbaren Optimierungspotentialen bzgl. Bauraumminimierung, Leistungserhöhung und Senkung des Kraftstoffverbrauchs. Erste Teilschritte wurden bereits durch die Entwicklung aufwendiger Kunststoff-Leichtbausaugrohre mit verschiedenen Schaltmöglichkeiten erreicht. Vor den Hintergrund des ökologischer Faktors „Kraftstoffeinsparung“ möchte MAHLE das Lufttaktventil im Saugsystem zur Serienreife zu entwickeln und Motorenherstellern als Komplettsystem mit dem Ansaugmodul (Luftführungen, Luftfilter, Saugrohr, Abgasrückführsystem und Klappensystem) anzubieten.

Die Ergebnisse der Forschungs- und Entwurfsarbeiten fließen in ein neuartiges Konzept kleiner und schneller Antriebsmodule ein, welche bei einer erfolgreichen Entwicklung für MAHLE einen Produktionszuwachs in der Größenordnung von ca. 15 Mio Euro/Jahr in Aussicht stellen. MAHLE gewinnt damit einen Know-How-Zuwachs und Vorsprung auf den Gebieten Antriebstechnik und Antriebssteuerung und sichert sich damit künftige Aufträge aus der Kfz-Industrie.

Die bisher bei Funktionsüberprüfungen am Aktuator und am Motorprüfstand erzielten Ergebnisse bestätigen die theoretischen Überlegungen und Simulationen weitgehend. Damit ist ein weiterer Schritt zu einer Verbesserung der Modellbildung und zur gesicherten Vorhersage von Systemeigenschaften gegeben. Damit ist die allgemeine Nachnutzung in Form von erprobten und verifizierten Simulationsverfahren und als an den beteiligten Instituten (Steinbeis-Transferzentrum Mechatronik Ilmenau und Universität Ilmenau) verbleibenden Erfahrungen bei der Auslegung von Hochleistungsantrieben gesichert. Weiterhin soll eine fundierte Basis geschaffen werden, um allgemein günstigere Erfolgsaussichten im Bezug auf die Entwicklung von Magnetantrieben zu erlangen, welche im Bereich der Kfz-Zulieferindustrie einen zunehmend wichtigeren Stellenwert einnehmen. Das Projekt stellt insbesondere auch im Bereich der Hochschulforschung und -ausbildung ein interessantes Forschungsobjekt dar, durch das aufgrund der hohen Anforderungen an Dynamik, Komplexität und Baugröße zahlreiche weiterführende Untersuchungen anschließen werden.



# MODAN

**Forschungsverbundprojekt  
„Entwurf und Modellierung von Antriebssystemen  
für die Mikrosystemtechnik“**

**MODAN**  
**www.modan.org**

*16SV1548*

**Abschlussbericht des Teilprojektes  
„Modulare Präzisionsantriebe für MEMS und Laser-  
anlagen“  
der TETRA GmbH**

Laufzeit: 01.04.2002 – 31.03.2005

Verbund-Nr.: V2285  
Fördermittelgeber: BMBF  
Projektträger: VDI/VDE-IT Teltow  
Betreuer: Dipl. - Ing. Chr. Breckenfelder / Dipl. - Ing. S. Krüger  
  
Projektleiter: Dipl.-Ing. O. Mollenhauer

Ilmenau, 12.10.2005

**Inhaltsverzeichnis**

1	Kurzdarstellungen .....	3
1.1	Aufgabenstellung .....	3
1.2	Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens .....	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	3
1.4	Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand .....	3
1.4.1	Für das Vorhabens genutzte bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte.....	4
1.4.2	Verwendete Fachliteratur, genutzte Informations- und Dokumentationsdienste .....	4
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	5
2	Eingehende Darstellungen.....	6
2.1	Projektziel .....	6
2.2	Projektdurchführung.....	7
2.3	Erzielte Ergebnisse .....	7
2.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen .....	17
2.5	Bekanntgewordene Fortschritte bei anderen Stellen .....	18
2.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	18
3	Fortschreibung des Verwertungsplans .....	18

Anlage 1:

Anlage 2:

Anlage 3:

## **1 Kurzdarstellungen**

### **1.1 Aufgabenstellung**

Die Aufgaben der TETRA GmbH waren durch folgende Teilkomponenten bestimmt:

Entwicklung und Anpassung der Sensorik und Messtechnik für die Demonstratoranlage

Entwicklung der Steuer- / Regelalgorithmen

Entwicklung der notwendigen Steuerungs- und Leistungselektronik und

Entwicklung der notwendigen Software für die PC - gestützte Bedienung der Demonstratoranlage.

Die Aufgaben waren hinsichtlich folgender Applikationen zur bearbeiten:

- Oberflächenmess- und -analysegeräte
- Montage- und Handlungseinheiten für die Mechatronik- und Mikrosystemfertigung.

### **1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens**

TETRA hatte vor Projektbeginn bereits langjährige Erfahrungen auf dem Gebiet der Entwicklung und Fertigung von Steuerungen. Die fruchtbare Zusammenarbeit mit dem IMMS in Forschungsprojekten stellte bereits einen festen Bestandteil der Entwicklung der Firma dar. TETRA hatte bereits Erfahrungen auf dem Gebiet tribologischer Untersuchungen gemeinsam mit dem IMMS und der TU Ilmenau gesammelt. Es wurden Vertriebspartnerschaften im Ausland aufgebaut, um später entsprechende Tester verkaufen zu können und die Kundenwünsche bereits in der Entwicklungsphase einfließen zu lassen. TETRA hatte die personellen Voraussetzungen und die Absichten, die Weiterentwicklung der Antriebe zum Produkt durchzuführen und zu vermarkten.

### **1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Im Projekt wurden Meilensteine für die bessere Koordination und Arbeit mit den Projektpartnern und zur Kontrolle des Fortschritts festgelegt und in regelmäßigen viertel- bis halbjährigen Status-Meetings kontrolliert. Zwischenzeitlich gab es Arbeitsberatungen der in bestimmte gemeinsame Arbeiten involvierten Projektpartner. Diese Absprachen entsprechend des Projektfortschrittes und der gegebenen Notwendigkeiten regelmäßig in kurzen Abständen.

### **1.4 Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand**

Das dem erfolgreichen Einsatz von Mikrosystemen und mikrosystemtechnischen Fertigungsanlagen innewohnende Wachstumspotential wird heute hinsichtlich seiner Wirksamkeit auch dadurch bestimmt, inwieweit es gelingt, das an Universitäten und Forschungseinrichtungen vorhandene Wissen auf einfach handhabbare Weise in kleine und mittelständische Unternehmen zu transferieren. Die Forschungseinrichtungen ihrerseits sind auf eine intensive Zusammenarbeit mit Industriepartnern angewiesen, um Entwicklungstrends abschätzen zu können und den Modellierungs- und Simulationsprozess für verschiedenste Anwendungsbereiche immer besser an die praktischen und problemspezifischen Erfordernisse anpassen zu können.

Systemmodellierung und -simulation stellen heute eine sinnvolle und unverzichtbare Ergänzung zur anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Mikrosystemtechnik und darüber hinaus dar. Vielfach ist aufgrund der Komplexität und Heterogenität der zu entwerfenden Systeme und Anlagen eine optimale Struktur nur noch mit sehr hohem Modellierungs- und Simulationsaufwand zu realisieren. Auch bei der industriellen Fertigung von MST - Komponenten bzw. Produkten im MST - Umfeld kann und muss die Simulation von geeigneten Systemmodellen zumindest entwurfsunterstützend eingesetzt werden. Die Notwendigkeit eines durchgängigen rechnerunterstützten Entwurfes wird heute von einer Vielzahl von Industriepartnern zunehmend erkannt. Da die Entwurfsaufgaben auch im Bereich MST nach wie vor mit herkömmlichen Hilfsmitteln gelöst werden, stoßen die Anwender zunehmend an die Grenzen der Leistungsfähigkeit. Die daraus resultierenden Probleme sollen mit den modernen Simulatoren umgangen bzw. vermieden werden.

Die Möglichkeiten der rechnerunterstützten Modellierungs-, Simulations- und Entwurfstechniken wurden für die TETRA GmbH im Laufe des Projektes transparenter gemacht. Durch Verfügbarkeit der Simulationstools und Einarbeitungshilfen der Toolanbieter konnte ein neuer Piezoaktor modelliert und optimiert werden. Am Beispiel eines elektrodynamischen Antriebs wurde das Entwurfswerkzeug SESAM erfolgreich getestet. Besonders wertvoll war dabei der Wissenszuwachs der Projektbearbeiter auf dem Teilgebiet der elektrodynamischen Optimierung. Ein direkter Kostenvorteil ergab sich beim Einsatz von SESAM in der kompletten und einfachen Optimierung des Antriebs ohne aufwendigen Prototypenbau und -test.

#### **1.4.1 Für das Vorhaben genutzte bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte**

Das bekannte Verfahren des elektrodynamischen Antriebs wurde verwendet und zusammen mit dem IMMS in einem linearen sowie einem planaren Antrieb zum Einsatz in Laseranlagen oder zur Bearbeitung von MEMS optimiert.

Zusammen mit dem IIS der FhG wurde ein Piezoaktor für den Einsatz in MEMS entworfen und entwickelt. Das Wirkprinzip geht auf die Kopplung von Piezo-Elementen mit Verformungskörpern zur Wegübersetzung zurück.

#### **1.4.2 Verwendete Fachliteratur, genutzte Informations- und Dokumentationsdienste**

- /1/ Kallenbach E., Saffert E., Hoffmann A., Schäffel Ch., Pause S.: Ein neues Maschinenkonzept mit planaren Mehrkoordinatenantrieben und Laserstrahlen; 1. Anwenderfachtagung Mikrosystemtechnik, Österreich, Dornbirn; 3/2000
- /2/ Schäffel Ch., Beckert E., Hoffmann A., Saffert E.: Ein komplexes mechatronisches Antriebssystem für die Halbleiterfertigung; Ehrenkolloquium zum 65. Geburtstag Prof. Dr. Kallenbach, Ilmenau; 9/2000
- /3/ Schäffel Ch.: Planar Motion Systems and Magnetic Bearings; 4th Polish-German Mechatronic Workshop 2003; Suhl, 7/2003
- /4/ Schäffel Ch.: Elektrodynamische Antriebe für die Mikro- und Nanotechnik; Workshop 'Innovative Produkte im Spannungsfeld von Entwicklung und Vermarktung', 23.01.2004, Ilmenau, 1/2004
- /5/ Ahmed S. I., Mollenhauer O., Spiller F.: High Precision Positioning and Measurement Systems for Microtribology, Proceedings of TRIMIS 2003, 01 - 03 June, 2003, Neuchâtel, Switzerland; 6/2003

- /6/ Mollenhauer O., Spiller F.: Fibre Optic sensor and tribology sensor system - Measurement system for distance, friction, general force, etc... ; Tokyo/Japan; Advanced Photonics Technology Exhibition; 11/2003
- /7/ Kallenbach, Eick, Quendt, Ströhla, Feindt, Kallenbach: Elektromagnete, B.G. Teubner Verlag Wiesbaden, ISBN 3-519-16163-X, 2003
- /8/ Ströhla: Ein Beitrag zur Simulation und zum Entwurf von elektromagnetischen Systemen mit Hilfe der Netzwerkmethod, Dissertation, Wissenschaftsverlag Ilmenau, ISBN 3-936404-00-3, 2002
- /9/ Zentner, J., Kallenbach E., Bertram T., Scharfeld F., Cinkaya H., Lückel J., Freudenberg H. und Maißer P.: Some Aspects of Performance Enhancement of Planar Drive Based PKM; International IEEE Conference Mechatronics & Robotics, Aachen; 2004
- /10/ Birli, O.; Feindt, K.; Kallenbach, E.; Ströhla, T.: SESAM – a network based design tool for developing electromagnetic actuators; International Conference on Mechatronics 2003, Loughborough University, UK; 19-20 June 2003
- /11/ Ströhla, T.; Birli, O.: Einsatz von Hysteresesimulation im Entwurfsprozess von Magnetaktoren; 47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der Technischen Universität Ilmenau IWK 2002; 23.-26. September 2002

...

### **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Intensive Zusammenarbeit gab es mit dem IMMS, mit dem viele der bewältigten Aufgaben gemeinsam durchgeführt wurden. Im Laufe des Projektes ist hier eine leistungsfähige „Hand-in-Hand“ Arbeitsweise entstanden.

Applikationsbedingt wurden Absprachen mit der LLT durchgeführt, die später zu einer gemeinsamen Strategieplanung für den Markt der Laserapplikationen genutzt wurden.

Während der Entwicklung und Modellierung des Piezoaktors war eine intensive Zusammenarbeit zwischen der FhG und TETRA notwendig, die auch nach Projektende für die Weiterentwicklung des Demonstrators Bestand haben soll.

Die TUI stand der TETRA GmbH für die Einarbeitung in das Simulationswerkzeug SESAM hilfreich und beratend zur Seite.

Zusammenarbeiten außerhalb des Verbundes für das Projekt ergaben sich nicht, jedoch wurde angeregt durch das Projekt mit dem Aufbau eines Netzwerkes für Hersteller von Direktantrieben begonnen. Dieses Netzwerk soll in einen Wachstumskern eingebracht werden.

## 2 Eingehende Darstellungen

### 2.1 Projektziel

Die im Projekt zu realisierenden Arbeiten waren zugeschnitten auf ein neuartiges Laborsystem für die Proben- und Werkstoffanalytik bzw. Proben- / Werkstückbearbeitung einschließlich notwendiger Analyse- bzw. Be- und Verarbeitungsverfahren (z.B. Laserbearbeitung). Dabei standen Untersuchungen zur Realisierbarkeit und der Aufbau von Demonstrationsgeräten mit Antrieben, die einen Verfahrbereich von 50 ... 250 mm bei gleichzeitig hoher Genauigkeit ( $\leq 1\mu\text{m}$ ) besitzen, im Vordergrund.

In Kooperation mit der LLT GmbH und der IMMS gGmbH wurden dafür 3D - Präzisionspositioniersysteme für das Proben- / Werkstückhandling bzw. die Laserpositionierung entwickelt. Die Aufgaben der TETRA GmbH waren durch folgende Teilkomponenten bestimmt:

Entwicklung und Anpassung der Sensorik und Messtechnik für die Demonstratoranlage,

Entwicklung der Steuer- / Regelalgorithmen,

Entwicklung der notwendigen Steuerungs- und Leistungselektronik und

Entwicklung der notwendigen Software für die PC - gestützte Bedienung der Demonstratoranlage.

Dafür wurden unter anderem folgende Schwerpunkte bearbeitet:

Applikation eines neuen Sensorprinzips für modulare Präzisionsantriebe zur Positionierung im sub -  $\mu\text{m}$  - Bereich

Beschreibung des Systemverhaltens des Positionsmeßsystems für die Simulation, Überprüfung der Modellierung

Algorithmenentwicklung einer auf dem Positionsmesssystem basierenden Lageregelung und Realisierung der Elektronikhardware

Entwicklung und Realisierung der Steuer- / Regelalgorithmen mit dem besonderen Schwerpunkt der Online - Bahnkorrektur, um sensorgeführte Fertigungsschritte programmieren zu können

Konzeption und Entwicklung einer modular aufgebauten PC - Software:

- Programmierung der Software zur Anlagenkonfigurierung
- Programmierung der Software für die Prozesssteuerung und zur Bedienung der gesamten Demonstratoranlage
- Programmierung von Funktionen zur Online - Bahnkorrektur
- Programmierung von Funktionen zur manuellen Prozessführung (operatorgeführte Fertigung) für sehr kleine Stückzahlen und im Testbetrieb

Konzeption und Realisierung des Bussystems (Hardware, Protokolle)

Untersuchungen und Prototyping von Präzisionsmessverfahren

Überprüfung der Arbeitsweise mit den Programmsystemen und Zusammenstellung von weiteren Anforderungen an die Simulations- und Optimierungssoftware bzw. von Änderungswünschen

Applikationen:

- Oberflächenmess- und -analysegeräte  
Montage- und Handlungseinheiten für die Mechatronik- und Mikrosystemfertigung.

## 2.2 Projektdurchführung

Im Projekt wurden Meilensteine für die bessere Koordination und Arbeit mit den Projektpartnern und zur Kontrolle des Fortschritts festgelegt und in regelmäßigen viertel- bis halbjährigen Status-Meetings kontrolliert. Zwischenzeitlich gab es diverse Arbeitsberatungen der in bestimmte gemeinsame Arbeiten involvierten Projektpartner.

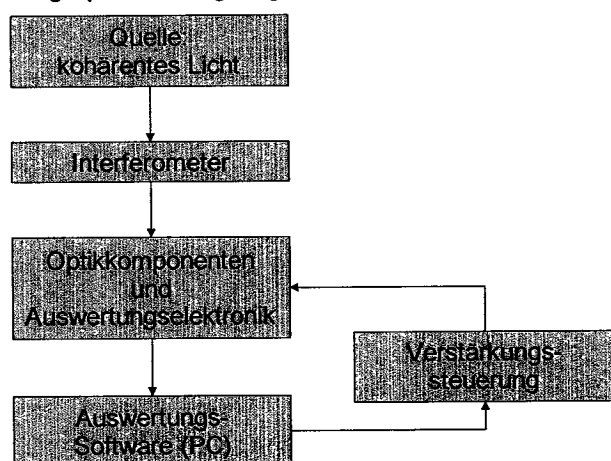
## 2.3 Erzielte Ergebnisse

### 2.3.1 Applikation eines neuen Sensorprinzips für modulare Präzisionsantriebe

Die Messwertaufgabe der Präzisionsantriebe besteht darin, ein Raster mit möglichst hoher Genauigkeit abzutasten. Dabei müssen inkrementelle Signale zum vorwärts und rückwärts Zählen gebildet werden.

Es gibt die Gruppe der mechanischen/geometrischen Raster und solche, die mittels Interferenz kohärenten Lichtes erzeugt werden. Für die im Projekt entwickelten Demonstratoren kamen die geometrischen Raster zum Einsatz. Ein Gitterabstand von  $20\mu\text{m}$  gegenüber  $40\mu\text{m}$  zu Beginn des Projektes konnte die Genauigkeit erhöhen. Durch genaue Vermessung des Rasters und Überprüfung der Position erfolgte am IMMS mittels Interferometer. Zwischen den Gitterlinien, also für eine Positionsauflösung von  $<20\mu\text{m}$  wurden die Werte interpoliert. Ungenauigkeiten sind danach vor allem auf geometrische Abweichungen des Rasters oder thermische Ausdehnung des Trägermaterials zurückzuführen.

Der neue Ansatz eines Sensorprinzips beruht auf einer interferometrischen Messung (Bild 2-1). Ziel ist es dabei, aus kohärentem Licht ein stehendes Wellenfeld zu erzeugen, das als Raster dient. Dazu werden zwei Strahlen kohärenten Lichts zur Interferenz gebracht und durch geeignete Optiken abgebildet. Eine Auswertungselektronik tastet das entstandene Bild ab und kann durch eine geeignete Software Auswertungen vornehmen. Durch eine Rückkopplung zur Auswertungselektronik über eine Verstärkung, kann das Signal für die Auswertung optimal ausgeregelt werden.



**Bild 2-1: Funktionsschema eines interferometrischen Sensors**

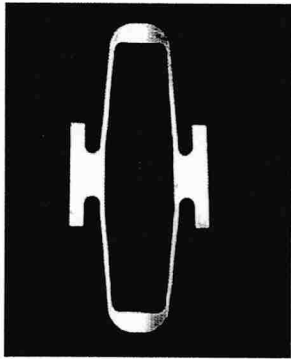
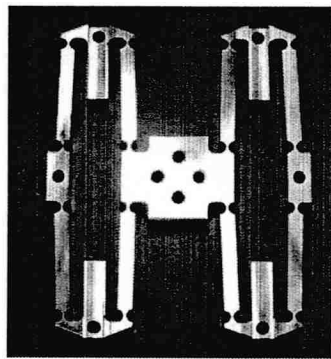
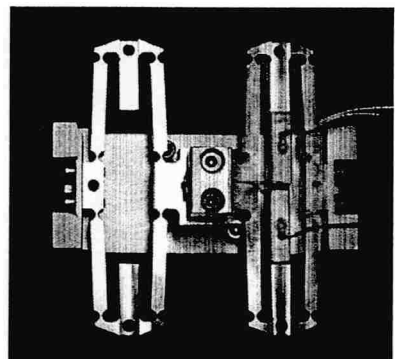
Entscheidend für das Funktionsprinzip ist die Auswahl und Anordnung der Optikelemente. Bekannte Anordnungen sind beispielsweise das Michelson-Interferometer und das Fabry-Perot-Interferometer. In beiden Fällen entstehen Streifen, deren Intensität für die Wegmessung ausgewertet wird.

Im Rahmen des Projektes wurden Untersuchungen zu einem neuen Sensor durchgeführt. Dafür wurde die Optik verschieden variiert und jeweils mit Auswertungs elektronik und Software kombiniert. Ergebnis der Untersuchungen ist ein Sensor, der mit seiner spezifischen Optik ein Muster erzeugt, mit dem nicht die Intensität, sondern das Muster selbst Grundlage der Auswertung ist. Die Genauigkeit des Sensors ist alleine von der konstanten Wellenlänge der Quelle abhängig, nicht jedoch von der konstanten Intensität der Lichtquelle, die mit herkömmlichen Lasern sehr schwer zu erreichen ist.

Der Sensor wird zum Produkt bei TETRA weiterentwickelt. Dieser Sensor ermöglicht eine neue Genauigkeitsklasse im Sub-nm-Bereich, wobei abzusehen ist, dass die Herstellung wesentlich kostengünstiger als herkömmliche Interferometer sein wird.

### 2.3.2 Erstellung von Modellen und Demonstratoren für Piezoaktoren (gemeinsam mit FHG-IIS)

Es wurde ausgehend von einer Grundform des Verformungskörpers das Modell für einen Piezoaktor entworfen (siehe Bild 2-2). Dieser wurde parametrisiert und mittels Simulation X (ISI) überprüft. Daraus konnten sinnvolle technische Parameter extrahiert werden, die nach dem Aufbau am Demonstrator überprüft wurden.

		
Ausgangsform $s = 150\mu\text{m}$	Entwurf nach Modellierung $s \approx 300\mu\text{m}$	Antrieb nach Realisierung $s = 280\mu\text{m}$

**Bild 2-2: Demonstrator für Piezoaktoren**

Nach Vorgaben der Simulation und Optimierung der Verformungskörper wurde ein Demonstrator realisiert, dessen Verfahrensweg um 86% erhöht wurde, ohne dass sich die dynamischen Eigenschaften wesentlich veränderten.

Zum Betrieb der Piezoaktoren wurde eine miniaturisierte Steuerung entwickelt und erfolgreich getestet (siehe Bild 2-3).



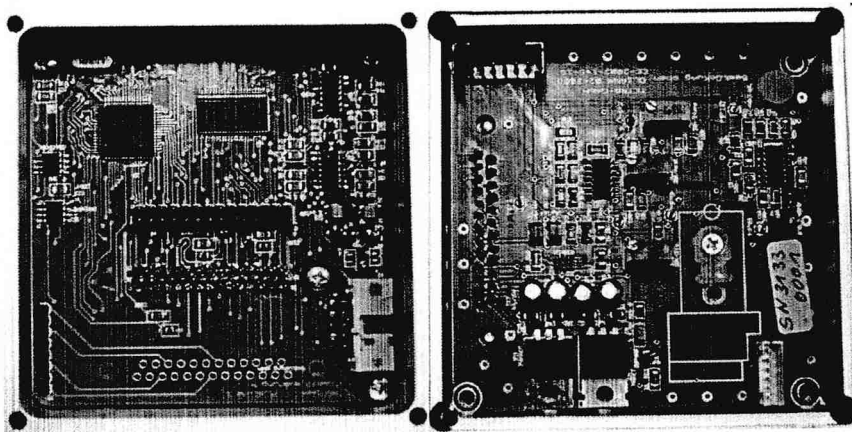


Bild 2-3: Steuerung für Piezoaktoren

### 2.3.3 Entwurf, Aufbau und Test von elektrodynamischen Antrieben (Gemeinsam mit IMMS)

Gemeinsam mit dem IMMS wurde auf der Basis des elektrodynamischen Antriebsprinzips ein modulares lineares Antriebsprinzip simuliert und entworfen. Nach ersten Funktionsprüfungen wurde ein Demonstrator (Antriebsteil, Steuerung) realisiert (siehe Bild 2-4).

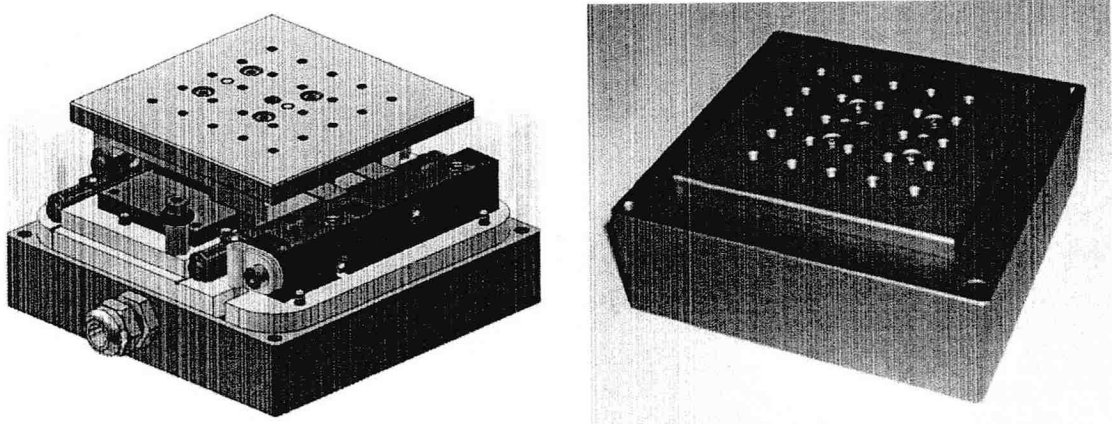
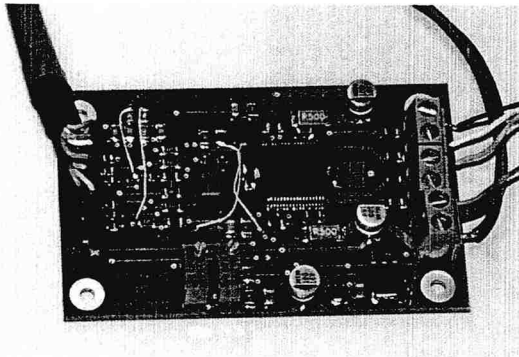


Bild 2-4: Entwurf und Antriebsteil eines linearen elektrodynamischen Antriebes LMS20

Der Antrieb hat nachfolgende Eigenschaften erhalten:

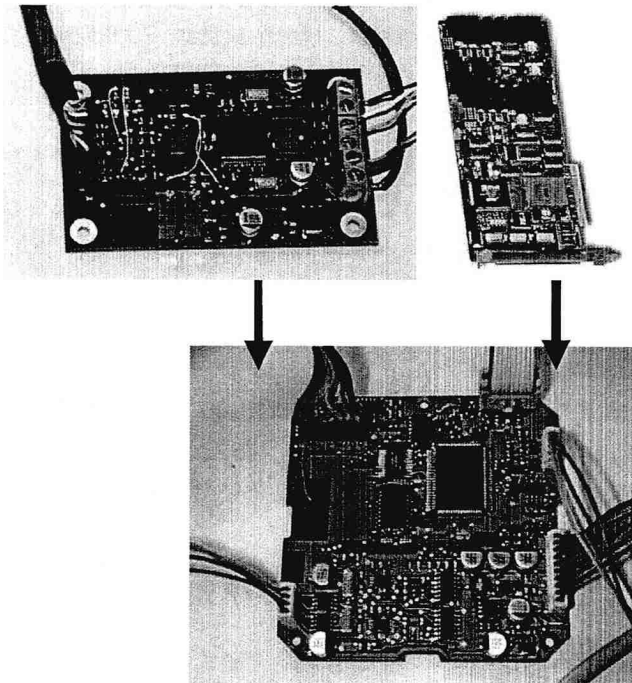
- Fahrbereich  $x = 20 \text{ mm}$
- Genauigkeit  $x = 1 \text{ }\mu\text{m}$
- Auflösung  $x = 50 \text{ nm}$
- Blockierkraft  $F_x = 2 \text{ N}$
- Beschleunigung  $a_x = 5 \text{ m/s}^2$
- Geschwindigkeit  $v_x = 30 \text{ mm/s}$
- Betriebsspannung  $U_B = 12 \text{ V}$
- Reinraumkompatibel
- Einbaulage beliebig

Für die Anwendung im Vakuum wurden Antriebsprinzipie und Kraftübertragungsmechanismen simuliert und untersucht.



**Bild 2-5: Steuerung LMS20**

Bild 2-5 zeigt die entwickelte Steuerung. Durch den kompakten Aufbau konnte ein Antriebssystem mit integrierter Elektronik realisiert werden.



**Bild 2-6: Integration Endstufe und des DSP-Boards zur kompakten Ansteuerungsschaltung**

Die Ansteuerung der Endstufe und die Regelung des Demonstrators wurde zunächst mit einem universellen DSP-Board MC8000 realisiert, das mit einem Windows-PC in Betrieb genommen werden konnte. In einem weiteren Entwicklungsschritt wurde von der TETRA GmbH eine integrierte kompakte Schaltung entwickelt, die neben der Endstufe auch die notwendigen DSP-Funktionen zur Ansteuerung des LMS20 enthält. Über eine serielle Schnittstelle und entsprechende Software lässt sich der LMS20 von einem Windows-PC steuern.

Nach dem Entwurf eines Antriebs wurde ein Demonstrator aufgebaut und hinsichtlich der Parameter untersucht.

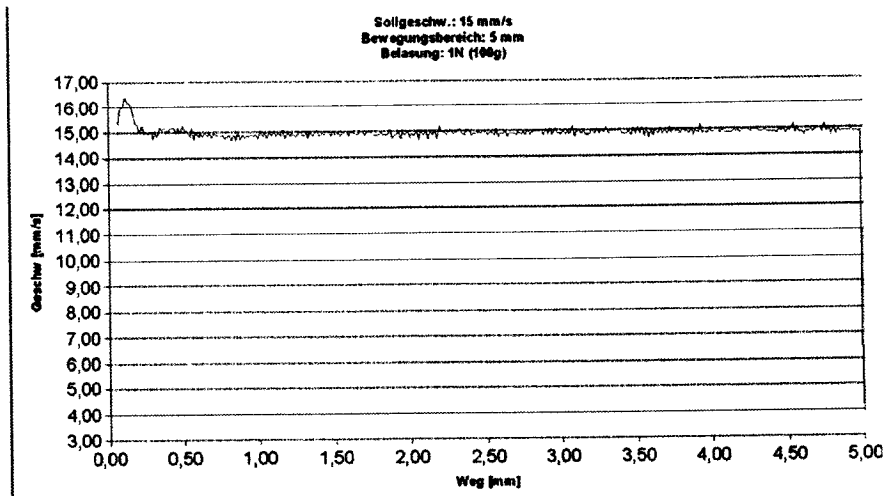


Bild 2-7: Geschwindigkeitseigenschaften

In Bild 2-77 ist dargestellt, dass die mittlere Geschwindigkeitsabweichung 0,09 mm/s nach Einschwingen beträgt. Dies entspricht einer Abweichung von 0,6%. Damit ist der erzielte Geschwindigkeitsfehler gegenüber konventionellen Antrieben sehr klein und besser als ursprünglich geplant.

Durch Messungen am IMMS konnte gezeigt werden, dass der Positionierfehler insbesondere durch die verwendeten Führungen bestimmt wird. Durch die Auswahl geeigneter Führungssysteme kann ein Positionierfehler kleiner gleich  $1\mu\text{m}$  erreicht werden (siehe Bild 2-88).

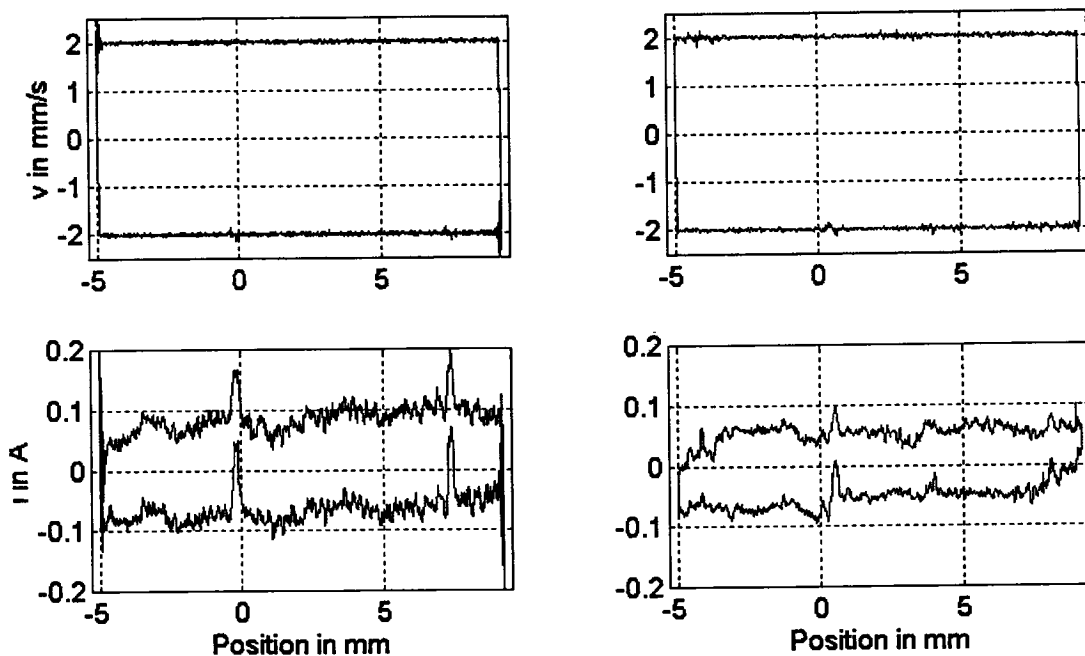
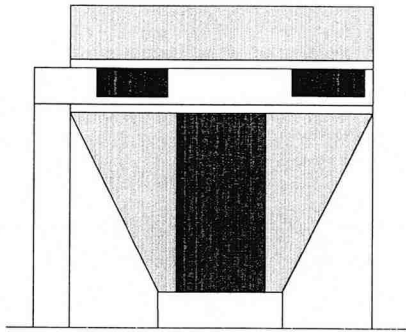


Bild 2-8: Positionierfehler LMS20

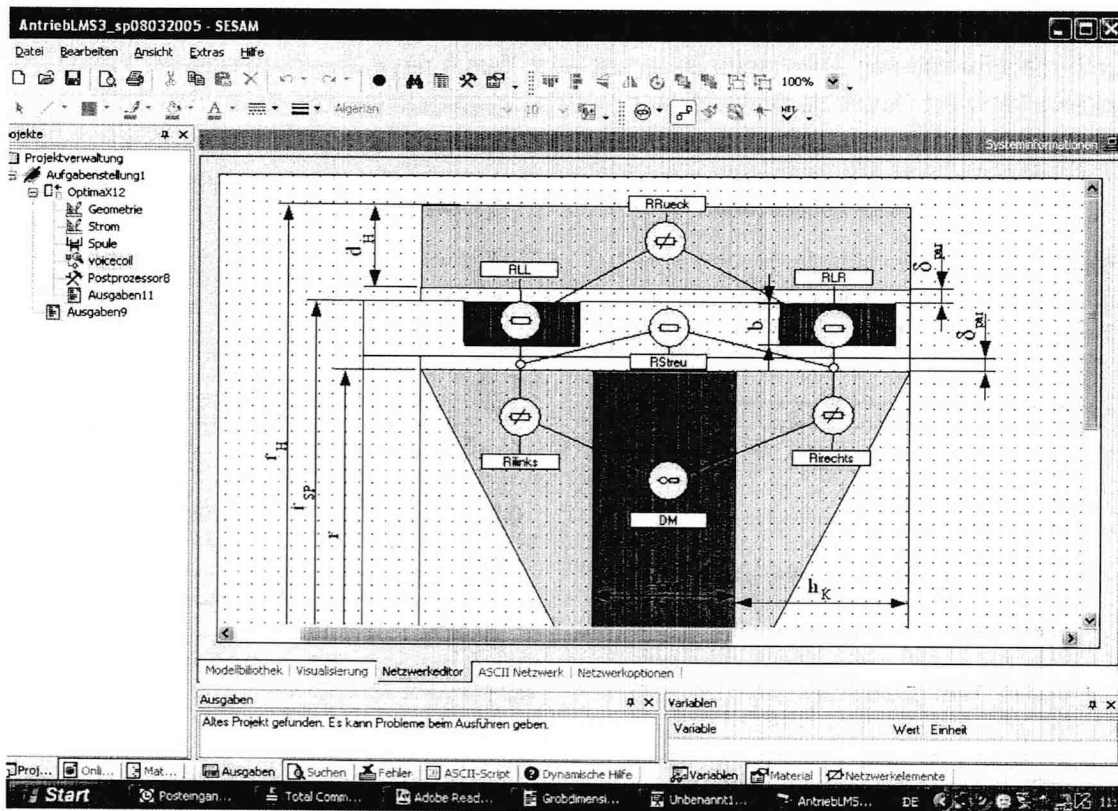
Für den hochdynamischen Einsatz wurde ein elektrodynamischer Aktor LMS3 konzipiert und modelliert. Er sollte laut Kundenanfrage einen Hub von 3 mm haben und mit einer Last von 3 kg eine Fehlertoleranz der Geschwindigkeit von  $<1\%$  erreichen. Als Antriebsprinzip wurde ein Voice-Coil-Antrieb gewählt. Bild 2-99 zeigt die Geometrie der Funktionsteile schematisch dargestellt.



**Bild 2-9: Geometrieschema des Voice-Coil-Antriebs LMS3**

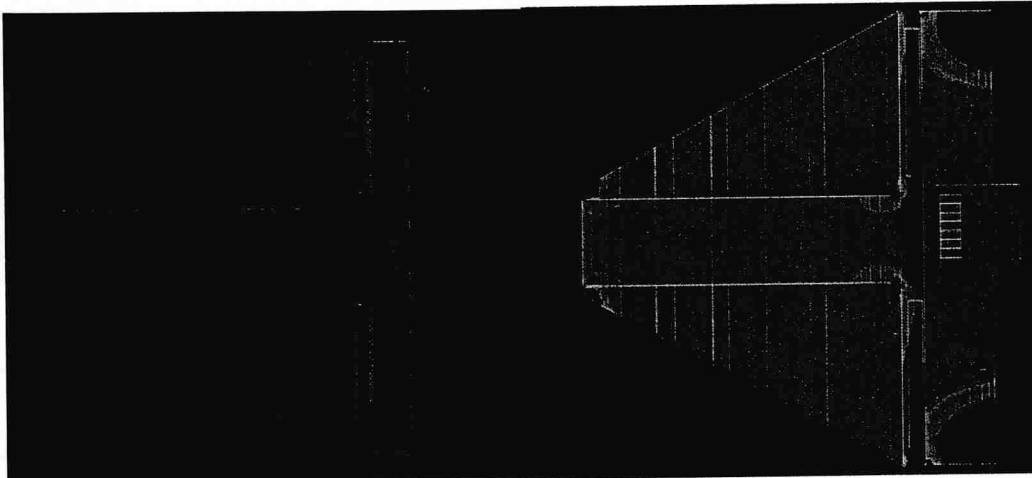
Die geometrischen Abhängigkeiten wurden als Modell in das Programmsystem SESAM übernommen und daraus ein Optimierungsmodell mit Hilfe der TU Ilmenau definiert (Bild 2-1010).

Die Interaktion zwischen Simulation und der Änderung der Ausgangsparameter zeigt bereits das Potential dieses Programmsystems für den Know-How-Gewinn des Anwenders auf diesem Gebiet. Ohne langwierigen Bau von Prototypen konnte die Auswirkung der Veränderung bestimmter Geometrieparameter untersucht werden.



**Bild 2-10: Modellierung des LMS3 in SESAM**

Ein zusätzlicher Nutzen ergab sich durch die Gegensimulation der Geometrie im Feldberechnungsprogramm Maxwell (Bild 2-1111).



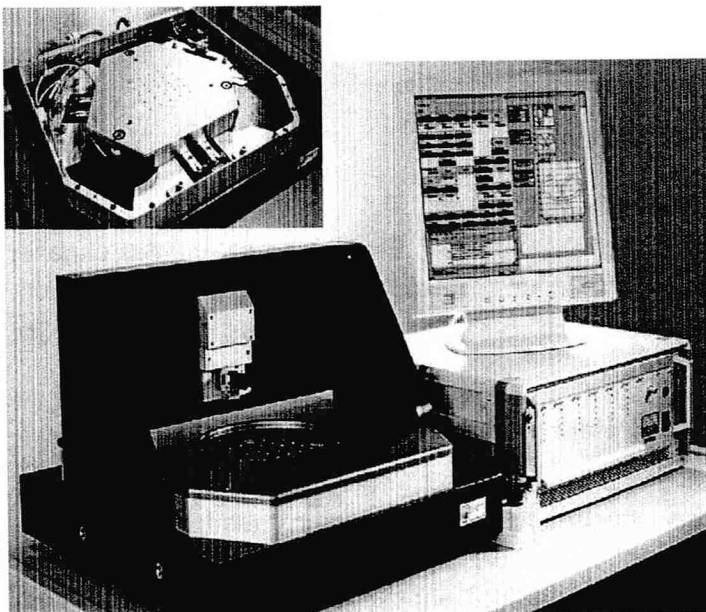
**Bild 2-11: magn. Feldberechnung des LMS3 in Maxwell**

Die im Maxwell errechneten Abweichungen von den Wunschparametern führten iterativ zur Verbesserung des Modells im SESAM.

Ein Prototyp dieses Antriebs wurde bisher nicht hergestellt, da sich minimale Abmessungen ergaben, die für das ursprünglich anvisierte Einsatzgebiet in der Medizintechnik zu groß waren. Dieses Beispiel zeigt jedoch den Nutzen des Simulationsprogramms für die Vorentscheidung einer Entwicklung. Hier konnte nach vergleichsweise wenig Aufwand im Vergleich zum Prototypenbau die Entwicklung eines Antriebs eingestellt werden, der den Ansprüchen des Marktes nicht gewachsen wäre.

#### **2.3.4 Applikation von Antrieben zur Untersuchung von Oberflächen**

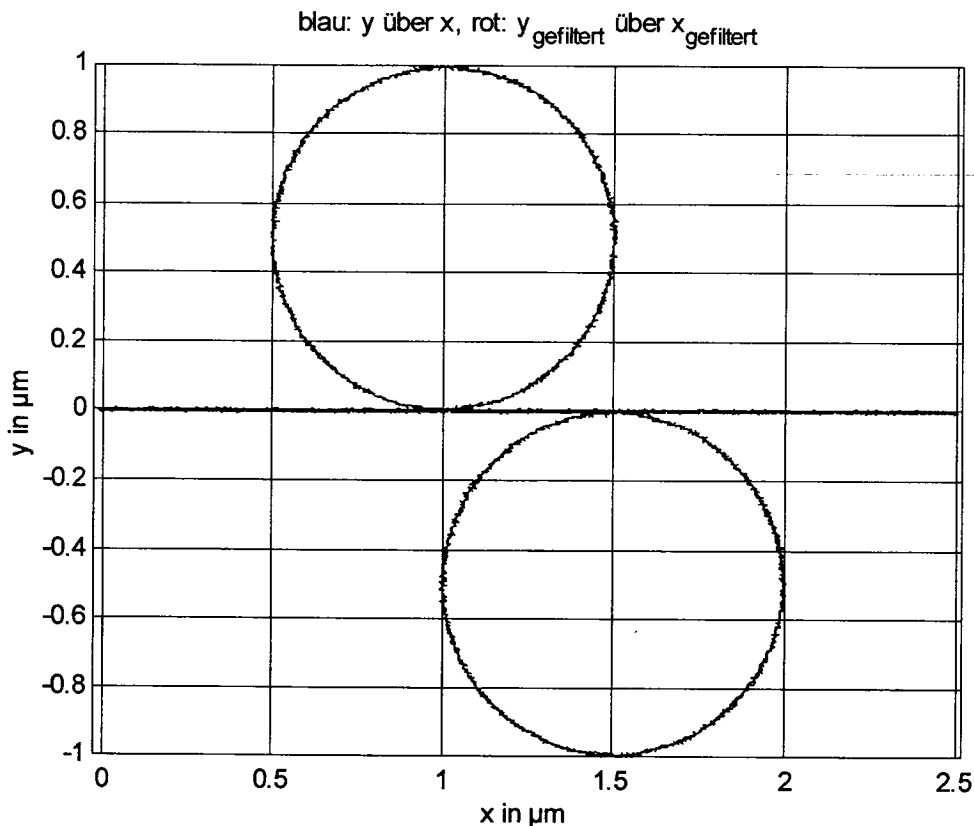
Ein planares Antriebssystem wurde hinsichtlich seiner Eignung für den Einsatz in Oberflächentestsystemen im nm-Bereich untersucht und für unterschiedliche Anforderungen simuliert (Siehe Abb. 7).



### Bild 2-12: Elektrodynamischer Planarantrieb PMS 100-3 als Basis für Analysegeräte und -instrumente

Für den Planarantrieb PMS 100 - 3 wurden notwendige Steuerungs- und Leistungselektroniken entworfen und realisiert.

Steuer- und Regelungsmechanismen wurden gemeinsam mit dem IMMS entworfen, realisiert und getestet. Ein im Simulink erzeugtes Modell wurde dabei durch spezifische Parameter immer weiter verfeinert und an die Dynamik des Antriebs angepasst. Die Messungen nach der Optimierung des Reglers ergaben eine Standardabweichung der Bahn in folgenden Positionen: x: 4,21 nm, y: 2,39 nm, dy: 6,02nm.

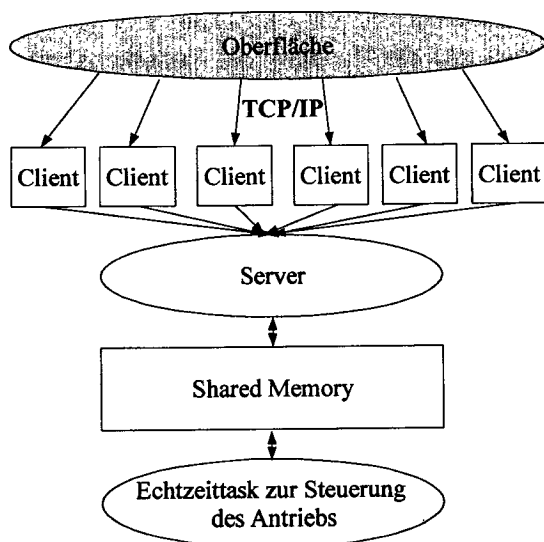


### Bild 2-13: Kreise mit einem Durchmesser von 1 µm

Im Bild 2-133 wird die Bahngenaugigkeit deutlich dargestellt. Eine Verbesserung des ohnehin sehr genauen Positionssignals konnte durch eine zusätzliche Datenfilterung (rot) erreicht werden. Eine dermaßen hohe Bahngenaugigkeit ist nach unseren Kenntnissen mit keiner gekreuzten Achsanordnung erreichbar.

#### 2.3.5 Konzeption und Entwicklung einer modular aufgebauten PC – Software

Ständig neue Anwendungsmöglichkeiten für einen als OEM-Komponente zu verwendenden planaren Antrieb für Oberflächenuntersuchungen führten zu Anforderungen einer flexibel erweiterbaren Softwarestruktur. Das Konzept musste die Erweiterbarkeit des Reglers, der Bewegungsbefehle und der Oberfläche vorsehen. Gemeinsam mit dem IMMS wurde hierfür ein Konzept erarbeitet, das modulare Programmpakete mit definierten Schnittstellen vorsah. Der Antrieb sollte dabei in Echtzeit gesteuert werden.



**Bild 2-14: Modulares Softwarekonzept zur Echtzeitansteuerung eines Antriebs**

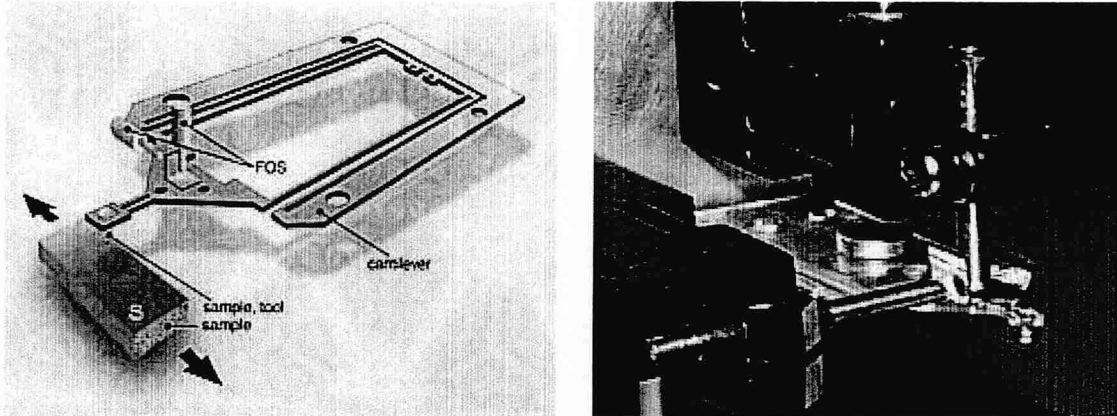
Bild 2-144 zeigt das entstandene Konzept schematisch. Der Echtzeittask steuert ausschließlich den Antrieb und ist von den übrigen Softwarepaketen völlig getrennt. Allein der Zugriff auf einen gemeinsam benutzten Speicher (shared memory) erlaubt ihm die Aktualisierung seiner Eingangsparameter und das Ablegen der Ausgangsparameter. Eine derartige Trennung schützt die Steuerung des Antriebs vor Zeitverzögerungen durch zeitraubende Oberflächenaktionen des Nutzers. Ein weiterer Vorteil dieser Trennung ist die einfache Austauschbarkeit des Reglers im Echtzeittask, der so flexibel für andere Anwendungen angepasst werden kann. Der Server ist das zweite Modul, das berechtigt ist, auf den Shared Memory zuzugreifen. Er beinhaltet die entsprechenden Zugriffsmechanismen zum Lesen und Schreiben der Bewegungsparameter. Für jede Bewegungsoperation wird ein eigener Client generiert, der in der Lage ist, sich mit dem Server zu verbinden und die benötigten Daten zu Lesen oder schreiben. Die Oberfläche nimmt über TCP/IP Kontakt zu den Clients auf, um bestimmte Bewegungen zu generieren oder die aktuelle Position anzuzeigen. Die so modularisierte Struktur erlaubt jederzeit das Hinzufügen weiterer Clients für zusätzliche Bewegungsoperationen oder die Umstrukturierung der Oberfläche für verschiedene Anwendungen, ohne die restlichen Softwaremodule anpassen zu müssen.

Das Softwarekonzept wurde zunächst am PMS100-3 umgesetzt und mit Erfolg getestet. Später wurde es in einem nicht in diesem Projekt entwickelten Oberflächentester in variiert Form appliziert. Somit konnte die Funktionsfähigkeit und Modularität des Konzeptes nachgewiesen werden. Die Kommunikation über TCP/IP zwischen der Oberfläche den restlichen Modulen des Systems ermöglicht eine flexible Ansteuerung der Anlage von einem beliebigen PC, der sich mit den Clients verbindet. Die TCP/IP - Verbindung gewährleistet aber auch den Datentransport von der Anlage zu einem beliebigen PC per Ethernet.

### 2.3.6 Untersuchungen und Prototyping von Präzisionsmessverfahren

Parallel zur Untersuchung der Sensoren wurde mit den bei TETRA vorhandenen Sensoren ein Messkopf zur Untersuchung von Oberflächen verwendet (Bild 2-15). Der Messkopf besteht funktional aus einer flachen Feder und zwei optischen Sensoren. Auf der Feder sind zwei kleine Spiegel geklebt, die als Reflektor für die optischen Sensoren dienen. Durch die Auslenkung der Feder verändert sich der Abstand der Spiegel zum Sensor, der das geänderte Wegsignal anhand seiner Kennlinie quantifizieren kann. Durch die Auslenkung in x- und z-

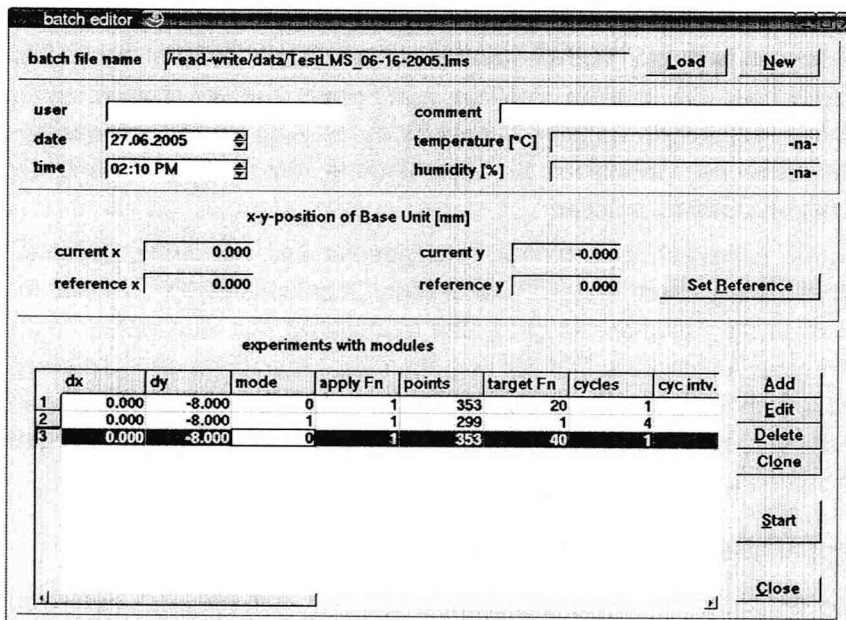
Richtung können somit Kräfte in normaler und transversaler Richtung appliziert und gemessen werden. Die Genauigkeit der Zustellbewegungen und die Variation der Federkonstante durch verschiedene Cantilever bestimmt die Genauigkeit und die Größenordnung der Kräfteinprägung.



**Bild 2-15: Messprinzip und Foto des Sensorkopfes mit faseroptischen Sensoren**

Mit diesem Aufbau können Normalkräfte zwischen wenigen  $\mu\text{N}$  bis zu  $1\text{mN}$  eingepreßt werden. Die Genauigkeit der Zustellung in z-Richtung wird durch eine Kombination aus Schrittmotor und Piezoaktor erreicht. Während der Schrittmotor zunächst eine Grobzustellung über maximal  $40\text{mm}$  mit einer Genauigkeit von bis zu  $2\text{ }\mu\text{m}$  realisiert, kann der Piezoaktor auf den letzten  $200\text{ }\mu\text{m}$  die Genauigkeit auf  $500\text{nm}$  verbessern. Aus dieser hoch präzisen Zustellung ergeben sich entsprechend präzise Kraftwerte.

Durch verschiedene Applikationskörper (verschiedene Kugeln, Spitzen) lassen sich mit eingepreßter Kraft Reibungs- oder Kratzversuche durchführen und anschließend die hinterlassenen Spuren in dazu senkrechter Richtung untersuchen.



**Bild 2-16: Maske zur Eingabe von Experimenten**

Die Experimente werden über die Oberflächensoftware gesteuert. Die Erarbeitung der Abläufe wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Vertriebspartner FALEX NV in Belgien und somit nahe den Markterfordernissen erarbeitet. In einer Maske (Bild 2-16) können mehrere Expe-



perimente definiert werden, die dann wie ein Stapel nacheinander abgearbeitet werden können. Zurzeit sind Reibungs- und Kratzversuche programmiert. Beim Hinzufügen eines Experiments führt ein Wizzard den Nutzer durch die nötigen Eingaben und prüft interaktiv mögliche Fehler. Ein intelligenter Algorithmus steuert die Bewegung des Schrittmotors und Piezoaktors zur schnellen Antastung der Zielkraft, ohne dabei das Ziel zu überschreiten (Bild 2-17).

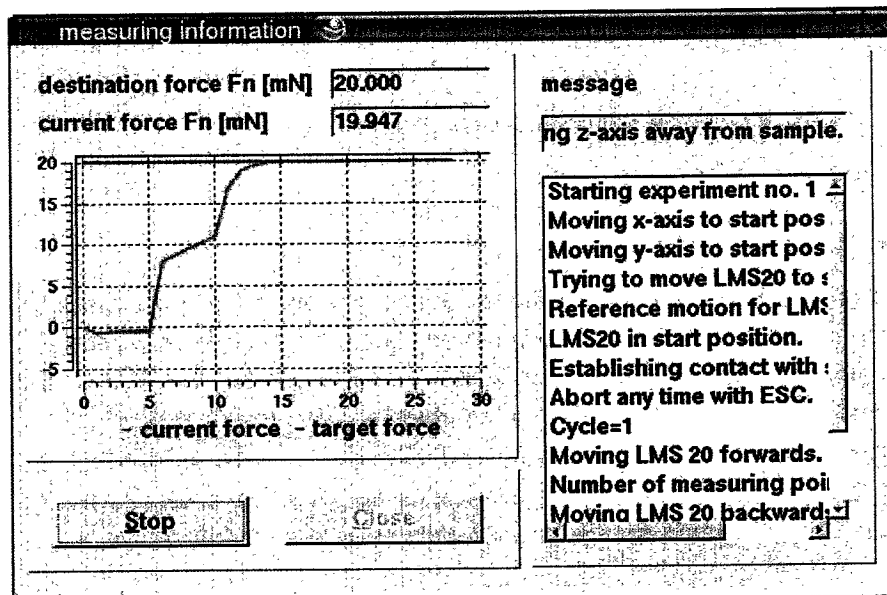


Bild 2-17: Beispiel einer erfolgreichen Antastung der Zielkraft

#### 2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen

Ein Piezoaktor, wie im Projekt entstanden, lässt sich für diverse Feinzustellungen verwenden, wobei die ruckfreie Bewegung einen wesentlichen Vorteil gegenüber Schrittmotoren darstellt. Durch die Kombination von Schrittmotoren und Piezoaktoren lassen sich Zustellbewegungen über große Bewegungsbereiche mit Genauigkeiten im Sub- $\mu\text{m}$ -Bereich realisieren. Diese Genauigkeiten sind in Oberflächentests sowohl für das Antasten des Materials mit präziser Kräfteinprägung als auch für kleine Bewegungen des Substrats während der Experimente erforderlich.

Der entwickelte LMS20 eignet sich als Modul für die Bewegung der Substrate oder Werkzeuge in Experimenten mit Verfahrbereichen bis zu 20 mm. Die hohe Geschwindigkeitskonstanz dieses elektrodynamischen Antriebs stellt dabei einen großen Vorteil dar. Durch die kompakte Bauweise und eine standardisierte serielle Schnittstelle ist der LMS20 als OEM-Komponente für entsprechende Bewegungen vielseitig verwendbar, kann aber auch mit einem eigenen Netzteil und einen PC als Einzelgerät verwendet werden.

Der PMS100-3 lässt sich ebenfalls als OEM-Komponente in verschiedene Oberflächentestsysteme integrieren. Das aufgesetzte Portal lässt die Montage beliebiger Bearbeitungs- und Analysewerkzeuge zu. Durch den großen Verfahrbereich kann auch ein Mehrstationenbetrieb realisiert werden.

Durch die Montage eines Lasers am Portal lässt sich eine Laseranlage konzipieren, die hochdynamische Arbeiten mit höchster Präzision ausführen kann. Die hohe Bahngenauigkeit und kleinen Abmessungen des Antriebs im Vergleich zu alternativen Antrieben stellt einen wesentlichen Vorteil dar.

Das flexible Softwarekonzept lässt sich für unterschiedliche Steuerungen im Echtzeitbetrieb immer wieder verwenden. In der TETRA GmbH wurde das Konzept in veränderter einfacher Weise bereits in einen Oberflächentester integriert und die Oberfläche bereits mehrfach an verschiedene Kundenwünsche angepasst.

#### **2.5 Bekanntgewordene Fortschritte bei anderen Stellen**

keine

#### **2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse**

Öffentliche Statusseminare

#### **2.7 Fortschreibung des Verwertungsplans**

Die Verbesserungen des so entstandenen Oberflächentesters, die bis heute andauern führten bereits ¼ Jahr nach Projektabschluss zu einem ersten Verkauf. Die so entwickelten Experimentalalgorithmen lassen sich nun auch für ähnliche Applikationen auf dem PMS100-3 übernehmen bzw. an komplexere Versuchsaufbauten anpassen.

Über den internationalen Vertrieb der TETRA GmbH wird nach dem Abschluss der Produktentwicklung und erfolgreicher Markteinführung ein Umsatz für die Oberflächentestgeräte von 300-350 k€/a und für die Präzisionsantriebe ein Umsatz von 250 k€/a erwartet.



**Forschungsverbundprojekt  
„Entwurf und Modellierung von Antriebssystemen  
für die Mikrosystemtechnik“**

**MODAN**

**[www.modan.org](http://www.modan.org)**

*168V1550*

**Abschlußbericht des Teilprojektes  
„Entwicklung von neuartigen Mikroantrieben unter  
Ausnutzung weiterentwickelter Entwurfsmethoden  
und Tools, Unterstützung der Erarbeitung  
verbesserter Modelle und Programmmodule“  
des STZ Mechatronik Ilmenau**

Verbund-Nr.: V2285  
Fördermittelgeber: BMBF  
Projektträger: VDI/VDE-IT Teltow  
Betreuer: Dipl. - Ing. Chr. Breckenfelder / Dipl. - Ing. S. Krüger

## Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellungen.....	3
1.1	Aufgabenstellung.....	3
1.2	Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens.....	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	3
1.4	Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand .....	4
1.4.1	Für das Vorhabens genutzte bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte.....	4
1.4.2	Verwendete Fachliteratur, genutzte Informations- und Dokumentationsdienste .....	4
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	5
2	Eingehende Darstellungen .....	6
2.1	Projektziel .....	6
2.2	Projektdurchführung .....	6
2.3	Erzielte Ergebnisse.....	12
2.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen.....	13
2.5	Bekanntgewordene Fortschritte bei anderen Stellen.....	13
2.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse .....	13
3	Fortschreibung des Verwertungsplans.....	13

Anlage 1: Übersicht der berechneten Magnetformen

## **1 Kurzdarstellungen**

Die Entwickler und Produzenten elektromagnetischer Antriebe, insbesondere kleine und mittlere Unternehmen erwarten die Schaffung anwendungsfreundlicher und damit leicht nutzbarer rechnergestützter Modellierungs-, Simulations- und Entwurfstechniken für die Entwicklung von Antrieben, Antriebskomponenten und Fertigungseinrichtungen, die nach dem magnetischen Wirkprinzip arbeiten. Mit dem Projekt soll demonstriert werden, dass die Durchgängigkeit des rechnergestützten Systementwurfes über alle Entwurfsebenen für diesen Bereich möglich ist. Damit sind die Vorteile des effizienten Einsatzes produktgruppenspezifisch aufbereiteter Tools anhand des Entwurfes konkreter Zielprodukte aus dem Bereich Antriebstechnik/ Aktuatorik nachgewiesen.

### **1.1 Aufgabenstellung**

Ziel ist es, neuartige Antriebe unter Ausnutzung weiterentwickelter Entwurfsmethoden und Tools zu entwickeln. Daraus ergeben sich folgende Teilaufgaben:

- Erarbeitung neuer Antriebsprinzipien
- Entwurf ausgewählter Antriebsstrukturen mit vorhandenen Entwicklungswerkzeugen
- Auswahl geeigneter Antriebsstrukturen (Grob- und Feindimensionierung)
- Bewertung der eingesetzten Entwicklungswerkzeuge und Ableitung von Überarbeitungsanforderungen
- Simulation des gewählten Antriebes als Gesamtsystem
- Berechnung und Konstruktion eines Demonstrators und der für seine Funktion erforderlichen Komponenten (Leistungsstellglied, Steuer- und Regeleinheit)
- Bau eines kompletten Labormusters zum Funktionsnachweis und zur Evaluation der Simulationsergebnisse

### **1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens**

Voraussetzung für die Durchführung der Arbeiten im STZ sind die bei MAHLE durchgeführten Arbeiten zum Lufttaktventil. Die Kenntnis von Funktion und Parametern des Lufttaktventils sind wichtige Bestandteile der präzisierten Aufgabenstellung für das STZ. Das Entwicklungstool SESAM wurde durch die TU Ilmenau als Betaversion zur Verfügung gestellt und im Verlauf des Projektes weiterentwickelt.

### **1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

In Absprachen mit MAHLE wurden die Arbeiten in drei Arbeitspakete eingeteilt:

1. Konzeptauswahl des Aktorprinzips, Grob- und Feindimensionierung des Antriebes
2. Aufbau eines ersten Prototyps mit entsprechender Elektronik und Ansteuerungssoftware für den Motorbetrieb  
Verifikation der Parameter, Anpassung an Motorbedingungen
3. Berechnung und Aufbau eines zweiten Prototyps (optimierte Variante von Prototyp I) mit entsprechender Elektronik und Ansteuerungssoftware

## **1.4 Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand**

### **1.4.1 Für das Vorhabens genutzte bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte**

Als Basis für die Entwicklung dienten die Patente zum Lufttaktventil von Dr. Schatz (z.B. Patent DE 37 37 828 (1987) und Patent 43 08 931 (1993)). Die Firma MAHLE hat mit dem Erfinder einen Exklusiv-Nutzungsvertrag abgeschlossen. Konstruktive Vorlagen oder angewandte Verfahren gab es auf Grund der Innovation der Produktidee nicht.

### **1.4.2 Verwendete Fachliteratur, genutzte Informations- und Dokumentationsdienste**

- [1] Schatz O.: Patent DE 4308931 (1993) „Lufttaktventil“
- [2] Schatz O.: Patent DE 3737828 (1987) „Gesteuertes Rückschlagventil“
- [3] Elsässer A., et al.: Impulsaufladung und Laststeuerung von Hubkolbenmotoren durch ein Lufttaktventil. MTZ 2001, Nr. 12
- [4] Schneider, E., Scholten, L., Wallrafen, W., Zentgraf, M.: Ein integriertes Saugmodul zur Anwendung der Impulsaufladung in der Großserie. Tagung 12. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2003
- [5] Findeisen, H., Linhart, J., Wild, S.: Development of an Actuator for a Fast Moving Flap for Impulse Charging. SAE-Paper 2003-01-0402, 2003
- [6] Elsässer, A., Schilling, W.; Schmidt, J.; Kallenbach, E.; Beyer, F.: Schnelle magnetische Aktoren für die Impulsaufladung von Hubkolbenmotoren. 47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau, 2002
- [7] Klütting, M., et al.: Drosselfreie Laststeuerung mit vollvariablen Ventiltrieben. MTZ 1999, Nr. 7/8
- [8] Kallenbach, E.; Kucera, U.: Mechatronische Ventiltriebe für Gaswechselventile. Mechatronik workshop Düsseldorf 2004
- [9] Kallenbach, E.; Beljajev, N.; Kallenbach, M.; Saffert, E.: Fast Acting Magnetic Drives For Automotive Applications. Proceedings ACTUATOR Bremen 2004
- [10] Kallenbach, M.; Beyer, F.; Baumbach, J.; Keilig, R.; Kallenbach, E.: Grenzen der Schnellwirkung von Antriebssystemen mit stark nichtlinearen Magnetaktoren. Probleme der Mechatronik 2003 Novocerkassk, Russland
- [11] Pischinger, S.: Variable Ventilsteuerung II. Expertverlag Renningen 2004
- [12] Patent: DE 103 32 489 A1, „Verfahren zum Anschwingen einer elektromagnetischen Stelleinrichtung“
- [13] VDI: VDI 2206 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, 2004
- [14] Patentanmeldung: Aktenzeichen 10 2005 011 227.7 „Verfahren und Vorrichtung zum Ermitteln von magnetischen Kenngrößen“
- [15] Baumbach, J., Glet, U.: Poster MagHyst, Kleinmaschinenkolloquium, TU Ilmenau, 10./11. März 2005
- [16] Baumbach, J.: Poster MagHyst, Automobilkongress mit begleitender Fachausstellung, 26. Mai 2005, Messe Erfurt
- [17] Dingelstadt, R.; Elsässer, A.; Schilling, W.; Schmidt, J.; Kallenbach, E.; Beyer, F.; Baumbach, J.; Otto, R.; Kucera, U.: Modellbasierte Optimierung von

- Magnetantrieben für Lufttaktventile. VDI-/VDE-Mechatroniktagung, Wiesloch, 1./2. Juni 2005
- [18] Kallenbach, E.: Der Gleichstrommagnet. Verlag Geest & Portig KG Leipzig 1969
  - [19] Kallenbach, E.; Bögelsack, G.: Gerätetechnische Antriebe. Carl Hanser Verlag München Wien 1991
  - [20] Kallenbach, E., Eick, P., Quendt, P.: Elektromagnete, B.G. Teubner Verlag Wiesbaden 2003
  - [21] Boll, R.: Weichmagnetische Werkstoffe, Vacuumschmelze GmbH, Hanau 1990
  - [22] SESAM, Dokumentation, Technischer Universität Ilmenau 2003
  - [23] Bertram, T., J. Gausemeier, C. Germer, C. Jung, E. Kallenbach, F. Kallmeyer, S. Möhringer, O. Oberschelp, U. Oldendorf, D. Reiners, J. Seuss, J. Wulf und F. Zohm. Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI-Richtlinie 2206. Düsseldorf: VDI.
  - [24] Elsässer, A.; Schilling, W.; Schmidt, J.; Dingelstadt, R.; Kallenbach, E.; Beyer, F. Baumbach, J.: Entwurf schnellwirkender magnetischer Aktoren für Lufttaktventile, Statusseminar MODAN, 06.10.2004, Fulda

Für die Patentrecherche wurde die Internetseite des deutschen Patent- und Markenamtes genutzt (<http://www.depatistnet.de>).

#### **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die Arbeiten wurden in enger Zusammenarbeit mit MAHLE International und der TU Ilmenau durchgeführt.

## 2 Eingehende Darstellungen

### 2.1 Projektziel

In stark wachsendem Umfang werden für die Betätigung von Ventilen (Einspritzventile, Gaswechselventile, Lufttaktventile) in modernen PKW schnellwirkende magnetische Aktoren mit Schaltzeiten im Bereich von 0.5 bis 3 ms benötigt. Im Mittelpunkt steht der Systementwurf zur Erarbeitung eines mechatronischen Lösungskonzeptes, das besonders die Gesichtspunkte der Schnellwirkung berücksichtigt. Dabei wird gezeigt, dass die frühen Phasen des mechatronischen Entwurfes, die die Auswahl der optimalen Wirkprinzipien der Teilfunktionen unter dem Gesichtspunkt einer späteren Integration umfassen, außerordentlich wichtig sind, besonders wenn man bei dem Entwurf bis an die physikalischen Grenzen gehen muss. Die technische Umsetzung eines solchen Systems stellt infolge der extrem kurzen Schaltzeiten im Bereich von 2 ms bei einem vergleichsweise sehr großen Drehwinkel (45°) zum Öffnen und Schließen des Ansaugquerschnittes eine große Herausforderung dar, die nur mit Hilfe einer mechatronischen Entwicklungsmethodik erreicht werden konnte.

### 2.2 Projektdurchführung

#### 2.2.1 Realisierung eines magnetischen Resonanzaktors

Systemkritisches Bauelement für das Lufttaktventil ist der elektromagnetische Aktor. Auf Grund des begrenzten Bauraumes, des notwendigen Schaltwinkels, der zu realisierenden Schaltzeit und der Vorgabe der maximal zulässigen Verlustleistung kommt dem effektiven Energiemanagement und einer geeigneten Auswahl des Magnetwerkstoffes eine besondere Bedeutung zu.

Die Anforderungen an den Aktor lauten:

Bewegungsform	rotatorisch, starre Kopplung mit Luftklappe
Bewegungsablauf	wechselsinnig mit steuerbaren Rastzeiten
Lebensdauer	sehr hoch, trotz rauer Umgebungsbedingungen
Direktantrieb	gute Anpassung an das Wirkelement
Steuer-/Regelbarkeit	gut, z.B. zur Realisierung von „Soft-Landing“.

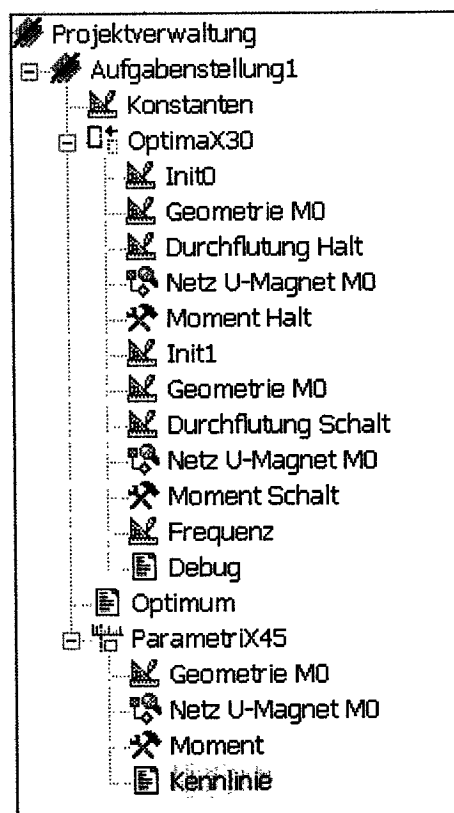
Für den Anker bedeutet das:

konstruktiv	drehachsnahe Position, minimale radiale Ausdehnung, maximal zulässige axiale Ausdehnung, „Leichtbauweise“, geringe Eisenweglänge
magnetisch	Nutzung von Werkstoffen mit sehr hohen magnetischen Flussdichten und hohem spezifischen elektrischen Widerstand
mechanisch	Nutzung von Werkstoffen mit hoher Festigkeit und hoher zulässiger Biegezugspannung.



Die Forderungen an den Werkstoff für den Magnetanker sind gegenläufig. Werkstoffe, die alle Forderungen gleichermaßen erfüllen, gibt es nicht, so dass ein akzeptabler Kompromiss gefunden werden muss. Höchste magnetische Flussdichten bei mittlerem spezifischen elektrischen Widerstand und niedriger mechanischer Festigkeit werden z.B. durch Relaisisen oder Eisen-Kobalt-Legierungen erreicht. Hohe mechanische Festigkeiten und spezifische elektrische Widerstände bei geringen magnetischen Flussdichten können z.B. durch korrosionsfeste, legierte, ferritische X-Stähle realisiert werden (Tabelle 1). Die Hauptfunktion der Magnete besteht im leistungsarmen Halten in einer der beiden Endlagen, bei in erster Näherung vernachlässigbarem Restluftspalt. Für diese Funktion spielen die magnetischen Eigenschaften eine besonders große Rolle. Für die Zweitfunktion des Fangens, zur Kompensation von Verlusten (Strömungsverlust, Reibungsverlust), spielen auf Grund der recht großen Luftspalte die magnetischen Eigenschaften nur eine untergeordnete Rolle. In diesem Fall ist eine möglichst hohe Durchflutung notwendig, die jedoch durch die maximal zulässige Verlustleistung bzw. die maximal zulässige Übertemperatur begrenzt wird.

Zur Durchführung der messtechnischen Untersuchungen an Werkstoffproben (BH-Kennlinie für Ringkern oder Stab) sowie an magnetischen Kreisen ( $\Phi$ - $\Theta$ -Kennlinien und  $\Psi$ -i-Kennlinien für Magnete oder Motore) wurde der neuartige Messplatz **MagHyst** konzipiert und aufgebaut [14].



Im Weiteren werden unterschiedliche Magnetgrundformen bezüglich ihrer Eignung für die Antriebsaufgabe untersucht. Hierfür wird das gemeinsam an der TU Ilmenau und der Innomas GmbH entwickelte Programmsystem SĒSAM genutzt. Es beruht auf der magnetischen Netzwerkmethod. Vorteile dieser Vorgehensweise sind die gute Abstraktionsmöglichkeit technischer Gebilde, die vergleichsweise kurze Rechenzeit, welche damit die Möglichkeit zur Untersuchung großer Lösungsräume für Optimierungen bietet. Vorhandene Netzwerkmodelle lassen sich problemlos parametrisieren und erweitern. Am Beispiel des U-Magneten (Bild 2) soll die Vorgehensweise erläutert werden. Die einzelnen Module des Programmsystems müssen je nach Aufgabenstellung (z.B. Dimensionierung, Optimierung, Dynamiksimulation) in geeigneter Weise in einer Baumstruktur angeordnet und seriell abgearbeitet werden (Bild 1).

Bild 1 Baumstruktur in Sesam

<p>Werkstoffkennlinie</p>	<p>Werkstoffkennlinie</p>	<p>Werkstoffkennlinie</p>
<p>Kraft-Durchflutungs-Kennlinie bei unterschiedlichen Restluftspalten</p>	<p>Kraft-Durchflutungs-Kennlinie bei unterschiedlichen Restluftspalten</p>	<p>Kraft-Durchflutungs-Kennlinie bei unterschiedlichen Restluftspalten</p>
<p>Streckgrenze <b>hoch</b></p>	<p>Streckgrenze <b>mittel</b></p>	<p>Streckgrenze sehr <b>niedrig</b></p>
<p>Spezifischer. elektr. Widerstand <b>hoch</b></p>	<p>Spezifischer. elektr. Widerstand <b>mittel</b></p>	<p>Spezifischer. elektr. Widerstand <b>niedrig</b></p>
<p>Kostenfaktor <b>mittel</b></p>	<p>Kostenfaktor sehr <b>niedrig</b></p>	<p>Kostenfaktor <b>sehr hoch</b></p>

Tabelle 1 Eigenschaften ausgewählter Werkstoffe

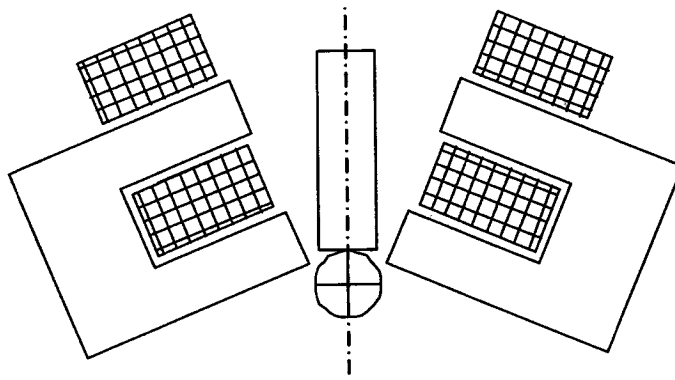


Bild 2 Klappanker- U- Magnet als Antrieb

Im Modul Aufgabenstellung sollten alle Vorgaben für elektrische, magnetische, mechanische und thermische Parameter wie z.B. Bauraumabmessungen, Verlustleistung, Spannung oder Schaltzeit abgelegt werden. Mathematisch-physikalische Konstanten ( $\pi$ ,  $\mu_0$ ) werden im Modul Konstanten hinterlegt. In OptimaX30 werden nach Festlegung der Optimierungsstrategie die Laufvariablen mit oberer und unterer Grenze, das Optimierungsziel (Maximierung bzw. Minimierung bestimmter Parameter) und die Restriktionen definiert. Nach einer Visualisierung der Geometrie wird ein Netzwerk aus Spulenelementen, nichtlinearen magnetischen Widerständen, linearen Luftspalt- und Streuflusswiderständen aufgebaut.

Während der Netzwerkgenerierung werden die Ergebnisse aus SESAM ständig mit den Ergebnissen aus FEM-Simulationen (MAXWELL) validiert. Das Netzwerk sollte so gestaltet sein, dass die Geometrie der einzelnen Elemente durch einfache geometrische Körper im Modul Geometrie M0 beschrieben werden kann. Im Gegensatz zu den magnetisch leitfähigen Eisenteilen ist die Geometrie der Streufluss- und Luftspaltwiderstände vor allem bei hohen Durchflutungen schwieriger zu beschreiben.

Die Werkstoffdaten sind in einer Datei hinterlegt, Die Daten der Geometrie können als Konstante, als berechneter Parameter oder als Laufvariable vorgegeben werden.

Im Ergebnis der Optimierung werden die Hauptabmessungen, die Momenten-Winkel-Kennlinien sowie die Momenten-Durchflutungs-Kennlinien ausgegeben. Für 12 unterschiedliche Bauformen (neutrale bzw. polarisierte U-Magnete, E-Magnete, Drehmagnete, elektrodynamische Antriebe) wurden unter Beachtung der Randbedingungen erstens die Grenzwerte für die kürzeste Schaltzeit (höchste Schaltfrequenz) und zweitens die Grenzwerte für gutes Fangverhalten berechnet. Die minimal erreichbaren Schaltzeiten der einzelnen Bauformen variieren um den Faktor 6. Der Bewertungskoeffizient für „gutes Fangen“ variiert um den Faktor 5. In Tabelle 2 sind ausgewählte Bauformen mit den dazugehörigen Momenten-Winkel-Kennlinienfeldern dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich bei gleichen Randbedingungen das Fangverhalten der einzelnen Aktoren deutlich unterscheidet.

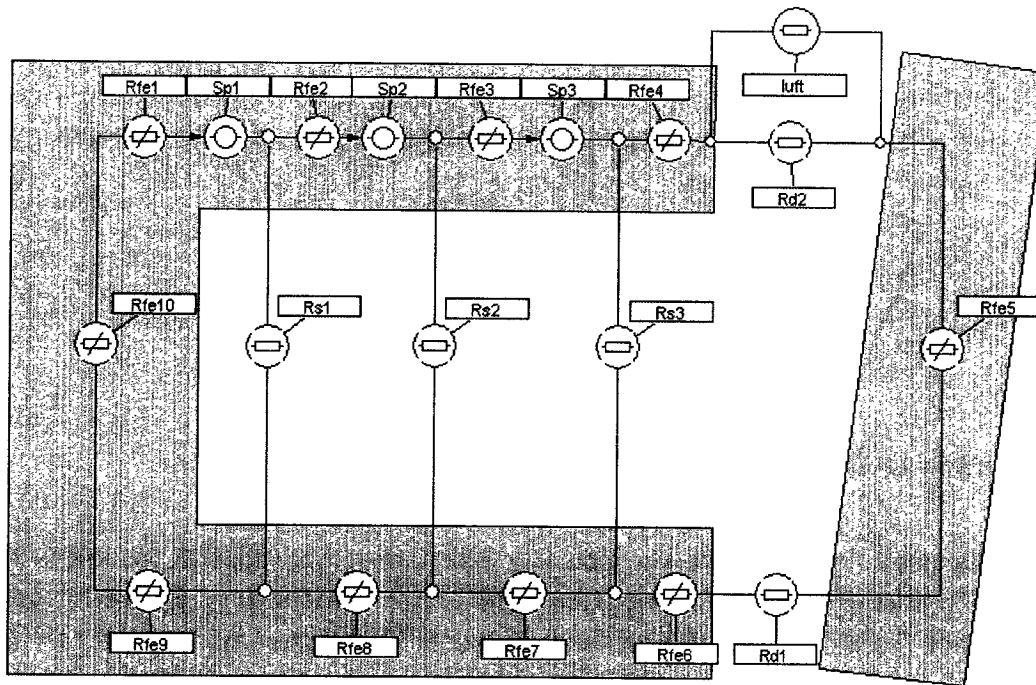


Bild 3 Netzwerkmodell für einen U-Magnet

Nach der Optimierung der Hauptabmessungen wurde die favorisierte Bauform konstruktiv an das Wirkelement und das Gehäuse angepasst und mittels FEM-Simulation nachgerechnet. In dieser Phase der Projektbearbeitung sollten nur noch kleine Änderungen an den funktionsrelevanten Bauteilen vorgenommen werden. Sonst ist eine erneute Grobdimensionierung mit veränderten Randbedingungen mit SESAM entsprechend dem V-Modell [23] ratsam. Der bisherige Entwicklungsprozess ist durch eine quasistationäre Grob- bzw. Feindimensionierung mit teilweise dynamischen Kennwerten gekennzeichnet. Im Folgenden sollen für die mittels FEM berechnete Bauform dynamische Untersuchungen durchgeführt werden, welche nicht nur die Nennwerte der Randbedingungen sondern auch deren Extremwerte berücksichtigen. Ein Modell der elektro-magneto-mechanischen Energiewandlung ist in MATLAB-SIMULINK aufgebaut. Nach ersten Simulationen konnte festgestellt werden, dass z.B. die durch die minimal zulässige Umgebungstemperatur von  $t_u = -25^\circ\text{C}$  resultierenden Widerstands- und Federmomentänderung das Feder-Masse-System soweit verstimmen, dass ein zeitgesteuertes Anschwingen nicht mehr möglich ist Bild 4.

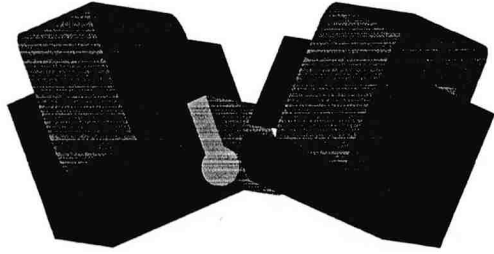


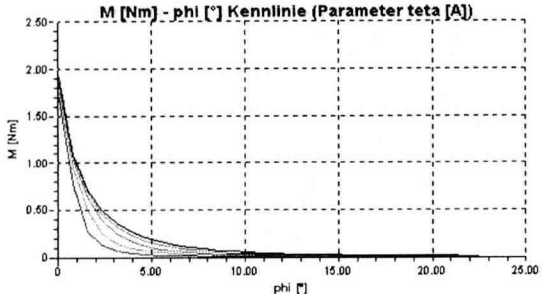
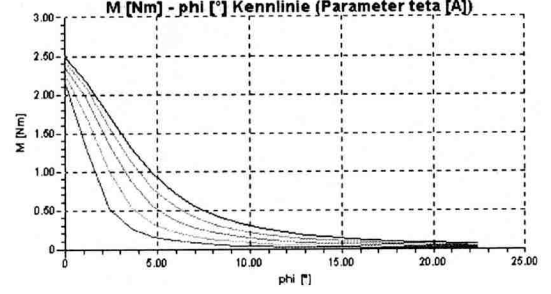
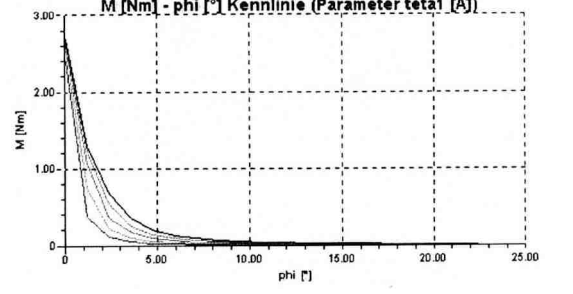
<b>Bauform UM5</b>	<b>Bauform UM8</b>	<b>Bauform EM1</b>
		
		
<p><b>Bauform eignet sich besonders zur Realisierung:</b></p>		
<p><i>niedriger Federraten</i></p>	<p><i>guten Fangens</i></p>	<p><i>kurzer Schaltzeiten</i></p>
<p><b>Vorteile:</b></p>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>geforderte Frequenz wird erreicht</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>geforderte Frequenz wird erreicht</i></li> <li>• <i>Kennlinienbeeinflussung</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>geforderte Frequenz wird erreicht</i></li> <li>• <i>Spulen einfach montierbar</i></li> <li>• <i>symmetrische Last</i></li> </ul>
<p><b>Nachteile:</b></p>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>unsymmetrische Last</i></li> <li>• <i>aufwendige Spulentechnologie</i></li> <li>• <i>Anschlag</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>unsymmetrische Last</i></li> <li>• <i>aufwendige Spulentechnologie</i></li> <li>• <i>Anschlag</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Anschlag</i></li> </ul>

Tabelle 2 Ausgewählte Bauformen bei gleichen Randbedingungen

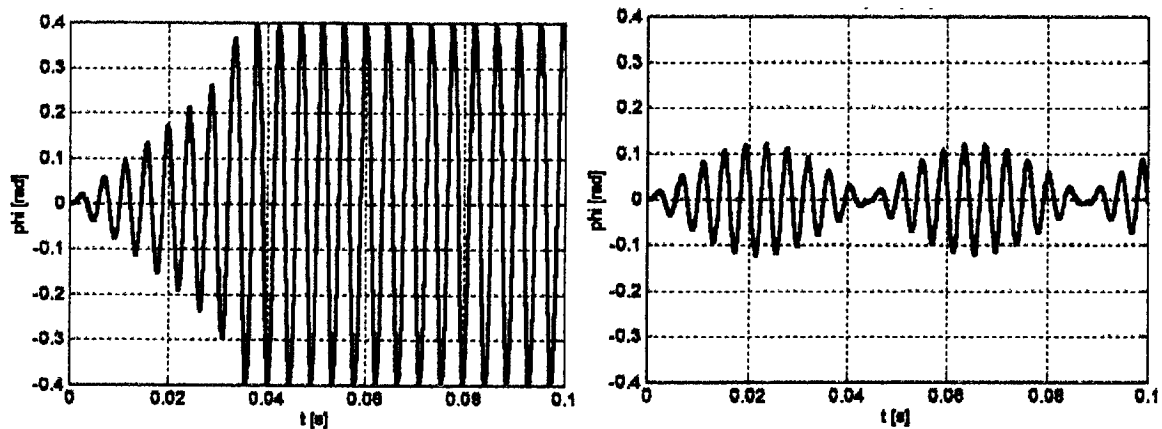


Bild 4 Anschwingvorgang bei Nennwerten (links) und bei Extremwerten (rechts)

Aufgrund dieser Simulationsergebnisse konnte schon vor Beginn der Laborversuch ein Verfahren zum Anschwingen mit veränderlicher Ansteuerfrequenz entwickelt und patentiert werden [12]. Dieses Verfahren ermöglicht auch bei extremen Umgebungsbedingungen ein sicheres Anschwingen der Lufttaktventile. Basierend auf den Ergebnissen der theoretischen Untersuchungen sind Labormuster aufgebaut und am Motor untersucht worden.

### 2.3 Erzielte Ergebnisse

Die umfangreichen Untersuchungen der einzelnen Modelle mit dem Programmsystem SESAM haben zu einer Reihe von Verbesserungsvorschlägen für die Weiterentwicklung des Programms geführt. In Zusammenarbeit mit der TU Ilmenau, wurden auftretende Probleme besprochen und von Seiten der TU Ilmenau behoben. Es konnten verschiedene Funktionen in das Programm implementiert und die Gebrauchsfähigkeit erhöht werden. Auch die Richtigkeit der berechneten Daten konnte bestätigt werden. Die Ergebnisse der einzelnen Berechnungen wurden mit den Ergebnissen aus FEM - Rechnungen mit MAXWELL verglichen.

Eine Vielzahl von Bauformen wurde als Netzwerk implementiert und dient nun als Wissensbasis für weitere Arbeiten (Siehe Anlage 1).

Ziel der Untersuchungen war es, besonders hochdynamische Antriebe für die Bewegungsaufgabe zu finden. Heraus kristallisiert haben sich dabei die Bauformen U-Magnet und E-Magnet. Diese wurden genauer experimentell untersucht. Diese Untersuchungen wurden teilweise im STZ und teilweise bei MAHLE durchgeführt. Die Fertigung der Funktionsmuster (Laserschneiden, Glühen, Schweißen, Spulen wickeln) konnte größtenteils über ortsansässige Firmen abgewickelt werden.

Die benötigten Endstufen und Ansteuerelektroniken wurden im STZ entwickelt und aufgebaut. Erste Laboruntersuchungen ohne Störkräfte wurden im STZ durchgeführt. Spezielle Untersuchungen am Motorprüfstand (Schleppprüfstand, Befuerter Motor) fanden bei MAHLE statt (siehe auch Teilbericht MAHLE).

Die Aktoren UM0, UM5, UM8 und E-Magnet erfüllen die dynamischen Randbedingungen. Aus technologischen Gründen wurde der Antrieb UM0 ausgewählt.

## **2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen**

Die gesammelten Erfahrungen bei der Modellerstellung mit dem Programmsystem SESAM sind bei der Weiterentwicklung und Anpassung des Programmsystems eingeflossen.

Das bei den Arbeiten im STZ gewonnene KnowHow kann auch für zukünftige Arbeiten genutzt werden. Dies betrifft vor allem die Bereich Antriebstechnik, Optimierung von Antrieben (Optimierungsstrategien) und Elektronikentwicklung.

Die technische Verwertung der Ergebnisse erfolgt bei MAHLE. Motorversuche wurden bereits von einzelnen Automobilherstellern erfolgreich durchgeführt. Eine Großserie kann jedoch frühestens im Jahr 2010 anlaufen.

## **2.5 Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen**

Keine

## **2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse**

Die folgenden Schutzrechte wurden gemeinsam von Mahle International GmbH bzw. Mahle Filtersysteme GmbH und STZ Mechatronik erarbeitet und angemeldet.

„Verfahren zum Anschwingen einer elektromagnetischen Stelleinrichtung“

Aktenzeichen: DE 103 32 489.5

„LTV-Magnetantrieb“

Aktenzeichen: PCT / DE 02 / 02992

„Verfahren zum Betätigen einer elektromagnetischen Stelleinrichtung“

Aktenzeichen: DE 103 15 585.6

„Verfahren zum Betätigen einer elektromagnetischen Stelleinrichtung“

Aktenzeichen: DE 103 15 584.8

„Elektromagnetischer Stellantrieb“

Aktenzeichen: DE 103 35 516

„Elektromagnetischer Stellantrieb“

Aktenzeichen: 10 2004 037 360.4

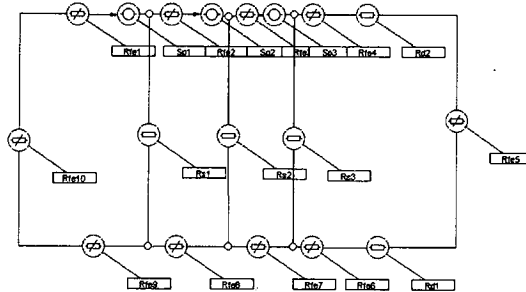
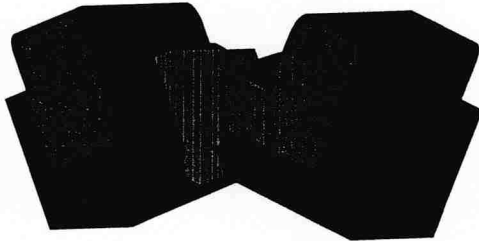
Veröffentlichungen siehe Punkt 1.4.2: [6], [15], [16], [17], [24]

## **3 Fortschreibung des Verwertungsplans**

Das STZ Mechatronik ist nicht Endnutzer der Ergebnisse. Die Verwertung der Ergebnisse erfolgt bei auch MAHLE bzw. an der TU Ilmenau.

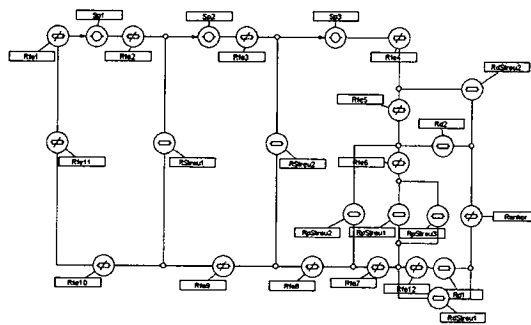
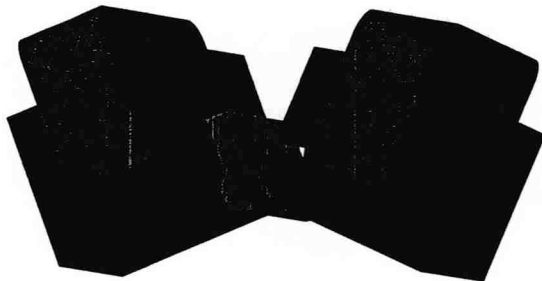
**Anlage 1: Übersicht der berechneten Magnetformen**

**U-Magnet UM0**



Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>- geforderte Frequenz wird erreicht</li> <li>- Spulen einfach montierbar</li> <li>- optimiert auf gute Steuerbarkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- unsymmetrische Last</li> <li>- Anschlag</li> </ul>

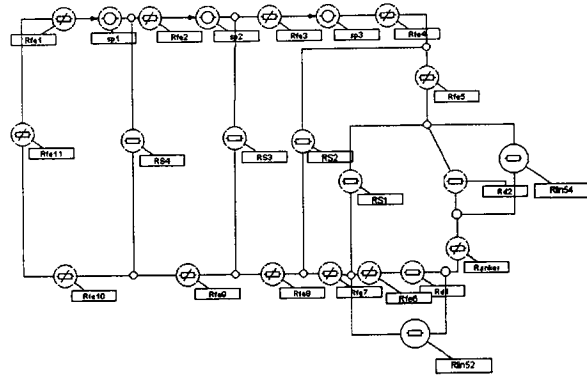
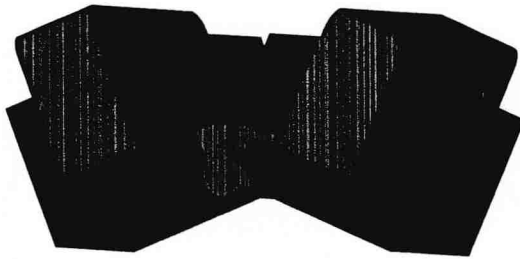
**U-Magnet UM5**



Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>- geforderte Frequenz wird erreicht</li> <li>- optimiert auf gute Steuerbarkeit</li> <li>- Geringste Federkonstante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- unsymmetrische Last</li> <li>- aufwändige Spulentechnologie</li> <li>- Anschlag</li> </ul>

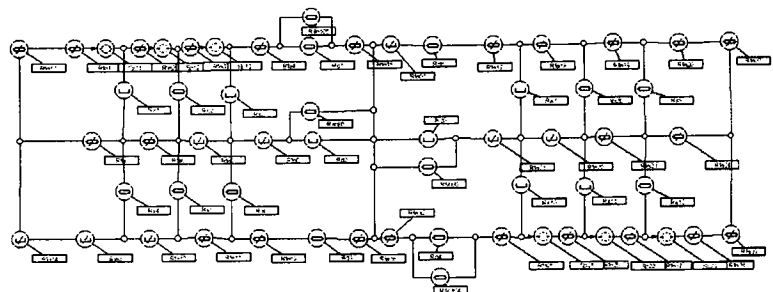
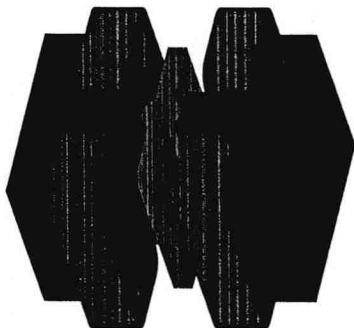


**U-Magnet UM8**



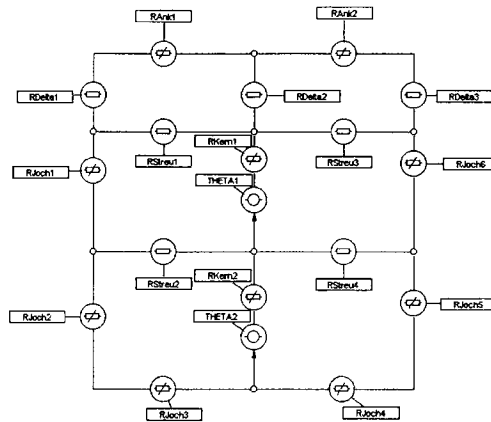
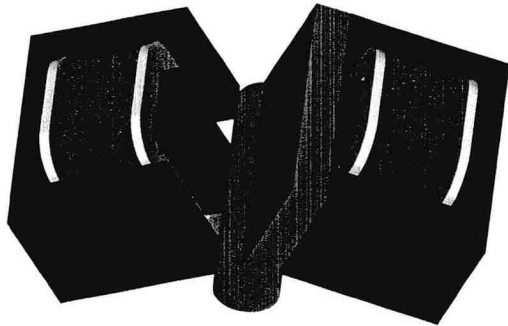
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>- geforderte Frequenz wird erreicht</li> <li>- Kennlinienbeeinflussung</li> <li>- optimiert auf gute Steuerbarkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- unsymmetrische Last</li> <li>- Anschlag</li> <li>- aufwändige Spulentechnologie</li> </ul>

**E-Magnet EM1**



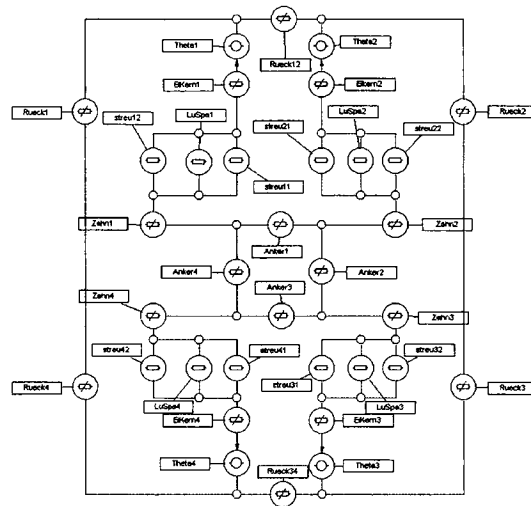
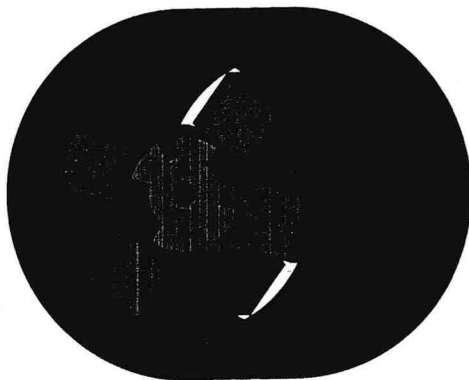
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>- geforderte Frequenz wird erreicht</li> <li>- Spulen einfach montierbar</li> <li>- symmetrische Last</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hohe fertigungstechnische Präzision erforderlich</li> <li>- Anschlag</li> </ul>

**E-Magnet EM2**



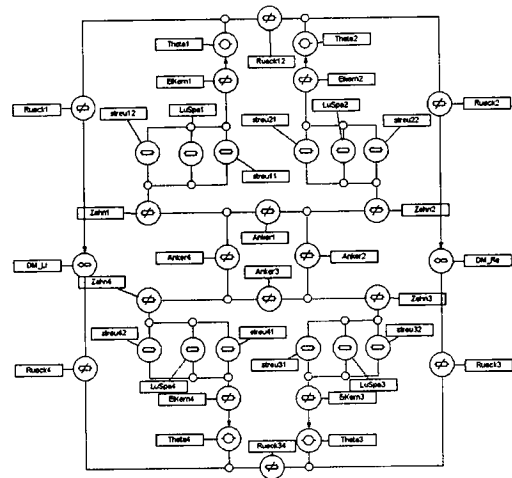
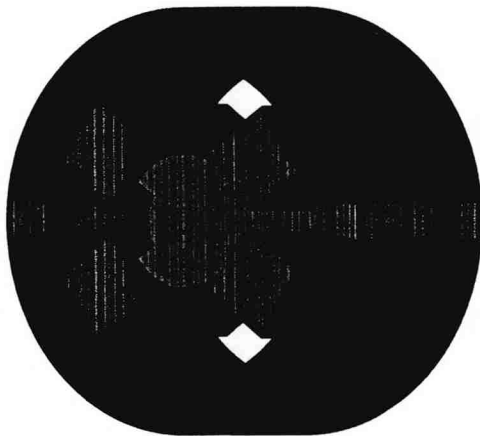
Vorteile	Nachteile
- Spulen einfach montierbar	- unsymmetrische Last - Anschlag - geforderte Frequenz wird nicht erreicht

**Drehmagnet D1N**



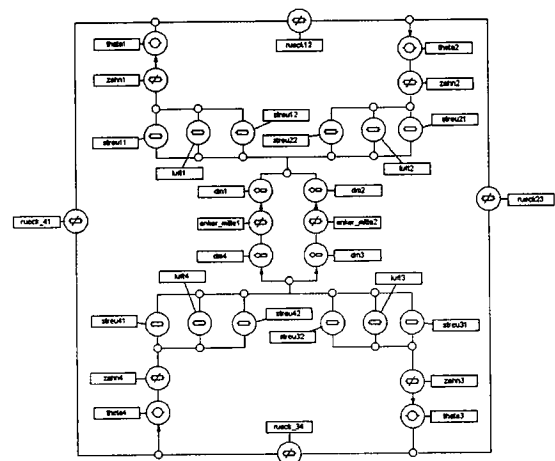
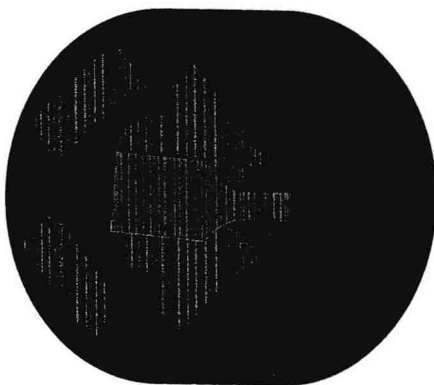
Vorteile	Nachteile
- kein Anschlag - symmetrische Last	- geforderte Frequenz wird nicht erreicht - aufwändige Spulentechnologie

**Polarisierter Drehmagnet D1P**



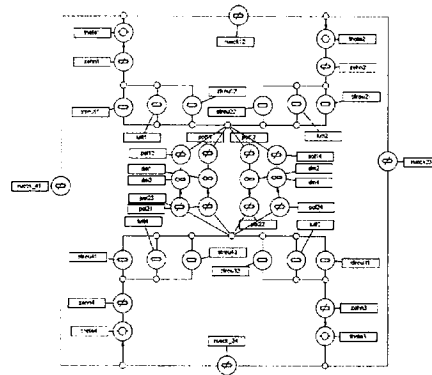
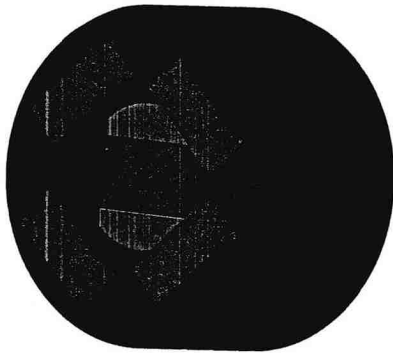
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>- kein Anschlag</li> <li>- symmetrische Last</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geforderte Frequenz wird nicht erreicht</li> <li>- Temperaturabhängigkeit und Alterung der Permanentmagneten</li> <li>- aufwändige Spulentechnologie</li> </ul>

**Pol. Drehmagnet D2P**



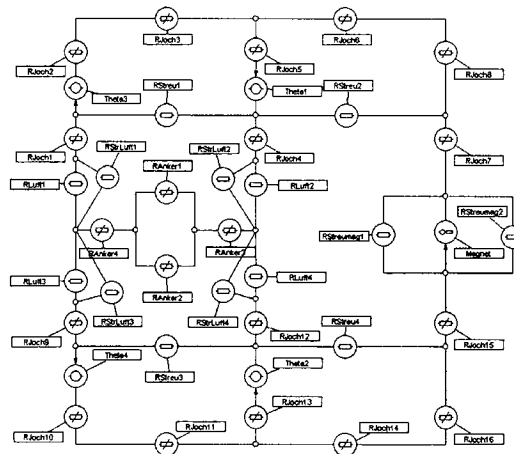
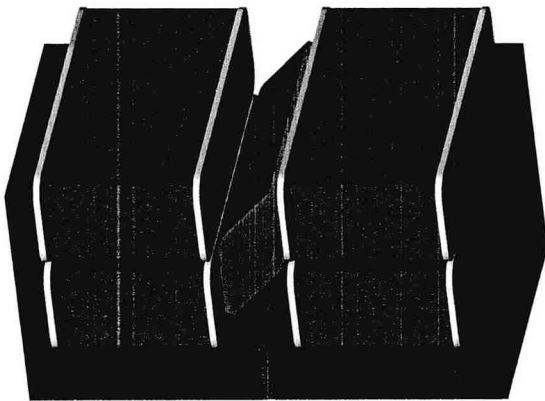
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>- kein Anschlag</li> <li>- symmetrische Last</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geforderte Frequenz wird nicht erreicht</li> <li>- Temperaturabhängigkeit und Alterung der Permanentmagneten</li> <li>- aufwändige Spulentechnologie</li> </ul>

**Pol. Drehmagnet D3P**

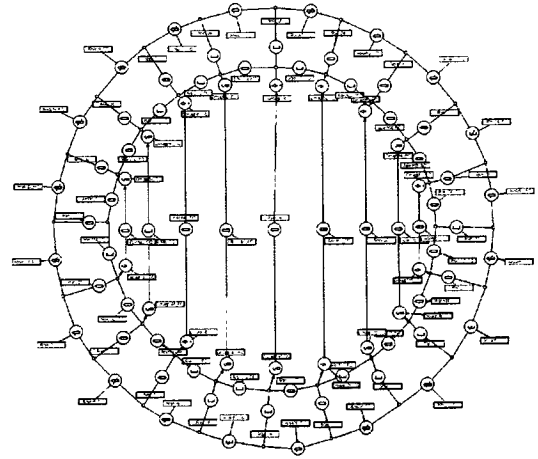


Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>- kein mechanischer Anschlag</li> <li>- symmetrische Last</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geforderte Frequenz wird nicht erreicht</li> <li>- Temperaturabhängigkeit und Alterung des Permanentmagneten</li> </ul>

**Polarisierter Brückenkreis**



Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>- verlustloses Halten</li> <li>- symmetrische Last</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geforderte Frequenz wird nicht erreicht</li> <li>- Temperaturabhängigkeit und Alterung der Permanentmagneten</li> <li>- hohe fertigungstechnische Präzision an den Polflächen</li> <li>- Federkonstante relativ groß</li> <li>- Anschlag</li> </ul>

**Elektrodynamischer Antrieb**

<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>- nahezu konstante Kraft</li><li>- gut steuerbar</li><li>- kein Anschlag</li><li>- symmetrische Last</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- geforderte Frequenz wird nicht erreicht</li><li>- Temperaturabhängigkeit und Alterung der Permanentmagneten</li><li>- aufwändige Wicklung</li></ul>

# MODAN

**Forschungsverbundprojekt  
„Entwurf und Modellierung von Antriebssystemen  
für die Mikrosystemtechnik“**

**MODAN**  
**www.modan.org**

16 SV 1553

**Abschlußbericht des Teilprojektes  
„Entwicklung netzwerkfähiger Entwurfsmodule für  
Mini- und Mikroaktoren“  
der Technischen Universität Ilmenau**

Verbund-Nr.: V2285  
Fördermittelgeber: BMBF  
Projektträger: VDI/VDE-IT Teltow  
Betreuer: Dipl. - Ing. Chr. Breckenfelder / Dipl. - Ing. S. Krüger

## Inhaltsverzeichnis

1. Kurzdarstellungen .....	3
1.1 Aufgabenstellung .....	3
1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens .....	5
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	6
1.4 Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand .....	6
1.4.1 Für das Vorhabens genutzte bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte .....	7
1.4.2 Verwendete Fachliteratur, genutzte Informations- und Dokumentationsdienste .....	7
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	8
2 Eingehende Darstellungen.....	9
2.1 Projektziel .....	9
2.2 Projektdurchführung.....	10
2.3 Erzielte Ergebnisse .....	12
2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen .....	15
2.5 Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen .....	16
2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	16
2.7 Literaturangaben .....	17

---

Anlagen: CD mit ...  
    Installationsdateien Programmsystem SESAM  
    Veröffentlichungen als PDF-Datei  
    Poster als PDF-Datei  
    Handbücher als PDF-Datei  
    Abschlussbericht als PDF-Datei  
    Erfolgskontrollbericht als PDF-Datei  
    Berichtsblatt als PDF-Datei  
    Document Control Sheet als PDF-Datei

## 1. Kurzdarstellungen

### 1.1 Aufgabenstellung

Der zunehmende Einsatz von Rechentechnik bei der Entwicklung und Optimierung magnetischer Antriebssysteme hat dazu geführt, dass die Möglichkeiten virtueller Untersuchungsmethoden stark erweitert werden konnten. Gleichzeitig ist der weitgehend analyseorientierte Entwurf antriebstechnischer Komponenten trotz Einsatz moderner CAD- und Feldberechnungssysteme durch lange Entwicklungszeiten und hohe Kosten gekennzeichnet. Obwohl in den letzten Jahren eine große Anzahl von CAD- und Feldberechnungsprogrammen mit wesentlich verbesserten Leistungsmerkmalen verfügbar sind und der Entwurf in einigen Punkten effektiviert werden konnte, fehlt es an Programmen, die einen weitgehend syntheseorientierten Entwurf von Antriebssystemen gestatten. Der Trend, moderne Produkte in immer kürzeren Zeiträumen auf den Markt zu bringen, erfordert auch von KMU den Einsatz moderner Entwurfsmethoden und –werkzeuge. Das hat auch eine Studie im Rahmen des Projektes „Vorbereitung eines Verbundprojektes zur Entwicklung offener Systeme für heterogene Antriebskomponenten und –systeme“ (OFFSYS) gezeigt.

Das Fachgebiet Mechatronik der Technischen Universität Ilmenau arbeitet seit vielen Jahren mit dem Steinbeis-Transferzentrum Mechatronik in Ilmenau auf dem Gebiet der Entwicklung magnetischer Antriebssysteme zusammen. Die Erfahrungen aus dieser Zusammenarbeit sind in die Entwicklung einer Software zum Entwurf magnetischer Antriebssysteme eingeflossen. Dabei sollten speziell die Anforderungen von KMU berücksichtigt werden (Hard- und Softwareausstattung). Dabei standen alle Arbeiten unter dem Thema „Konzeption netzwerkfähiger Entwurfsmodule für Mini- und Mikroaktuatoren“. Die Technische Universität Ilmenau hat sich auf Grund dieser Erkenntnisse und in Absprache mit Projektpartnern innerhalb des Projektes mit folgenden Aufgabenschwerpunkten befasst:

- **Konzeption von Entwurfsmodulen und Erarbeitung der Programmstruktur**
  - Erarbeitung einer einheitlichen Vorgehensweise zum Entwurf
  - Aufgabenstellung für Programmmodule ausgewählter Aktoren
  - Erarbeitung eines Kataloges verschiedener Systemkomponenten
  - Aufnahme und Anpassung von Baukastenmodulen in den Katalog
  
- **Entwicklung des Programmmoduls Resonanzaktor für das STZ Mechatronik**
  - Erarbeitung der Auswahlkriterien für geeignete Komponenten
  - Entwicklung des ersten Moduls „Magnetischer Resonanzaktor“
  
- **Validierung des Programmmoduls Resonanzaktor und der Programmstruktur**
  - Versuchsphase Modul Resonanzaktor (von Steinbeis-Transferzentrum Mechatronik)
  - Entwicklungsarbeiten zur Modellierung
  - Umsetzung von weiteren Problemstellungen der Projektpartner



- **Dokumentation der Ergebnisse**

Erprobung und Demonstration des Entwurfssystems

Dokumentation der Ergebnisse

Das Ziel des Vorhabens war die Entwicklung einer Software zum Entwurf magnetischer Antriebssysteme. Das Innovative an diesem Produkt ist der Einsatz der Netzwerkmethodene als „Rechenkern“. Im Vergleich zu etablierten FEM-Systemen ergeben sich daraus einige entscheidende Vorteile:

- Sehr kurze Rechenzeiten (speziell bei Dynamik- und Optimierungsrechnungen)
- Durchführung effizienter Energie- und Kraftberechnungen
- Vergleichbarer Rechenaufwand bei 2D- und 3D-Modellen
- Einfach anpassbar an unterschiedliche Aufgaben durch parametrische Modelle
- Anwendung auf andere physikalische Gebiete (Fluidtechnik, Thermik, Akustik u.a.)
- Ausreichende Genauigkeiten in der Phase der Grobdimensionierung

Die zu entwickelnde Software (Projektname SESAM) erhebt auf keinem Fall den Anspruch leistungsfähige FEM-Systeme zu ersetzen. Es gibt aber für diese Software eine Reihe von Einsatzmöglichkeiten, bei der die implementierten Gleichungslöser (Netzwerkmethodene) die Vorteile der Methodik nutzen können. Das sind die Berechnung dynamischer Vorgänge, Optimierungsrechnungen und Untersuchungen zur Hysterese magnetischer Materialien und deren Einfluss auf Ergebnisparameter. Toleranzanalysen und Empfindlichkeitsuntersuchungen sind ebenfalls durchführbar.

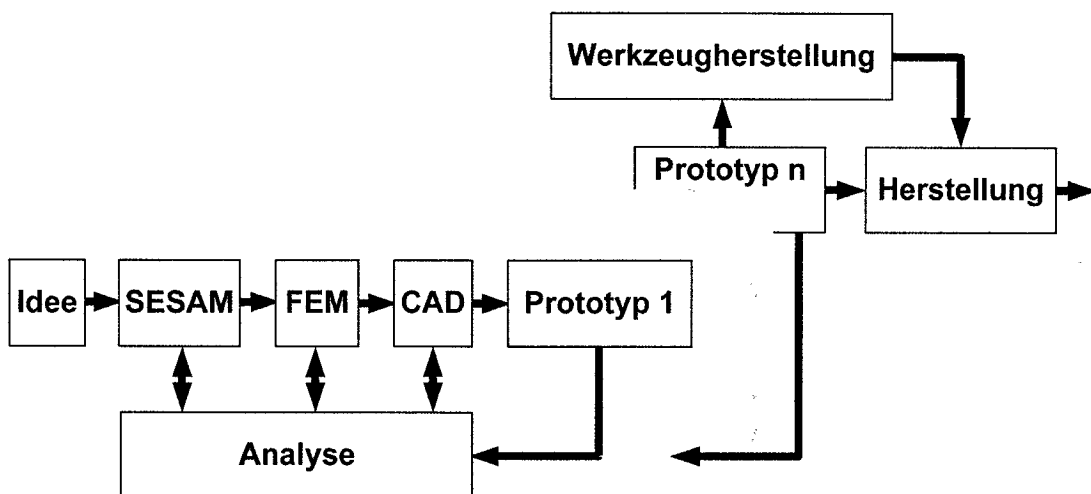


Abbildung 1: Einordnung von SESAM in den konstruktiven Entwicklungsprozess

Wie in oben gezeigter Abbildung war die zu entwickelnde Software gleichberechtigter Bestandteil im Prozess der Grobdimensionierung (siehe auch VDI 2221). Das Programm SESAM ist in der Lage, eine Vielzahl von Lösungsmöglichkeiten (Grundprinzipien, Materialien,

Bauformen) in sehr kurzer Zeit zu untersuchen, um mit einer quasi-optimalen Lösung genauere Untersuchungen (zum Beispiel mit FEM) durchführen zu können. Hauptziel war eine Minimierung von Prototypen und damit die Einsparung von Entwicklungskosten sowie eine Verringerung von Entwicklungszeiten. Weiterhin standen eine einfache Handhabung (grafische Nutzeroberfläche) des Programms und eine Verbesserung der Akzeptanz virtueller Untersuchungsmethoden im Focus der Arbeiten der Technischen Universität Ilmenau.

## 1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

Das Fachgebiet Mechatronik beschäftigte sich seit vielen Jahren mit der Entwicklung magnetischer Antriebssysteme. Der Grundstein wurde durch Prof. Kallenbach und sein Buch „Der Gleichstrommagnet“ gelegt. In den 70-er und 80-er Jahren wurden durch die Mitarbeiter kleine Fortran- und Basic-Programme geschrieben, um sich die Arbeit bei der Entwicklung von Antriebskomponenten im eigenen Hause zu erleichtern. In großem Rahmen wurden wir 1991 mit der Erstellung domänenspezifischer Software (magnetische Antriebe) konfrontiert, als die Firma Robert Bosch GmbH die Entwicklung einer umfangreichen Software für Gleichstromtopfmagnete (Projekt Sturgeon) in Auftrag gab. Bereits zu diesem Zeitpunkt sollte für die frühen Phasen der Entwicklung die Netzwerkmethodologie eingesetzt werden. Die Netzwerke wurden fest im Quellcode hinterlegt, die Software konnte nur die 13 implementierten Grundbauformen untersuchen. Das gesamte Programmsystem beinhaltete eine umfangreiche Projektverwaltung und Projektsteuerung. AutoCAD, eine Oracle Datenbank und das FDM-Werkzeug Profi wurden als Bestandteile in das Programmsystem implementiert. Als 1997 auch die ersten KMU Interesse an der Software zeigten, war keine Windows Version verfügbar, da die Entwicklung für die Robert Bosch GmbH unter UNIX auf DEC-Workstations gefordert war. Ab Mitte 1998, nach Ende der Entwicklungsarbeiten für die Robert Bosch GmbH, starteten wir mit der Entwicklung eines Windows-Programms zur Untersuchung magnetischer Antriebssysteme. Nach Abschluss der Entwicklungsarbeiten und der danach verfügbaren ersten Version konnten wir Erfahrungen beim Einsatz des Programms in KMU und Universitäten sammeln. Es hat sich gezeigt, dass die prinzipielle Vorgehensweise richtig, aber der Umgang mit der Software zu schwierig war und die geforderte Flexibilität bei der Erzeugung der Netzwerke nicht in vollem Umfang realisiert werden konnte. Im Umfeld der Arbeiten an diesen zwei großen Softwareprojekten entstand eine Vielzahl kleiner Anwendungen, die vorwiegend im Auftrag von KMU entwickelt wurden. Eine vollständige Liste mit Informationen zu Projekten finden Sie im Internet unter folgender Adresse:

<http://mechatronik.tu-ilmenau.de/MTRWeb/ForschungUebersicht.asp?s=ger&a=2003>

Im folgenden eine Auswahl an Projekten mit direktem Bezug zum Forschungsvorhaben:

- Untersuchungen zum Entwurf von Mikrosystemen - Mikroaktuatoren (1992-1994)
- Optimierter Außenläufermotor (1994-1996)
- STURGEON - Entwurfssystem für Gleichstromtopfmagnete (1991-1998)
- Verbesserung der dynamischen Eigenschaften von piezoelektrischen Aktoren (1996)
- Verhaltensoptimierte magnetische Antriebe (1996-1998)
- Piezokeramische Ultraschall-Motoren (1997-1999)
- SESAM - Werkzeuge für magnetische Sensor- und Aktorelemente (1997-2001)
- Miniaturisierte Wegsensoren für Proportionalmagnete (1998-2002)

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Technische Universität Ilmenau plante im Vorhaben die Entwicklung spezifischer netzwerkfähiger Entwurfsmodule für Mini- und Mikroaktoren als Bestandteile von komplexen Simulationssystemen für den durchgängig rechnergestützten Entwurf. Die Arbeiten standen in engem Zusammenhang mit der Entwicklung neuer Mikroantriebslösungen des Steinbeis-Transferzentrum Mechatronik. Die Berücksichtigung der Anforderungen zur Modularisierung der Antriebssysteme stellte eine Anpassung an die vom VDMA geplante Umsetzung des Baukastens für Mikrosysteme dar. Das Programmsystem SESAM sollte die Entwicklung des magnetischen Resonanzaktors unterstützen. Eine Evaluierung der Software durch das Steinbeis-Transferzentrum Mechatronik wurde angestrebt. Das Entwicklungsvorhaben wurde in folgenden Schritten durchgeführt:

- **Erarbeitung einer Konzeption für die neu zu entwickelnde Software**
- Definition der Aufgabenspezifikation (für Entwurf magnetischer Antriebssysteme)
- Erarbeitung der Aufgabenstellung für die notwendigen Programmmodule
- Festlegung des Programmablaufs und Definition der Programmsteuerung
- Erarbeitung des Katalogs mit Komponenten und Integration in den Modulbaukasten
  
- **Exemplarische Realisierung des Moduls für magnetische Resonanzaktoren**
- Ermittlung der Anforderungen des magnetischen Resonanzaktors an die Module
- Umsetzung der Berechnungsalgorithmen in C++ Programme
- Realisierung der grafischen Nutzeroberfläche zur Eingabe der Netzwerke
- Aufbereitung der Rechenergebnisse und Realisierung der Ergebnisausgaben
- Realisierung der Projektsteuerung, Materialdatenbank und Verknüpfung aller Module
  
- **Validierung des Moduls für magnetische Resonanzaktoren**
- Spezifikation der Schnittstellen zur Parameterübergabe an externe Programme
- Realisierung notwendiger Schnittstellen zu andere Programmen (FEM, Simplorer)
- Programmtest, Fehlerbeseitigung und Einarbeitung von Wünschen der Anwender
  
- **Dokumentation der Ergebnisse**
- Erprobung und Demonstration des Entwurfssystems (Veröffentlichungen usw.)
- Dokumentation der Ergebnisse (u.a. im Handbuch zum Programmsystem)

### 1.4 Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand

Mit Beginn des Projektes war eine Vielzahl von Softwaresystemen verfügbar, die den Entwurf magnetischer Antriebssysteme unterstützen konnten. Fast alle Systeme hatten ihren Ursprung in der Untersuchung mechanischer Objekte. Im Laufe der Zeit wurden aber zusätzliche Programmmodule veröffentlicht, die auch die Berechnung magnetischer Eigenschaften erlaubten. Oftmals sind derartige Module aber nur für einfache Arten magnetischer Grund-

baufORMen anwendbar und wurden vorwiegend für statische Analysezwecke eingesetzt. Zur Untersuchung dynamischer Vorgänge und bei der Optimierung kam es zu extrem hohen Rechenzeiten (bedingt durch die Verfahren der FEM). Programme, die zur Untersuchung magnetischer Eigenschaften die NetzwerkmethodE anwenden, gab es zum damaligen Zeitpunkt nur im universitären Bereich. Kommerzielle Anbieter waren nicht verfügbar. Diese Situation war für das Fachgebiet Mechatronik die Möglichkeit, die aus früheren Arbeiten gewonnen Erfahrungen auf dem Gebiet der Magnetkreisentwicklung und Programmierung domänenspezifischer Software zu verbinden und eine Software zu entwickeln, die auch dynamische Untersuchungen und Optimierungsrechnungen auf Basis der schnell rechnenden NetzwerkmethodE ermöglicht. Dabei sollte die auf Formeln beruhende Beschreibung der „Netzwerke“ weitestgehend durch interaktive, grafische Oberflächen vereinfacht werden.

#### **1.4.1 Für das Vorhabens genutzte bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte**

Aus der Literatur sind zu Projektbeginn keine Ergebnisse Dritter mit Relevanz für das Vorhaben bekannt. In dieser Art und Weise (NetzwerkmethodE) gibt es nach unseren Recherchen keine Software, die statische, dynamische und Optimierungsrechnungen magnetischer Antriebssysteme erlaubt. Die ebenfalls implementierten Module zur Toleranz- und Empfindlichkeitsuntersuchung waren in dieser Art und Weise kommerziell noch nicht verfügbar.

Innerhalb der Projektlaufzeit ist aber aufgefallen, dass auch andere Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen immer mehr die NetzwerkmethodE bei der Untersuchung technischer Sachverhalte einsetzen. Dabei beschränkt sich das nicht nur auf die Magnetik, auch andere physikalische Effekte werden mit Programmen, die die NetzwerkmethodE als Basis haben, untersucht. Das hängt sicherlich mit den kurzen Rechenzeiten zusammen und erlaubt damit die Untersuchung einer Vielzahl von Lösungsvarianten. Weitere Informationen finden Sie im Abschnitt 2.5 dieser Zusammenfassung.

#### **1.4.2 Verwendete Fachliteratur, genutzte Informations- und Dokumentationsdienste**

Das innerhalb dieses Projektes geplante Vorhaben ist weitestgehend ein Softwareprojekt. Entsprechend der Schnelllebigkeit auf diesem Gebiet diente an vielen Stellen das Internet als Informationsquelle. Bei Fragen oder Problemem der Programmierung wurden diverse Internetforen kontaktiert. Als gute Quellen für die C++ Programmierung (einschl. ActiveX-Controls) dienten die Entwicklerwebsites und Foren der Hersteller von ActiveX-Controls:

- The Code Project (<http://www.codeproject.com>)
- CodeGuru (<http://www.codeguru.com>)
- BCGSoft Co Ltd. (<http://www.bcgsoft.com>)
- Lassalle Technologies (<http://www.lassalle.com>)
- Microsoft Developer Network (<http://msdn.microsoft.com>)

Auf dem Gebiet der magnetischen Antriebe und deren Entwicklung bzw. der Entwurfmethodik wurde unter anderem auf folgende Literatur und Informationsquellen zugegriffen:

- VDI Richtlinie VDI 2221
- Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme (V-Modell)
- GMM Workshops "Methoden und Werkzeuge zum Entwurf von Mikrosystemen"
- Fachtagung „Mechatronik“
- Actuator

Eine vollständige Liste mit Veröffentlichungen bei Konferenzen, in Zeitschriften und Büchern finden Sie unter <http://mechatronik.tu-ilmenau.de/MTRWeb/PublikationenHome.asp>.

### **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Innerhalb dieses Projektes gab und gibt es eine enge Zusammenarbeit mit dem Steinbeis-Transferzentrum Mechatronik Ilmenau. Zur Evaluierung der zu erstellenden Software sollte der vom Steinbeis-Transferzentrum Mechatronik zu entwickelnde Resonanzaktor dienen. Dieses hochdynamische Antriebssystem wird in Zusammenarbeit mit der MAHLE Filtersysteme GmbH Stuttgart innerhalb des Projektes entwickelt und stellt auf Grund der Antriebspezifikation hohe Anforderungen an die Entwurfsoftware. Durch die Kooperation mit zwei Industriepartnern erhoffen wir uns den notwendigen Input zu erhalten, um eine flexible, industriennahe und nutzerfreundliche Anwendung entwickeln zu können.

## 2 Eingehende Darstellungen

### 2.1 Projektziel

Der Trend zu kleineren, verteilten und schnell wirkenden Antrieben mit kleiner Leistungsaufnahme in der Automobilindustrie, der Automatisierung technischer Prozesse und der Haus-technik nimmt ständig zu. Dazu müssen gerade in der Massenproduktion die Antriebe einfach und preiswert herzustellen sein. Auf der anderen Seite kann man die Grenzen magnetischer Antriebsprinzipien auf Grund neuer Materialien (z.B. Piezokeramiken, Selten-Erd-Dauermagnete) und von neuen Technologien (Kaltumformprozesse, Glasspulen ...) immer besser ausreizen. Um bei der Entwicklung neuer Antriebssysteme diese Vielzahl von Einflussgrößen berücksichtigen zu können, sind leistungsfähige Werkzeuge notwendig. Gerade in den Phasen der Grobdimensionierung, wo eine große Anzahl von Lösungsvarianten gegeneinander abgewogen werden müssen, sind schnell rechnende und flexible Programme notwendig.

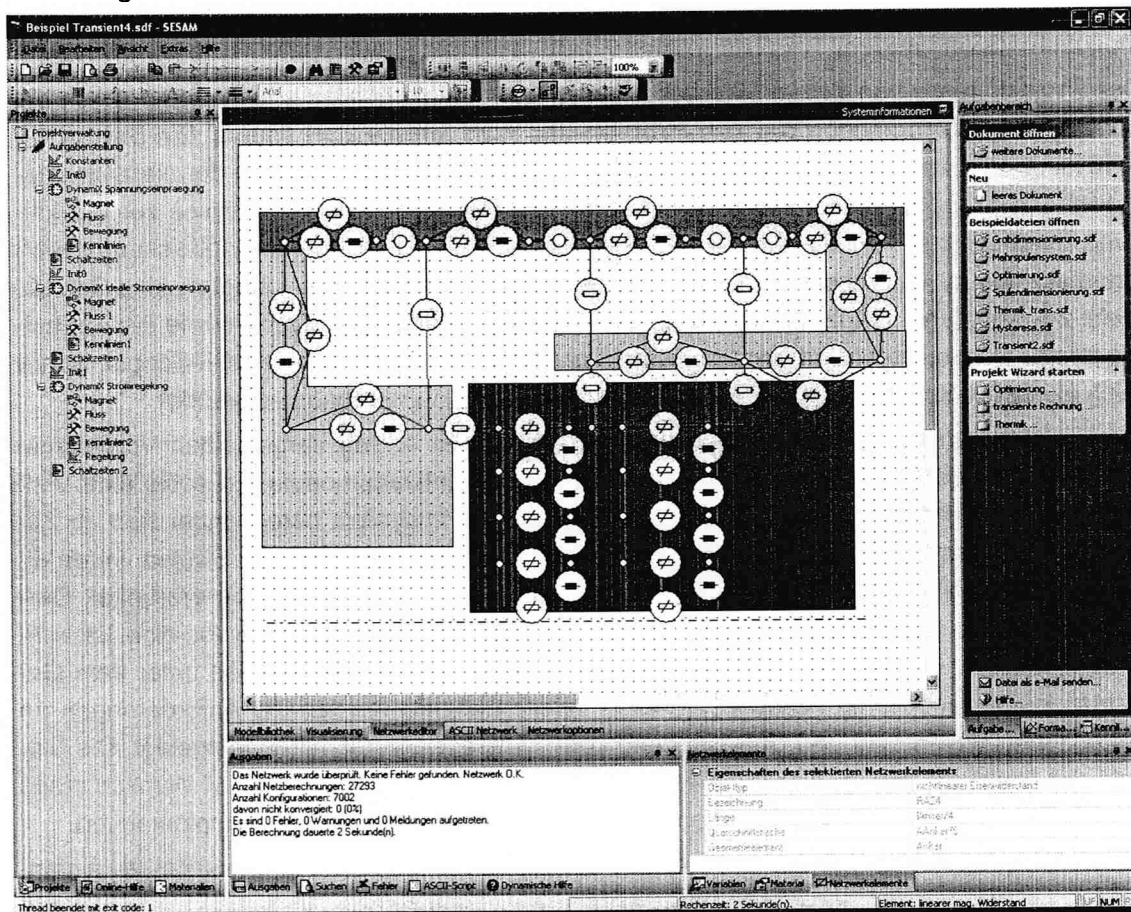


Abbildung 2: Grafische Benutzeroberfläche am Beispiel des Netzwerkeditors

Innerhalb des Projektes soll für die Domäne der magnetischen Antriebe ein Werkzeug entwickelt werden, was genau diese Aufgaben erfüllen soll. Mit der Netzwerkmethod sollen die technischen Sachverhalte abgebildet und berechnet werden. Das relativ komplizierte Formelwerk soll weitestgehend über eine grafische Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 2) ge-

handhabt werden. Die Ergebnisse werden in Form von Diagrammen zur Anzeige gebracht. Module für Dynamikberechnungen, Optimierungen, Toleranzanalysen, Empfindlichkeitsanalysen, Parameterstudien und Thermikberechnungen sind im Programmsystem SESAM integriert. Alle Module können flexible innerhalb der zu implementierenden Projektverwaltung angeordnet werden. Eine integrierte Materialdatenbank, Werkzeuge zur Fehlersuche (bei Modellierungsfehlern) und ein umfangreiches Hilfesystem sind ebenfalls Bestandteil des Programmsystems.

## 2.2 Projektdurchführung

Aus den Erfahrungen der Softwareentwicklung in den Projekten STURGEON und SESAM wurden die notwendigen Arbeiten innerhalb dieses Projektes in vier Blöcke untergliedert. Zum ersten Mal bestand die Möglichkeit, eine umfangreiche Software innerhalb eines Projektes zu entwickeln. Die anderen Werkzeuge aus früheren Projekten waren nur eine „Sammlung“ eigenständiger Tools (die im Rahmen unterschiedlicher Projekte entstanden) unter einer einheitlichen Oberfläche. Gleichzeitig sollten die in STURGEON vergebenen Restriktionen, der Einsatz kommerzieller Software zur Realisation von Hauptfunktionen, durch eigene Module realisiert werden.

Das Projekt wurde von einem Mitarbeiter bearbeitet. Unterstützung erhielt dieser durch die parallel laufende Promotion von Jun.-Prof. Dr.-Ing. Tom Ströhla zum Thema „Ein Beitrag zur Simulation und zum Entwurf von elektromagnetischen Systemen mit Hilfe der Netzwerkmethode“. Als Ergebnis dieser Promotion konnten alle theoretischen Erkenntnisse zur Berechnung magnetischer Antriebssysteme in Form eines ANSI C Programms (Gleichungslöser) innerhalb des zu entwickelnden Softwaresystems eingesetzt werden. Lediglich eine Schnittstelle zur Kopplung von Gleichungslöser und grafischer Nutzeroberfläche sowie ein Formelinterpreter mussten realisiert werden. Diese Schnittstelle, in Form eines ASCII-Scripts, wurde auch als Script-Sprache in den Pre- und Postprozessoren zur Eingabe verwendet.

Die Projektdurchführung entsprach weitestgehend der im Antrag dargestellten Vorgehensweise. Die Arbeiten begannen mit der Konzeption der Entwurfsmodule. Es sollte eine Vielzahl unterschiedlicher Antriebssysteme mit dem Programmsystem berechenbar sein. In Zusammenarbeit mit dem Steinbeis-Transferzentrum Mechatronik und Herrn Ströhla wurde eine einheitliche Vorgehensweise zum Entwurf elektromagnetischer Antriebe erarbeitet. Daraus wurden die dann notwendigen Programmmodule extrahiert, die man für eine Berechnung statischer, dynamischer und thermischer Eigenschaften benötigt (alles unter dem Gesichtspunkt magnetischer Antriebe). In einer zweiten Runde wurden die Anforderungen an Module zur Optimierung und Untersuchung von Hystereseigenschaften festgelegt. Die Module zur Empfindlichkeits- und Toleranzanalyse wurden erst Ende 2004 auf Wunsch eines Anwenders, aus einer konkreten Aufgabenstellung heraus, spezifiziert und implementiert.

In den Gesprächen zur Konzeption der Entwurfmodule hat sich gezeigt, dass es wenig sinnvoll ist, für bestimmte magnetische Grundbauformen (Topfmagnete, E-Magnete, polarisierte Magnete usw.) separate Berechnungsmodule zu entwickeln und diese in einen Katalog mit Systemkomponenten zu packen (siehe Aufgabenstellung). Aus diesem Grund wurde ein interaktiver, grafischer Netzwerkeditor entwickelt.

Am Ende der Konzeptionsphase wurde anhand des magnetischen Resonanzaktors überprüft, ob die an diesen magnetischen Antrieb gestellten Anforderungen mit dem zu entwickelnden Programmsystem erfüllt bzw. berechnet werden können.

Als Ergebnis der Konzeptionsphase ergaben sich zwei Änderungen bezüglich des Arbeitsplans. Die Gespräche hatten gezeigt, dass der Katalog mit verschiedenen Systemkomponenten nicht realisiert werden muss, da der Netzwerkeditor das Erzeugen beliebiger Netzwerke unterstützen soll. Der ursprüngliche Plan, das Programm als Modul für Simplorer zu entwickeln, wurde dahingehend revidiert, dass ein eigenständiges Programm für Windows entstehen sollte, das später über Schnittstellen mit anderen Programmsystemen gekoppelt werden kann (FEM oder Gesamtsystemsimulation).

Anschließend begann die Umsetzung aller theoretischen Ergebnisse in Software. Die Entwicklung der Programmmodule mit C++ und diversen ActiveX-Controls (FlowControl und Diagramme) sollte einen Großteil der verfügbaren Bearbeitungszeit in Anspruch nehmen. Das Programmgerüst wurde entwickelt, die Projekt- und Materialverwaltung implementiert, anschließend wurden die unterschiedlichen Berechnungsmodule umgesetzt. Im Frühjahr 2003 war eine erste Beta-Version mit allen Grundfunktionalitäten verfügbar und wurde bis Mitte 2003 an der Technischen Universität Ilmenau und im Steinbeis-Transferzentrum Mechatronik getestet und evaluiert. Es wurden Fehler beseitigt und neue Funktionen, die aus Sicht der Anwender notwendig waren, implementiert.

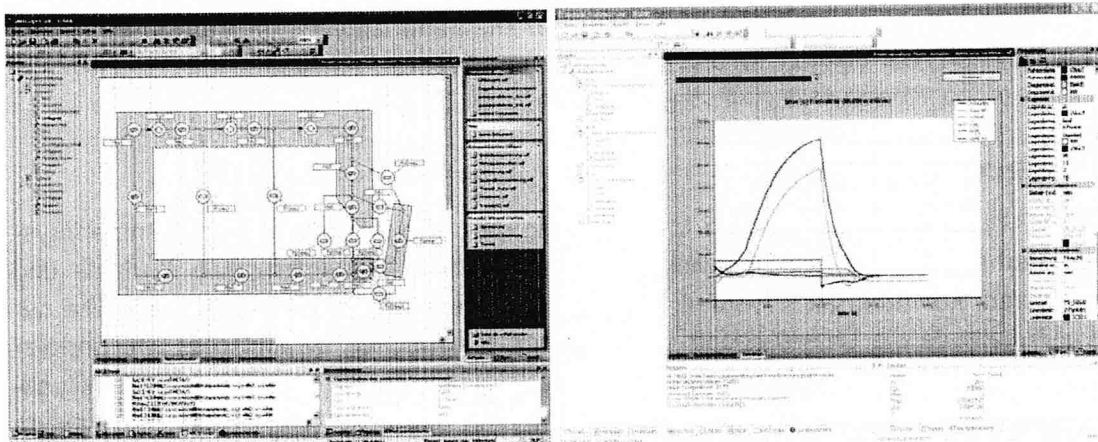


Abbildung 3: Netzwerkmodell und zugehörige Berechnungsergebnisse

Anschließend wurde allen Projektpartnern die Version 1.0 zur Verfügung gestellt. Gleichzeitig wurde das Programm auch zur Ausbildung von Studenten im Fachgebiet Mechatronik und zur Durchführung von studentischen Projektarbeiten eingesetzt. Ziel war die Einbindung möglichst vieler Anwender in den Test und Evaluierungsprozess. Gleichzeitig wurden im zweiten Halbjahr 2003 Vergleichrechnungen zwischen Sesam und FEM durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit und Genauigkeit abschätzen zu können. Ausgewählte einfache magnetische Antriebe wurden entworfen, gebaut und anschließend vermessen (siehe Abbildung 3). Bei der Genauigkeit der Ergebnisse zwischen FEM und SESAM hängt es entscheidend von den Kenntnissen (Magnetik) der Anwender ab, welche Ergebnisse erzielt werden. Detaillierte Netzwerkmodelle, die den magnetischen Fluss exakt nachbilden, erreichen durchaus Genauigkeiten von 2-3%. Ist die Abbildung des magnetischen Flusses mit Netzwerken nicht so genau möglich (lokale Sättigungen und veränderliche Streufelder), dann treten unter Umständen auch Abweichungen von 15-20% auf oder in Extremfällen kann das System nicht berechnet werden (siehe auch Veröffentlichungen – Grenzen der Netzwerkmethod).

Ein weiterer Entwicklungsabschnitt startete Anfang 2004. Die Anwender des Programms hatten bei der Arbeit eine Vielzahl von „Unzulänglichkeiten“ in der Bedienung und „fehlende“



Funktionen festgestellt. Aus diesem Grunde wurde die Oberfläche in einigen Punkten komplett überarbeitet (speziell Fensterverwaltung und Netzwerkeditor) und an die Anforderungen der Anwender angepasst. Fehlende Funktionen (z.B. Kopplung mit FEM) wurden, soweit es der Zeitplan erlaubte, implementiert.

Während der gesamten Projektlaufzeit wurden Kongresse und Fachtagungen besucht, um auf aktuelle Trends reagieren zu können. So wurde zum Beispiel auf dem 10. GMM Workshop 2004 unter dem Motto „Methoden und Werkzeuge zum Entwurf von Mikrosystemen“ mehrfach deutlich zum Ausdruck gebracht, das in der heutigen Zeit ein Programm nur erfolgreich am Markt bestehen kann, wenn eine englischsprachige Version verfügbar ist. Ähnliche Erfahrungen hatten wir bereits Anfang 2004 gemacht, nachdem mehrfach Anfragen zu Testversionen aus England, Frankreich und den Niederlanden kamen. Aus diesem Grunde wurden noch kurz vor Beendigung des Projektes Programmroutinen implementiert, die andere Sprachversionen des Programms unterstützen. Verfügbar sind momentan deutsch und englisch (ohne Handbuch und Online-Hilfe). Sind weitere Sprachversionen notwendig, müssen nur die Sprachtabellen entsprechend ergänzt werden (französisch ist bereits vorbereitet).

Die abschließenden Arbeiten im Januar 2005 beschäftigten sich mit der Aktualisierung der Installationsroutinen, der Aktualisierung des Internetauftritts zu SESAM Version 2005 und der Fertigstellung der Version 1.2 als Abschluss innerhalb des Projektes.

### 2.3 Erzielte Ergebnisse

Die Entwicklung einer Software zur Unterstützung des Entwurfs magnetischer Antriebssysteme innerhalb des Projekts „Entwicklung netzwerkfähiger Entwurfsmodule für Mini- und Mikroaktoren“ konnte erreicht werden. Es wurde ein Werkzeug entwickelt, das mit Hilfe der Netzwerkmethod die Untersuchung magnetischer, thermischer, dynamischer und anderer relevanten Eigenschaften magnetischer Antriebssysteme erlaubt. Die prinzipielle Funktionsfähigkeit der Software wurde anhand der Entwicklung des magnetischen Resonanzaktors durch das Steinbeis-Transferzentrum Mechatronik nachgewiesen. Dabei wurde mit dem Programm SESAM eine Vielzahl von Bauformen (siehe Abbildung 4) in der Phase der Grobdimensionierung untersucht, es erfolgte eine Optimierung der Geometriedaten, entsprechend vorgegebener Zielfunktionen. Dabei zeigte sich, dass das Programmsystem SESAM für die Grobdimensionierung von Magnetaktoren hervorragend geeignet ist.



Abbildung 4: Untersuchte Bauformen bei der Entwicklung des mag. Resonanzaktors

Anschließend wurde die erfolgsversprechende Variante mit FEM Werkzeugen weiter untersucht und optimiert. Es wurden Prototypen gebaut und im Steinbeis-Transferzentrum Mechatronik und der MAHLE Filtersysteme GmbH evaluiert. Die in der Aufgabenstellung definierten Parameter des Resonanzaktors konnten erreicht werden. Der Vorteil der entwickelten Software lag in sehr kurzen Rechenzeiten während der Optimierung und Parametersuche in der Phase der Grobdimensionierung. Dem gegenüber stehen ein erhöhter Aufwand bei der Modellierung und die dafür notwendigen umfangreichen Kenntnisse des Anwenders auf den Gebieten der Netzwerkmodellierung und Magnetik.

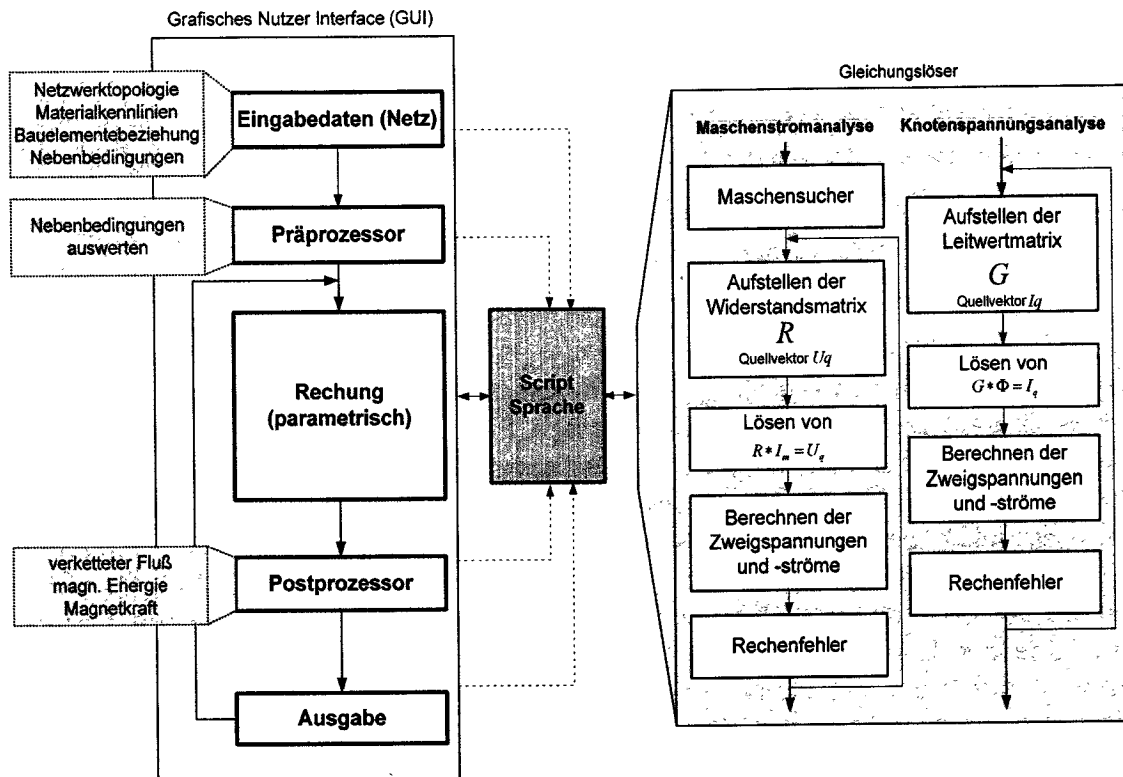


Abbildung 5: Aufbau Programmsystems SESAM (Modul Oberfläche, Script, Rechenkern)

Die im Programmsystem hinterlegte Struktur (siehe Abbildung 5) hat sich bei der Programmierung und bei der Anwendung des Programmsystems bewährt. Über eine Scriptsprache kommunizieren grafische Nutzeroberfläche und Gleichungslöser miteinander. Mit Hilfe der Scriptsprache und dem integrierten Formelinterpreter können alle Netzwerkmodelle parametrisch definiert werden. So können alle technischen Systeme abgebildet werden, deren Struktur und Verhalten mit Netzwerkmodellen beschreibbar sind. In der vorliegenden Version können magnetische, elektrische und thermische Netzwerke (und damit die Eigenschaften magnetischer Antriebssysteme) untersucht werden. Folgende Berechnungsmodule sind implementiert:

- Optimierungen, Dynamiksimulation und Parameterstudien
- Spulendimensionierung
- Toleranz- und Empfindlichkeitsuntersuchungen
- Thermikberechnung mit Konvektion und Strahlung
- Untersuchung von Wirbelströmen und Hystereseverhalten

Ergänzt werden diese Berechnungsmodule durch weitere Module, die die Eingabe des Netzwerkes ermöglichen, die Handhabung von Materialdaten erlauben und den Anwender bei der Fehlersuche bei der Modellierung unterstützen.

- Integrierter Formelinterpreter (für parametrische Modelle)
- Ergonomische Benutzerschnittstelle (einschließlich eines grafischen Netzwerkeditors)
- Integriertes CAD für Visualisierung (2D)
- Ausführliche Hilfe und Wissensdatenbank (deutsch)
- Integrierte Materialdatenbank (für das Mapping von Materialien auf Geometrien)
- Beispiel- und Modellbibliothek (muss erweitert werden)
- Flexible Formatierung der Ergebnisse (Kennlinien)
- XML Interface (für Import, Export und Erweiterungen)

Das Programmsystem ist sehr gut geeignet für die Untersuchung komplexer Strukturen, die sich auf konzentrierte Elemente reduzieren lassen. Es ist die Untersuchung homogener oder homogenisierter Feldgebiete möglich. Der Rechenaufwand bei 2D- und 3D-Modellen ist nahezu vergleichbar. An seine Grenzen (bedingt durch die Netzwerkmethode) stößt das System, wenn lokale Sättigungen (z.B. bei Kennlinienbeeinflussung) oder veränderliche Streufelder (z.B. bei Schrittmotoren) auftreten. Die kurzen Rechenzeiten, auch bei der Simulationen des dynamischen Verhaltens und bei Toleranzuntersuchungen (Abbildung 6), sind ein entscheidender Vorteil gegenüber FEM, die Erstellung der Netzwerkmodelle ist aber zeitaufwändig und der Anwender benötigt ein fundiertes Wissen.

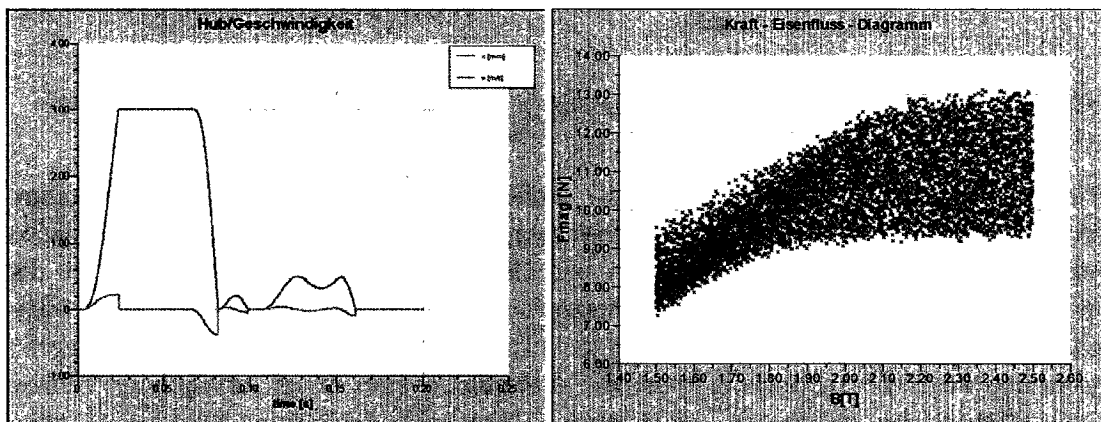


Abbildung 6: Berechnungsergebnisse (links: Dynamik, rechts: Toleranzuntersuchung)

Eine Weiterentwicklung des Programmsystems SESAM wäre wünschenswert, da die Problematik der Erstellung der Netzwerke anwenderfreundlicher gelöst werden muss. Aus jetziger Sicht sind kurzfristig Wizards denkbar, die für einfache Baugruppen eines Antriebs das Netzwerk automatisch erzeugen. Langfristig kann man auch über die automatische Erzeugung von Netzwerken nachdenken, indem die Geometrie eingelesen und interaktiv das Netzwerk erzeugt wird. Eine Überarbeitung der Dokumentation von Version 1.0 nach 1.2 ist ebenfalls notwendig (es gibt einige relevante Änderungen) und konnte aus Zeitmangel leider nicht realisiert werden, da uns die kurzfristige Implementierung der englischen Version wichtiger erschien.

Das Programm SEAM wurde für Windows entwickelt und läuft auf alle Windows Plattformen ab Windows 98SE. Die Umsetzung erfolgte weitestgehend objektorientiert mit C++. Der Rechenkern (Gleichungslöser) wurde in ANSI C realisiert. Weitere Informationen zum Pro-

grammsystem finden Sie unter <http://mechatronik.tu-ilmenau.de/sesam>. Dort können Sie auch eine voll funktionsfähige Demoversion herunterladen.

#### **2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen**

Das Programmsystem ist in einer windows-kompatiblen und auf die Bedürfnisse von klein- und mittelständischen Unternehmen angepassten Version seit Frühjahr 2005 verfügbar. Es werden die Sprachen deutsch und englisch unterstützt.

Die Erkenntnisse und Erfahrungen, die diesem Programmsystem zugrunde liegen, wurden in den letzten Jahren an der Technischen Universität Ilmenau – Fachgebiet Mechatronik entwickelt bzw. geschaffen. Der Projektbearbeiter und auch Jun.-Prof. Ströhla haben das Fachgebiet zwischenzeitlich leider verlassen. Eine Weiterentwicklung und Vermarktung über die innomas GmbH (ehemalige Mitarbeiter des Fachgebiets Mechatronik) während der Projektlaufzeit und darüber hinaus wurde angestrebt, konnte aber auf Grund unterschiedlicher Auffassungen nicht realisiert werden. Hauptproblem waren fehlende Kapazitäten für Werbung, Marketing und die Durchführung von Workshops. Der im Projekt beschäftigte Mitarbeiter war vollständig mit der Entwicklung der Software beschäftigt (einschließlich Handbüchern und Veröffentlichungen). Darüber hinausgehende Marketingaktivitäten waren aus zeitlichen Gründen nicht möglich.

Die im Projekt entwickelten Programme und Berechnungsmodule (SESAM) sollen unmittelbar bei der Ausbildung in den Fächern Mechatronik und Mikrosystemtechnik der Technischen Universität Ilmenau eingesetzt werden. Gleichzeitig können Industriepartner mit Hilfe von SESAM den Entwurf und die Dimensionierung von magnetischen Antriebselementen effizienter gestalten. Gerade im Bereich der Prinzipiellösungssuche oder Optimierung von Antriebssystemen können mit Hilfe der neu entwickelten Module Eigenschaften untersucht werden, die mit Hilfe von FEM nicht oder nur mit hohem Zeitaufwand möglich waren. Allen interessierten Anwendern steht unter <http://mechatronik.tu-ilmenau.de/sesam> eine kostenlose Vollversion zu Verfügung (kostenlose Registrierung und Freischaltung ist erforderlich).

Momentan ist der deutschsprachige Raum die vorgesehene Region für eine Verbreitung des Programmsystems SESAM (obwohl es 2003 Anfragen aus Frankreich und England gab, das Programm 2004 in Portugal vorgestellt wurde und 2005 Interesse aus den Niederlanden bekundet wurde). Bis zum heutigen Zeitpunkt haben 56 Anwender das Programm herunter geladen, von denen 34 einen Freischaltcode angefordert haben. Die Zahl der aktiven Nutzer bewegt sich allerdings nach unseren Erkenntnissen nur im Bereich von zehn Anwendern.

Speziell durch die Arbeit von Studenten mit SESAM in Studien- und Projektarbeiten konnte das Fachgebiet einen Know-how Zuwachs erzielen, der sich positiv auf aktuelle und künftige Forschungs- und Entwicklungsaufträge aus der Industrie auswirken wird. Für eine weitere Verbreitung des Programms muss aber innerhalb von Workshops den Anwendern der Umgang mit SESAM vermittelt werden, da trotz Rechnerunterstützung die Arbeit mit Netzwerken ein gewisses Maß an Know-how voraussetzt (Problematik der Netzwerkmethodik allgemein und umfassende Kenntnisse der Magnetik). An der Technischen Universität Ilmenau wird die Juniorprofessur „Entwurf Mechatronischer Antriebe“ unter Jun.-Prof. Ströhla das Programmsystem weiter in Lehre und Forschung einsetzen und auch wenn möglich die Weiterentwicklung vorantrieben.

## 2.5 Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen

Betrachtet man Veröffentlichungen der letzten zwei Jahre, stellt man fest, dass es zunehmend Anwendungen außerhalb der Elektrotechnik und des Schaltkreisentwurfs gibt, die die Netzwerkmethodik zur Berechnung technischer Sachverhalte einsetzen. Kurze Rechenzeiten und die Möglichkeit der Simulation komplexer Systeme haben zu einer stärkeren Verbreitung dieser Berechnungsmethodik beigetragen. Besonders bei der Simulation von komplexen Systemen (mit Matlab – Simulink, Simplorer, SimulationX, PSpice u.a.), wo domänenübergreifende technische Prinzipien nach dem Black-Box-Prinzip behandelt werden, ist die Netzwerkmethodik sehr gut anwendbar.

Das Programmsystem SESAM in der jetzigen Form untersucht detaillierter das Verhalten magnetischer Eigenschaften (also nur einer Domäne). Dabei werden Geometrie- und Materialeigenschaften, sowie die Ausbreitung des magnetischen Flusses, berücksichtigt. Der Einsatz der Netzwerkmethodik erlaubt natürlich auch die Berücksichtigung mechanischer Sachverhalte (z. B. Gegenkräfte durch Federn), elektrischer Randbedingungen (verschiedene Ansteuerregimes) und thermischer Eigenschaften (z.B. für unterschiedliche Betriebsarten). Aus der aktuellen Literatur sind keine Ergebnisse Dritter mit Relevanz für das Vorhaben bekannt. In dieser Art und Weise gibt es unseres Wissens keine Software, die statische, dynamische und Optimierungsrechnungen magnetischer Antriebssysteme mit Hilfe der Netzwerkmethodik unterstützt. Wir sind uns klar darüber, dass es sich bei der hier entwickelten Software um ein Nischenprodukt handelt, da der Markt von Herstellern antriebstechnischer Komponenten (magnetische Antriebe) überschaubar ist.

## 2.6 Erfolge oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Während der gesamten Projektlaufzeit wurden Kongresse und Fachtagungen besucht und das Programmsystem wurde in Vorträgen und Postern vorgestellt. Allerdings war die Resonanz verhalten. Gerade KMU haben immer noch Vorbehalte, was den Einsatz virtueller Entwicklungsmethoden angeht. Einerseits verständlich, bindet der Einsatz spezialisierter Software durch Einarbeitung und Wartung Arbeitskräfte, andererseits muss aber auch das Einsparungspotential berücksichtigt werden. Interesse an dem Programm kam vorwiegend aus dem universitären Bereich. Dort ist derzeit auch das Anwendungsgebiet (Forschung und Lehre).

Im Folgenden finden Sie alle zum Programmsystem SESAM während der Projektlaufzeit getätigten Vorträge und Poster:

- Birli, O.; Ströhla, T. Entwicklung magnetischer Antriebssysteme mit Hilfe der Netzwerkmethodik und dem Programmsystem SESAM. 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Mechanical Engineering from Macro to Nano, Technische Universität Ilmenau, 19.09.-23.09.2005, Ilmenau, 2005, S. 105-106. 2005
- Birli, O.; Ströhla, T.: Design of fast acting magnetic actuators with SESAM: FIMEC 2004, 12.-14.10.2004, Guimarães (Portugal) 2004
- Birli, O.; Ströhla, T.: Simulation und Optimierung von magnetischen Antrieben mit Hilfe der Netzwerkmethodik: 10. GMM Workshop "Methoden und Werkzeuge zum Entwurf von Mikrosystemen", 20.-22.10.2004, Cottbus, S.89-96. 2004
- Zöppig, V.; Kallenbach, E.; Birli, O.; Schmidt, J.; Ströhla, T. Rapid Development of micromechatronic systems containing magnetic actuators. The Eighteenth International Workshop on High-Performance Magnets and Their Applications. Annecy (France). 29 August 2004 to 2 September 2004, Proceedings 2004
- Birli, O.; Feindt, K.; Kallenbach, E.; Ströhla, T.: SESAM – a network based design tool for developing electromagnetic actuators; International Conference on Mechatronics 2003, Loughborough University, UK, 19-20 June 2003
- Ströhla, T.; Kallenbach, E.; Feindt, K.; Birli, O. Entwurf magnetischer Aktoren für mechatronische Systeme mit SESAM, VDI-Mechatronik Tagung 2003; Innovative Produktentwicklung, 7-8 Mai 2003, Fulda 2003

- Ströhla, T. Ein Beitrag zur Simulation und zum Entwurf von elektromagnetischen Systemen mit Hilfe der Netzwerkmethod. Dissertation TU Ilmenau 2003, Wissenschaftsverlag Ilmenau, ISBN 3-936404-00-3
- Birl, O.; Kallenbach, E.; Feindt, K.; Ströhla, T. SESAM – A Software that Supports the Design Process of Electromagnetic Actuators. Actuator Bremen, Proceedings, 2002
- Ströhla, T.; Birl, O. Einsatz von Hysteresesimulation im Entwurfsprozess von Magnetaktoren. 47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der Technischen Universität Ilmenau IWK 2002, 23.-26. September 2002
- Birl, O.; Kallenbach, E. Conceptual Desig of Magnetic Drives with SESAM. Electromechanika, Jubiläumsausgabe 4/2002, ISSN 0136-3360, S. 7-14

Alle Vorträge finden Sie als PDF-Datei auf der beiliegenden CD. Dort sind auch PDF-Versionen der Handbücher und eine voll funktionsfähige Demoversion von SESAM Version 2005 verfügbar.

## 2.7 Literaturangaben

- Bayer, O., Kamusella, A.: Simulation und Optimierung schnellschaltender Magnete. Proc. Dresdner Tagung Simulation im Maschinenbau, Dresden, 2000, S. 557-574
- Geißler, G.: Modellbildung von Proportionalmagneten mittels konzentrierter Parameter. O+P Ölhydraulik und Pneumatik, 45 (2001) 1, S. 49-52
- Jonas, Ge.: Berechnen elektrischer Maschinen - über magnetische Abschnitts-leitwerte. VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 1997
- Roschke, T.: Entwurf geregelter elektromagnetischer Antriebe für Luftschütze. Fortschrittsbericht VDI Reihe 21 Nr. 293 VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000
- Schweer, J.-B. Berechnung kleiner Wechselstrom-Ventilmagnete mit massivem Eisenkreis, Diss. Universität Hannover, 1997