



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

MODAN

www.modan.org

**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, Schneidische 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 erfolge 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 Geheimnisschutz 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 Rechercharbeiten 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 ²	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.

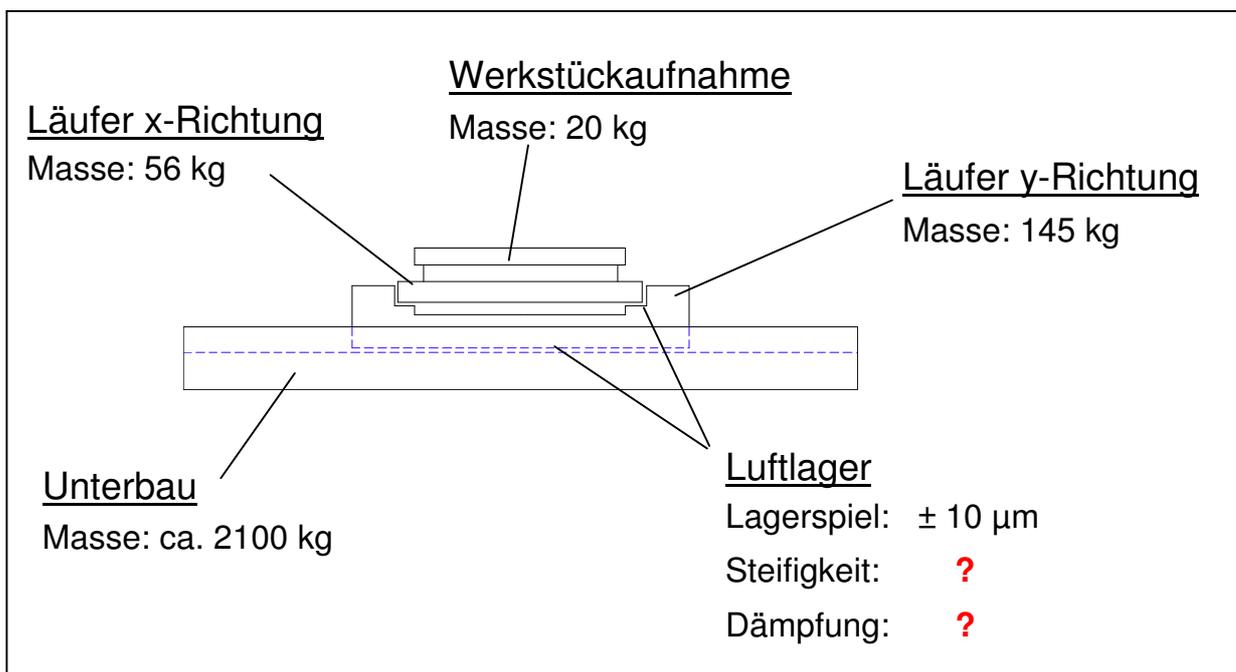


Bild 4: Schematischer Aufbau des Kreuztisches mit Linearmotoren

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.

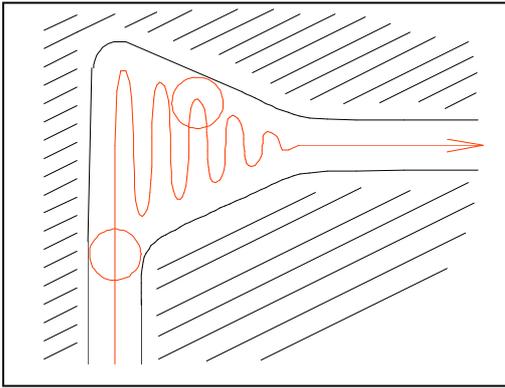


Bild 5: Überschwingen beim Durchfahren einer Ecke

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.

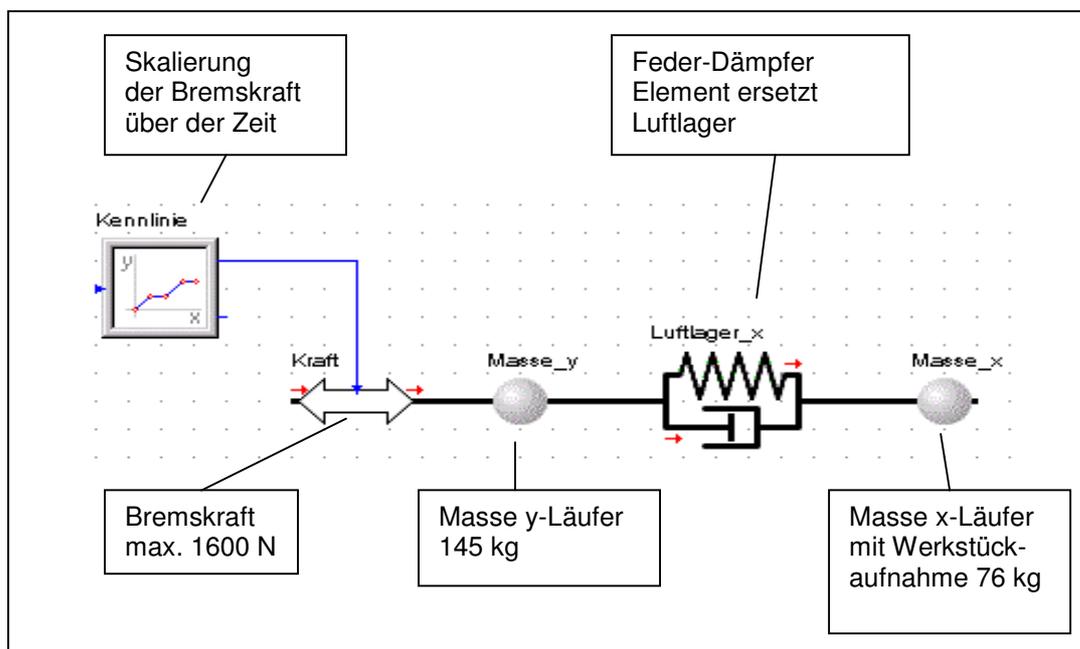


Bild 6: Modell: Konstante Geschwindigkeit von 1 m/s in y-Richtung;
Abbremsen bei Erreichen der Zielposition bis auf 0 m/s.

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.

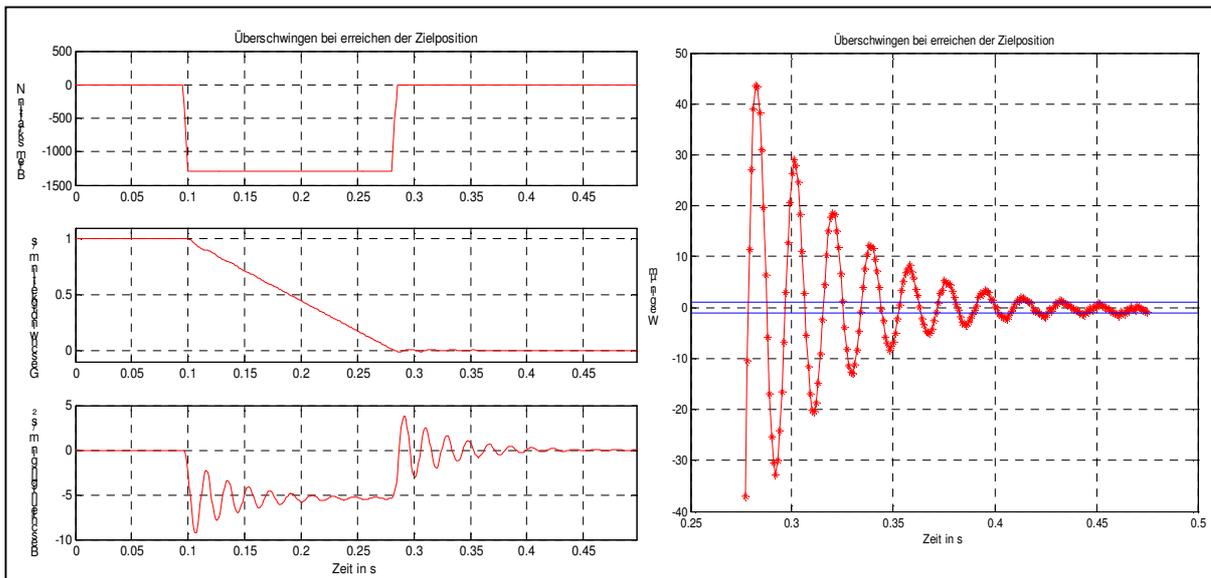


Bild 7: Simulation mit rechteckförmiger Bremskennlinie: links: Bremskraft, Geschwindigkeit, Beschleunigung
rechts: Überschwingen an der Zielposition

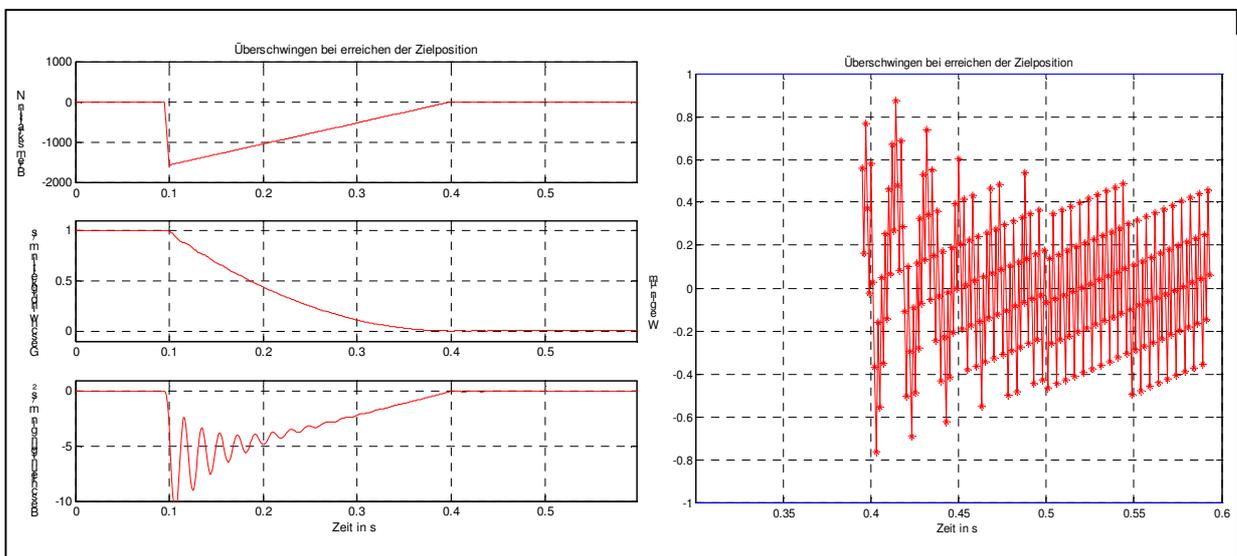


Bild 8: Simulation mit rampenförmiger Bremskennlinie: links: Bremskraft, Geschwindigkeit, Beschleunigung
rechts: Überschwingen an der Zielposition

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.

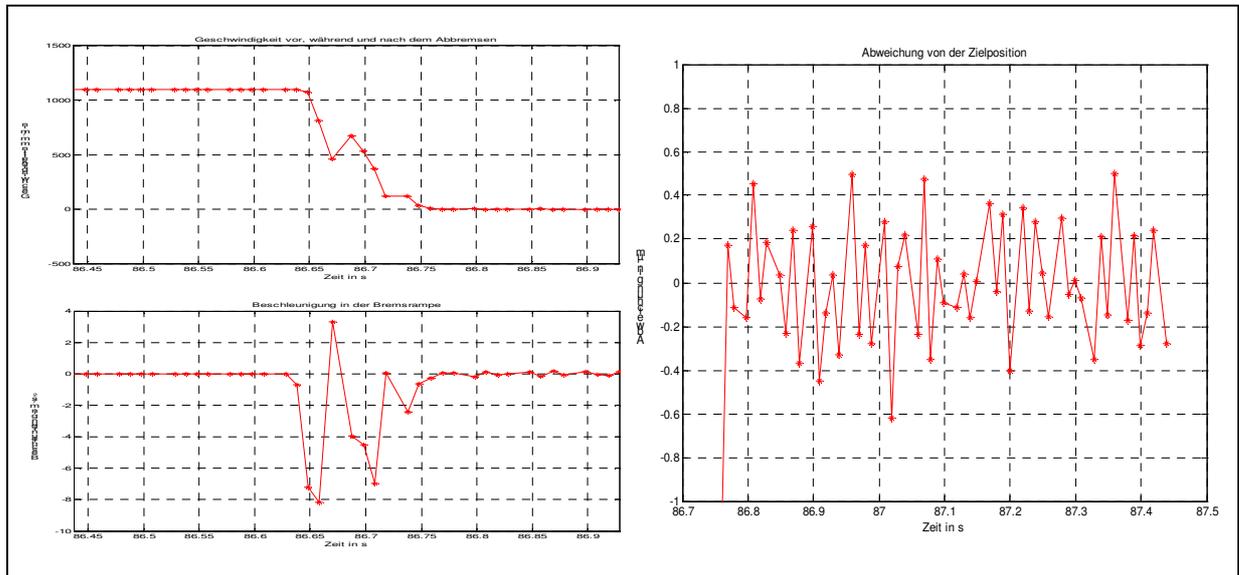


Bild 9: Messergebnisse beim Abbremsen von 1 m/s bis in den Stand
links: Geschwindigkeit und Beschleunigung,
rechts: minimales Überschwingen an der Zielposition

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.

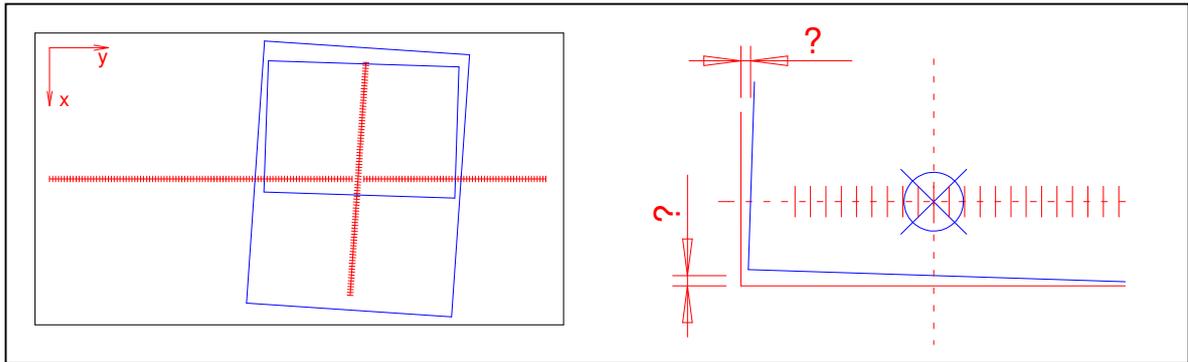


Bild 10: Modell zu Ursachen weiterer Lageabweichungen aufgrund von Spiel, Steifigkeit und Dämpfung der Linearachsen mit Luftlagern

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.

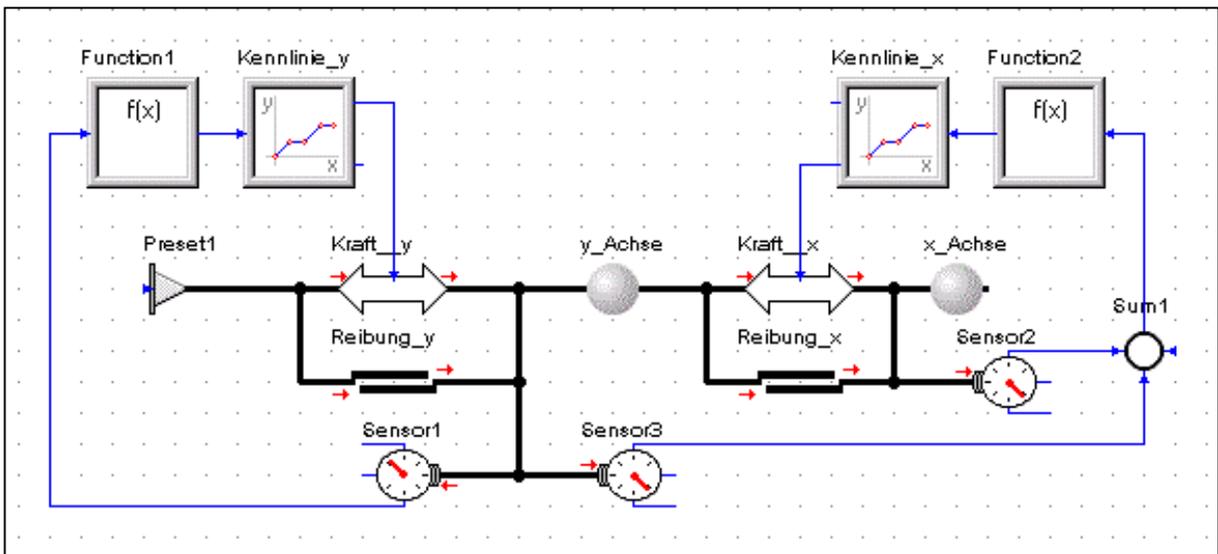


Bild 11: Simulationsmodell fasst alle Einflussgrößen wie Luftlager, Kraft der Faltenbälge, Trägheitsmomente in Kennlinie zusammen

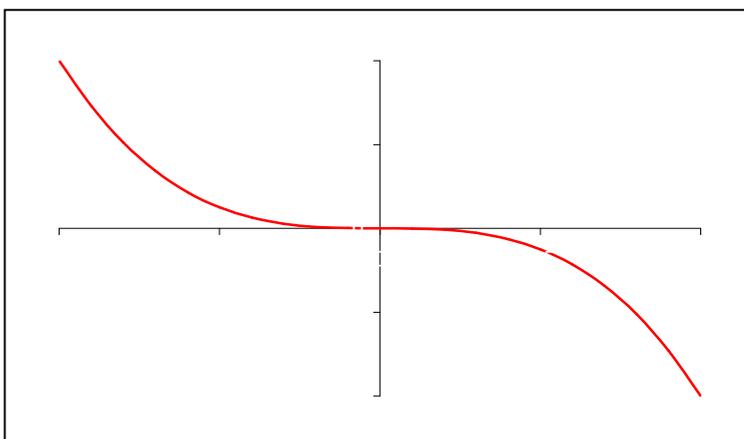


Bild 12: Möglicher Kennlinienverlauf

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

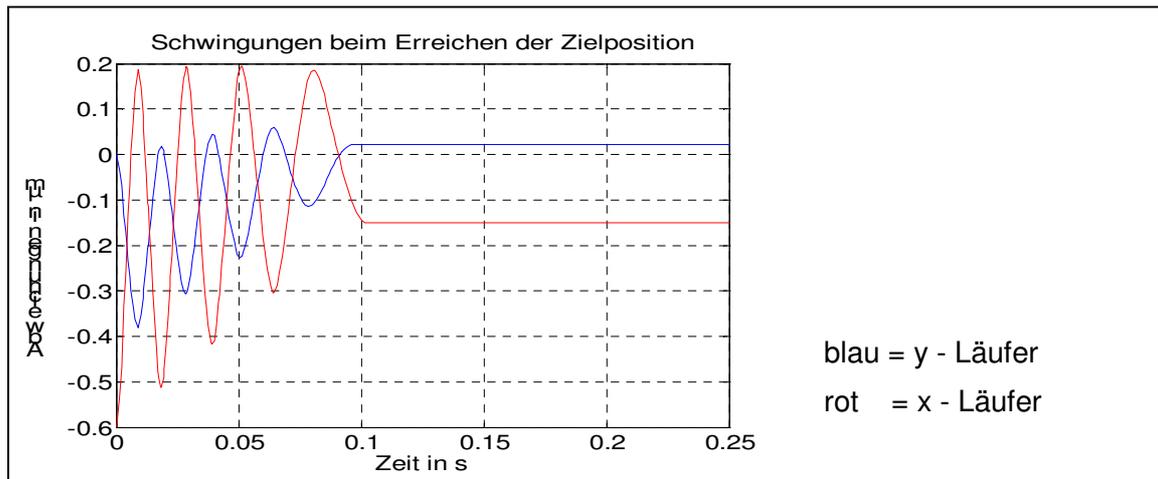


Bild 13: Simulationsergebnisse mit oben genanntem Model: Schwingungen mit etwa 60 Hz; die erreichte Position ist ungleich der Sollposition

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 Mikrointerferometer 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 µm / 160 mm in der y-Achse bzw. 5 µm / 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.

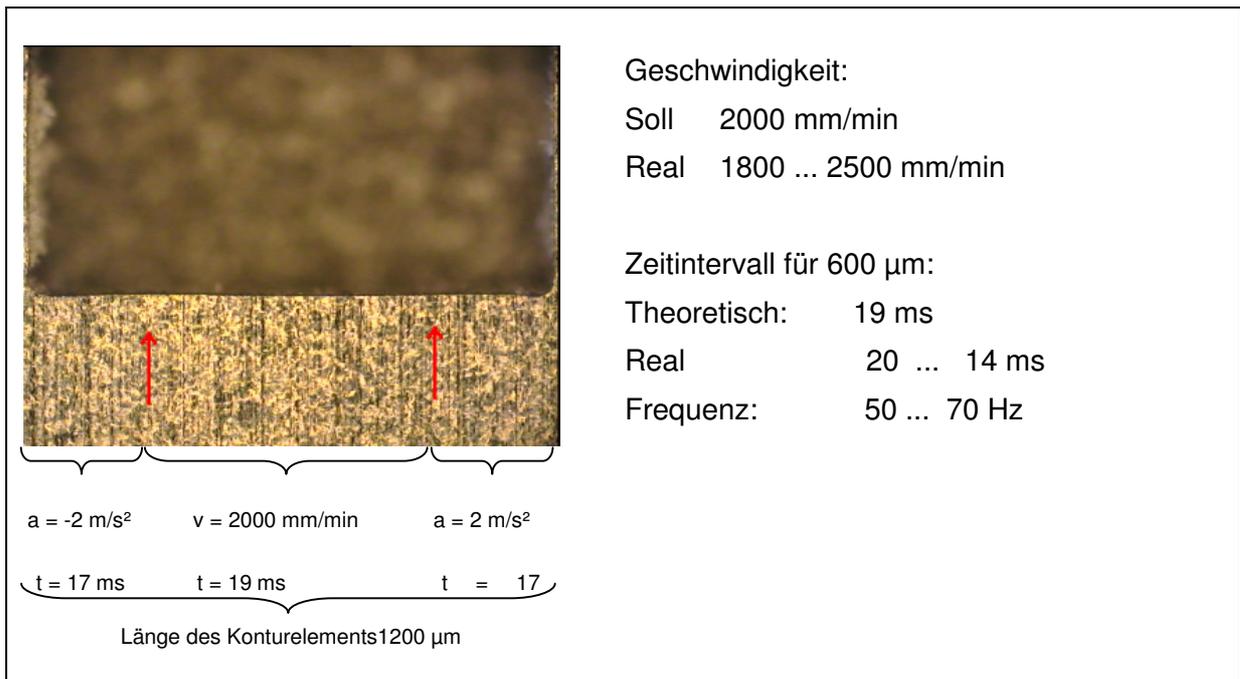


Bild 14: Messergebnisse zur Bahngenaugigkeit anhand eines Testteils

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 $\pm 1 \text{ µm}$ 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.

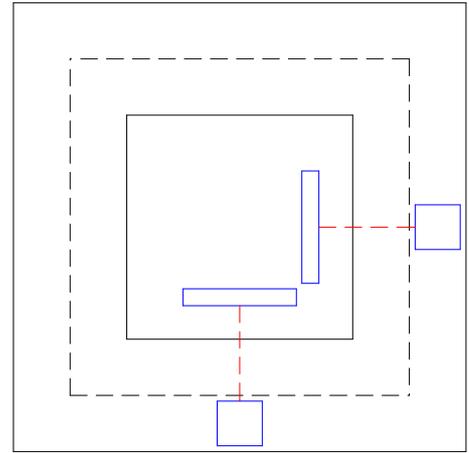


Bild 15: Messaufbau mit zwei Interferometern am Planartisch

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.

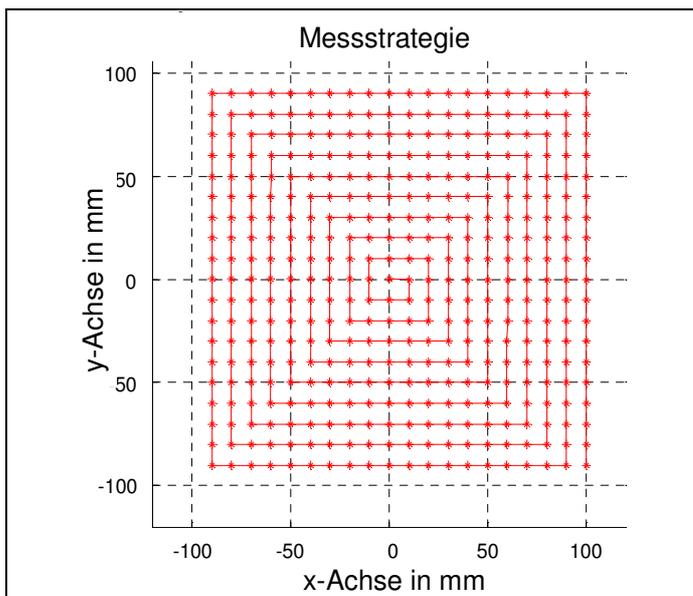


Bild 16: Messstrategie am Planartisch

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

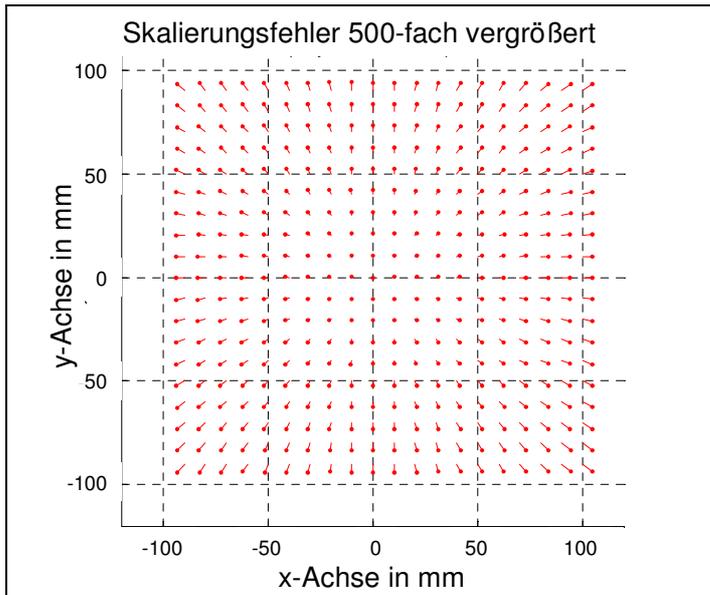


Bild 17: Temperaturabhängiger Skalierungsfehler des Messsystem in beiden Achsen

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 steuerungsseitige Kompensation dieser beiden Fehlerarten mit relativ einfachen Mitteln (Fehlertabelle zur Korrektur der Istposition) möglich ist.

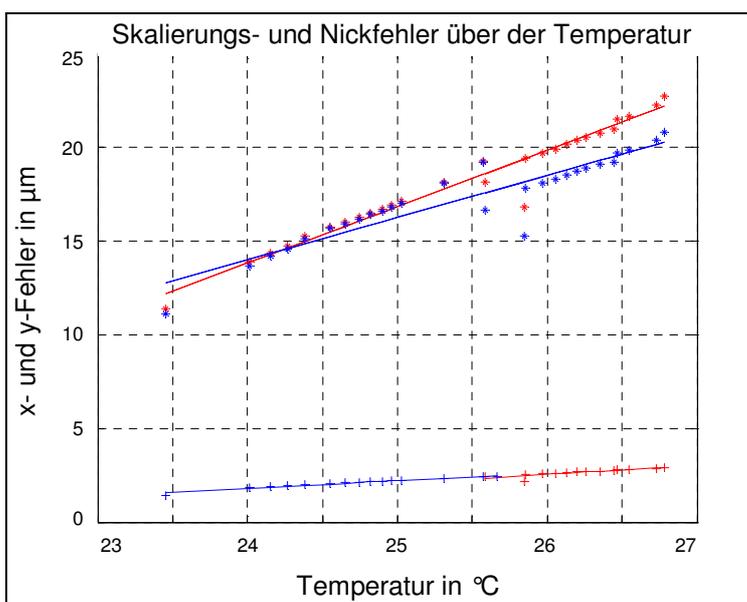


Bild 18: Linearer Zusammenhang von Skalierungs- und Nickfehler von der Temperatur (rot= x-Achse, blau = y-Achse)

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.

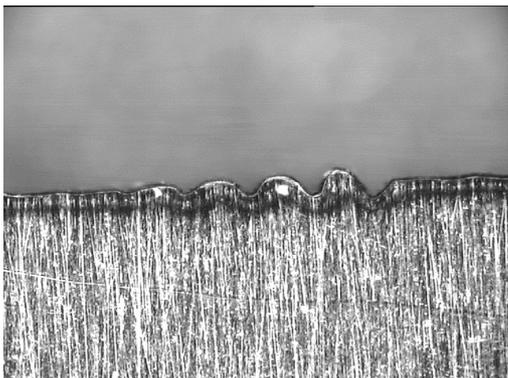


Bild 19: künstlich erzeugte Schwingungen

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 FüÙe des Maschinenunterbaus erkannt (siehe Bild 20). Diese Schwingungen führen zu einer Relativbewegung zwischen Strahlquelle und Positioniersystem. Nach diesen gewonnenen Erkenntnissen wurden die JustierschraubfüÙe des Maschinenunterbaues durch großflächig aufliegende Keilplatten ersetzt.

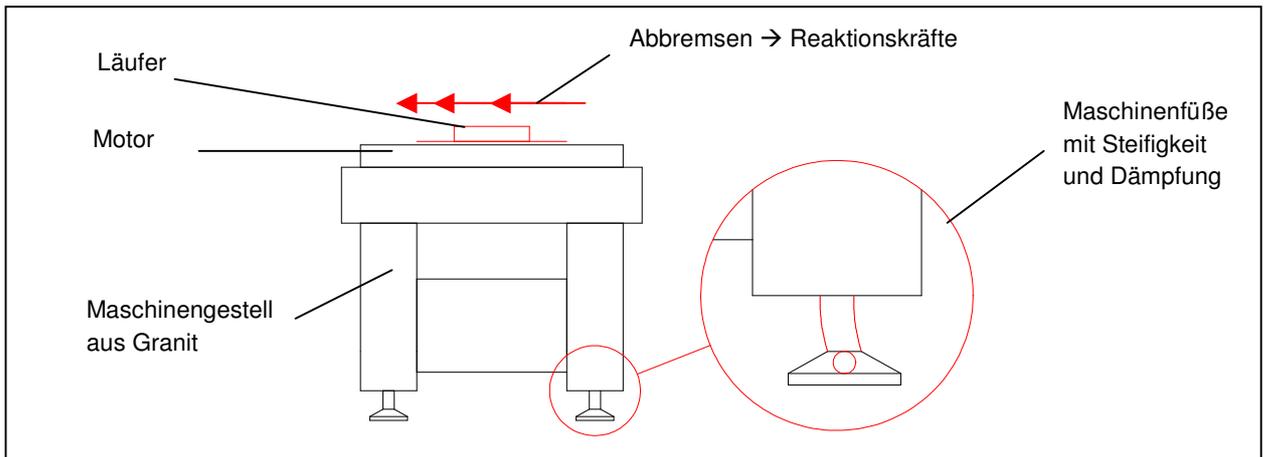


Bild 20: MaschinenfüÙe als Ursache von Schwingungen

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.

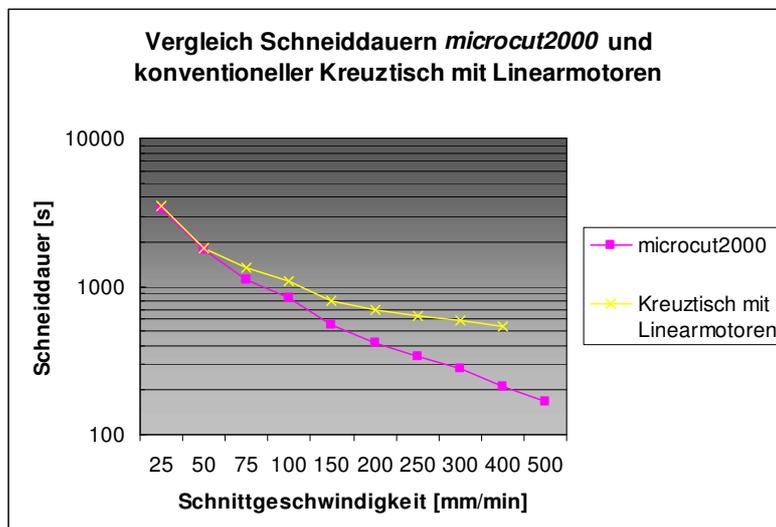


Bild 21: Vergleich Schneiddauern zwischen *microcut 2000* und konventionellem Kreuztisch mit Linearachsen

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 kurzbrennweitigen Fokussieroptik wurden erstmals Schnittspalte bei dünnen Edelstahlfolien von kleiner als 10 μm 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 fertigbarer 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 der 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 gewonnenen 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.