



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

**MODAN**

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

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

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	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

## **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 Simulations-Tools 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 Modulkonzept 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)

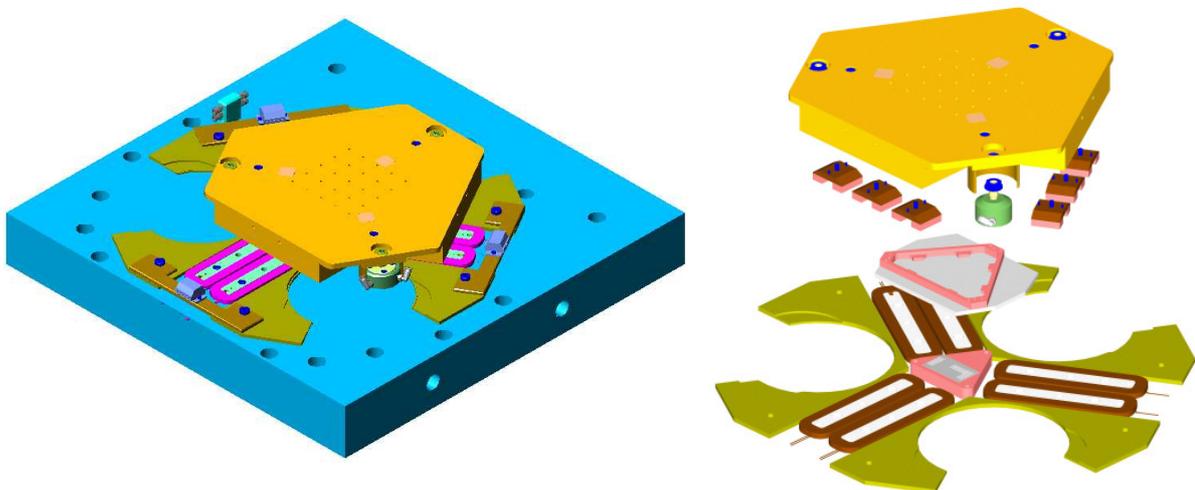


Abb. 1: Elektrodynamischer x - y -  $\Delta\phi$  - Planarantrieb PMS 100 - 3, CAD - Modell

- 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.

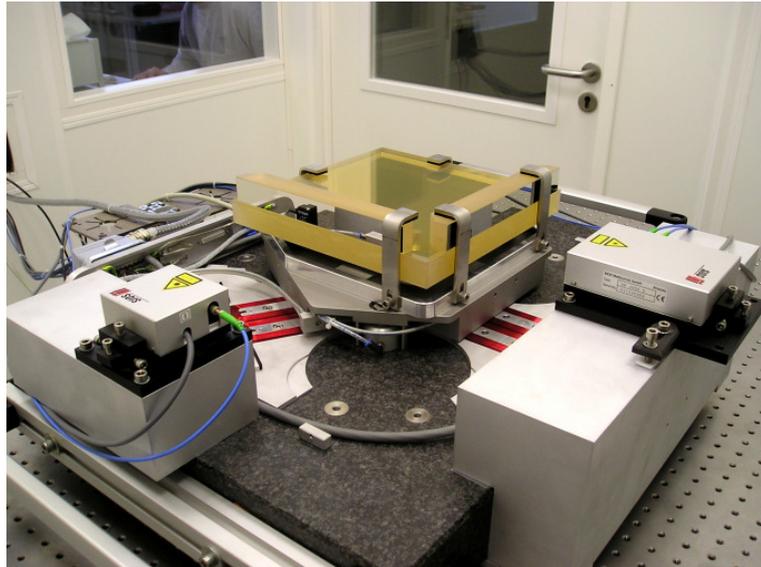


Abb. 2: Versuchsaufbau zur Vermessung der Maßverkörperung des PMS 100 - 3 mittels laserinterferometer

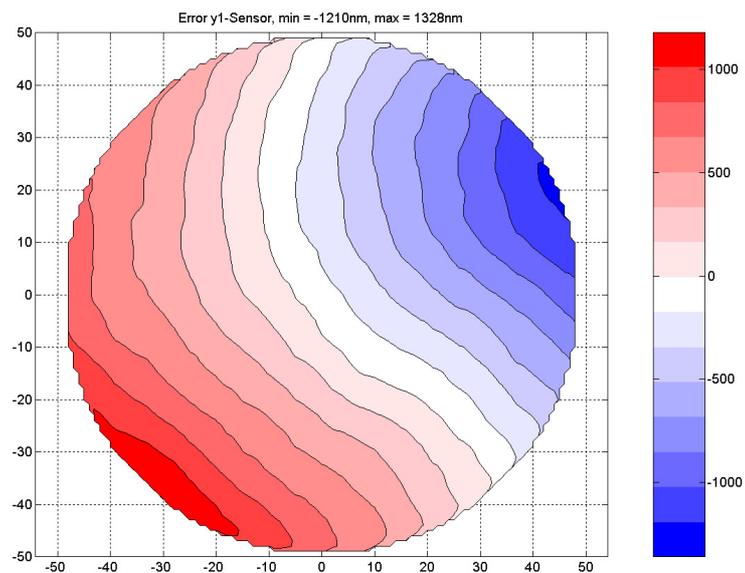


Abb. 3: Abweichung der Messergebnisse zwischen Messsystem des PMS 100-3 und der Vergleichsmessung mit Laserinterferometern

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 Bahnkorrekturtabelle 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

- 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.

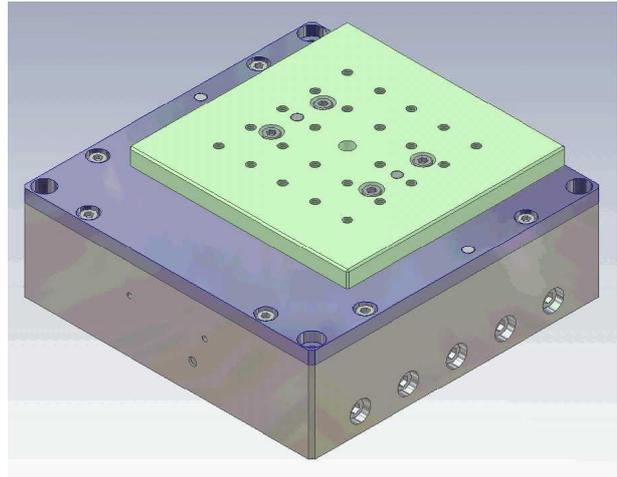


Abb. 4: CAD-Modell des LMS 20

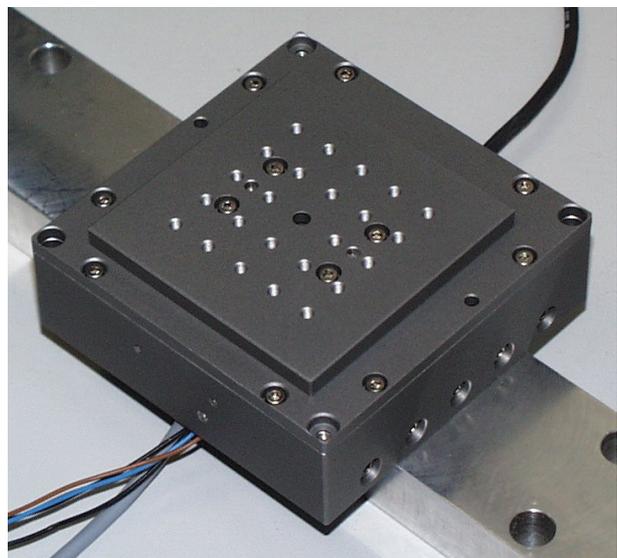


Abb. 5: Erste Version des Demonstrators des LMS 20

### 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  $x$ ,  $y$ ,  $\phi_z$  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:  $200\text{nm}$

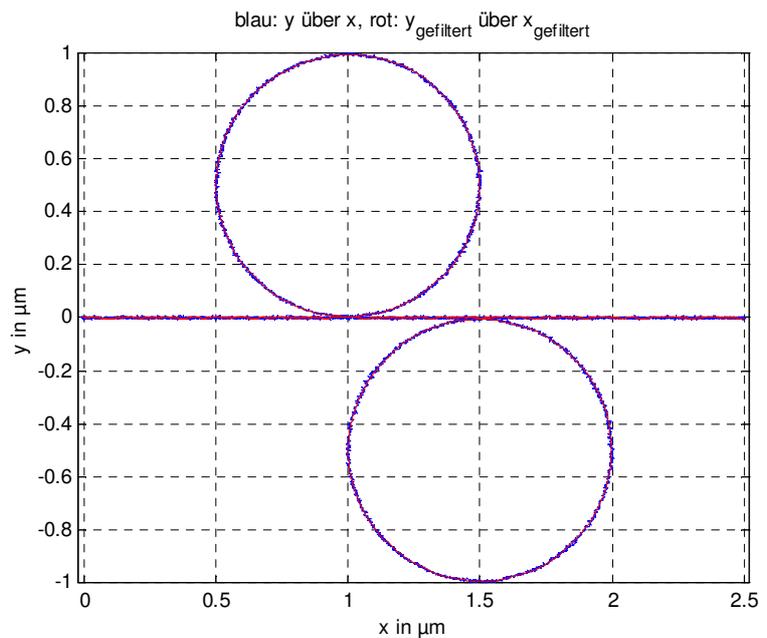


Abb. 7: Kreisfahrt mit einem Durchmesser von  $1\mu\text{m}$  und einer Geschwindigkeit von  $6,3\mu\text{m/s}$

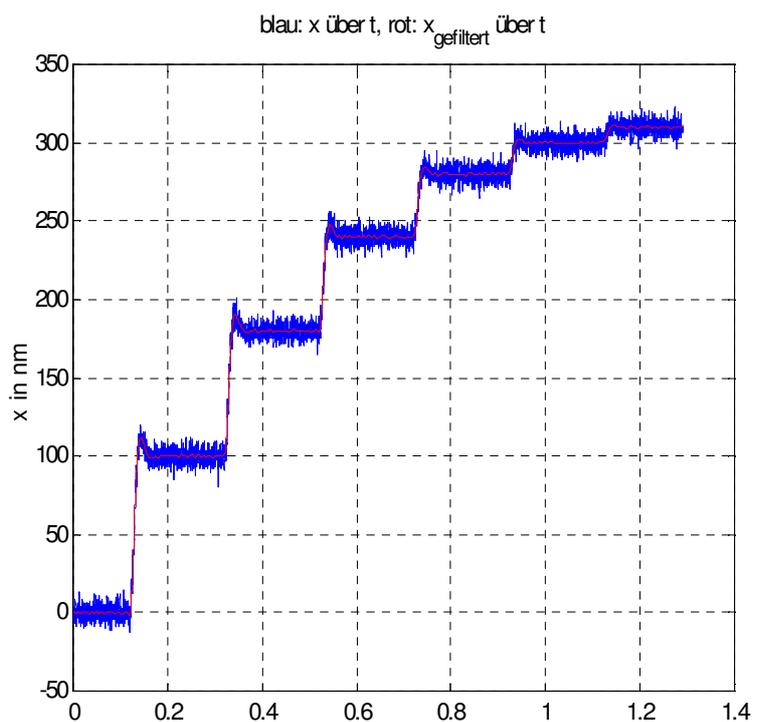


Abb. 9: Positionierung in Schritten von  $100\text{nm}$ ,  $80\text{nm}$ ,  $60\text{nm}$ ,  $40\text{nm}$ ,  $20\text{nm}$ ,  $10\text{nm}$

- 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. Endlagenabtastung 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

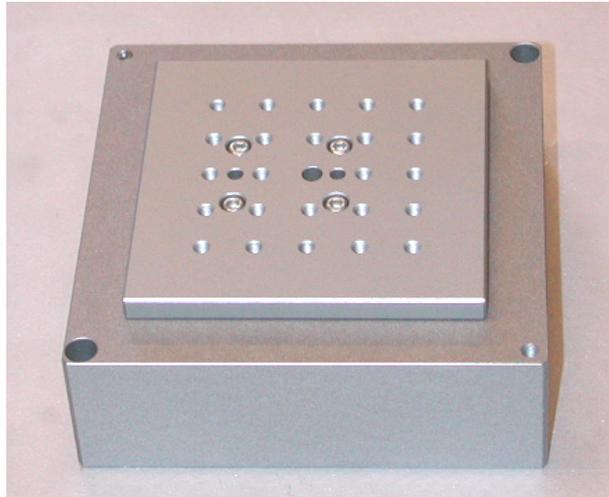


Abb. 10: Zweite Version des Demonstrators des LMS 20

- 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.

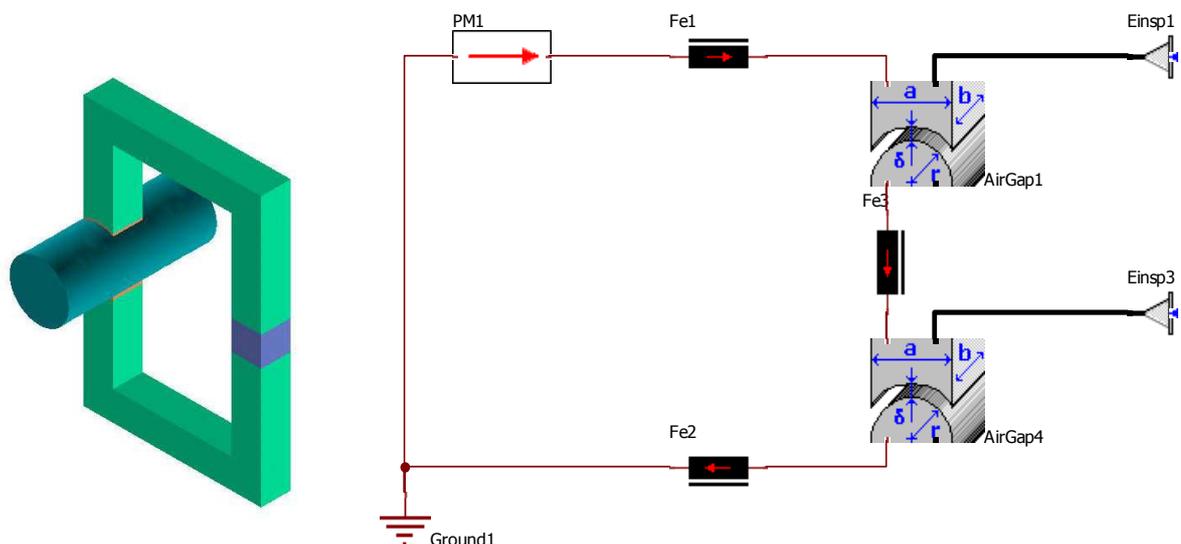


Abb. 11: Vereinfachte Modelle einer magnetisch gelagerten Welle; links: FEM-Modell, rechts: SimulationX-Modell

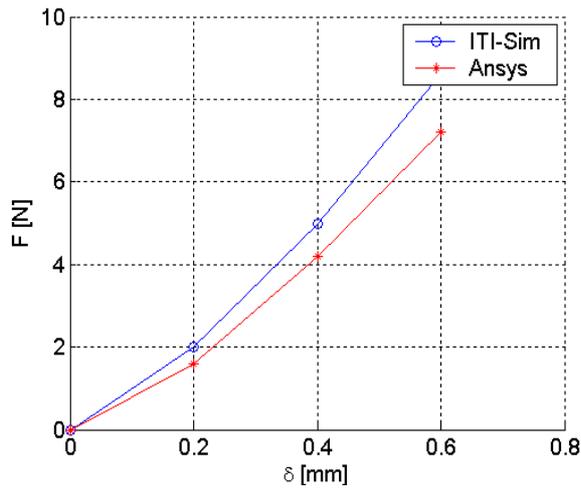


Abb. 12: Vergleich der Simulationsergebnisse der magnetisch gelagerten Welle zwischen ANSYS und SimulationX

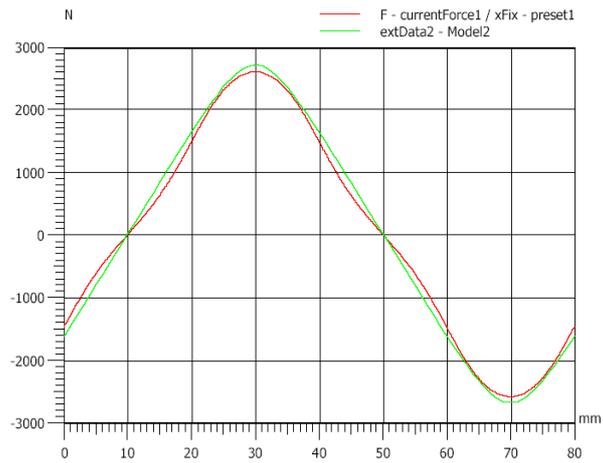


Abb. 13: Vergleich der Simulationsergebnisse eines elektrodynamischen Linearantriebs zwischen ANSYS und SimulationX

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.

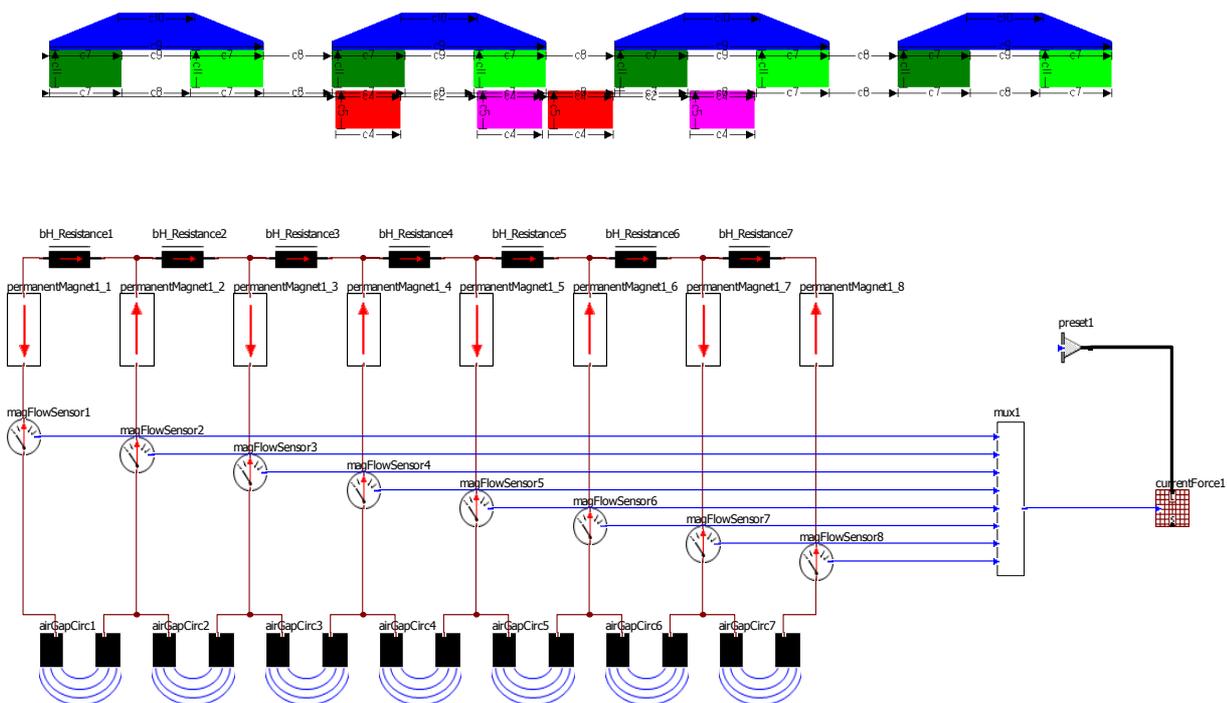


Abb. 14: Magnetkreise (oben) und SimulationX - Modell (unten) des eindimensionalen Direktantriebes

### **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 herstellernunabhängigen 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.