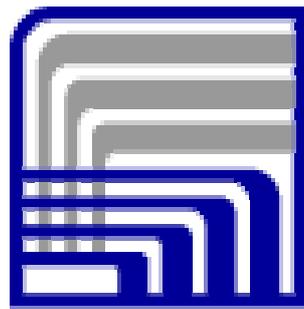


# **Jahresbericht**

**IMMS gGmbH**

**2001**



**IMMS**

# Inhaltsverzeichnis

Positionierung des IMMS im industriellen Umfeld .....	2
Organisationsstruktur des IMMS .....	4
Themenbereich "Mechatronik".....	6
Ausgewählte Fachberichte aus dem Themenbereich "Mechatronik" .....	7
Themenbereich "System Design" .....	18
Ausgewählte Fachberichte aus dem Themenbereich "System Design".....	19
Themenbereich "Mikroelektronische Schaltungstechnik" .....	25
Ausgewählte Fachberichte aus dem Themenbereich "Mikroelektronische Schaltungstechnik" .....	26
Themenbereich "Analyse und Test".....	37
Ausgewählte Fachberichte aus dem Themenbereich "Analyse und Test" .....	38
Mitgliedschaft in Verbänden, Fachgruppen etc.....	40
Vorträge und Veröffentlichungen .....	41
Aufsichtsrat / Wissenschaftlicher Beirat.....	44
Kontakt / Adresse .....	45

# Positionierung des IMMS im industriellen Umfeld

Das IMMS hat sich zur Aufgabe gestellt, eine Brücke zu schlagen, zwischen den Grundlagen für neuartige Technologien, Verfahren und technisch/physikalische Effekte und deren Anwendung und Nutzbarmachung in der Industrie. Ziel ist es, industrielle Partner in die Lage zu versetzen, diese Anwendungen mit vertretbarem Aufwand in Produkte mit wesentlich verbesserten oder auch mit bisher unbekanntem Eigenschaften zu überführen.

Zu diesem Zweck ist das Institut Partner in Kooperationsnetzwerken von Forschungseinrichtungen aus verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen und industriellen Anwendungen. Besonders eng sind die Maschen dieser Netzwerke zwischen Einrichtungen und Unternehmen im Freistaat Thüringen geknüpft.

Kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) finden im IMMS einen geeigneten Partner, mit dem sie rasch und zuverlässig die Kluft zwischen neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen und der Entwicklung innovativer Produkte schließen können. Das IMMS entwickelt hierfür strategisch und marktorientiert Kompetenzfelder, um den prognostizierten F&E-Bedarf rasch mit anwendungsorientiertem Wissen und Methoden, ausgebildetem wissenschaftlichem Personal sowie Geräten und Ausrüstungen bedienen zu können.

Das IMMS hat seit seiner Gründung eine kontinuierliche Entwicklung vollzogen.

Diese Entwicklung dokumentiert sich in einem stetigen Personalaufbau sowie in der Erweiterung und Modernisierung seiner Arbeitsmittel und Infrastruktur, gleichermaßen für beide Standorte Ilmenau und Erfurt.

Der Output des Instituts besteht aus:

- Dienstleistungen in Forschung und Entwicklung
- hochqualifizierten und spezialisierten Ingenieuren
- der Verfügbarkeit modernster Ausrüstungen
- der Befähigung seiner Mitarbeiter im unternehmerischen Denken und Handeln

- der Förderung von Innovationen im industriellen Umfeld

Insgesamt fließt der Output in weit überwiegender Maße kleinen und mittelständischen Unternehmen in Thüringen zu. Die Karte Thüringer Forschungspartner legt Zeugnis über das aktive Vorgehen des IMMS ab. Es ist davon auszugehen, dass zu allen branchenüblichen Thüringer Unternehmen, welche Erzeug-



## Partner Thüringen

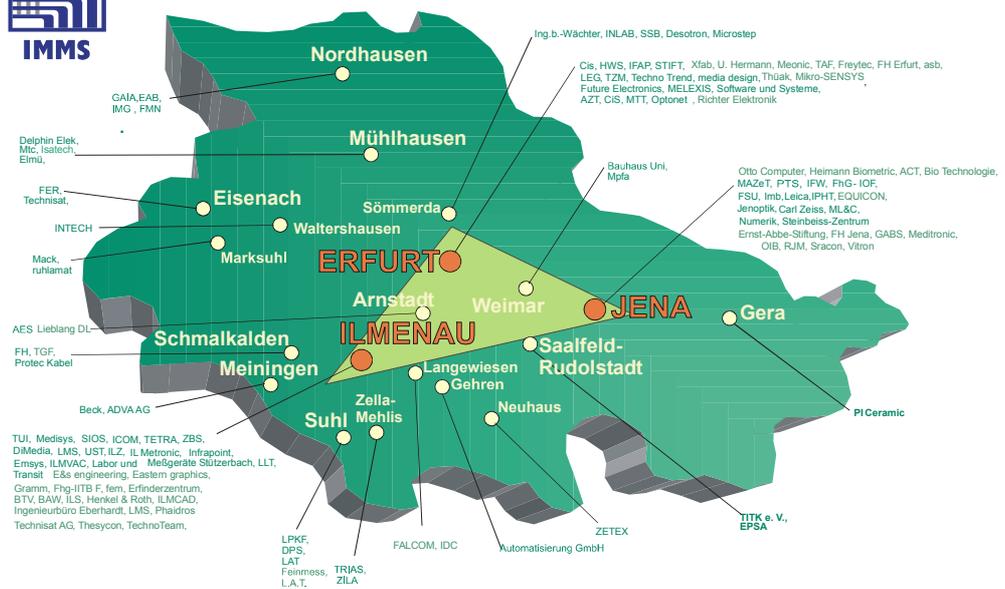


Abb. 1.: Kooperationslandschaft des IMMS in Thüringen

nisentwicklung betreiben, Kundenkontakte bestehen. Darüber hinaus verfolgt das IMMS insbesondere seit dem letzten Jahr das Ziel, mit innovativen Unternehmen, mindestens mit Produktionsstandort in Thüringen, strategische Forschungsallianzen zu schmieden.

Abb. 2 demonstriert überzeugend, dass die Forschungspartner des IMMS überwiegend Thüringer Unternehmen sind. Darüber hinaus gibt es natürlich Forschungsk Kooperationen in einer Vielzahl weiterer Bundesländer, aber auch international nach Österreich, Schweiz, Niederlande, Japan und den USA.

In den zurückliegenden Jahren hat sich die Industrielandschaft Thüringens verändert. Unternehmen, die 1998 noch kleine oder mittelständische Unternehmen waren, gelten infolge von Verschmelzungen heute als Großunternehmen. Entsprechend flexibel müssen die Formen der Zusammenarbeit gestaltet werden. Sicherlich ist das einer der Gründe dafür, dass zwar die Anzahl der Projektpartner und auch die der Projekte nicht deutlich zunahm, aber die Einnahmen aus Industrienaufträgen be-

trächtlich gesteigert werden konnten. Es ist festzustellen, dass in diesem Zusammenhang auch das Interesse der Industrie an der Verwertung der Forschungsergebnisse in Produktinnovationen signifikant zugenommen hat.

Die Projektgröße für Auftragsforschung nahm deutlich zu. Es werden mehr größere Projekte abgearbeitet.

Das korreliert mit den Erfahrungen zum Aufwand und zum Zeitbedarf, der geleistet werden muss, um von angewandter Forschung bis zum Prototypen, als Vorstufe eines Produktes zu kommen.

Derzeit bestehen bereits mehrere Rahmenverträge mit Thüringer Unternehmen, die zum Zweck der umfassenden Nutzung von Forschungsergebnissen für die strategische Entwicklung von Produktvorstufen (Prototypen) abgeschlossen wurden. Darüber hinaus bestehen

weitere bilaterale Kooperationen mit vergleichbaren Zielstellungen.

Es ist gelungen, im Rahmen dieser Partnerschaften die Voraussetzungen für jeweils völlig neuartige Produktlinien zu schaffen, an deren internationaler Vermarktung die Unternehmen mit Unterstützung des IMMS derzeit intensiv und erfolgreich arbeiten.

Im weiteren kooperiert das IMMS mit einer Vielzahl von Firmen im Rahmen von Verbundprojekten und projektorientierter Auftragsforschung.

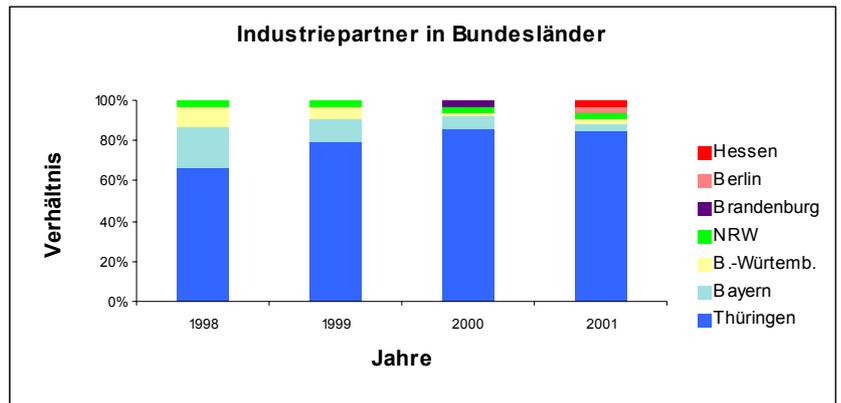


Abb. 2: Industriepartner in Bundesländer

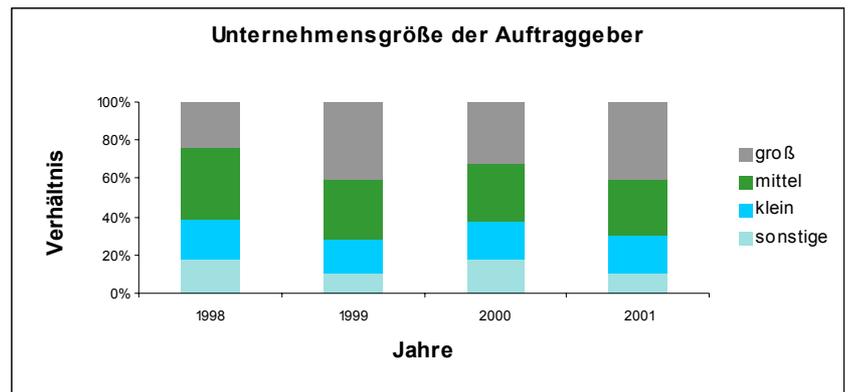


Abb. 3: Unternehmensgröße der Auftraggeber

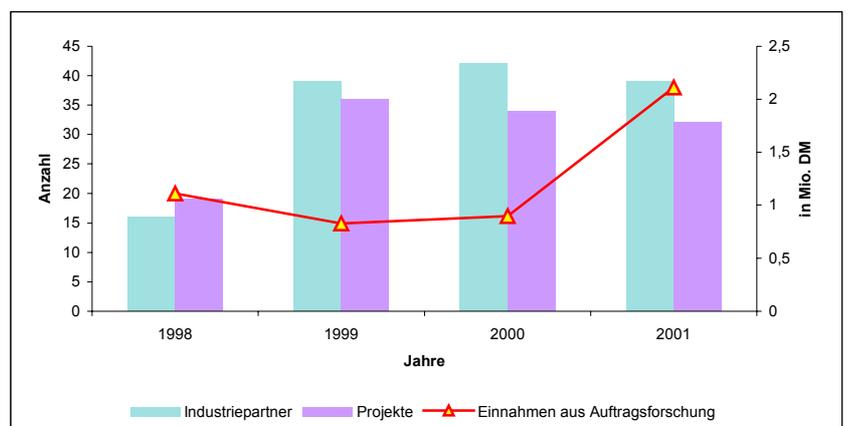


Abb. 4: Übersicht Einnahmen aus Auftragsforschung

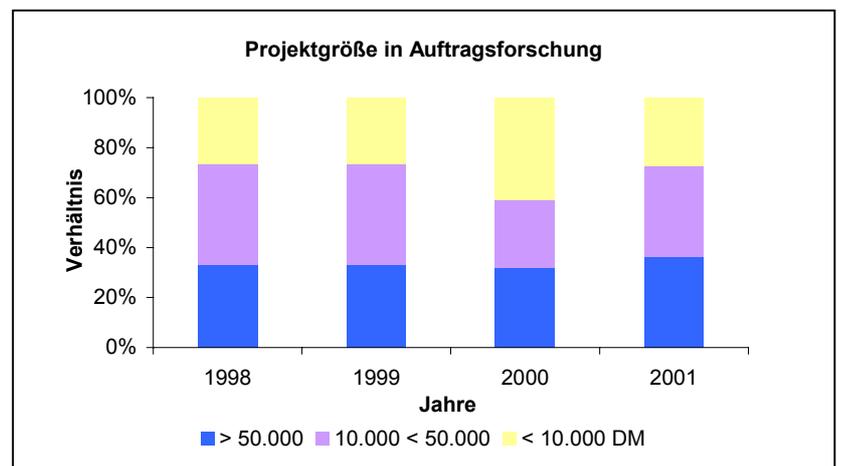


Abb. 5: Projektgröße in Auftragsforschung

# Organisationsstruktur des IMMS

Um administrative Grenzen durchlässig zu gestalten und die wissenschaftliche Durchdringung von Forschungsthemen zu fördern, hat sich das IMMS eine thematisch orientierte Struktur gegeben.

In den Themenbereichen Mikroelektronische Schaltungstechnik, System Design, Mechatronik und Analyse & Test wird die Basisarbeit zur Sicherstellung der wissenschaftlichen Qualität und Ausprägung der einzelnen anwendungsbezogenen, marktorientierten Themengebiete geleistet. Die Themenbereichsleiter sorgen gemeinsam mit ihren Spezialisten für die Durchdringung des Wissensgebietes in der

Impulsen, die aus den gegenwärtigen Entwicklungen an den verschiedenen Märkten erkennbar werden. Die anwendungsbezogene Forschung und Entwicklung konkretisiert sich deshalb in adäquaten Themengebieten. Aufgabe der Themengebietsleiter ist es, gemeinsam mit ihren Mitarbeitern entsprechende Impulse zu generieren. Dies geschieht zum einen aus der Forschungs- und Entwicklungstätigkeit selbst, die bestehende Lücken und Mängel für die zielorientierte Anwendungen von Grundlagen erkennen lässt und Rückschlüsse über den gegenwärtigen und zukünftigen Bedarf der Industrie ermöglicht, zum anderen aus der

## Organisationsstruktur - IMMS

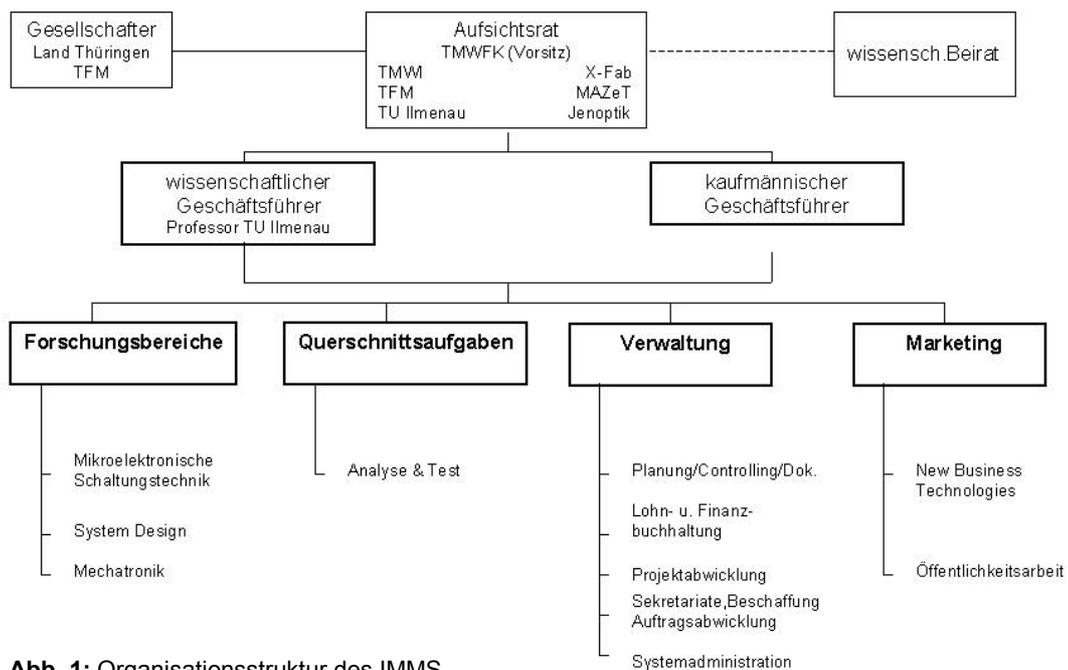


Abb. 1: Organisationsstruktur des IMMS

jeweils erforderlichen wissenschaftlichen Tiefe und Breite, damit ausreichend Wissensvorlauf in erforderlicher Qualität bereitsteht, um Brücken zu bauen, über welche sich die Industrie ausgehend vom Stand der Technik rasch und mit geringem Risiko neue Lösungen mit möglichst hohem Innovationspotential unter Berücksichtigung internationaler Strategien erschließen kann. Hierzu dienen Wissenschaftskooperationen mit universitären und anderen Forschungseinrichtungen im besonderen aber auch eigene Arbeiten an grundlegenden Forschungszielen.

Zur Orientierung innerhalb der Breite dieser Basis bedarf es einer ausreichenden Zahl von

systematischen Analyse bestehender Märkte und deren zukünftigen Anforderungen.

Es kommt nicht nur darauf an, ständig neues Wissen zu erwerben, sondern auch zu bewahren und in der institutionellen Organisation nutzbar zu machen. Dies ist für das IMMS in zweierlei Hinsicht von großer Bedeutung. Nicht nur der Anspruch auf höchste Qualität wissenschaftlicher Ergebnisse sondern auch die strategische Orientierung auf deren Verwertung in industriellen Anwendungen setzt Spezialisten voraus, die über ein besonderes Niveau fachlicher Qualifikation verfügen und in der Lage sind, dieses in kollektiver Arbeit, durch Führung und Anleitung von Teams in immer wie-

der neue Problemlösungen zu verwandel.  
Das Marketing ist für die Planung der strategischen und taktischen Marketingaktivitäten des IMMS auf der Basis regelmäßiger Analysen der Marktsituationen in den vom IMMS gewählten Segmenten und die Herstellung eines adäquaten Angebotsportfolios verantwortlich. Zu diesem Zweck nutzt es die Kompetenzen der Themenbereiche durch Anleitung und Moderation der Themengebiete- und Themenbereichsleiter bei der Erarbeitung ihrer Marketingpläne. Es trägt Verantwortung für die Planung, Integration und Durchführung aller Einzelmaßnahmen mit dem Ziel, ein widerspruchsfreies Bündel von Einzelmaßnahmen auf dem Markt in Erscheinung treten zu lassen. Es liefert Beiträge für die Konzipierung und Umsetzung von Verwertungsstrategien für Forschungsergebnisse, Entwicklung einer geeigneten Patent- und Lizenzpolitik unter Berücksichtigung des politischen Umfeldes, Initiierung der Verwertung über Kooperationen

und Entwicklung geeigneter Businessmodelle sowie zur Definition eines konkreten Dienstleistungsangebots, im abgestimmten Verhältnis zur Gemeinnützigkeit des Unternehmens. Darüber hinaus trägt es Verantwortung für die Aufrechterhaltung der Corporate Identity unter Berücksichtigung moderner Kommunikations- und Businessstrukturen und sorgt für eine angemessene Präsenz und Wirksamkeit in Netzwerken und Clustern.

Die Verwaltung des IMMS arbeitet sehr effektiv. Ihre wesentlichste Aufgabe ist die Kontrolle der einzelnen Projekte unter Berücksichtigung der verschiedenen Finanzierungsquellen. Mit geeigneten Instrumenten unterstützt sie die Fachkräfte bei der wirtschaftlichen Führung der Forschungsprojekte, sorgt für ordnungsgemäße Abrechnung öffentlich geförderter Vorhaben und bewertet regelmäßig das Risikopotenzial bezüglich der Gemeinnützigkeit und des projektfinitzierten Teils.

Ilmenau, im Januar 2002



Prof. Dr. Gerd Scarbata  
wiss. Geschäftsführer



Hans-Joachim Kelm  
kfm. Geschäftsführer

# Mechatronik

Im Themenbereich Mechatronik werden Präzisionsantriebssysteme für verschiedenste Applikationsfelder entworfen, analysiert und getestet. Neben dem konstruktiven Entwurf der zum Teil sehr komplexen und heterogenen Systeme erfolgt in der Regel eine Optimierung auf der Basis einer Modell-

bildung und Simulation. Diese gestattet eine gute und fundierte Vorhersage des Systemverhaltens, z.B. bezüglich der mechanischen Deformation, der Dynamik und des magnetischen oder thermischen Verhaltens, und reduziert die Anzahl der Designzyklen auf ein Minimum. Die verwendeten Werkzeuge hierfür sind u.a. Ansys, Maxwell und Matlab/Simulink. Der konstruktive Entwurf erfolgt mit Hilfe von Mechanical-Desktop oder Pro/Engineer.

Die im Themenbereich Mechatronik anvisierten Themengebiete

- Direktantriebssysteme
- Antriebe für UHV-Einsatz
- Analysegeräte und Instrumente und
- Komplexe mechatronische Systeme

überschneiden sich sowohl innerhalb des Themenbereiches Mechatronik und bieten zudem unmittelbare Anknüpfungspunkte zu den Themenbereichen System Design und Schaltungs- und Messtechnik.

Die Arbeitsweise bei der Lösung von Projektaufgaben zeichnet sich insbesondere durch eine Betrachtung und Optimierung der Systeme als Ganzheit aus und basiert auf einer engen interdisziplinären Zusammenarbeit von Fachkräften in Projektteams und mit dem Kunden.

Die am IMMS entworfenen Antriebssysteme zeichnen sich z.B. durch folgende Besonderheiten aus:

- hohe Genauigkeit und Dynamik auch bei Bahnbewegungen (multiaxiale Direktantriebe)
- Einsatz unterschiedlicher physikalischer Wirkprinzipien (z.B. elektrodynamisch, elektromagnetisch, piezoelektrisch)
- Einsatz neuartiger innovativer Steuerungsstrategien

Neben dem Entwurf neuartiger applikations- und kundenspezifischer Antriebslösungen sowie deren Adaption mit geeigneter Sensorik



und Steuerungstechnik und Integration in Geräte und Anlagen verfügt der Themenbereich gleichzeitig über umfangreiches Know-How beim Gerätedesign aus konventionellen Antriebs-, Sensor- und Steuerungskomponenten.

Eine umfangreiche Ausstattung an Mess- und Steuerungstechnik ermöglicht eine Optimierung und gute Bewertung der Antriebseigenschaften sowie das Rapid-Prototyping beim Entwurf optimal angepasster Steuerungen.

Folgende Systeme werden derzeit entwickelt und untersucht:

- Magnetische Lagerung von Wellen (S. 10)
- Antriebe für HV und UHV Anwendungen (S. 14)
- Anlagen und Komponenten zur Fertigung Mikro-Elektro-Mechanischer Systeme MEMS-Fab (S. 12)
- Sensorik und Steuerkomponenten für planare Hybridschrittantriebe (S. 8)
- 5D-Präzisionspositionierssystem zum Polieren von Hochleistungsoptiken (S. 7)
- Systeme zur adaptiven Last- und Schwerpunkt-Identifikation für Präzisionsantriebe (S. 16)
- Antriebssystem für 3D- Präzisions-Messmaschine (S.13)
- Planare elektrodynamische Direktantriebssysteme
- Mikro-Tribologiesysteme
- Entwurf mehrachsiger digitaler Regelsysteme.

Künftig anvisierte Aufgabenstellungen sind:

- Entwurf und Implementierung von Bahnsteuerungskonzepten für multiaxiale Antriebssysteme
- Antriebe für Stepper und Lithographiesysteme
- Optische Oberflächenmesstechnik
- Nanopositioniersysteme großer Bewegungsbereiche

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Christoph Schäffel

Tel.: +49 (3677) 678333

Email: christoph.schaeffel@imms.de

# Entwurf, Aufbau und Erprobung eines 5-Achs-Positioniersystems

## Zielstellung

Auf dem Gebiet magnetisch angetriebener und luftgeführter Systeme wurde im Themenbereich Mechatronik in den vergangenen Jahren umfangreiches Wissen bei der Realisierung von Antriebs- und Positioniersystemen für Anwendungen in der Laserbearbeitung aufgebaut. Dabei entstand neben der Beherrschung der mechanischen Themen Know How für die Realisierung der Steuerungen. Die Systeme arbeiten bisher mit einer Steuerung für zwei Achsen. Für das Polieren von optischen Bauelementen wird ein Positioniersystem benötigt, welches mit der Steuerung von fünf Achsen eine neue Herausforderung darstellt. Realisiert werden sollen Fahrwege in x-, y- und z-Richtung mit einer Positioniergenauigkeit von 10  $\mu\text{m}$  bzw. 2  $\mu\text{m}$  bei Fahrwegen von max. 400 mm. Weiterhin soll eine Kippbewegung um x- und y-Achse bis zu einem Winkel von 5° mit einer Winkelgenauigkeit von  $\approx 4''$  realisiert werden. Bewegt werden Werkstücke mit einem Gewicht von  $\leq 10\text{kg}$  bei einer zu realisierenden Bahnengenauigkeit von  $\pm 10\mu\text{m}$ . Das Positioniersystem wird im Rahmen eines gemeinsamen Projektes mit der FSU Jena entwickelt, konstruiert, gebaut und erprobt.

## Forschungsverlauf und -stand

Das Forschungsprojekt gliedert sich in folgende Schwerpunkte:

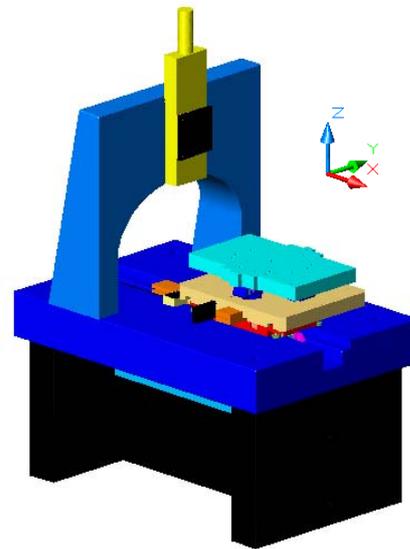
- Konzeption und Auswahl von Lösungsprinzipien für die einzelnen Bewegungsabläufe
- Reglerentwurf und hardwareseitige Implementierung
- Auswahl von Sensorprinzipien, Entwurf und Aufbau der Sensoren und der dazugehörigen Elektronik
- 3D-Konstruktion und Bau eines Prototyps

Um den Einfluss von mechanischen Störeinflüssen, insbesondere Schwingungen, nahezu ausschließen zu können, wurde als Basis des Systems ein massiver Granittisch gewählt, auf den ein einteiliges Portal ebenfalls aus Granit zur Befestigung der z-Achse aufgesetzt ist. Als hochauflösende z-Achse wird ein handelsübliches Achsmodul eingesetzt. Die Bewegung der x- und y-Trägerplatten in x- und y-Richtung realisiert ein elektrodynamischer linearer Direktantrieb. Die Tische gleiten separat auf vier Luftführungen über der Granitplatte. Die axiale Führung der x-Platte erfolgt in Bewegungsrichtung über ein abgeglichenes System von Magnetbrücken und Luftführungen entlang einer hochpräzisen, in die Granitplatte eingearbeiteten, Führungsfläche; die Luftführung der y-Platte entlang eines hochpräzisen Führungsbalkens, der von der x-Platte getragen wird. Die Wegmessung erfolgt jeweils mittels eines optischen linearen Messsystems.

Zentrisch auf der y-Platte ist die Kippplatte auf einem vorgespannten Präzisionskardangeln gelagert. Die Einleitung der Kippbewegung erfolgt durch vier symmetrisch angeordnete Voice-coil-Direktantriebe an den Randzonen unterhalb der Kippplatte. Hochauflösende modifizierte Linear-messsysteme messen an den Gelenkhälften die Winkelbewegungen. Das Positioniersystem hat Abmessungen von 1200mm x 800mm x 1700mm und ein Gesamtgewicht von ca. 1000kg. Die Steuerung erfolgt mittels eines Industrie-PC. Die Komponenten sind in einem 12-HE Standschrank untergebracht.

## Ausblick

Die erarbeitete Antriebskonzeption ist auf Grund der sehr hohen Steifigkeit der Luftführungen und des



Granitgestells sowie nicht zuletzt wegen der bevorzugten Wahl von Direktantriebs-Komponenten sehr gut geeignet, die hohen Anforderungen der Spezifikation zu erfüllen. Insbesondere die Luftführungen und Direktantriebe garantieren durch ihre Berührungsfreiheit eine hohe Lebensdauer bei gleichbleibender Genauigkeit sowie durch ihre Stick-Slip-Freiheit eine hohe Gleichförmigkeit der räumlichen Bahnbewegung. Das User-Interface visualisiert die Bahnkurve der x-y-Ebene und die Ist-Position der Antriebsachsen.

Die Steuerungssoftware wird komplett in Eigenleistung entwickelt.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Hans-Ulrich Mohr

Tel.: +49 (3677) 678318

Email: hans-ulrich.mohr@imms.de

# Nichtlineare Regelung von Schrittmotorantrieben mit Lageerfassung über Sensoren und Fehlererkennungsalgorithmen

## Zielstellung

Im Maschinenbau werden weltweit höhere Geschwindigkeiten und Genauigkeiten gefordert. Für die Antriebe ergibt sich daraus ein Trend zum Einsatz von Direktantrieben, die die Nachteile des klassischen Rotationsmotor-Spindel-Antriebs wie Spiel, Reibung, Geräusche und Nachgiebigkeit vermeiden. Der Wegfall der Getriebe ermöglicht geringere Massen und eine Verbesserung der Dynamik des Antriebs. Um die Möglichkeiten hinsichtlich Präzision und Dynamik auszuschöpfen, die sich aus den konstruktiven Vorteilen der Direktantriebe ergeben, genügt es nicht, die Antriebe in der offenen Steuerkette als klassischen Schrittmotor zu betreiben. Benötigt werden statt dessen eine Lageerfassung und Regelung des Antriebs. Im Rahmen eines vom Thüringer Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kultur geförderten Verbundprojektes werden moderne, nichtlineare Algorithmen zur Regelung von Schrittmotoren entwickelt. Als Basis für die am Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik (IAS) der TU Ilmenau zu entwerfenden Regelungen dient das im Institut für Mikrosystemtechnik, Mechatronik und Mechanik (IMMM) der TU Ilmenau entwickelte dynamische Modell der Antriebe. Die realisierbare Leistungsfähigkeit der Positions- oder Bahnregelung wird dann wesentlich von den Eigenschaften des Reglers sowie von der Qualität der zu Verfügung stehenden Positionsmesssignale bestimmt. Die Aufgabe, in Zusammenarbeit mit den Industriepartnern ein in die Antriebe integrierbares Wegmesssystem zu entwickeln, dessen Signale als Eingangsgrößen für leistungsfähige Regelungen dienen können, wird im Rahmen des Verbundprojektes am Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gGmbH Ilmenau (IMMS) gelöst. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Systemen für Planarantriebe, da hier bisher kostengünstige, robuste, hinreichend leistungsfähige Systeme fehlen.

## Forschungsverlauf und -stand

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene physikalische Grundprinzipien auf ihre Eignung für die Wegmessung überprüft. Resultat dieser Untersuchungen war, dass als Maßverkörperung nur die Statorzahnung in Frage kommt. Alle anderen Lösungen schränken insbesondere bei Planarantrieben die Freiheiten beim Einbau und damit die möglichen Anwendungen stark ein. Weiterhin weisen diese Verfahren eine erhöhte Anfälligkeit gegenüber Verschmutzungen und anderen Umweltein-

flüssen auf und sind auf Grund ihrer Aufwendigkeit teurer und schwerer zu handhaben.

Dementsprechend wurden im weiteren verschiedene Messverfahren untersucht, welche die Statorzahnung als Maßverkörperung benutzen. Untersucht wurden optische, kapazitive und magnetische Verfahren. Die Bewertung der Verfahren erfolgte nach den Kriterien

- Leistungsfähigkeit, d.h. Auflösung und Genauigkeit
- Robustheit gegen Störungen und Umwelteinflüsse
- Haltbarkeit, Wartungsaufwand, Kosten

sowie aus technologischer Sicht, d.h. Fertigungsaufwand und Integrierbarkeit in vorhandene Systeme. Ergebnis der Untersuchung war, dass eine magnetische Abtastung der Statorzähne den besten Kompromiss zwischen den sich teilweise widersprechenden Kriterien darstellt.

Im weiteren Verlauf des Projektes wurden umfangreiche Studien zur Gestaltung und Optimierung von Geometrie und Material solcher Sensoren durchgeführt. Die Optimierung wurde beschleunigt, indem als Vorstufe zur extrem rechenaufwendigen FEM-Simulation Berechnungen mit Ersatzmodellen vorgenommen wurden. Die tendenziellen Abhängigkeiten der Signale von Geometrie und Material konnten aus diesen Ersatzmodellen weitgehend richtig abgeleitet werden, nur die Signalform selbst ließ sich nicht mit ausreichender Genauigkeit vorhersagen, da es nicht möglich war, die Veränderungen des magnetischen Widerstands im Arbeitsluftspalt bei Bewegung des Sensors hinreichend genau im Ersatzmodell wiederzugeben. Hier waren die genaueren, aber sehr aufwendigen 3D-FEM-Simulationen notwendig.

Zielstellung der Optimierung war, eine möglichst große Signalamplitude bei möglichst sinusförmigen Signalen zu erreichen, um eine einfache Auswertung der Signale zu ermöglichen. Auch sollen die Signale eine möglichst große Robustheit gegenüber Störungen und Toleranzen aufweisen. Die Parameterstudien zeigten, dass sich beide Ziele nicht in einer Lösung vereinbaren lassen. Daher wurde mit den Projektpartnern aus der Firma L-A-T Linear Antriebs Technik Suhl AG (LAT) vereinbart, zwei Lösungen zu entwickeln und experimentell zu testen. Die experimentelle Überprüfung der neuen Sensoren hat ergeben, dass der entstehende Messfehler bei einer einfachen atan-Auswertung gegenüber der Startlösung geringer ausfällt (s. Abb. 1).

## Ausblick

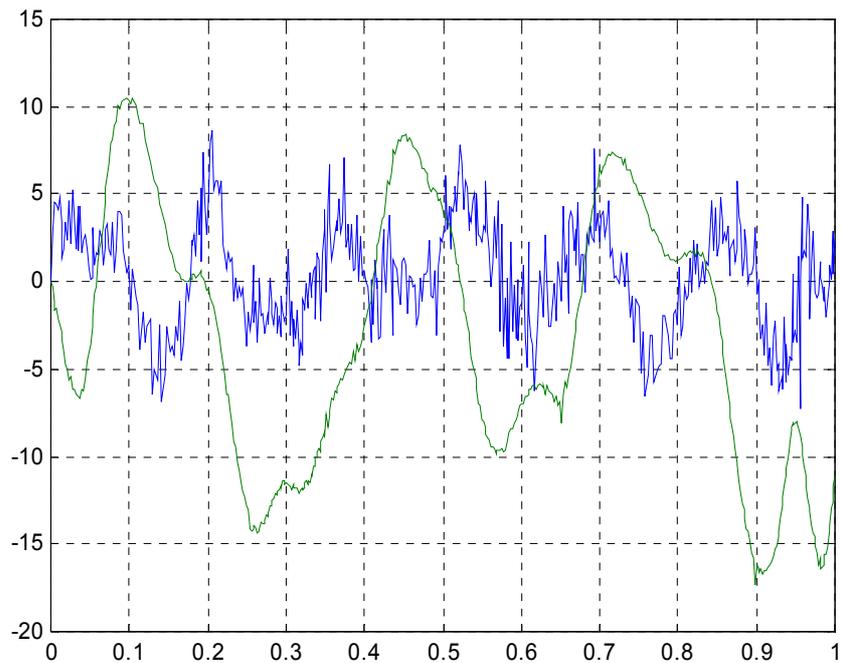
Der Schwerpunkt der zukünftigen Arbeiten liegt in der Entwicklung eines Algorithmus zur automatischen Fehlererkennung und Korrektur der Messwerte um die Genauigkeit des Systems weiter zu verbessern. Weiterhin sind die Sensoren in die nichtlinearen Regelungskonzepte einzubinden um zu beweisen, dass sich mit diesen Sensoren hochpräzise, bahngesteuerte planare Schrittmotorantriebe realisieren lassen.

Ansprechpartner:

Dipl.-Math. Michael Katzschmann

Tel.: +49 (3677) 678321

Email: michael.katzschmann@imms.de



**Abb. 1:** Vergleich der Messfehler in  $\mu\text{m}$  für die Startlösung (grün) und eine optimierte Lösung (blau), als Referenzsystem wurde ein Laserinterferometer benutzt

# Entwurf, Konstruktion und Erprobung von Magnetlagerungen für hochdrehende Laser-Radial-Verdichter unter Berücksichtigung modernster Regelungsstrategien

## Zielstellung

Magnetlager haben sich in den vergangenen Jahren auf Grund ihrer Systemvorteile, wie Wartungsfreiheit und nahezu reibungsfreier Lagerung, ein großes Anwendungsspektrum erschlossen. Diese Charakteristika prädestinieren sie u.a. zum Einsatz in Vakuumpumpen und Verdichtern. Höhere Rotationsgeschwindigkeiten in Folge verringerter Reibung erlauben den Vorstoß in neue Dimensionen bei der Pumpenleistung. Die Wartungsfreiheit vermeidet Stillstandszeiten und trägt so in erheblichem Umfang zur Senkung der Betriebskosten bei, da Verdichter oft in hochwertigen Industrieanlagen, wie Hochleistungslasern, zum Einsatz kommen.

Um Systemspezifika der Magnetlager beim Design zu berücksichtigen, erfolgt das Design von Wellenfunktionalität und -lagern idealerweise als Gesamtsystem. Diese Vorgehensweise, das Neudesign der Welle, lässt sich jedoch auf vorhandene Fertigungssysteme aus Kostengründen oftmals nicht übertragen. In solchen Fällen erfolgt ein Redesign der Welle; die Funktionskomponenten der Welle bleiben unverändert, die vorhandenen konventionellen Lager werden durch Magnetlager substituiert.

Gegenstand eines gemeinsamen Projektes mit der Fa. Becker GmbH & Co. ist das Redesign eines hochdrehenden Laser-Radial-Verdichters am IMMS. Das beinhaltet die Entwicklung, die Konstruktion und die Erprobung von Magnetlagern für die gegebenen Rahmenbedingungen wie z. B. das Wellengewicht von ca. 20 kg. Das im September 2000 begonnene Projekt wird vom TMWFK gefördert.

## Forschungsverlauf und -stand

Das Projektvorhaben gliedert sich in die Schwerpunkte

- Bewertung und Auswahl von Magnetlagerprinzipien unter besonderer Berücksichtigung der späteren industriellen Serienfertigung und der damit korrespondierenden Kosten
- Simulation und Entwurf der 2 Radiallager und des Axiallagers
- Reglerentwurf auf der Basis einer Mechaniksimulation sowie hardwareseitige Implementierung

- Auswahl von Sensorprinzipien, Entwurf und Aufbau von Sensor und zugehöriger Elektronik sowie Entwurf und Aufbau der Ansteuerelektronik für die Regelspulen
- Redesign von Gehäuseteilen und Konstruktion der Magnetlageraufnahme sowie
- Aufbau und Test von Labormustern sowie Prototypen

Das Magnetlager nutzt die an den Grenzflächen zwischen Eisenkreis und Luftspalt entstehende Reluktanzkraft. Die Umsetzung dieses Wirkprinzips kann auf verschiedene Weise erfolgen - radiale Magnetlager lassen sich nach der Richtung der Flussdichte im Eisenkreis (hetero- und homopolar entsprechend quer oder längs zur Welle), der Polanzahl (3 oder 4) sowie der Art der Vormagnetisierung

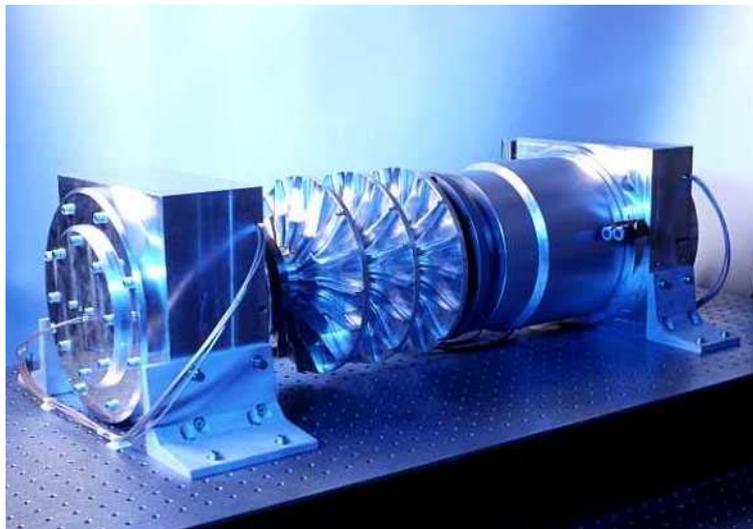


Abb.1: Labormuster der magnetisch gelagerten Welle

(permanentmagnetisch oder mit Spulen) unterscheiden. Bei permanentmagnetischer Vorspannung können Axial- und ein Radiallager zudem als magnetisch gekoppeltes Kompaktlager ausgeführt werden.

Aus den verschiedenen Lagerformen ist ein bezüglich erzielbarer Kräfte, Lagergeometrie, Wärmeverhalten sowie Fertigungsaufwand und -kosten optimales Lager auszuwählen. Als Bewertungsgrundlage dient dabei ein zweistufiges Modell. Auf das analytische Modell zur Grobdimensionierung setzt ein FEM-Modell zur Feindimensionierung auf. Im Ergebnis der Untersuchungen kristallisierte sich nach einer Analyse der aufgestellten Bewertungsmatrix ein 4-poliges Heteropolarlager als optimales Radiallager heraus. Der Vorteil, den ein permanentmagnetisch vorgespanntes Lagersystem hinsichtlich eines geringeren Lagervolumens bietet, wiegt die wesentlich höheren

Kosten gegenüber einem reinen elektromagnetischen System nicht auf.

Für den Reglerentwurf wurde die Welle mit ihren sechs Freiheitsgraden als gekoppeltes System betrachtet. Die Modellierung der Welle erfolgte dabei mittels konzentrierter Massen. Das Wellenmodell wurde validiert durch Messungen (Modalanalyse) an der Welle sowie durch ein FEM-Volumenmodell in ANSYS. Die Implementierung des Reglers erfolgte für das Labormuster mit dem Rapid-Prototyping System dSpace, für den Prototypen ist sie auf einer bezüglich der Funktionalität und Kosten optimierten Hardware umzusetzen. Wirbelstromsensoren generieren die Reglereingangsgrößen.

Für den Aufbau eines Labormusters wurde die Verdichterwelle nebst Stator und Gehäusekomponenten zur Aufnahme der Magnetlager redesignet. Beim so realisierten Labormuster wurden nach einer Optimierung der Filter des Reglers Drehzahlen von 15000 U/min erreicht, die auf Grund der Luftreibung das Maximum unter atmosphärischen Bedingungen darstellen.

## Ausblick

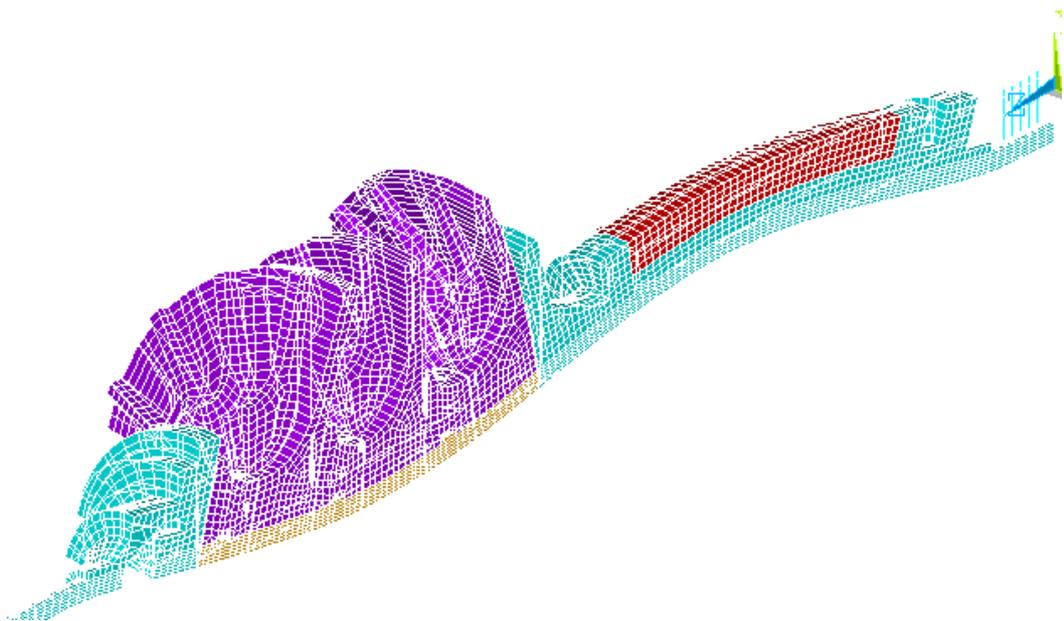
Der Schwerpunkt der zukünftigen Arbeiten liegt einerseits bei der Vakuumbdichtung des Labormusters, um im geschlossenen Gaskreislauf mit der Verdichterwelle deren Nenndrehzahl von 30000 U/min zu erreichen. Weiterhin sind die permanentmagnetisch vorgespannten Lager, die im Labormuster zum Einsatz kommen, durch die entworfenen rein elektromagnetischen Lager zu substituieren.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Steffen Michael

Tel.: +49 (3677) 678342

Email: [steffen.michael@imms.de](mailto:steffen.michael@imms.de)



**Abb. 2:** FEM-Simulation der 2. Biegeschwingung der Verdichterwelle

# Fabrikation von Mikro-Elektro-Mechanischen Systemen (MEMS-Fab)

## Zielstellung

Weltweit entwickelt sich zunehmend bei kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) der Bedarf, die in F&E entwickelten Produkte mit hoher Fertigungseffizienz schnell und wirtschaftlich herzustellen. Aufgrund der vergleichsweise geringen Stückzahlen (z.B. Kleinserien) und der Vielzahl zu lösenden Anwendungsprobleme müssen die Prozessketten flexibel und modular gestaltet werden, so dass ein schnelles Reagieren auf wechselnden Bedarf, z.B. Austausch einzelner Prozessschritte oder Einfügen zusätzlicher Prüfprozesse, möglich ist. Mit modularen Kleinfertigungsanlagen werden z.B. teure Reinräume durch Vakuumrezipienten oder Inertgasräume abgelöst. Sie erlauben eine flexible Verkettung der erprobten Vorbereitungs-, Fertigungs- und Nachbereitungsprozesse, die lediglich an die zu erwartenden Stückzahlen und die räumlichen Gegebenheiten angepasst werden müssen.

## Forschungsverlauf

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines modularen und von äusseren Randbedingungen unabhängigen Systems für die Fertigung von mechatronischen Produkten in kleinen und mittleren Stückzahlen. Der beispielhaft zu realisierende Demonstrator ermöglicht die Herstellung von Sensor- und Aktorkomponenten unter Verwendung fotostrukturierbarer Gläser (s. Abb. 1). Die jeweiligen Herstellungsschritte werden von bekannten Technologien und Verfahren übernommen. Folgende Schwerpunkte wurden bearbeitet:

- Auswahl, Anpassung handelsüblicher prozessspezifischer Kleinfertigungsanlagen, z. B. Beschichtungsapparaturen
- Weiterentwicklung handelsüblicher bzw. Konzipierung, Entwurf und Bau geeigneter Rezipienten, Schleusen und Pumpen
- Anpassung der prozessnahen Analytikhard- und -software zur Parameterbestimmung der Werkstücke/Proben
- Konzipierung der flexiblen Kopplung durch die Entwicklung universeller Koppelstellen
- Konzipierung, Entwurf und Bau universeller Transfer- und Handlingsysteme
- Konzipierung, Entwurf, Aufbau von Prozesssteuerungen

Das IMMS befasst sich mit den folgenden Arbeiten:

- Gesamtkonzept der Demonstratoranlage
- Konzipierung, Aufbau von Prinzipversuchen für die notwendige Antriebstechnik und für das Proben-/Werkstückhandling,

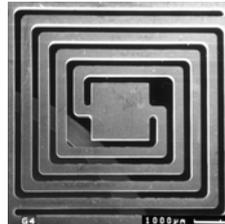
für die Greiftechnik und für die Magazinierungssysteme

- Konzipierung der für die Verkopplung der Prozesskammern notwendigen Transfersysteme einschliesslich der darin enthaltenen Antriebstechnik

## Forschungsstand

Im Rahmen der Projektbearbeitung wurden drei Module realisiert:

- Waferbelichtungsmodul (TETRA GmbH, IMMM, IMMS) (s. Abb. 2)
- Ätzmodul (ILMVAC GmbH, TU Ilmenau - Fachgebiet Glas- und Keramiktechnologie und Fachgebiet Konstruktionstechnik, IMMS) (s. Abb. 3)
- Tempermodul (LMS GmbH, TU Ilmenau - Fachgebiet Glas- und Keramiktechnologie)



**Abb. 1:** Beispiel einer Sensor-komponente aus fotostrukturierbarem Glas (Quelle: TU Ilmenau)



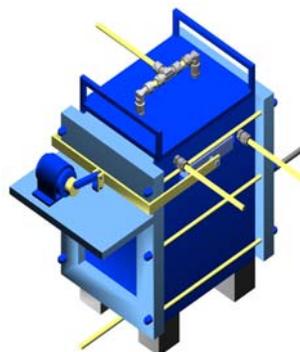
**Abb. 2:** Teil des Versuchsaufbaus des Belichtungsmoduls mit Zuführeinrichtung (Quelle: TU Ilmenau)

## Ausblick

Es ist vorgesehen, in einem Folgeprojekt weitere Module und deren Verkettung zu entwickeln, um die Herstellung von Sensorkomponenten aus fotostrukturierbarem Glas durchgängig und automatisiert zu ermöglichen.

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Frank Spiller  
Tel.: +49 (3677) 678326  
Email: frank.spiller@imms.de



**Abb. 3:** Ätzmodul (Quelle: TU Ilmenau)

# Entwicklung eines Mess- und Antriebssystems für eine 3D- Präzisions-Messmaschine

## Zielstellung

Die räumliche Vermessung komplexer Körpergeometrien mit Nanometerauflösung wird zukünftig in der Fertigungstechnik sowie in der Mikromechanik und Mikrosystemtechnik von grundlegender Bedeutung sein. Für Körpergeometrien mit linearen Abmessungen von 0,1 mm bis 1 dm sind jedoch keine hochauflösenden und hochgenauen 3D-Messverfahren und Messgeräte bekannt. Das Vorhaben sieht deshalb die Schaffung der Grundlagen für eine 3D-Präzisions-Messmaschine vor. Es werden planare Antriebskonzepte untersucht bei gleichzeitiger Integration laserinterferometrischer Messverfahren in die Gesamtkonzeption. Damit werden die Grundlagen für die räumliche Vermessung von Körpergeometrien mit einem Messvolumen von  $(100 \times 100 \times 10) \text{ mm}^3$  gelegt. Durch die Ergänzung mit einem laserinterferometrischen Antastsystem für die Probenantastung in z-Richtung wird eine 3D-Präzisions-Messmaschine geschaffen. Als geeignete Antriebslösungen werden im Rahmen eines DFG-Projektes durch das IMMS luftgeführte planare Direktantriebe untersucht. Die Projektpartner Fachgebiet (FG)-Prozessmess- und Sensortechnik und FG-Antriebstechnik der TU Ilmenau untersuchen im Rahmen des Projektes Anordnungen zur hochgenauen Positionserfassung sowie zur magnetischen Objektführung im Raum.

## Forschungsverlauf und -stand

Das Vorhaben hat zum Ziel, einen multiaxialen Direktantrieb mit stick-slip freier Führung für eine 3D-Präzisions-Messmaschine mit dem Messbereich zu schaffen.

Für die Umsetzung dieses Konzeptes sind Bewegungen und Kräfte/Momente in insgesamt drei translatorischen ( $x, y, z$ ) und einer rotatorischen Achse ( $r_z$ ) zu generieren. Die z-Komponente wird im ersten Schritt des Projektes (erste 2-Jahres-Etappe) ausschließlich durch einen an einem Portal montierten messenden Taster realisiert, der auch z-Höhenschwankungen der Tischführung mit erfasst. Für die Kraft-erzeugung zur Messobjektbewegung in den einzelnen Koordinaten sollen bevorzugt elektrodynamische Motorelemente zum Einsatz kommen, da sie eine hohe Dynamik bei guter Steuerbarkeit ermöglichen. Besonderes Augenmerk liegt auf der geometrischen Gestaltung und räumlichen Anordnung der Magnet-

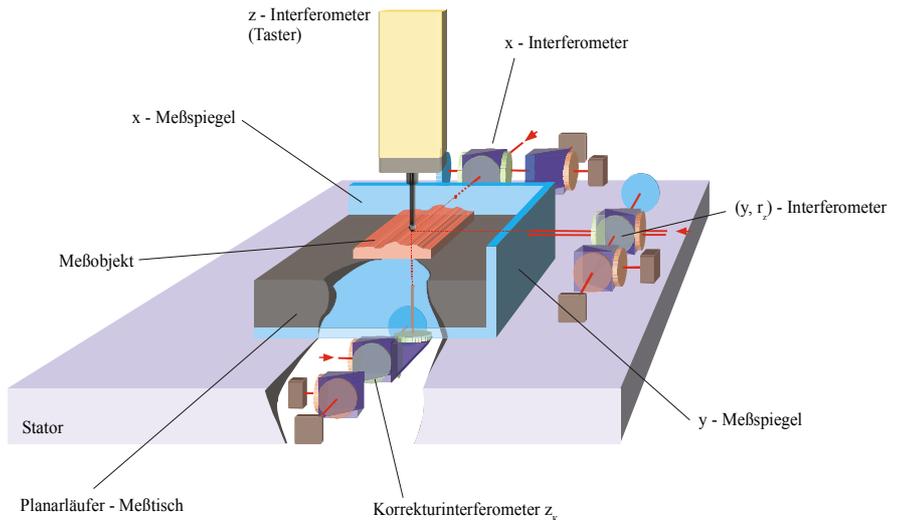


Abb. 1: Darstellung des Gesamtkonzeptes der Messmaschine

und Spulenelemente für die Kraft- und Momenterzeugung. Diese Strukturfindungs- und Gestaltungsphase erfolgt mit dem Ziel einer optimalen Integration möglichst aller Antriebsachsen in ein kompaktes struktursteifes Motorsystem.

Für den Läufer soll weiterhin eine stick-slip freie Führung in allen Koordinaten mit minimierten Ablauffehlern ( $r_x, r_y, r_z$ ), basierend auf optimierten Luftführungen, entworfen und experimentell erprobt werden.

Da das aus Motor- und Führungskomponenten bestehende Antriebsteilsystem zur Erreichung einer hohen Messgenauigkeit eine optimale räumliche Integration der Interferometerkomponenten ermöglichen soll, erfolgt die Erarbeitung des Gesamtkonzeptes der Messmaschine in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Prozessmess- und Sensortechnik.

## Ausblick

Den Schwerpunkt der Arbeiten am IMMS bildet derzeit die Erarbeitung des Gesamtkonzeptes für die Messmaschine unter Berücksichtigung der Adaption der Messsysteme. In Folge soll der Motor konstruiert, gefertigt, aufgebaut und experimentell untersucht werden. Besonderes Augenmerk gilt dabei der Führung des Läufer-elementes. Die für Feinpositionieraufgaben notwendige stick-slip Freiheit soll mit in den Läufer integrierbaren aerostatischen Führungselementen erfolgen.

Weiterhin sollen Konzepte erarbeitet werden, die eine Erfassung und Kalibrierung bzw. Kompensation von Führungsfehlern ermöglichen.

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Christoph Schäffel

Tel.: +49 (3677) 678333

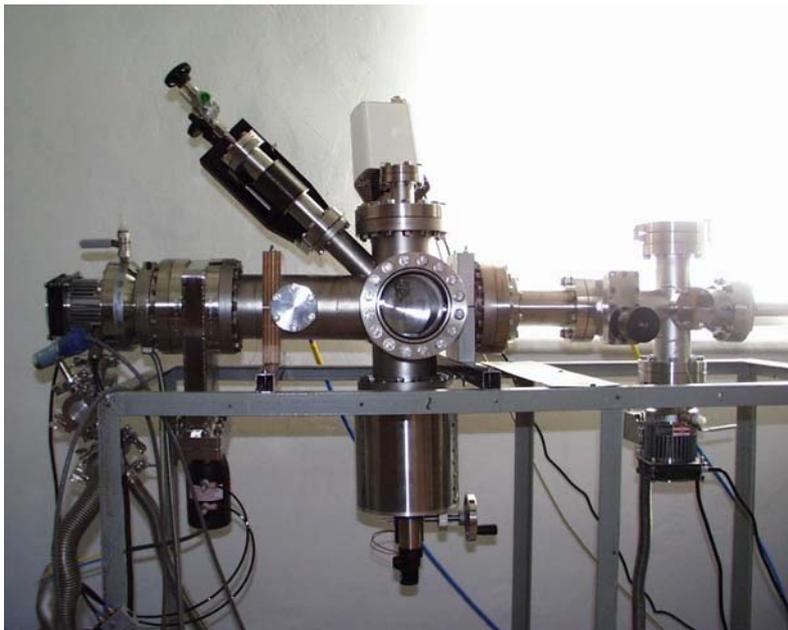
Email: christoph.schaeffel@imms.de

# Geregelte Präzisionsantriebe unter erschwerten Einsatzbedingungen

## Forschungsverlauf

Gegenstand des Forschungsverbundprojektes war die Entwicklung mechatronischer Präzisionsantriebe, die eine hohe Genauigkeit bzw. Reproduzierbarkeit erreichen und gleichzeitig unter erschwerten Umweltbedingungen, wie z.B. Ultrahochvakuum (UHV), einsetzbar sind. Anhand von Versuchsaufbauten und Demonstratoren konnte nachgewiesen werden, dass aufgrund moderner Werkstoffe und Werkstoffkombinationen Präzisionsantriebe unter erschwerten Umgebungsbedingungen einsetzbar sind. Die angestrebten Positioniergenauigkeiten liegen dabei im Bereich von unter 10nm bzw. hundertstel Bogensekunden. Im Projekt wurden folgende Schwerpunkte bearbeitet:

- Entwicklung und Bau spezieller Mess- und Analysensysteme für die Durchführung der werkstofftechnischen Untersuchungen (z.B. Tribometer) und Durchführung der Untersuchungen
- Entwicklung, Aufbau und Test rotatorischer bzw. translatorischer Antriebselemente sowie weiterer Komponenten
- Entwicklung, Aufbau und Test anwendungsspezifischer Sensorik, Mess- und Steuerungstechnik
- Entwicklung, Aufbau und Test von Demonstratoren mechatronischer Antriebe für erschwerte Einsatzbedingungen (z.B. im UHV).



**Abb. 1:** Vakuumszillationsreibungstester für die Probenpaarung Kugel/Fläche

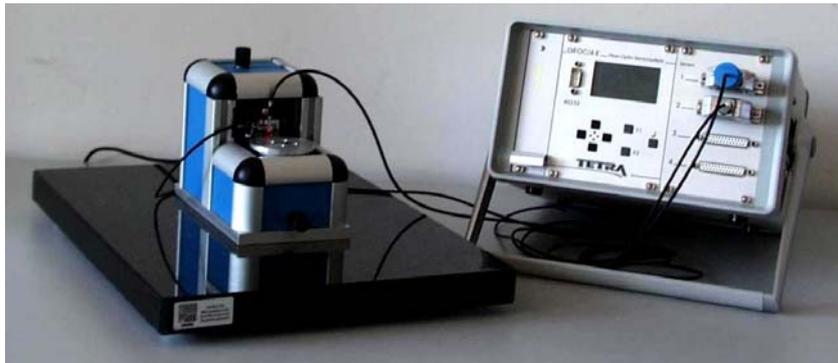
Die umfangreichen werkstofftechnischen Untersuchungen beinhalteten u.a. die Ermittlung des Desorptionsverhaltens und tribologischer Eigenschaften von Werkstoffen und Schichten unter definierten Einsatzbedingungen. Aus den tribologischen Untersuchungen konnten zahlreiche Erkenntnisse für den späteren Einsatzfall, z.B. in Gleit- bzw. Wälzlagern bzw. -führungen und Antriebselementen, abgeleitet werden. Im Projekt wurden verschiedene Werkstoffe und Werkstoffpaarungen auf ihre tribologischen Eigenschaften in Normalatmosphäre, auf Reibungs- und Verschleisseigenschaften und insbesondere auf das Desorptionsverhalten untersucht, um detaillierte Aussagen über ihre Eignung für verschiedene Umgebungsbedingungen zu erhalten. Für die Durchführung der tribologischer Untersuchungen in Normalatmosphäre, unter Schutzgas und im Hoch- bzw. Ultrahochvakuum entstanden unterschiedliche Varianten von Pin-on-Disk bzw. oszillatorisch arbeitenden Mikrotribometern und anderen Testern. Für die Untersuchungen sind Probekörperpaarungen Kugel/Fläche und/oder Fläche/Fläche einsetzbar.

## Forschungsstand

Die fünf Achsen des oszillatorisch arbeitenden Mikrotribometer für Normalatmosphäre ermöglichen eine parallele Ausrichtung der Probekörper zueinander. Damit wird es möglich, die tribologischen Eigenschaften zweier flächiger Proben zu untersuchen.

Für die Untersuchung der tribologischen Eigenschaften unter Vakuumbedingungen entstand ein Vakuumszillationsreibungstester (s. Abb. 1).

Mit einem siebenachsigen Universaltester können Probenpaarungen parallel zueinander ausgerichtet (drei Hubachsen), in Kontakt gebracht (eine Hubachse) und gegeneinander verdreht (eine Drehachse) werden. Ausserdem ist es möglich, die obere Probe, die am Sensorkopf befestigt ist, um 90° zu schwenken (eine Schwenkachse). Damit wird es möglich, die untere Probe halbkugelförmig abzutasten. Die zwischen beiden Proben definiert einzuprägende Normalkraft wird durch ein piezoelektrisches Antriebssystem (eine Achse) erzeugt. Der Universaltester ist optional mit weiteren Antriebs- und Messsystemen, z.B. einem x-y-Tisch, ausrüstbar. Neben tribologischen Werkstoffuntersu



**Abb. 2:** Pin-on-Disk Mikrotribometer für Normalatmosphäre

chungen (oszillatorisch und Pin-on-Disk) sind Adhäsions-, Indentations- und Härtemessungen möglich.

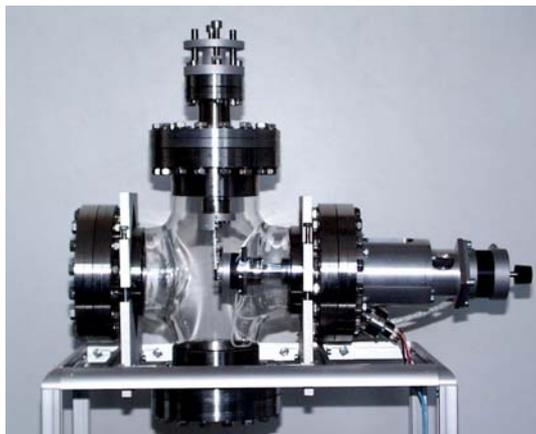
Tribologische Untersuchungen im Mikrobereich nach dem Prinzip Pin-on-Disk sind mit den beiden Tribometern (s. Abb. 2 und 3) durchführbar. Das Mikrotribometer (s. Abb. 2) eignet sich für Untersuchungen unter Normalatmosphäre. Mit dem gleichen Antrieb, einem speziell für diese Anwendung von der Fa. PI Ceramic entwickelten piezokeramischen Lamellenmotor, ist das Mikrotribometer für Untersuchungen im Ultrahochvakuum (s. Abb. 3) ausgestattet. Die Messwerterfassung an beiden Tribometern erfolgt ebenfalls nach dem gleichen Prinzip. Damit sind vergleichende Untersuchungen unter atmosphärischen Bedingungen und im UHV durchführbar.

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Frank Spiller

Tel.: +49 (3677) 678326

Email: frank.spiller@imms.de



**Abb. 3:** Pin-on-Disk Mikrotribometer für UHV

# Verbesserung der Regelgüte von planaren Antriebssystemen durch Identifikation der Belastungssituation

## Zielstellung

In der Industrie, speziell im Hochtechnologiebereich, erfreut sich der Markt für Positionierantriebe kleiner und mittlerer Verfahrwege (einige Zentimeter bis Dezimeter) einer steigenden Nachfrage. Dabei stehen vor allem lineare und planare Positionieraufgaben im Vordergrund. Die entscheidenden Parameter, die letztlich die Effizienz des Antriebs im Einsatz begrenzen, betreffen dabei die erreichbare Geschwindigkeit und Präzision der Positionierung bzw. Bahnverfolgung. Das am IMMS in enger Zusammenarbeit mit der TU Ilmenau entwickelte Präzisionsdirektantriebssystem ist der Prototypenphase längst entwachsen und hat sich im industriellen Umfeld bewährt.

Das entwickelte Antriebssystem ist sehr flexibel und lässt sich problemlos an kundenspezifische Positionier- und Bahnverfolgungsaufgaben anpassen. Dabei verändern verschiedene Trägerplattformen und Werkstückaufnahmen sowie das Werkstück selbst durch ihre zusätzliche Masse und ggf. durch die Verschiebung des Schwerpunktes die dynamischen Parameter der Läuferapplikation.

Die optimale Parametrierung der speziellen, modellbasierten Regelung ist daher stark von der konkreten Einsatz- bzw. Belastungssituation abhängig. Im Rahmen einer Diplomarbeit wurden Adaptionsmechanismen und Identifikationsalgorithmen vor dem konkreten Hintergrund dieses Präzisionsantriebssystems untersucht.

## Forschungsverlauf

Die eingesetzte beobachterbasierte Zustandsregelung ist auf der Grundlage eines Streckenmodells zu bemessen. Untersuchungen im Vorfeld haben ergeben, dass die gewählte und entsprechend bemessene Reglerstruktur gegenüber (in Grenzen) variierender Streckenparameter eine erstaunliche Robustheit besitzt. Um die Leistungsfähigkeit des Reglers voll ausschöpfen zu können, ist eine Anpassung der Beobachter- und Reglerparameter an die entsprechenden Gegebenheiten nötig.

Im ersten Schritt wurden geeignete parametrische Modellgleichungen abgeleitet, deren Parameter direkt oder im engen Zusammenhang mit den gesuchten Entwurfparametern standen. Das Ziel bestand darin, mit möglichst einfachen mathematischen Mitteln eine ausreichend genaue Modellbeschreibung auszudrücken.

Im weiteren führte ein vergleichender Test verschiedener Identifikationsalgorithmen zu dem Ergebnis, dass im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit vor allem im geschlossenen adaptiven Regelkreis der Parameterschätzalgorithmus nach der Methode des **restricted exponential forgetting (RXF)** nach R.Kulhavy beste Eigenschaften bezüglich Robustheit und Nachführverhalten besitzt.

Der Adaptionsmechanismus, im Sinne einer selbsttätigen Anpassung der Regelung an teilweise unbekannte Streckenparameter sowie deren Veränderung, sollte nun Identifikation und Entwurf (bzw. Tuning) in geeigneter Weise kombinieren. Im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit der später einzusetzenden Zielhardware (ADSP-21060-Board) schiedene aufwendige Reglerentwurfsverfahren von Beginn an aus. Eine flexibel interpretier- und realisierbare Möglichkeit stellt das in Abbildung 1

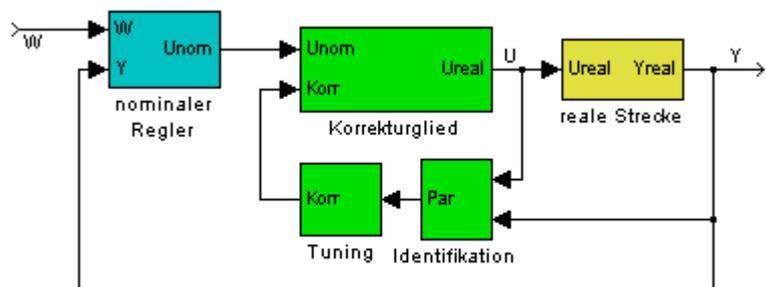


Abb. 1: Reglerentwurfsverfahren

gezeigte Schema dar.

Simulationsergebnisse, die mit Hilfe von MATLAB/SIMULINK errechnet wurden, stellten die Entscheidungsgrundlage dar, nach welcher der vielversprechendsten Ansatzes zur Realisierung auf einem Rapid-Prototyping-System ausgewählt wurde. Zum Einsatz kam das ACE-Kit 1103 von der dSpace GmbH, welches über entsprechende Leistungsstufen zur Ansteuerung eines Demonstratorplanarantriebes (Verfahrweg 102 x 102mm) diente.

## Forschungsstand

Im Anschluss an erfolgreiche Testfahrten wurde eine Referenzkontur ausgewählt, welche die Beurteilung und den Vergleich der Regelung ohne und mit Adaptionsalgorithmus ermöglichte. Bei der Referenzkontur handelte es sich um ein 10 x 10 KreisArray. Jeder dieser Kreise hatte einen Radius von 84µm. Bei veränderlicher Zusatzmasse, die geeignet auf dem Läufer befestigt wurde, und sonst gleichen Bedingungen, sollte die Abweichungen des tatsächlichen Fahrweges von der Referenzkontur ermittelt werden. Dabei wurden für

jeden Kreis des Arrays drei Kriterien berechnet:

- mittlere Abweichung vom Sollradius entlang der Kreise MITAB
- maximale Abweichung vom Sollradius entlang der Kreise MAXAB
- maximale Radiusschwankung entlang der Kreise MAXRS

Abbildung 2 zeigt (blau ohne ; rot mit adaptiver Erweiterung), dass die Güterwerte durch die adaptive Erweiterung mit den Güterwerten des zum Entwurf herangezogenen unbelasteten (nominalen) Systems nahezu übereinstimmen und unabhängig von der Belastungssituation sind.

### Ausblick

Im Blickpunkt weiteren Interesses stehen neben der Aufbereitung und Portierung der Ergebnisse auf die Einsatzhardware (MCX-DSP-Board von PMDI) die Integration in das bestehende Softwareprojekt. Vorteilhafterweise wurden die leistungsbedingten Einschränkungen der Einsatzhardware während des gesamten Forschungsverlaufs in Entscheidungsfindungen mit einbezogen.

Desweiteren sind Überwachungs- und Sicherheitsalgorithmen zu formulieren, die die Einhaltung gewisser Randbedingungen garantieren (Identifizierbarkeitsbedingungen), sodass eine Adaption nur bei sicher erkannter Veränderung der dynamischen Parameter erfolgt.

Der allgemeine Charakter des adaptiven Lösungsansatzes sollte an weiteren Antriebssystemen nachgewiesen werden können.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Torsten Maaß

Tel.: +49 (3677) 678362

Email: torsten.maass@imms.de

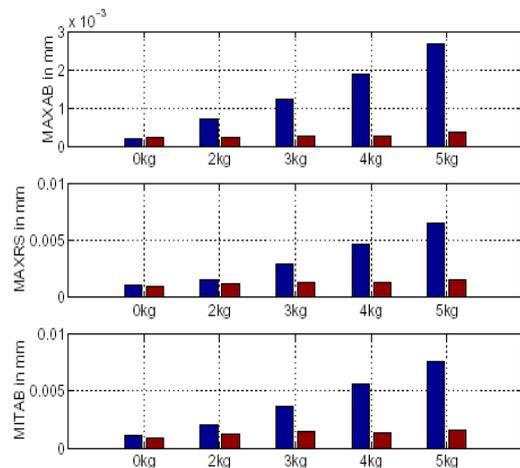


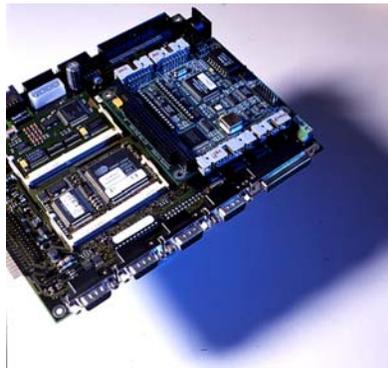
Abb. 2: Güterwerte in Abhängigkeit der Belastung

# System Design

Der Themenbereich „System Design“ erforscht den Entwurf und die Realisierung komplexer eingebetteter elektronischer Systeme. Die Anwendung durchgängiger Entwicklungsprozesse auf Basis applikations- und architektur-spezifischer Design-Flows ist unumgänglich. D. h.: Ein hochkomplexes elektronisches System wird zunächst auf abstrakter Ebene (Verhaltensbeschreibung) modelliert und simuliert, dann schrittweise synthetisiert, implementiert und integriert. Die abstrakte Modellierung geschieht in Anwendung von Tools und Methoden wie Statemate, Matlab/Simulink, HDL, System-C. Im Ergebnis des Designprozesses entstehen Systemlösungen in Form von ASICs, FPGAs, klassischen PCB Designs, IPs (intelligent properties) und SoCs (System-on-Chip) als Hardware und Softwareseitig Firmware und Applikationen für eingebettete DSPs (z. B. TI, SHARC) und Microcontroller (z. B. x86, ARM, MIPS, NEC, PPC). Im Themenbereich wird in drei Themengebieten interdisziplinär gearbeitet.

Im Themengebiet **Digitale Signalverarbeitung/Industrieelektronik** wurde ein Projekt im Bereich Weg- und Winkelmesssysteme erfolgreich abgeschlossen. Der entwickelte Interpolator-schaltkreis wurde als Muster gefertigt, getestet und den Projektpartnern zum Applikationstest übergeben. Die Arbeiten an einem weiteren Projekt mit ähnlicher Thematik (Hochauflösendes absolutkodierte Auflichtmessmodul, werden in den ersten Monaten des Jahres 2002 abgeschlossen. Eigentliches Hauptaugenmerk im Themengebiet waren Forschungsarbeiten aus dem Bereich der Bildverarbeitung. Am IMMS wurde ein hochkomplexes Demonstratorboard entwickelt, mittels dem komplexe Aufgaben der industriellen Bildverarbeitung lösbar sind. Neuwertig hierbei ist die Aufteilung der Bildverarbeitung in einen Hardware- und einen Softwareanteil und die Verwendung einer neuartigen Modellierungsmethode mit Hilfe von System-C. Mit ihr lassen sich erstmalig ausführbare Spezifikationen erzeugen.

Im Themengebiet **Busse und vernetzte Systeme** wurden die Arbeiten an der IEEE1394 Firmware-Library mit Erfolg beendet. In Zusammenarbeit mit der EMSYS GmbH Ilmenau entstand eine hochportable Bibliothek von Firmware-Routinen, die auf einer großen Anzahl von IEEE



1394-Hardwarekonfigurationen verwendet werden kann. Weiterhin wurde die Entwicklung eines Buskonverters für serielle Busse auf Basis eines ARM-Controllers begonnen. Das entwickelte Referenzboard wird unter embedded Linux betrieben (S. 21). Zieleinsatzgebiet ist die Kommunikation zwischen verschiedenen seriellen Bussen und Feldbussen im Bereich der Automatisierungstechnik. Derzeit wird an der Implementierung der Peripherietreiber (IEEE 1394 und S-ATA sowie CAN) gearbeitet. Die im Projekt durch das IMMS durchgeführte Portierung des Linux-Kernel für den eingesetzten Prozessor (NET40) von 2.0.38 auf 2.4.10 ermöglichte die Aneignung von Know-How im embedded Linux Umfeld und es konnte ein weiteres Projekt akquiriert werden. Es beinhaltet den Entwurf einer linuxbasierten Softwareplattform für Settop-Boxen und digitales TV.

Im Themengebiet **Embedded Software/Automotive Systems** wurde erfolgreich im Bereich des

Einsatzes eingebetteter Software für Geräte der Kommunikationstechnik (GPS, GSM) geforscht. Es wurde in Zusammenarbeit mit einem langjährigen Forschungs- und Entwicklungspartner ein neues Gerätekonzept unter Einsatz des Open Source Betriebssystems eCos (S. 23) entwickelt.

Im Bereich echtzeitfähiger Steuerungen unter Linux/RT wurde in Zusammenarbeit mit dem Themenbereich Mechatronik eine Steuerung für mechatronische Antriebe auf Basis von Standard-Komponenten entwickelt (S. 19). Der Einsatz von Standardbaugruppen für solche Steuerungssysteme wird zu einer Absenkung der Hardwarekosten für Steuerungsboxen um bis zu 60% führen. Erste Kontakte für Industriekooperationen wurden auf der Messe „SPS/IPC/Drives 2001“ in Nürnberg geknüpft. Die Forschungsvorhaben im Bereich UML, formale Spezifikation und Verifikation wurden im Rahmen mehrerer studentischer Arbeiten weiterentwickelt und werden im Jahr 2002 in einem dafür beantragten Förderprojekt fortgeführt.

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Christian Schröder

Tel.: +49 (3677) 678315

Email: christian.schroeder@imms.de

# Steuerung mechatronischer Antriebssysteme mit Real-Time-Linux

## Zielstellung

Für die Steuerung mechatronischer Antriebssysteme werden in der Regel digitale Signalprozessoren eingesetzt, um die kritischen Timing-Anforderungen zu erfüllen. Die zur Zeit häufig praktizierte Lösung besteht im Einsatz eines Standard-PCs, der eine DSP-Karte enthält, die für das Einlesen der Bahnsensoren und die Ansteuerung der Aktoren zuständig ist.

Der Einsatz solcher DSP-Lösungen erzeugt meist hohe Hardwarekosten, da außer einem



**Abb. 1:** mechatronische Antriebssysteme (Planarantrieb)

Steuer-PC noch ein geeignetes DSP-Board benötigt wird. Durch den Einsatz eines Single-Board-Computers mit einem Standardbetriebssystem lassen sich diese Kosten senken, was vor allem bei höheren Stückzahlen von Bedeutung ist. Allerdings muss das eingesetzte Betriebssystem ein determiniertes Zeitverhalten aufweisen, um den Timinganforderungen gerecht zu werden.

Eine kostengünstige Hardware zur Steuerung mechatronischer Systeme kann bei Einsatz des Betriebssystems Linux mittels eingebetteten PC realisiert werden.

Vorteile:

- keine Kosten für Betriebssystem
- echtzeitfähiges Betriebssystem (Bedingung für Steuerung!)
- Leistungsfähigkeit der Hardware „wächst mit“
- Standard-PC-Funktionalität bei Bedarf gratis vorhanden (Schnittstellen, TCP/IP, Bildschirm, Tastatur etc.)

Um die Hardwarekosten der Steuerungen drastisch zu senken, bot sich der Einsatz eines Echtzeit-Betriebssystems an, welches auf einem eingebetteten Computersystem lauffähig ist. Die Hardware besteht aus einem x86-basierendem PC und zwei Wandlerkarten (Analog-Digital, Digital-Analog). Alle Hardwarekomponenten sind Standardsysteme. Softwareseitig wird der Einsatz des freien Betriebssystems Linux mit der Echtzeiterweiterung RTAI (Real Time Application Interface) favorisiert. Linux/RTAI ist lizenzkostenfrei, ermöglicht Interrupt-Latenzzeiten im Mikrosekundenbereich und zeichnet sich durch eine hohe Stabilität, gute Skalierbarkeit und Verfügbarkeit des Sourcecodes aus.

Ziel war die Erarbeitung eines erweiterbaren bzw. skalierbaren Modulkonzepts für die Steuerung unterschiedlich komplexer mechatronischer Systeme.

## Forschungsverlauf

Das IMMS Ilmenau erarbeitete sich in den letzten Jahren ein Entwicklungs-Know-How für PC-Lösungen und Linux-Applikationen. Ausgehend von den gesammelten Erfahrungen und der Notwendigkeit ein Echtzeit-Betriebssystem zu verwenden, wurde das lizenzkostenfreie Betriebssystem Linux mit der Echtzeiterweiterung RTAI eingesetzt.

Folgende Aufgaben waren im Projekt zu lösen:

- Hardware-Recherche
- Auswahl, Tests
- Finden kostengünstiger AD/DA- Module (bzw. Module mit PWM / Encoder- Schnittstellen), möglichst mit Linux- Treibern
- Test der AD/DA- Module auf Eignung für Steueraufgaben
- Untersuchungen zur notwendigen Prozessor-Leistung anhand von Beispielreglern
- Kauf ausgewählter Module und Test am realen System
- Einarbeitung in das Echtzeit-Betriebssystem
- Implementierung der Steuerung als RTAI-Applikation
- Implementierung mechatronischer Regelalgorithmen als Echtzeit-Anwendung
- Realisierung einer Demonstrationslösung

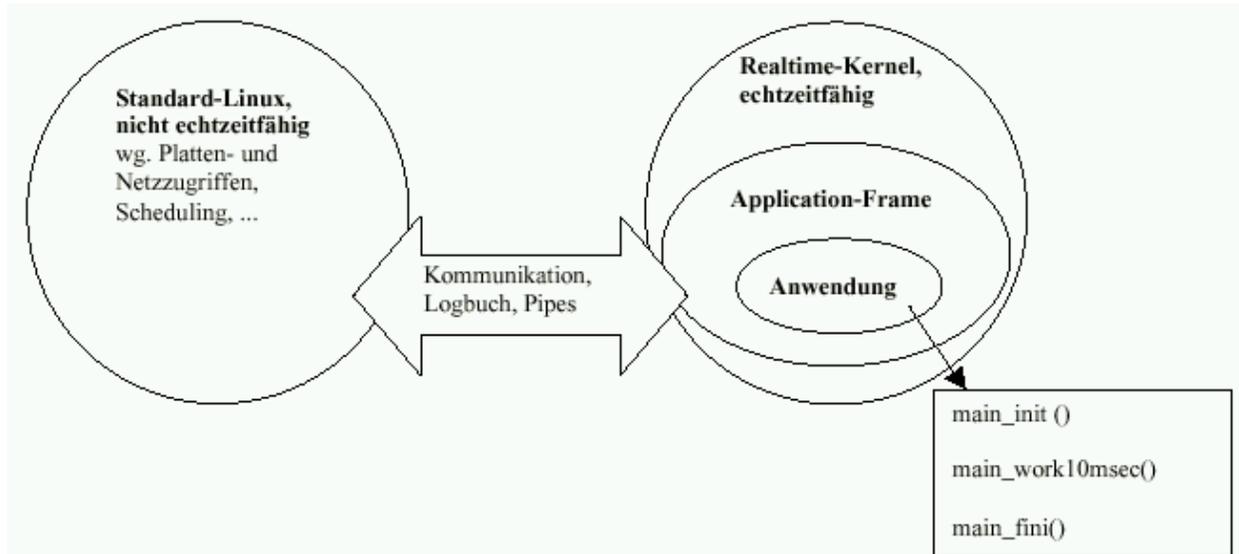


Abb. 2: Echtzeit-Betriebssystem (Beziehung Standard-Echzeit Linuxkernel)

## Forschungsstand

Es wurde eine funktionsfähige Steuerung zum Antrieb eines Planarantriebes als RTAI-Linux-Anwendung entwickelt.

Zur Steuerung des Reglermoduls wurde ein Programm auf der grafischen Oberfläche (KDE) entwickelt (s. Abb. 3), welches mit dem Echtzeit-Regelalgorithmus (RTAI-Linuxtask) über „Shared Memory“ - und „FIFO“ Funktionen kommuniziert (s. Abb. 2 - Kommunikation).

Die Regelfrequenz liegt z. Z. noch bei 2 kHz welches eine Verfahrensgeschwindigkeit von 20 mm/s zulässt. Das Reglermodul enthält den Regelalgorithmus und die Ansteuerung der zwei Wandlerkarten (Analog-Digital, Digital-Analog) für den Antrieb eines Planarmotors.

## Ausblick

Derzeit erfolgt eine Optimierung der Software auf kürzere Regelzeiten (Ziel 10 kHz). Dafür wird die grafische Oberfläche auf einen anderen Rechner ausgelagert. Reglermodul und Steuerprogramm werden über eine Client/Server Verbindung miteinander arbeiten. Dadurch soll Rechenzeit eingespart werden, welche zur Erhöhung der Regelfrequenz benötigt wird. Durch den Einsatz eines embedded PC mit Standardkomponenten kann diese gesamte Steuerung miniaturisiert werden.

Eine Herausforderung für weitere Arbeiten ist die Entwicklung eines Designflow vom Matlab/Simulink-Model zur (RTAI-) Linux Steuerung als ein Standardprozess.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Fred Vogler

Tel.: +49 (3677) 678368

Email: fred.vogler@imms.de

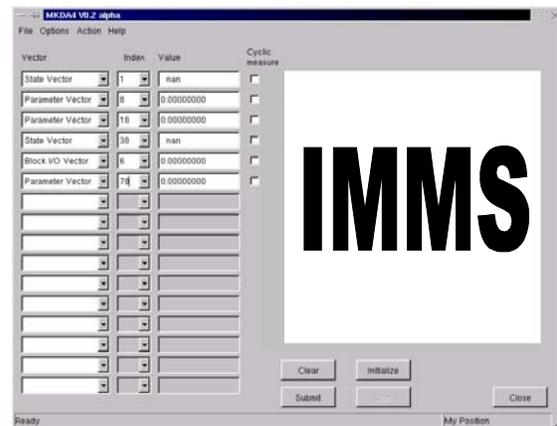


Abb. 3: KDE Oberfläche des Steuerprogramms

# Embedded Linux

## Zielstellung

Seitdem Linux als freies Betriebssystem auf breiter Front akzeptiert wird, werden ständig neue Anwendungsgebiete dieses überaus flexibel einsetzbaren Betriebssystems gefunden. Im Bereich der Embedded Systeme ist Linux allerdings noch nicht so verbreitet, obwohl es gerade hier sein Potential nutzen kann. Linux einzusetzen hat folgende Vorteile:

- freie Verfügbarkeit, man ist nicht von einem Hersteller abhängig
- keine Lizenzkosten
- Open Source, bestehende Projekte können genutzt werden
- breite Unterstützung durch die Linux Entwicklungsgemeinde

Das IMMS hat es sich zum Ziel gesetzt, an der Verbreitung von Linux aktiv mitzuwirken. Ein Schwerpunkt des Themenbereichs System Design ist Linux im embedded Markt. Es wird ein breites Spektrum abgedeckt, angefangen von Hardware Entwicklung, über die Kernel-

sein System nach seinen Wünschen aus den vorhandenen Baugruppen zusammenstellen. Der Kunde hat die Möglichkeit, EmLIN als Steuerrechner, als universeller Buskonverter zum Umsetzen verschiedener Protokolle auf ein anderes oder einfach nur als Linux Entwicklungsboard einzusetzen.

## Forschungsverlauf

Herzstück von EmLIN ist ein Net +ARM40 Prozessor der Firma NETsilicon. Um eine Grundfunktionalität zu gewährleisten sind folgende Komponenten notwendig

- Prozessor Net +ARM40
- Speicher SDRAM sowie Flash
- Stromversorgung
- Ethernet bzw. RS232 zur Kommunikation.

Das Board ist mit dieser Ausstattung funktionsfähig. Weiterhin sind eine ganze Reihe verschiedener Schnittstellen vorgesehen. Einen vollständigen Überblick über die vorhandenen Schnittstellen erhält man in Abb. 2.



**Abb. 1:** Das Referenzboard 250 x 140mm<sup>2</sup>

portierung, die Anwendungs- und Treiberentwicklung bis hin zu Echtzeitlinux.

Um dieses Know-How dem Kunden näherzubringen, wurde EmLIN entwickelt. EmLIN ist ein auf einem Net +ARM Prozessor basierendes Entwicklungsboard für embedded Linux. Es bietet mehrere im industriellen bzw. PC Umfeld genutzte Schnittstellen. EmLIN wurde modular entwickelt, d.h. der Kunde kann sich

Zusätzlich ist ein frei programmierbarer XILINX FPGA vorhanden. Mit diesem Schaltkreis ist es möglich, zusätzliche Hardware zu implementieren, in diesem Fall wird ein seriell ATA Protokoll programmiert. Seriell ATA ist ein neuer Standard zum Anschluss von Festplatten an den PC, welcher eine höhere Datenübertragung als der bisherige parallel ATA ermöglicht.

<b>Bus</b>	<b>Einsatzgebiet</b>	<b>Beispiel</b>
Ethernet	Bürokommunikation	PC Vernetzung, Internet
IEEE1284	Bürokommunikation	Drucker
IEEE1394	Multimedia, PC	Digitale Videobearbeitung,
CAN	Automobiltechnik	Vernetzung im PKW,
USB	Multimedia, PC	Drucker, Scanner, Tastaturen
RS232	PC, Meßtechnik	Sensoren, Meßgeräte
Seriell ATA	PC	Festplatten

**Abb. 2:** Überblick über die zur Zeit eingesetzten Busse

Softwareseitig kommt ein Linux für MMU lose Prozessoren zum Einsatz, da der Net +ARM keine eigene MMU (Memory Management Unit) besitzt. Das Entwicklungspaket Net+Lx wurde von NETsilicon geliefert. Es beinhaltet einen Crosscompiler sowie ein uCLinux mit Kernel 2.0.38. Aus Gründen der Treiberverfügbarkeit wird eine aktuelle Version des Linuxkernel (Version 2.4) eingesetzt. Wichtig war hierbei, dass schon viele Treiber existieren, es mussten so weniger Treiber neu geschrieben werden. Größtenteils reichen ein paar Änderungen im vorhanden Quellcode vollkommen aus, um die Software an die Hardware anzupassen.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Jan Pietrusky

Tel: +49 (3677) 678331

Email: jan.pietrusky@imms.de

## **Forschungsstand**

Aktuell läuft auf dem Board eine vom IMMS portierte Linuxversion 2.4 auf dem EmLIN Board. An der Anpassung verschiedener Treiber auf diese Linuxversion wird zur Zeit gearbeitet. Die Arbeiten zum seriellen ATA Protokoll sind bereits in der Testphase, wobei die Treiberentwicklung noch Zeit in Anspruch nimmt, da dieser komplett neu geschrieben werden muss.

Daneben wird die Schaltung kontinuierlich den gegebenen Anforderungen angepasst, auch im Hinblick auf die unten erwähnte Modularisierung des Boards.

## **Ausblick**

In einer zweiten Version werden die Komponenten von einem Board auf zwei Boards aufgeteilt. Der eigentliche Rechnerkern mit Prozessor, Speicher, Ethernet und notwendiger Peripherie kommt auf eine Platine. Die einzelnen Schnittstellen, eine SDRAM – Speichererweiterung sowie der XILINX FPGA kommen auf ein eigenes Mainboard. Da im industriellen Umfeld größtenteils Sensoren und Aktoren bedient werden müssen, ist eine Erweiterung mit 2 PCI Steckplätzen ebenfalls in Planung. Es ist dann möglich, Karten zur Messwerterfassung bzw. Karten zur Ausgabe von Werten beliebiger Hersteller zu benutzen.

# eCos - Ein Open Source Betriebssystem für die Realisierung komplexer eingebetteter elektronischer Systeme

## Zielstellung

Die steigende Komplexität eingebetteter Systeme und die prinzipielle Verfügbarkeit entsprechender Hardware führen von Applikationen, die in einer Mainloop laufen, hin zu Applikationen, die auch schon in eingebetteten Systemen ein Betriebssystem benötigen. Für die Anbieter komplexer Systeme wäre es ideal, wenn nicht jeder Wechsel der Hardware ein neues Betriebssystem erforderte. Ideal wäre es ebenfalls, wenn die für die Applikationsentwicklung notwendigen Tools und das Betriebssystem selbst keine zusätzlichen Kosten verursachen würden. Unter Berücksichtigung der Durchsetzbarkeit am Markt wurde im Rahmen eines F&E-Projektes nach einem entsprechendem Betriebssystem und einer adäquaten Entwicklungsumgebung gesucht. Die Eignung des ausgewählten Betriebssystems soll mit einem aus einer Hardwareplattform, dem Betriebssystem und einer Demopplikation bestehenden komplexen eingebetteten elektronischen System nachgewiesen werden. Die mit diesem System zu realisierenden Funktionen und die Komponenten für die Hardwareplattform wurden von unserem Projektpartner vorgegeben.

## Forschungsverlauf

Zu Beginn des F&E-Projektes wurde Linux untersucht. Der Ressourcenbedarf erscheint aber speziell für Systeme, die in großer Stückzahl auf den Markt gebracht werden, zu hoch. Außerdem benötigen viele Applikationen nicht alle die Möglichkeiten, die Linux als Betriebssystem bietet. Es wurde deshalb nach einer Alternative gesucht.

Mit eCos wurde ein geeignetes Betriebssystem gefunden. eCos steht für "Embedded Configurable Operating System". Da eCos ein Open Source Betriebssystem ist, fallen bei seiner Nutzung keine Gebühren an. Das Know-How einer mit eCos realisierten Applikation bleibt trotzdem Eigentum des Entwicklers und muss nicht öffentlich gemacht werden.

Um dem Open Source Gedanken auch bei den Entwicklungstools weiter zu verfolgen, wurden frei verfügbare, GNU-basierte Cross-Development-Tools (Compiler, Assembler, Linker, Debugger, ...) für die Portierung und Applikationsentwicklung eingesetzt.

Im weiteren Verlauf des F&E-Projektes wurde der einzusetzende Controller festgelegt. Die anderen Hardwarekomponenten sollten erst zu einem späteren Zeitpunkt präzisiert werden. Um nicht mit der Portierung bis zur Fertigstellung der eigentlichen Hardwareplattform warten zu müssen, wurde eine erste Portierung

auf eine bereits verfügbare Hardwareplattform durchgeführt. Dank diesem Vorgehen konnten bereits zu diesem frühen Zeitpunkt Probleme erkannt und beseitigt werden. Gleichzeitig wurde so das geplante Vorgehen für die eigentliche Portierung praxisnah getestet. Unter Berücksichtigung der dabei gewonnenen Erkenntnisse konnte eCos danach auf die parallel zu diesen Arbeiten fertiggestellte Hardwareplattform reibungslos und deutlich schneller portiert werden. Die Portierung erfolgte im Wesentlichen in vier Schritten:

- Anpassung des Memorylayouts an die neue Plattform
- Portierung eines auf der Hardwareplattform laufenden Monitorprogramms zum Download und Debugging
- Anpassung der seriellen Schnittstellen
- Integration weiterer Hardwarekomponenten

Abschließend kann man feststellen, daß der "Umweg" über eine bereits vorhandene Hardwareplattform richtig war. Probleme konnten so frühzeitig gelöst und dadurch die Portierung auf die eigentliche Hardwareplattform erheblich beschleunigt werden.

## Forschungsstand

Mit eCos können komplexe Applikationen realisiert werden. Das Betriebssystem, von Red-Hat® daraufhin konzipiert, bietet den Entwicklern hinsichtlich ihrer Lösung Flexibilität, gewährt Einblick in alle Aspekte des Systems und ermöglicht damit eine maximale Kontrolle über das System selbst. Darüber hinaus erfüllt eCos Realtime-Anforderungen. Prinzipiell verfügt das Betriebssystem über folgende Funktionalität:

- diverse Treiber inklusive Ethernet, USB, Flash, serielle Schnittstellen
- TCP/IP mit optionalem SNMP Support
- ISO C und mathematische Bibliotheken
- EL/IX Level1 Posix Kompatibilitätsschicht
- µITRON 3.02 Kompatibilitätsschicht
- RedBoot bootstrap und debug-Firmware
- hochgradig portierbare Hardware Abstraction Layer (HAL)
- Real-time Kernel

Eine der herausragenden Eigenschaften von eCos ist die enorme Konfigurierbarkeit. Dies kann auf der Kommandozeile bzw. auch mit einem grafischen Konfigurationstool erfolgen. Damit kann das Betriebssystem an unterschiedlichste Hardwareplattformen angepasst und auf die Anforderungen der jeweiligen Applikation zugeschnitten werden. Im Gegensatz

zu Linux als Multiuser- und Multitasking-OS ist eCos ein Single-User- und Multithreading-OS. Unter eCos wird die Applikation mit dem Betriebssystem gelinkt und erst danach auf die Hardwareplattform geladen. Eine aus drei Threads bestehende Testapplikation inclusive eCos war z.B. ca. 64kB groß.

Nicht jede der oben aufgeführten Funktionen ist für jede Hardwareplattform verfügbar. Das Vorhandensein eines funktionsfähigen Beispiels erleichtert aber die Implementierung einer eigenen Lösung.

Inzwischen wurde eine eCos-Portierung auf die neue Hardwareplattform abgeschlossen. Abbildung 1 zeigt diese Hardwareplattform. Die Portierung schließt RedBoot als das Standardmonitorprogramm von Redhat zum Download und Debugging mit ein. Auf der Basis der eCos-Portierung und der neu entwickelten Hardwareplattform wurde eine Demoapplikation entwickelt, die unter anderem das von eCos bereitgestellte Multithreading nutzt. Damit konnte die Funktionsfähigkeit des neu entwickelten komplexen eingebetteten Systems nachgewiesen werden.

Im Ergebnis dieses F&E-Projektes steht dem Projektpartner mit eCos jetzt ein universelles, anpassungsfähiges, stabiles und leistungsfähiges Betriebssystem für komplexe eingebettete elektronische Systeme zur Verfügung, das Realtime-Anforderungen erfüllt und nur einen geringen Ressourcenverbrauch aufweist.

## Ausblick

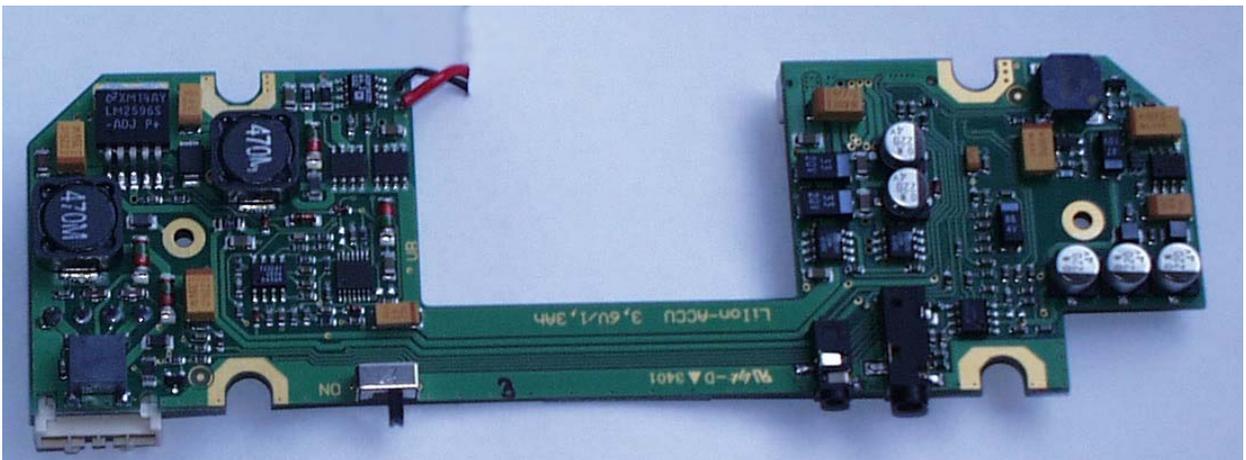
In der nächsten Zeit wird der Schwerpunkt unserer Arbeit darauf liegen, die Ergebnisse des F&E-Projektes zum Projektpartner zu transferieren und seine Mitarbeiter bei der Einarbeitung in eCos zu unterstützen. Wie bei anderen Betriebssystemen auch, benötigen die Applikationentwickler keine detaillierten Kenntnisse von den Internas von eCos, um ihre Ideen in Applikationen umzusetzen. Dank dem Open Source Charakter von eCos haben sie aber hier die Möglichkeit, das Betriebssystem gezielt zu verändern, sollte dies eine Applikation einmal verlangen. Zusammen mit den anderen Eigenschaften von eCos besteht so die Möglichkeit auf zukünftige Anforderungen des Marktes flexibel reagieren zu können. Dies zeichnet das Open Source Betriebssystem eCos gegenüber anderen Betriebssystemen aus und macht es für Entwickler und Anbieter von komplexen eingebetteten elektronischen Systemen besonders interessant.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Axl Schreiber

Tel.: +49 (3677) 678355

Email: axl.schreiber@imms.de



**Abb. 1:** Hardwareplattform

# Mikroelektronische Schaltungstechnik

Das IMMS stellt sich das Ziel, die Leistungsfähigkeit und Effizienz im analogen und mixed-signal Schaltungsentwurf durch Erforschen und Anwenden neuer EDA- und Design-Methoden sowie Schaltungstechniken zu vervollkommen. Dies soll dazu beitragen die Zusammenarbeit zwischen der Mikroelektronik- und Mikrosystemindustrie und Design-Zentren zu verbessern. Das IMMS sieht darin seinen Beitrag, um in Kompetenzclustern, wie z. B. dem Thüringer Optonet e.V. oder dem Automobilzulieferer Thüringen e.V. Innovationen zu fördern.

Folgende Kompetenzschwerpunkte wurden als Themengebiete im mixed-signal Schaltungsentwurf aufgebaut:

- HF-Design
- ADC-Entwurf und Sensorelektronik
- Optoelektronik
- DSP- und controllerbasierte Synthese von mixed-signal ASICs
- Modellierung und Simulation

Die Arbeiten im Themenbereich Mikroelektronische Schaltungstechnik sind darauf orientiert, Forschungsergebnisse aus europäischen (MEDEA) und nationalen Projekten (BMBF) für eine breite Anwendung (vor allem auch zu Gunsten mittelständischer Unternehmen) aufzubereiten und dabei eigene Kompetenz und Forschungsleistung einzubringen. Gleichzeitig sollen für die Thüringer Mikroelektronik- und Mikrosystemfirmen (z.B. im Technologiedreieck Jena-Erfurt-Ilmenau) industrienaher Forschungen durchgeführt werden, damit deren Produktentwicklungen mit neuen effektiven Methoden fehlerfrei und schnell durchgeführt werden können.

Als Beispiele sollen für das Jahr 2001 folgende Ergebnisse vorgestellt werden:

Aufbauend auf den Forschungen der vergangenen Jahre zum **HF-Design** (Projekte HF-Front-End/BMBF und Low Power Kommunikationsmodule/TMWFK) wird von den Industriepartnern eine Palette an Sender/Empfängermodulen für 433 MHz und 868 MHz angeboten. Die Forschungsarbeiten sollen zukünftig mit neuen Technologien (SiGe, SOI) bis in den Frequenzbereich von 6 GHz fortgesetzt werden (S. 30).

Im Themengebiet **ADC** wurde ein 14-Bit zyklischer RSD AD-Umsetzer mit Verhaltensbeschreibungen in seiner Architektur entwickelt, simuliert, optimiert und anschließend bis zum Layout entworfen und hergestellt sowie die Labormuster gemessen. Gleichzeitig wurden dabei die Entwurfsmethoden für Präzisions-SC-Schaltungen vorangebracht. Vorarbeiten für  $\Delta$ - $\Sigma$ -Schaltungen und -wandler sowie die zugehörigen Filter wurden durchgeführt (S. 26).

Im Themengebiet **Optoelektronik** wurde die Geschwindigkeit von DVD-Leseschaltungen ver-



dreifach (TIA mit > 40 MHz Bandbreite) und für den Lese-/Schreibbetrieb Schaltungen mit umschaltbarem Dynamikbereich entwickelt (S. 32). Für hochauflösende absolutcodierte Messsysteme wurde eine Teststruktur mit einem aus 512 Fotodioden bestehenden Zeilensensor einschließlich der analogen Signalverarbeitung realisiert (S. 31). Begonnen wurden Forschungsarbeiten zu Schaltungen für optische Low-Cost-Busse.

Für **DSP-basierte Systeme** wurde eine Entwurfsmethodik erforscht (S. 28), mit der ein System zunächst mathematisch beschrieben und simuliert werden kann (MATLAB, SIMULINK). Hiervon ausgehend werden die erforderlichen Ressourcen und erreichbaren Leistungsparameter abgeschätzt. Die Methode gestattet eine anschließende Implementierung auf einem DSP-Emulatorboard, in einem FPGA oder auch als ASIC.

Eine stürmische Entwicklung nahm das Themengebiet **Modellierung und Simulation** (S. 33 ff). Für die SOI-Technologie der X-FAB wurden die Modellierungsvoraussetzungen geschaffen und ein SOI-Design-Kit für digitale und analoge Hochtemperaturschaltungen entwickelt. Mit dem Design-Kit wurden mit der CADENCE-Umgebung erfolgreich Testschaltungen für Hall-Sensoren, ADCs, SRAMs, Antriebssteuerung u.a.m. für Umgebungstemperaturen bis 220 °C entwickelt.

Weitere Forschungen werden zu neuen ESD-Testmethoden, ESD-Modellierung und -Simulation durchgeführt.

Mit AnalogInsydes und AdvanceMS (beide aus dem MEDEA+-Projekt ANASTASIA+ bereitgestellt) sowie der Verifikationssoftware von SIEMENS (im Projekt VALSE von SIEMENS zur Verfügung gestellt) wurden neue Entwurfsmethoden übernommen und evaluiert, die in Schulungen und Workshops für Interessierte nutzbar gemacht werden sollen.

Ansprechpartner:

Prof. Dr. sc. techn. Franz Rößler

Tel.: +49 (361) 4276639

Email: franz.roessler@imms.de

# Analoge Korrekturschaltungen für hochgenaue SC A/D-Wandler

## Zielstellung

Im Themengebiet Analog-Digital-Umsetzer wurde 2001 das Projekt "Entwicklung von A/D-Wandlern für die Anwendung in Digitalen Signal-Verarbeitungssystemen unter Berücksichtigung neuester Technologien, Techniken und Anforderungen" (TMWFK) erfolgreich abgeschlossen. Es wurden insgesamt zwei Iterationen eines zyklischen RSD ADU in der Erfurter X-Fab-Technologie CX06 realisiert und ausgemessen. Um eine Referenz für die eigenen ADU-Messungen herzustellen, wurden Tests an den ADUs bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) Berlin durchgeführt. Beide Resultate zeigten eine sehr gute Übereinstimmung. 2001 haben ein Diplomand und ein Praktikant ihre Arbeiten auf dem Gebiet der Dezimationsfilter für überabgetastete ADUs erfolgreich abgeschlossen.

## Forschungsverlauf und -stand

Die Forschungsarbeiten im Projekt wurden (nach der erfolgreichen ersten ADU-Implementierung) im Jahr 2001 auf analoge Korrekturschaltungen zur Erhöhung der ADU-Auflösung konzentriert, anwendbar für zyklische und Pipeline-ADUs. Der Hintergrund dafür waren die Anforderungen an die Anwendung des ADU als stand-alone minimal-area IP-Block (da digitale Korrektur bei jeder Realisierung individuell im Digitalteil eingefügt werden kann), als auch für sehr empfindliche Switched-Capacitor (SC) Ausleseschaltungen z.B. für kapazitiven Sensoren.

Der Algorithmus basiert auf einer Fehleranalyse der SC-Schaltungen. Hauptgegenstand war dabei der Offset und die endliche Verstärkung der OpAmps. Die SC-Fehler durch Kapazitätsmismatch sowie Ladungsinjektion und Taktübersprechen in MOS-Schaltern wurden bereits durch geeignete Schaltungstechniken (Bottom-Plate Sampling, voll symmetrisches Layout) bei der ersten ADU-Iteration erfolgreich unterdrückt.

## OpAmp-Fehler bei SC

Die Auswirkung endlicher Verstärkung und des Offsets der OpAmps besteht darin, dass nach Erreichen des eingeschwungenen Endzustandes der Integrationsphasen von SC-Systemen infolge der noch vorhandenen Spannungsdifferenz am Eingang ( $U_e = U_{out}/G$ ) die Ladung von der Sample-Kapazität  $C_x$  (aus einer vorhergehenden Samplephase, Abb. 1a) nicht vollständig auf die Integrations-Kapazität  $C_y$  übertragen wird. Ausserdem erscheint am Ausgang des OpAmps nur die um  $U_e$  reduzierte Spannung über der Integrationskapazität.

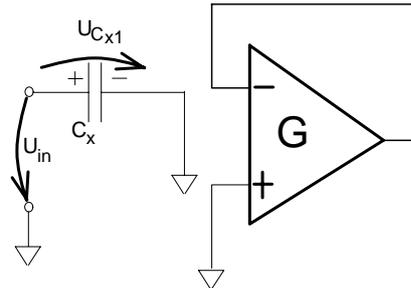


Abb. 1a: SC-Integrator Sample-Phase

Für die Ladungsverschiebung von  $C_x$  auf  $C_y$  ergibt die Bilanz:

$$\begin{aligned} U_{out} &= (U_{in} - U_e) \frac{C_x}{C_y} - U_e \\ &= U_{in} \frac{C_x}{C_y} - U_e \left( 1 + \frac{C_x}{C_y} \right) \end{aligned}$$

Wenn  $C_x = C_y$  ergibt sich ein Fehler von  $2 \cdot U_e$ , der durch eine Hilfsladung  $Q = 2 \cdot U_e \cdot C_x$  kompensiert werden kann. Als Basis für die Korrektur werden Fehler-Messkapazitäten benutzt ( $C_e \approx C_x$ ), die aber den Arbeitskapazitäten Ladung in der Größenordnung des zu korrigierenden Fehlers entziehen. Deshalb muss die Fehlerermittlung in einer vorhergehenden „Prädiktphase“ erfolgen, die den eigentlichen „Rechenvorgang“ mit Dummy-Kapazitäten „simuliert“.

## Korrektur-Schaltung

Im zweiten ADU-Design wurde eine neuartige Korrektur durch Ladungsaddition konzipiert, die bessere Eigenschaften besitzt, als das bisher bekannte Prinzip durch Spannungsaddi-

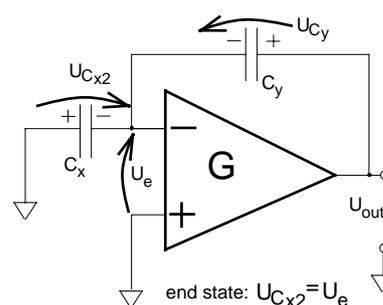


Abb. 1b: SC-Integrator: Hold-Phase

tion und die sich besonders gut in Fully-Differential Schaltungstechnik realisieren lässt. Dabei werden zwei parallele Messkapazitäten ( $C_{e1} = C_{e2}$ ) zwischen beiden OpAmp-Eingängen in der Prädiktphase mit der vollen Eingangsdifferenz aufgeladen:

$$Q_e = U_{e1} (C_{e1} + C_{e2}) = 2 \cdot U_{e1} \cdot C_e.$$

In der Korrekturphase werden die beiden  $C_e$  an je einen Eingang gegen Analogmasse (Mittenspannung) geschaltet. Im Anfangsmoment ent-

steht eine Spannungsverdopplung an den Eingängen ( $2U_{e1}$ ), die aber durch die Gegenkopplung wieder auf  $U_{e2}$  reduziert wird, wobei die Hälfte der Ladung  $2U_{e1}C_e$  auf das Integrations-C ( $C_y$ ) verschoben wird. Wenn die Verhältnisse in der Prädikt- und Sample-Phase ähnlich sind ( $U_{e1} \approx U_{e2}$ ) und zugleich  $C_e = 2C_x$  dimensioniert wurde, kompensiert man die Wirkung des OpAmp-Fehlers.

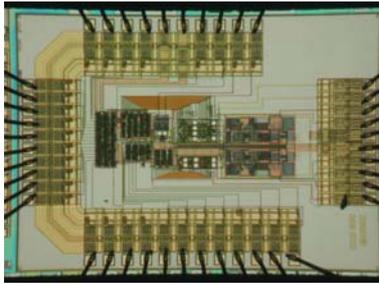


Abb. 2: Chipfoto des ADU1-Prototypen

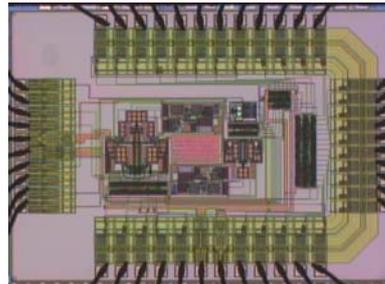


Abb. 3: Chipfoto des ADU2-Prototypen

Als nachteilig zeigt sich bei der Ladungskorrektur (gegenüber der Korrektur durch Spannungsaddition) der Verbrauch der in den  $C_e$ -Mess-Kapazitäten gespeicherten Fehlerwerte bei jedem Korrekturvorgang. Die  $C_e$  können jedoch so groß ausgelegt werden, dass alle Fehler in einem Mehrphasenprozess in der letzten Phase korrigiert werden.

### Korrekturkonzept des ADU2

Die Anzahl der SC-Phasen für unseren zyklischen ADU beträgt vier und wird bestimmt durch den SC-Block der die Operation ( $2X_i \pm U_{ref}$ ) realisiert. Darin treten zwei zu korrigierende Integrationsprozesse (Ladungsverschiebungen) auf. Der in Phase 1 (Prädiktphase) auf den  $C_e$  gespeicherte Fehlerwert wird erst in Phase 4 zur Korrektur verbraucht. Die Korrektur in Phase 2 erfolgt einfach, indem die in Phase 2 wirksame Integrationskapazität ( $C_z$ ) ebenfalls in Phase 1 als Messkapazität benutzt wird und mit dem Fehler  $U_{e1}$  negativ vorgeladen wird. Die Korrektur in dem zweiten SC-Block, dem 3-Phasen-Sample&Hold, erfolgt durch Ladungsaddition.

### Realisierung

Bei beiden ADU-Iterationen wurden unterschiedliche Layout-Techniken erprobt. Abb. 3 zeigt eine typische kreisähnliche Anordnung der Blöcke, die dem zyklischen ADU-Umlauf am nächsten kommt und dadurch Übersprech-Störungen vermeidet. Ein wichtiger Aspekt beim Layout der SC-Matrizen war die Kreuzungsfreiheit der empfindlichsten Knoten.

### Resultate

Bei den ersten dynamischen und statischen Messungen zur zweiten ADU-Iteration (ADU2) konnte die Wirksamkeit des Korrekturprinzips erfolgreich nachgewiesen werden. Die ADU-Messungen erfolgten jeweils auf einem 16-Bit-Auflösungslevel. Die harmonischen Verzerrungen werden von  $THD = -69,78\text{dB}$  auf  $-74,38\text{dB}$  beim Einschalten der analogen Korrektur unterdrückt, was sich bei der Gesamt-ADU-Performance durch eine Änderung des SINAD (Noise & Distortion) von  $65,77\text{dB}$  auf  $66,8\text{dB}$  auswirkt. Dies entspricht einer effektiven Auflösung von  $10,8\text{Bit}$  und zeigt, dass der ADU durch rauschoptimiertes Redesign noch verbessert werden könnte. Abb. 4 zeigt die ermittelte integrale Nichtlinearität (INL), die das 12-Bit-Niveau mit  $\pm 0,5\text{LSB}$  erfüllt. Die statischen ADU-Messungen zeigen, dass neben den nichtlinearen Verzerrungen auch der ADU-Offset deutlich minimiert wird: von  $300-600$  auf nur  $20\text{LSB}$ -Einheiten mit analoger Korrektur.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Reinhard Kindt  
Tel. +49 (361) 41740027  
Email: reinhard.kindt@imms.de

Dipl.-Ing. Richard Izák  
Tel. +49 (3677) 673841  
Email: richard.izak@imms.de

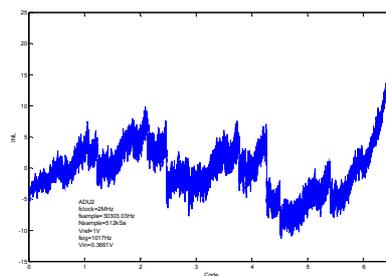


Abb. 4: INL für 30 kS/s und 1 kHz Sinus-Signal, ermittelt auf 16-Bit-Level mittels Histogramm (invertiert gegenüber Abb. 5)

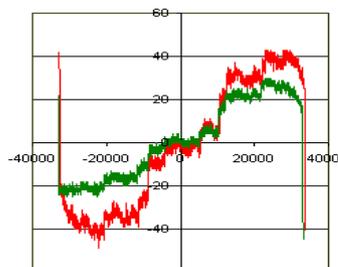


Abb. 5: Vergleich statisch gemessener INLs mit und ohne analoge Korrektur

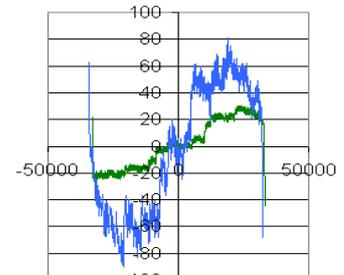


Abb. 6: Vergleich von INL bei ADU1 (blau) u. ADU2 (grün)

# DSP-basierte Systeme in der Mess- und Regelungstechnik

## Zielstellung

Viele Produkte in der Mess- und Regelungstechnik sind von kleinen Stückzahlen geprägt, was einen hohen Anteil an Entwicklungskosten bewirkt. Der Einsatz von mixed-signal Schaltungen mit A/D-Umsetzer und DSP kann dieses Problem lösen. Durch die Programmierbarkeit der Systeme kann eine Schaltung an verschiedene Aufgaben angepasst werden, was die produzierten Stückzahlen vergrößert. Weiterhin ermöglicht die Software auch die kostengünstige Entwicklung von komplexen Algorithmen.

Im IMMS wird eine Methodik entwickelt, mit der Signalverarbeitungsaufgaben auf eine Kombination aus A/D-Umsetzer, DSP und Software abgebildet werden.

## Forschungsverlauf

Im vergangenen Jahr wurde die Methodik zum Entwurf von DSP-basierten Systemen durch die Entwicklung und Konfiguration von Entwurfswerkzeugen weiterentwickelt. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in einem Demonstratordesign praktisch angewendet.

## Ressourcenabschätzung

Die Kosten eines DSP-basierten Systems werden durch die Auswahl des Prozessors entscheidend beeinflusst. Die technische Eignung des DSPs für eine bestimmte Aufgabe ist neben anderen Faktoren, wie Kenntnisstand der Mitarbeiter und Verfügbarkeit der Entwurfswerkzeuge, ein wichtiges Auswahlkriterium für den Prozessortyp.

Um die kritischen Ressourcen (Rechenzeit und Speicherplatz) präzise zu planen, wurde ein Programm erstellt, das diese Ressourcen aus einem Systemmodell abschätzt (s. Abb. 1).

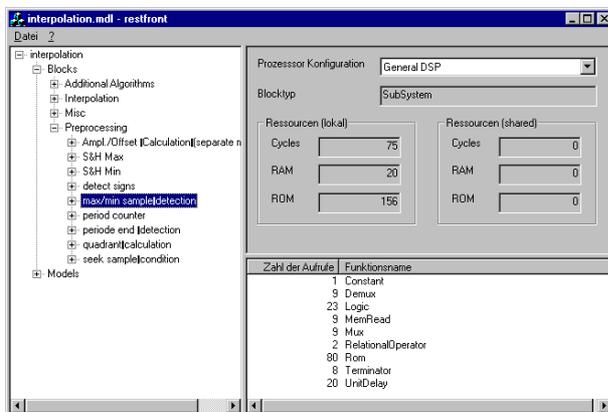


Abb. 1: Screen-Shot der Ressourcenabschätzung

Ein Modell in der Systembeschreibungssprache Simulink wird durch das Programm analysiert und in algorithmische Elemente zerlegt. Für jeden Elementaralgorithmus werden die

benötigten Ressourcen für den gewünschten Prozessor bestimmt. Die Ressourcenabschätzung ist konfigurierbar. Neue Prozessoren können hinzugefügt werden, um verschiedene Prozessorarchitekturen zu vergleichen. Durch die hierarchische Analyse des Ressourcenverbrauchs wird aufgezeigt, wo die Ressourcen eingesetzt werden. Kritische Teile des Systems können ggf. überarbeitet werden.

## System-Software Cosimulation

Während des Systementwurfs wird eine ausführbare Spezifikation in einer Hochsprache (z.B. Simlink oder Saber) erstellt. In den weiteren Phasen des Entwurfs werden verfeinerte Modelle der Implementierung gegen diese Spezifikation verifiziert. Da für die Implementierung andere Simulatoren verwendet werden, müssen die Daten der Spezifikation konvertiert werden, wodurch die Flexibilität der Hochsprache verloren geht.

Dieses Problem kann durch eine gemeinsame Simulation von Spezifikation und Implementierung gelöst werden (s. Abb. 2).

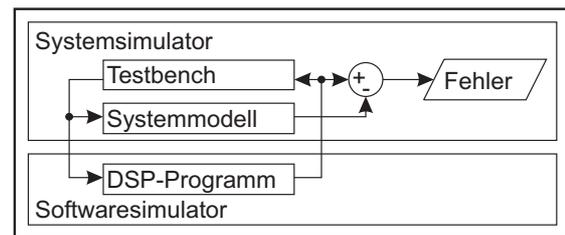


Abb. 2: Cosimulation von System und Software

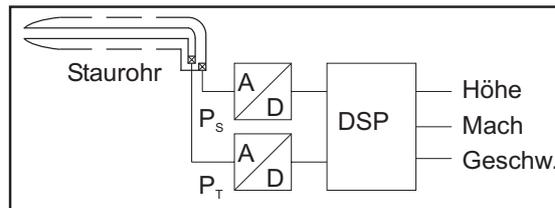
In der Hochsprache der Spezifikation können komfortabel Testdaten erzeugt werden. Der Simulator der Implementierung ermöglicht eine präzise Simulation des entworfenen Systems. Im IMMS wird die Hochsprache Simulink mit verschiedenen Softwaresimulatoren für DSP-Cores (ARC) und Mikrocontroller (MLX16) gekoppelt. Durch die Cosimulation des Systemmodells mit dem Prozessormodell können beide Modelle miteinander verglichen werden. Die Auswirkungen von Differenzen (z.B. Rundungsfehler) können so direkt simuliert werden.

## Demonstrator Luftwerterechner

Bei Flugzeugen werden Luftwerte (z.B. Flughöhe und Machzahl) aus dem Luftdruck in einem Staurohr berechnet (s. Abb. 3).

Für die Erfassung der Daten ist eine sehr genaue A/D-Umsetzung der Drucksignale der Sensoren notwendig. Die digitalisierten Werte werden durch komplexe Algorithmen korrigiert und in die Luftwerte umgerechnet.

Die Verarbeitung der Signale durch einen DSP ermöglicht eine Anpassung der Algorithmen an



**Abb. 3:** Signalflussplan eines Luftwerterechners

verschiedene Sensoren, ohne die Hardware zu überarbeiten.

Die Berechnung der Luftwerte und die Erzeugung der Testdaten wurden nach einer Spezifikation der Firma Nord-Micro AG in Simulink modelliert. Die Luftwerteberechnung wurde dann im IMMS in C für den ARC-Core programmiert. Die Differenzen zwischen der ARC-Software und dem Simulink-Modell konnten durch Cosimulation beider Modelle analysiert werden. Das System wird von der FhG IIS-A auf einem FPGA-Board implementiert und erprobt.

### Forschungsstand

Mit der im IMMS entwickelten Methodik ist ein effektiver Entwurf von DSP-basierten mixed-signal ASICs möglich. Mittels Ressourcenabschätzung können fundierte Aussagen über die Auswahl eines geeigneten Prozessors getroffen werden. Durch die Cosimulation von System- und Softwaremodellen können komfortabel Testbenches erstellt werden, ohne auf eine bitgenaue Simulation des Systems zu verzichten. Die Verarbeitung von Drucksignalen in einem Luftwerterechner demonstriert die Methodik am Beispiel des ARC-Cores.

### Ausblick

Es ist geplant, die Entwurfsmethodik für DSP-basierte System so weiterzuentwickeln, dass auch die nicht-elektrische Umgebung (z.B. mit VHDL-AMS) simuliert werden kann. Durch die Realisierung einer IP-Plattform sollen über den Prozessor hinaus vorhandene Blöcke wiederverwendet und in den verschiedenen Ebenen des Entwurfs simuliert werden. Die praktische Anwendung des Entwurfsflusses ist für spezielle Anwendungen (z.B. Hochtemperatur Sensorinterface in SOI-Technologie) geplant.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Christian Lang  
 Tel.: +49 (361) 4170164  
 Email: christian.lang@erfurt.imms.de

# Integrierte Induktivitäten

## Zielstellung

Die Arbeitsschwerpunkte im Bereich HF-Schaltungsdesign konzentrieren sich auf die Planung, den Entwurf und den Test von integrierten HF-Schaltkreisen. Dazu zählen insbesondere Transmitter, Receiver und Transceiver für Applikationen in den lizenzfreien Funkbändern bei 433 MHz, 868 MHz, 2.4 GHz und 5.6 GHz. In diesen ICs spielen Oszillatoren für die Referenzfrequenzzeugung eine Schlüsselrolle. Trotz ihrer hohen Performance wurden LC-Oszillatoren in Low Cost Applications bislang selten eingesetzt. Dies resultierte maßgeblich aus den geringen Güten integrierter Induktivitäten sowie aus Schwierigkeiten bei deren Modellierung. Mit der Weiterentwicklung der Möglichkeiten der Integrationstechnologien und der Entwurfswerkzeuge im Schaltungsdesign sowie der größer werdenden HF-Übertragungsfrequenzen wird jetzt der Einsatz von vollständig integrierten LC-Oszillatoren nicht nur möglich, sondern mit der stetig steigenden Systemkomplexität auch notwendig (kanalfähige HF-Systeme).

## Ergebnisse

Das IMMS beschäftigte sich intensiv mit der Entwicklung und Optimierung von integrierten Induktivitäten. Dazu wurden verschiedene Testfelder entworfen und ausgewertet (s. Abb. 1). Die Einbindung in den Entwurfsflow erfolgt

Frequenz [GHz]	$Q_{max}$	$L_{min}$ [nH]	$L_{max}$ [nH]
0,9	7,8	4	12
2,4	11,5	1,5	3,8

mit dem Inductor Modeler innerhalb von Cadence DFII. Damit wird der Entwickler in die Lage versetzt, die Spule während des Designprozesses so zu optimieren, dass die Gesamtschaltung die bestmögliche Performance erreicht. Der bislang übliche und mit vielen Iterationen verbundene Weg, fixe Spulenlayouts einzusetzen, wird damit hinfällig.

Die Tabelle gibt einen Überblick über die erreichbaren Parameter integrierter Induktivitäten. Sie wurden in einer 0,6m Standard Bi-CMOS Technologie integriert. Die messtechnische Charakterisierung der Spulen erfolgte mit Hilfe eines HF-Messplatzes und einem HP 8510 Networkanalyzer. Es wurden zunächst die S-Parameter der Spulen

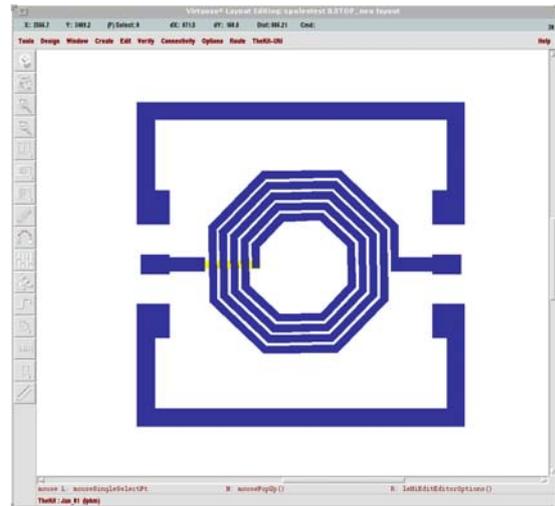


Abb. 1: Layoutbeispiel Spulentestfeld

gemessen und ein Deembedding mit der zugehörigen Openstruktur durchgeführt. Anschließend konnten die Elemente des elektrischen Ersatzschaltbildes der Spule extrahiert werden.

Ein Vergleich von Simulations- und Messergebnissen ist in Abbildung 2 dargestellt.

## Ausblick

Neben Spulen werden am IMMS verschiedene Varianten integrierbarer Varaktoren (MOS-, PN-Typen) untersucht. Die Arbeiten zur Spulen- und Varaktorcharakterisierung sowie deren Modellierung bilden die Grundlage für den Entwurf von vollständig integrierten LC-VCOs. Diese werden Ringoszillatoren in bestehenden PLL-Synthesizern ersetzen. RF-Applikationen, für die bislang externe Schwingkreiselemente notwendig waren, lassen sich so vollständig integriert realisieren.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Matthias Lange

Tel.: +49 (361) 4276601

Email: matthias.lange@imms.de

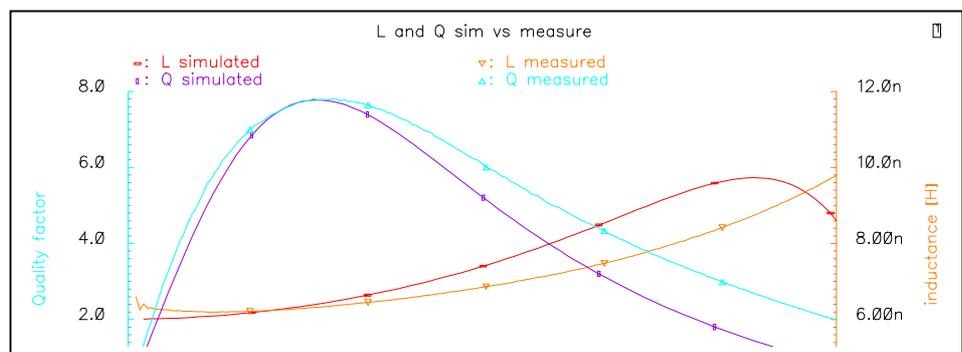


Abb. 2: Vergleich von Simulations- und Messergebnissen einer für 1 GHz Arbeitsfrequenz optimierten Spule (Induktivität und Güte als Funktion der Frequenz)

# Optischer Zeilensensor TH9353.1

## Zielstellung

Systeme und Komponenten für die Automatisierungs- und Steuerungstechnik nehmen zunehmend einen bedeutenderen Platz in der Herstellung ein. Der entwickelte optische Zeilensensor TH9353.1 ist eine typische Entwicklung von Sensorik und Steuerungstechnik auf der einen Seite und der rechnergestützte Datenverarbeitung auf der anderen Seite miteinander zu verbinden. Die Projektarbeit umfasste den Durchlauf des vollständigen Entwurfsweges, ausgehend von der Erstellung der Systemspezifikation bis hin zum entworfenen und gemessenen ASIC. Dies schließt ebenso die Etablierung eines effizienten Entwurfs sowie die Entwicklung neuer Schaltkreiselemente ein. Das Projekt wurde in Jahr 2001 erfolgreich zu auswertbaren Ergebnissen gebracht.

## Forschungsverlauf und -stand

Wichtigstes Ergebnis der Projektarbeit war der erfolgreiche praktische Nachweis des Funktions- und Messprinzips dieses optischen Zeilensensors. Das wesentlich Neue an der Entwicklung dieses Sensors ist die hohe Auflösung der gewonnenen optischen Daten und die schnelle Verarbeitungsgeschwindigkeit. Eine mögliche Anwendung ist, den Schaltkreis mechanisch vor einem Strichcode zu positionieren, welcher optisch ein äquivalentes Schatten- oder Lichtfeld verursacht. Dieses Lichtfeld wird mit Hilfe von 512 Fotodioden, welche sich auf dem Schaltkreis in einer Zeile befinden, in gleichwertige analoge Spannungen umgewandelt, abgetastet und als auswertbare Spannungen für die weitere Verarbeitung zur Ausgabe gebracht. Somit stehen an den analogen Blockausgängen des Schaltkreises das erfasste Licht- und Schattenfeld als Multiplexsignal zur Verfügung. Eine interne separate digitale Logik steuert den Verarbeitungsablauf so, daß die analogen Blockausgänge des Schaltkreises an nachfolgend periphere prozessorgestützte Baugruppen arbeiten können. Eingefasst ist der Zeilensensor auf einem speziell dafür angefertigten Glasträger.

## Ausblick

Im Jahr 2002 wird die Entwicklung weiterer Sensoren in der Optotronik ein Teil der Forschung ausmachen. Ein wesentlicher Themenschwerpunkt wird die Entwicklung von ASICs in der optischen Datenverarbeitung sein. Der Zeilensensor wird den Einsatz in zukünftigen Messsystemen finden.

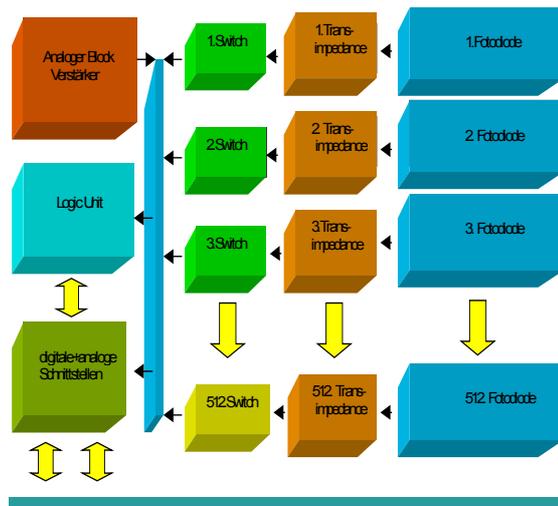


Abb. 1: Blockschaltbild des Zeilensensors TH9353.1

	<i>min</i>	<i>Typ</i>	<i>max</i>
$U_{DDA}$	4.5 V	5 V	5.5 V
$U_{DDD}$	4.5 V	5 V	5.5 V
$I_{DDA}$		25 mA	
$I_{DDD}$		10 mA	
<b>Clock</b>		500 kHz	1 MHz
$Z_{trans}$	0.5 M $\Omega$	1M $\Omega$	1.5 M $\Omega$
$I_{Foto}$	100 pA		200 nA
<b><math>P_{out}</math> per analog channel</b>	18 dB	20 dB	22 dB
<b><math>U_{out}</math> Hub per channel</b>	500 mV	1.8 V	2.2 V
<b>Temperatur</b>	-20°C	27°C	90°C
$U_{ref}$	2.2 V	2.5 V	2.8 V

Tab. 1: Spezifikation des optischen Zeilensensors TH9353.1

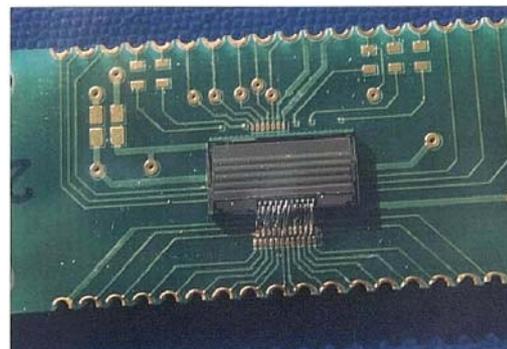


Abb. 2: Zeilensensor TH9353.1 als ASIC in einer Teststruktur

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Steffen Lange

Dipl.-Ing. Frank Miehlisch

Tel.: +49 (0361) 4276692

Email: steffen.lange@erfurt.imms.de

Email: frank.miehlisch@erfurt.imms.de

# Integrierte optische Empfänger für DVD Lese- und Schreib- Lese-Geräte

## Zielstellung

Das Forschungsziel im Projekt "DVD blue" ist der Entwurf von integrierten optischen Empfängern zur hochdichten Datenaufzeichnung. Angewendet werden diese Empfänger in CD- und DVD-Laufwerken. Dort wurde mit dem Übergang von infraroten Abtastsystemen (CD) zu roten Abtastsystemen durch die schärfere Fokussierung des Lichtes eine wesentliche Steigerung der Aufzeichnungsdichte erreicht (CD: 0,65GB, DVD: 4,7GB).

## Forschungsverlauf und -stand

Die gegenwärtigen Arbeiten konzentrieren sich auf den Entwurf von optischen Empfängern für den Einsatz in herkömmlichen DVD-Lesegeräten sowie weiterführend in DVD-Schreib-Lese-Geräten. Der dazu entworfene Empfängerschaltkreis vereinigt das Sensorelement (Fotodiode), den nachfolgenden Verstärker (TIA-tranceimpedance Amplifier) sowie eine Signalvorverarbeitung auf dem selben Chip. Er besteht dabei aus vier schnellen Empfangskanälen zur Gewinnung des Focussierungssignals, einer Addierschaltung für diese schnellen Kanäle zur Ausgabe des Datensignals (Grenzfrequenz: 60MHz) und vier langsamen Empfangskanälen zur Erzeugung des Signals zur Spurlageeinstellung. Der Empfänger für die DVD-Schreiber ist in der Lage, im Schreibbetrieb mit der gleichen Geschwindigkeit wie im Lesebetrieb zu arbeiten.

## Ausblick

Das Ziel der weiteren Arbeit wird sein, die Geschwindigkeit normaler DVD-Empfänger zu erhöhen sowie die optischen Empfänger für die nächste Generation von DVDs zu entwickeln. Dort wird auf der Grundlage von blauem Laserlicht eine nochmalige Steigerung der Aufzeichnungsdichte möglich (bis ca. 20GB für eine einlagige, einseitige Disk). Aufgrund der verringerten Quanteneffizienz bei blauem Licht gibt die Fotodiode jedoch einen kleineren Sig-

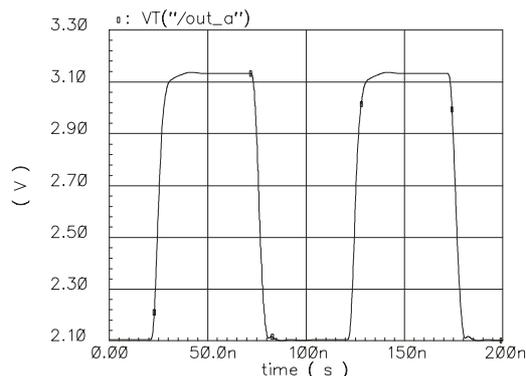


Abb. 2: Simulationsergebnis eines schnellen Kanals

nalstrom ab bei einer gleichzeitig höheren Grenzfrequenz, so dass an die neu zu entwerfenden Verstärker wesentlich höhere Forderungen hinsichtlich Bandbreite und Empfindlichkeit gestellt werden.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Steffen Lange

Tel.: +49 (361) 4276692

Email: steffen.lange@imms.de

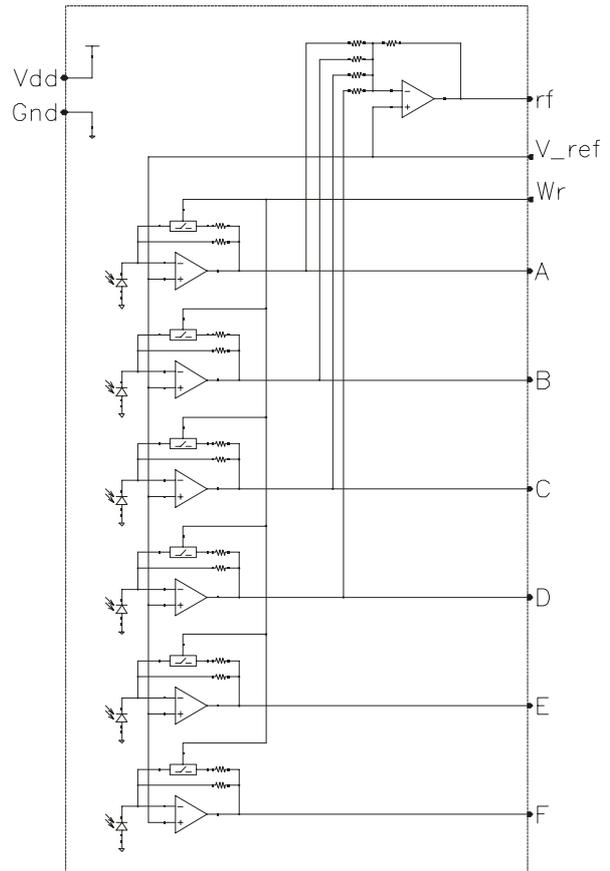


Abb. 1: Blockschaltung des DVD-Empfängers

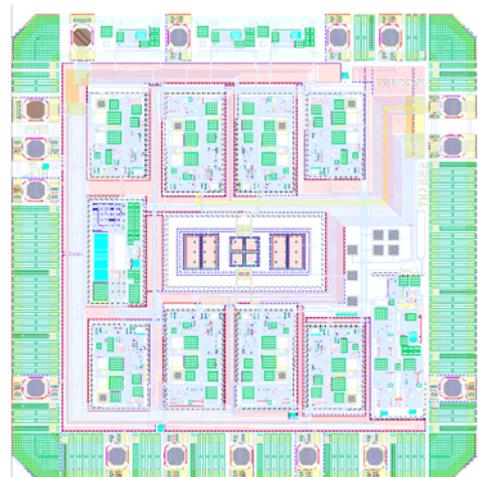


Abb. 3: Layout des DVD Schreib-Leseempfängers

# SOI Schaltungstechnik

## „Qualifizierungs-Device“

### Zielstellung

Im Rahmen des Projektes "Realisierung eines Qualifizierungs-Bauelements für die Digital-Library der X-FAB Technologie XI10" wurde ein Q-Device-Chip realisiert. Dieses dient zur Charakterisierung der digitalen Zellen der X-FAB Technologie XI10 (SOI):

- Validierung: logische Funktion, Timing, Leistungsaufnahme
- AC/DC Parametertest
- ESD-Test
- IDDQ-Test
- Lebensdauertest
- Ausfalluntersuchung
- Verifizierung des Design Kits/Flows

### Forschungsverlauf und -stand

Der aktuelle Stand (September 2001) der Vorarbeiten des X-FAB-Projekts "X-FAB Digital Cell\_Q\_Device" wurde übernommen und auf dieser Grundlage entstand die konkrete Implementierung der Digital-Zellen in der XI10 Technologie.

Das Grundkonzept beinhaltet einen kombinatorischen (Inverter, Buffer, Tri-State, (N)AND, (N)OR, EX(N)OR, FA) und einen sequentiellen (Flip-Flops, Latches) Teil. Hier wurde vorerst nur der kombinatorische Teil realisiert.

Die Testkonzeption für die Technologie XC06 wurde überarbeitet und an die XI10 Technologie angepasst: Reduzierung des Umfangs auf die aktuelle Gatteranzahl der XI10, Vereinfachung der vorhandenen Schematics. Um die allgemeine Anwendbarkeit des Konzepts (Portabilität auf beliebige X-FAB Technologien) nicht zu verletzen, wurden bei fehlenden Gattern und Gatterblöcken Dummy-Strukturen realisiert. Letzteres wird es ermöglichen, das Q-Device mit universellen Pattern-Sätzen zu testen.

Der kombinatorische Teil besteht aus 10 Blöcken in denen die Subblöcke einzelner Gatter unterschiedlicher Anzahl zusammengefasst sind. Die Gatter-Subblöcke beinhalten das einzelne Gatter zum Testen der logischen Funktion sowie eine Gatter-Kette (offen oder als Ringoszillator betrieben) zum Messen dynamischer Kenndaten (Verzögerungszeiten, steigende, abfallende Flanken). Die Ketten werden im Dauer- und im Pulsbetrieb getestet. Weiterhin bietet das Device die Möglichkeit zum Testen der IO Zellen der XI10 Technologie (NAND-Tree). Das Layout des Q-Device-Bauelementes ist in Abb. 1 dargestellt.

### Ausblick

Nach Fertigstellung der Q-Device-Chips (März 2002) ist auch deren messtechnische Charakterisierung am Institut geplant. Die Messungen werden dabei mit Hilfe der bereitgestellten Test-Pattern-Sätze durchgeführt (Tester HP 82000).

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Valentin Nakov  
Tel.: +49 (3677) 678341  
Email: valentin.nakov@imms.de

Abb.1: Layout Q-Device

# SOI Schaltungstechnik „Speicherentwicklung“

## Zielstellung

Im Themengebiet SOI werden im Rahmen eines internen Projektes Schaltkreise für Sensorinterfaces entwickelt. Damit das entwickelte Interface an unterschiedliche Sensoren angepasst werden kann, wird ein wiederbeschreibbarer Speicher (SRAM, EEPROM) zum Ablegen von Daten für die Kennlinien-Korrektur der gemessenen Werte benötigt. Die Blockschaltung des geplanten Sensorinterfaces stellt Abb. 1 dar.

## Forschungsverlauf und -stand

Die Entwicklung von SRAM Speichern am IMMS wurde im Oktober 2000 im Rahmen einer Diplomarbeit begonnen. Ergebnis dieser Arbeit war ein 256x8 Bit großer Speicher mit allen elementaren Peripherielementen (Leseverstärker, Bitleitungsvorladung und Dekoder). Nach den Messungen wurde dieser überarbeitet, erweitert und an die in der Zwischenzeit aufgetretenen Änderungen der Technologie angepasst. Abb. 2 zeigt das Layout der zweiten Generation des SRAM-Speicherchips. Das Speicherzellenarray und die Lage der wichtigsten Peripherielemente sind gekennzeichnet. Den Kern des Speichers bildet ein Array aus 256x32 SRAM-Doppelzellen (jede Zelle speichert 2 Bit). Den Zugriff auf das gewünschte 16 Bit Datenwort ermöglichen Wort- und Bitleitungsdekoder. Der Wortleitungsdekoder ist ein auf beide Seiten des Zellenarrays aufgeteilter NAND-Dekoder, beim Bitleitungsdekoder handelt es sich um eine einfache Variante eines 2:1 Multiplexers. Sowohl im Adress- als auch im Datenpfad sorgen Treiber für den Erhalt der Pegel. Die in der Abbildung mit "2" markierten Ausleseschaltkreise ermöglichen das zerstörungsfreie Lesen der Daten. Das erforderliche Signalspiel für Schreib- und Lesevorgang wird durch den Controller zur Verfügung gestellt. Von aussen ist der Speicher über Daten- und Adressleitungen sowie ein Signal zur Richtungsumschaltung ansprechbar. Zudem benötigt der Controller ein Taktsignal.

Da der verwendete SOI-Prozess für den Entwurf von EEPROMs umgestaltet werden muss, haben die SRAMs einen Entwicklungsvorsprung von etwa einem Jahr. Es wurden bisher EEPROM und EPROM Einzelzellen in verschiedenen Varianten entworfen. Darüberhinaus wurden bereits einige Teile der Peripherie (Hochvoltschalter, Charge-Pumps) des geplanten nichtflüchtigen Speichers simuliert und ebenfalls als Teststrukturen einzeln realisiert.

## Ausblick

Durch Messungen an den Teststrukturen sollen besonders geeignete Layoutvarianten

identifiziert und Anregungen für ein Redesign gefunden werden. Auf Basis der Messergebnisse des SRAM soll dieser dann anschließend ebenfalls einem Redesign unterzogen werden. Desweiteren ist geplant den SRAM mit einem Built-in-Self-Test zu versehen. Ziel der Speicherentwicklung ist es, SRAM und EEPROM nicht nur im geplanten Sensorschaltkreis einsetzen zu können, sondern diese auch im Rahmen des Design-Kits zur Verfügung zu stellen.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Sonja Richter

Tel.: +49 (3677) 678324

Email: [sonja.richter@imms.de](mailto:sonja.richter@imms.de)

# SOI Schaltungstechnik „Design Kit“

## Zielstellung

Im Rahmen eines Auftrages der X-FAB Semiconductor Foundries AG an die IMMS gGmbH bestand die Aufgabe, ein Design-Kit für die X-FAB Technologie XI10 1,0µm SOI-CMOS zu erstellen. Für den Design Support zeichnet die X-FAB Semiconductor Foundries AG verantwortlich. Die Maintenance, wie z.B. Einbau von Neuerungen bzw. Änderungen, wird durch die IMMS gGmbH übernommen. Dieses Projekt wurde 2001 abgeschlossen.

## Forschungsverlauf und -stand

Das Design-Kit wurde in der Cadence Affirma Spectre Mixed-Signal Designumgebung entwickelt. Es stellt eine Entwicklungsumgebung für Mixed-Signal-Designer und Layouter dar. Der durch das Design-Kit vollständig unterstützte Design-Flow (s. Abb. 1) unterscheidet sich nicht wesentlich von dem eines Standard CMOS-Prozesses.

Er beginnt mit der Eingabe der digitalen oder analogen Schaltpläne (Schematic Entry) und anschließender Pre-Layout-Simulation, er setzt sich mit dem Layout fort und wird nach abschließender Post-Layout-Simulation mit der Abgabe der Daten im GDSII-Format in der Waferfabrik abgeschlossen. Das besonders bei Analogschaltungen zu beachtende SOI-spezifische Verhalten, wie der Kink Effekt, die Selbsterwärmung von Transistoren oder die Kontaktierung des Substrats, wird bereits durch die Modelle im Design-Kit mit berücksichtigt. Für den Prozess der X-FAB besteht zudem ein MPW-Service, den auch kleinere Firmen nutzen können.

Im Design-Kit sind neben einer Standardzellbibliothek digitaler Zellen sowie einer Bibliothek mit Input- und Output-Zellen „primitive Elemente“ wie Transistoren, Dioden, Widerstände und lineare Kapazitäten, auch verschiedene Hochvolt-Transistortypen für 30, 60 und 90 V sowie ein Hall-Element für die Magnetfelddetektion enthalten. Optional werden eine lineare Kapazität sowie ein hochparasitären Elementen unterschieden. Als parasitäre Elemente werden Kapazitäten zwischen Leitungen, zum Substrat und Leitungswiderstände erkannt. Beide Optionen sind unabhängig voneinander frei wählbar, wobei bei der Extraktion von parasitären Elementen zwischen der Extraktion von Kapazitäten und Widerständen unterschieden werden kann.

Der LVS-Check prüft das Layout auf Abweichungen vom zuvor eingegebenen Schaltplan und stellt darüber hinaus die Voraussetzung für die Post-Layout-Simulation dar. Analoge Schaltungssimulationen können mit dem unter

ohmiger Polywiderstand angeboten. Für das Hall-Element (s. Abb. 2) sind keine extra Masken notwendig, da man das n-Driftgebiet eines Hochvolttransistors verwenden kann, um eine Hall-Platte herzustellen (da sich die bei anliegendem Magnetfeld ausbildende Hall-Spannung umgekehrt proportional zur Schichtdicke des aktiven Siliziums verhält ( $t_{Si}=250\text{ nm}$ )). In Standardprozessen sind meist weitere Implantationen notwendig, um die kleinen Schichtdicken von Hall-Platten zu realisieren. Bei den „primitiven Elementen“ entstehen im Vergleich mit Standard Bulk-CMOS Technologien die größten Abweichungen. Designer, die mit diesen Standardtechnologien vertraut sind, werden mit parametrisierbaren Zellen (PCELLS) für jedes „primitive Bauelement“ schnell in die Lage versetzt, eigene Designs in ein Layout umzusetzen. Die voll synthesefähige Standardzellbibliothek der digitalen Zellen steht in zwei Versionen zur Verfügung: Für die Verdrahtung mit Cell-Ensemble sowie für Silicon-Ensemble. Die I/O-Bibliothek beinhaltet Input-, Output- und bidirektionale Zellen in verschiedenen Treiberstärken und als open Drain-, bzw. als open Source -Varianten. Weiterhin stehen Power-Zellen für die Spannungsversorgung sowie Filler- und Corner-Zellen zur Vervollständigung des Rings zur Verfügung. Damit sind alle Voraussetzungen zum Erstellen von Mixed-Signal-Layouts gegeben.

Um die notwendige Designsicherheit herzustellen, ist in das Design-Kit ein Regelwerk zur Verifikation von Schaltkreisen mit eingebunden. Der Design-Rule-Check prüft hinsichtlich der bestehenden Layoutregeln die Regelkonformität der „primitiven Bauelemente“ und des gesamten physikalischen Layouts. Aus dem gezeichneten Layout können nun über die Schaltungsextraktion Erkenntnisse über die vorhandenen parasitären Bauelemente gewonnen werden. Gleichzeitig erhält man eine Netzliste für den LVS-Check (Layout versus Schematic). Bei der Layoutextraktion wird zwischen einfacher Extraktion und Extraktion mit

dem Analog Artist verfügbaren Spectre oder Hspice von Avant! erfolgen.

Für diese beiden Schaltungssimulatoren sind Modelle und Parametersätze in das Design-Kit eingebunden. Als Transistormodelle sind Bulk-MOSFET-Modelle (BSIM3v3) und SOI-spezifische Modelle (BSIM3SOIPD) mit den hierzu notwendigen Parametersätzen verfügbar. Ebenso sind Diodenmodelle (die Länge einer Diode entspricht der Siliziumschichtdicke) sowie verschiedene Typen von Widerständen und Kapazitäten als Modellparametersätze implementiert. Die für die Digital-Simulation mit

Verilog notwendigen Timingdaten stehen ebenfalls zur Verfügung. Mixed-Signal-Simulationen werden im Analog Artist durchgeführt. Der Design-Flow unterscheidet sich nicht von einem Standard Design-Flow. Der wesentliche Unterschied besteht bei den Transistormodellen und bei den Layouts der „primitiven Elemente“. Diese werden vom Nutzer des Design-Kits nicht verändert.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Stefan Bormann

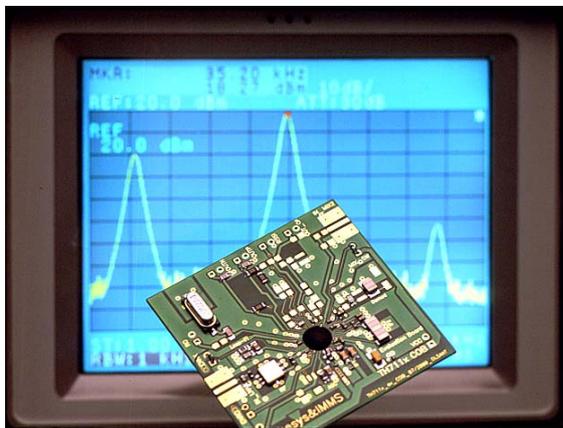
Tel.: +49 (3677) 678341

Email: stefan.bormann@imms.de

## Analyse und Test

Der Themenbereich Analyse und Test umfasst Mess- und Analyseverfahren, die sowohl zur Unterstützung industrienaheer Forschungsprojekte angeboten werden als auch Forschungs- und Entwicklungsarbeiten innerhalb des IMMS begleiten. Schwerpunkte bilden hierbei:

- Hochfrequenzmesstechnik zur Bestimmung von S-Parametern bis 50GHz
- Bestimmung von Rauschparametern im Frequenzbereich von 300kHz...26GHz
- Test von ASIC's im Digital oder Mixed Signal Mode
- Messtechnik zur Charakterisierung von AD/DA-Wandlern
- Standardmesstechnik zur Charakterisierung digital/analoger Schaltungen



Die mehrjährigen Erfahrungen auf dem Gebiet der HF-Bauteilecharakterisierung konnten im Jahr 2001 sowohl zur Lösung von Designaufgaben im Bereich von Hochfrequenzapplikationen als auch zur Lösung von kundenspezifischen Messaufgaben eingesetzt werden. Namenhafte Chipproduzenten gehören inzwischen zum Kundenkreis. Auch auf nationalen und internationalen Konferenzen konnte das IMMS seine Kompetenz demonstrieren und erhielt für seine Forschungsarbeiten viel Anerkennung.

Um den für die Zukunft erwarteten Anstieg von Aufgaben auf dem Gebiet des ASIC-Tests zu bewältigen, ist der Themenbereich personell erweitert worden. Insbesondere sollen die Erfahrungen aus den abgeschlossenen Testaufgaben verstärkt in das Design von ASICs einfließen können. Darüber hinaus erfolgte der kontinuierliche Ausbau der Messtechnik durch Hinzufügung von Hard- und Softwarekomponenten mit dem Ziel der weiteren Automatisierung von Testabläufen.

Die Messmöglichkeiten des Themenbereiches sind um Komponenten erweitert worden, die eine statische und dynamische Charakterisie-

rung von AD/DA-Wandlern ermöglichen. Damit wurden Erkenntnisse gesammelt, die bereits in laufende Projekte eingebunden werden konnten. Die Zielsetzung, eine erprobte Messtechnik mit einer Auflösung von 14 Bit zur Verfügung zu haben soll im Jahr 2002 vollständig realisiert werden. Damit wird am IMMS die Möglichkeit geschaffen, die in den folgenden Jahren zu lösenden Designaufgaben für AD/DA Wandler mit einer leistungsfähigen Test- und Messtechnik zu unterstützen.

Neben den aufgeführten Test- und Messaufgaben werden im Themenbereich Projekte zum Schaltungsdesign bearbeitet. Schwerpunkte sind hierbei die HF Schaltungstechnik (GPS/GSM-Anwendungen) und die Leistungselektronik (Elektronische Vorschaltgeräte für Leuchtstofflampen).

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Peter Kornetzky

Tel.: +49 (3677) 678316

Email: peter.kornetzky@imms.de

# Verfahren zur Charakterisierung von Fuses in 0,6 $\mu\text{m}$ -Technologien und Optimierung des Programmiervorgangs

## Zielstellung

In der Halbleiterschaltungstechnik sind OTPs (einmal programmierbar) nicht mehr wegzudenken. Ein Vertreter dieser primitive devices sind Fuses. Diese „Sicherungen“ ermöglichen den Abgleich einer Schaltung auf Wafer-Level. Mit Fuses und entsprechender Auswerteelektronik lassen sich so höhere Genauigkeitsanforderungen in analogen Schaltungsteilen ohne Spezialequipment erreichen. Beim Programmieren ändert sich der Widerstand der Fuses von einigen hundert Ohm in den Megaohmbereich. Einsatzgebiete der Fuses sind zum Beispiel die Automobil- oder die Kommunikationselektronik.

Fuses sind Bestandteil der Designkits der Foundries. Im Rahmen des Projektes wurden für die X-FAB Semiconductor Foundries AG Erfurt Untersuchungen zu optimalen Programmierbedingungen und Charakterisierungsmessungen durchgeführt. Die Ergebnisse fließen in die Designkits der X-FAB für die Technologien XB06 und CX06 mit ein.

Dabei interessieren die folgende Aspekte :

- **Programmierung**  
Es sind Bedingungen wie Spannung, Strom und Zeit anzugeben, unter denen die Fuses mit Produktionsequipment sicher programmiert werden können.
- **Reversibler Bereich**  
Im reversiblen Bereich wird die Programmierspannung der Fuse so gewählt, dass die Auswerteschaltung sie als programmiert erkennt. Die Rückkehr in den unprogrammierten Zustand erfolgt ohne Änderung der Eigenschaften der Fuse. Der reversible Bereich ist wichtig beim Produktionstest zur Auswahl der Fuse, die eine Schaltung optimal abgleicht.
- **Zuverlässigkeit**  
Weiterhin sind Aussagen zur Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität zu treffen. Dabei interessiert der Einfluss unterschiedlicher Programmierbedingungen auf die Zuverlässigkeit. Die Zuverlässigkeit wird mittels Q-Devices im Lifetest ermittelt.

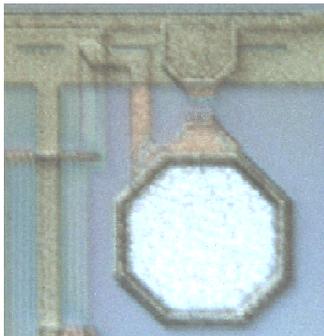


Abb. 1: Chipfoto einer Fuse

## Forschungsverlauf und -stand

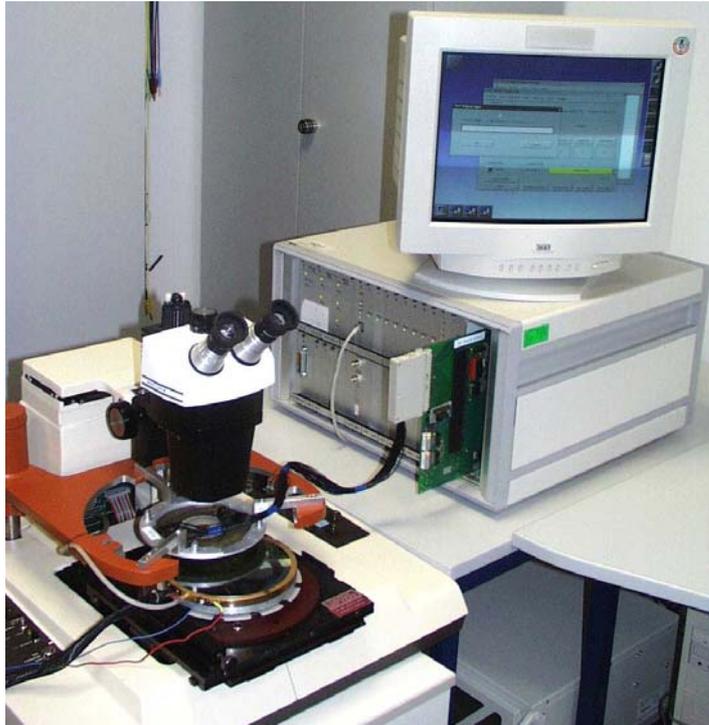
Die Umsetzung der Aufgabenstellung erforderte zuerst exakte und statistisch gesicherte Kenntnisse des Verhaltens der Fuses beim Programmiervorgang. Dafür wurde eine Charakterisierungsmesstechnik entwickelt und aufgebaut. Als Basis diente das IC-Evaluierungstestsystem HP82000 mit externen Komponenten und Messgeräten für eine genaue Untersuchung. Im Vordergrund stand hierbei die Forderung, so exakt wie möglich die Eigenschaften der Fuses zu erfassen. Für den Analogteil kam Kelvinleitungsführung zur Anwendung. Weiterhin wurden Equipmentvergleiche durchgeführt. Die Implementierung der Testsoftware erfolgte in HP-VEE.

Wichtig in dieser Phase waren ausführliche Analyse- und Visualisierungsmöglichkeiten für die Messwerte aus den umfangreichen Messreihen mit den folgenden Schwerpunkten :

- **I / U – Kennlinien**  
Aufnahme bei verschiedenen Schrittweiten und Zeitbedingungen. Variation der beiden Programmiermodi U-Force und I-Force.
- **I / t – Kennlinien**  
Bewertung des Echtzeitverhaltens beim Programmiervorgang. Messaufbau mit Oszilloskop und Stromzange.
- **R-Messungen**  
Exakte Widerstandsmessungen der Fuses vor und nach dem Programmieren sowie beim Programmiervorgang.
- **Reversibler Bereich**  
Der Bereich wurde mittels eines speziellen Testprogramms ermittelt. Gesucht wurde dabei die maximale Spannung, die keine bleibende Widerstandsänderung an den Fuses hervorruft.
- **Digitaltest**  
Die Fuses sind gemeinsam mit Auswerteschaltungen auf den Chips integriert. Der Programmiererfolg kann so digital bewertet werden. Die Auswerteschaltungen der bis zu 64 Fuses auf den Chips sind über Multiplexer erreichbar.

Ausgehend von den Untersuchungen an mehreren Technologie- und Layoutvarianten wurden optimale Programmierbedingungen für die einzelnen Fusetypen abgeleitet.

Eine weitere Aufgabe des Projektes bestand darin, die ermittelten Programmierbedingungen auf eine typische Produktionsmesstechnik ohne Zusatzequipment und den Analysemöglichkeiten zu überführen. Diese Messtechnik dient zur Programmierung von Fuses auf Testchips, die aufgebaut als Q-Devices, die



**Abb. 2:** Wafermesstechnik am „Sigma Delta“

Grundlage für Zuverlässigkeitsuntersuchungen bilden.

Deshalb wurde eine Produktionsmesstechnik zum Testsystem „Sigma Delta“ entwickelt und realisiert. Die Testhardware umfasst dabei die Wafermessung mit Programmierung der Fuses und die Devicemessung an den gehäuseten Chips. Die Implementierung der einzelnen Test- und Checkerprogramme erfolgte hierbei in C. Weiterhin wurde das Loadboard für das Testsystem entwickelt und aufgebaut.

Für die Q-Devices wurden die Programmierbedingungen festgelegt, so dass Aussagen zur Zuverlässigkeit bei verschiedenen Programmierregimes möglich werden. Die Auswahl der Programmierbedingungen erfolgte unter Gesichtspunkten wie Erfahrungen aus den Charakterisierungsmessungen, einer optimalen Abdeckung des relevanten Strom-/Spannungsbereiches und einer Instrumentierung mit typischen Produktionstestequipment.

Die Messung und Programmierung der Chips für die Q-Devices erfolgte im IMMS. Die Produktionsmesstechnik wurde dem Projektpartner für die Zwischenmessungen während des Lifetests zur Verfügung gestellt und nach Erfurt überführt.

## **Ausblick**

Das Projekt wurde von September bis Dezember 2001 mit der Abteilung Designsupport der X-FAB Semiconductor Foundries AG Erfurt durchgeführt. Der Lifetest wird im ersten Quartal des Jahres 2002 abgeschlossen sein.

Ansprechpartner :

Dr.-Ing. Klaus Förster  
Tel.: +49 (3677) 678316  
Email: klaus.foerster@imms.de

## Mitgliedschaften in Verbänden, Fachgruppen etc.

- **Mitglied Leitungsgremium der GI/GMM/ITG-Kooperationsgemeinschaft "Rechnergestützter Schaltungs- und Systementwurf (RSS)"** (Fachausschuß 3.5 der GI, Fachbereich 8 der GMM, Fachausschuß 5.2 der ITG)
- **GI/GMM/ITG-Kooperationsgemeinschaft "Rechnergestützter Schaltungs- und Systementwurf (RSS)"** Fachgruppe 1 "Allgemeine Methodik und Unterstützung von Entwurfsprozessen für Schaltungen und Systeme"; Fachgruppe 2 "Entwurf von analogen Schaltungen"
- **GMM - Beirat**
- **DFAM - Deutsche Forschungsgesellschaft für die Anwendung der Mikroelektronik e.V.**
- **VDE / VDI Fachgesellschaften ITG, EKV und GMM**
- **VDE / VDI - Arbeitskreis Mikrotechnik Thüringen**
- **Facharbeitsgruppe Mikrotechnik Thüringen (TMWAI-STIFT)**
- **Steuergremium des EDACentrums**
- **ITG-Arbeitskreis "Zusammenarbeit Industrie und Hochschulen"**
- **ITG Fachgruppe "CAD für den Analogschaltentwurf"**
- **IEEE - Circuit and Systems Society; Electron Devices Society; Solid-State Circuits Society**
- **EIBA - EUROPEAN INSTALLATION BUS ASSOCIATION**
- **VSIA - VITAL SOCKET INTERFACE ALLIANCE**
- **USB - Implementer Forum**
- **MSDN - MICROSOFT DEVELOPERS NETWORK**
- **VDMA - Arbeitskreis "Nutzergruppe Mikrosystemtechnik" im VDMA**
- **TZM Erfurt - Technologie-Zentrum-Mikroelektronik e.V.**
- **InnoRegio Südthüringen e.V.**
- **MTT Mikrotechnik Thüringen e.V.**
- **Industriegebiet Erfurt Südost e.V.**
- **GNT - Gesellschaft zur Förderung neuer Technologien Thüringen e.V**
- **OptoNet e.V. Thüringen**
- **AZT e.V. - Automobilezulieferer Thüringen e.V.**
- **Fraunhofer Gesellschaft / IOF Jena**
- **EUROPRACTICE**
- **American Chamber of Commerce**
- **DFN**
- **Programmkomitee Technologiesymposium MTT 2002** (Mikrotechnik Thüringen)
- **Member of the Review Board of the TELSIS 2001** (5th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services)
- **Mitglied des „Inneren Arbeitskreises“ FUTUR des BMBF**
- **Jury des BMWi zum Initiativprogramm "Zukunftstechnologien für kleine und mittlere Unternehmen" - ZUTECH 1999 – 31.7.2003**
- **Programmkomitee GI/GMM/ITG Fachtagung "Entwurf Integrierter Schaltungen" E.I.S.-Workshop, 2001**
- **Programmkomitee/Reviewer DATE 2001**
- **Strukturkommission für die Hauptabteilung Prozessdatenverarbeitung und Elektronik (HPE) 2001**

## Vorträge und Veröffentlichungen

- **„Passive High-Speed Backplane für 2.5 GBit/s“**  
B. Bieske (IMMS gGmbH)  
ADVA, Meiningen 01/2001
- **„Erfahrungen mit der UML beim Entwurf von Kfz-Steuerungen“**  
Götze M., Kattaneck W. (IMMS gGmbH)  
ITG/GI/GMM Workshop "Methoden und Beschreibungssprachen zur Modellierung und Verifikation von Schaltungen und Systemen", 02/2001, Meißen
- **Systems on Chip: „Übersicht zur Simulation von "Multi-Nature" - Systemen“**  
Prof. Dr. Rößler F. (IMMS gGmbH)  
Regionalgruppe Ilmenau der Gesellschaft für Informatik, Ilmenau, 02/2001
- **„DSP-Software Entwicklung aus Simulink Modellen / C-basierter Hardwareentwurf mit den AIRT Tools von Frontier Design“**  
Lang Ch. (IMMS gGmbH)  
DFAM AK-Sitzung, 02/2001
- **„Experiences with the UML in the Design of Automotive ECU“**  
Götze M., Kattaneck W. (IMMS gGmbH)  
„Design, Automation and Test in Europe“ (DATE) 2001, München 03/2001
- **„DSP-mixed-signal-ASICs“**  
Prof. Dr. Rößler F., Lang Ch. (IMMS gGmbH)  
DFAM Beiratssitzung, Freiburg, 03/2001
- **„Entwurfsmethodik für DSP-basierte mixed-signal-ASICs“**  
Lang Ch. (IMMS gGmbH)  
CeBIT 2001, Hannover 03/2001
- **„Kick-off-Meeting zum Projekt "ASDESE"“**  
Prof. Dr. Rößler F. (IMMS gGmbH), Foss C. (Melexis)  
Reutlingen, 03/2001
- **„Kick-off-Meeting zum Projekt "ANASTASIA"“**  
Izak R., Lange St., Prof. Dr. Rößler F. (IMMS gGmbH)  
München, 03/2001
- **„DSP und Mixed-Signal-ASICs“**  
Lang Ch. (IMMS gGmbH)  
8. Sitzung des Wissenschaftlichen Beirats des IMMS, Ilmenau, 03/2001
- **„Abschlussbericht zum Förderprojekt LPKM“**  
Lange M. (IMMS gGmbH),  
Ilmenau, 03/2001
- **„Top-Down Entwurf eines zyklischen A/D-Wandlers unter Einbeziehung der Verhaltensmodellierung in Spectre HDL“**  
Izak R., Kindt R., Rößler F. (IMMS gGmbH), Stroemer J. (Melexis)  
10. EIS-Workshop "Entwurf Integrierter Systeme", Dresden, 04/2001
- **„Modellbasierter Entwurf von DSP basierten mixed-signal Systemen in Sensorsignalverarbeitung“**  
Lang Ch. (IMMS gGmbH)  
IHP, Frankfurt/Oder, 04/2001
- **„Entwurf eines digitalen Dezimationsfilters für einen 16-Bit Sigma-Delta-Modulator“**  
Möllmann U. (IMMS gGmbH)  
IMMS u. TU Ilmenau, Diplomarbeit, 04/2001

- **„Entwurf eines digitalen Dezimalfilters in MATLAB“**  
Richter O.  
Praktikumsbericht IMMS Ilmenau, FH Zittau, 04/2001
- **„Ontwikkeling van apparatuur vor materiaalonderzoek onder hoogvacuüm“**  
Dr. Spiller, F. (IMMS gGmbH), Mollenhauer, O. (TETRA GmbH), Scherge, M.  
Fachzeitschrift Constructeur, Verlag ten Hagen & Stam, Den Haag, 04/2001
- **„Entwurf magnetischer Lager für hochdrehende Wellen“**  
Dr. Schäffel Ch. (IMMS gGmbH)  
Wiss. Kolloquium zum 5-jährigen Bestehen des IMMS, Ilmenau, 05/01
- **„Virtuelle Produktentwicklung in der Automobilelektronik“**  
Kattanek W. (IMMS gGmbH)  
Wiss. Kolloquium zum 5-jährigen Bestehen des IMMS, Ilmenau, 05/01
- **„Entwurf von Silizium Hochtemperatur-Schaltungen“**  
Dr. Nuernbergk D. (IMMS gGmbH)  
Wiss. Kolloquium zum 5-jährigen Bestehen des IMMS, Ilmenau, 05/01
- **„Embedded Linux im industriellen Umfeld“**  
Dr. Schröder Ch. (IMMS gGmbH)  
Wiss. Kolloquium zum 5-jährigen Bestehen des IMMS, Ilmenau, 05/01
- **„Design of Silicon High Temperature Circuits - Entwurf von Silizium Hochtemperatur-Schaltungen“**  
Dr. Nuernbergk D. (IMMS gGmbH)  
Ilmenau 05/2001
- **„Kick-off-Meeting ASEDA Projekt VALSE“**  
Lang Ch. (IMMS gGmbH)  
München, 05/2001
- **„Entwurf von HT-Schaltungen mit einer 1.0µm SOI Technologie“**  
Dr. Nuernbergk D. (IMMS gGmbH)  
München, SOI-Workshop, 05/2001
- **„Decomposition of Multi-Valued Functions into Min- and Max-Gates“**  
Lang Ch. (IMMS gGmbH)  
Warsaw, 05/2001
- **„Meeting ASEDA Projekt ANASTASIA - WP2“**  
Kindt R. (IMMS gGmbH)  
Meylan 06/2001
- **„Meeting ASEDA Projekt - ANASTASIA - WP3.1“**  
Lange St. (IMMS gGmbH)  
München, 07/2001
- **„A cyclic RSD analog-digital converter for embedded applications“**  
Izak R., Stroemer J., Kindt R. (IMMS gGmbH)  
Bratislava, Slovakia, Proceedings of 3rd ECS'01, pp. 97-100, 09/2001
- **„Möglichkeiten und Grenzen der Softwaregenerierung für den ARC Core / Software eines Luftdatenrechners auf dem ARC Core“**  
Lang Ch. (IMMS gGmbH)  
DFAM-Sitzung 09/2001

- **„SystemC zur Modellierung ausführbarer Systemspezifikationen - Der Weg vom Systemmodell zur Implementierung“**  
Zellmann J. (IMMS gGmbH)  
HSCD-Workshop, Ilmenau, 09/2001
- **„SystemC zur Modellierung ausführbarer Systemspezifikationen - Der Weg vom Systemmodell zur Implementierung“**  
Zellmann J. (IMMS gGmbH)  
Workshop „Werkzeuge und Ansätze für die Spezifikation und Synthese komplexer Systeme“  
Ilmenau, 11/2001
- **„eCOS - Ein Open-Source-Betriebssystem für den Einsatz in komplexen eingebetteten Systemen“**  
Schreiber A. (IMMS gGmbH)  
MMS F&E Report, Ilmenau, 10/2001
- **„Hardware-Design mit SystemC“**  
Zellmann J. (IMMS gGmbH)  
Ilmenau, IMMS F&E Report, 10/2001
- **„Rauschmessungen für die Kommunikationstechnik“**  
Bieske B. (IMMS gGmbH)  
Kamp-Lintfort, ITG 9.1 Diskussionssitzung, 10/2001
- **„Rauschparametermessungen an HF-CMOS u. Si/SiGe-HBT's“**  
Dr. Baumann U. (IMMS gGmbH)  
Kamp-Lintfort, ITG 9.1 Diskussionssitzung, 10/2001
- **„Die Herausforderung evolutionärer Systeme“**  
Sankowski H. (IMMS gGmbH)  
Ilmenau, IMMS F & E Report, 10/2001
- **„Low Power Funkmodul für das 868 MHz Band“**  
Bieske B. (IMMS gGmbH)  
Fachzeitschrift "Elektronik Wireless", 10/2001
- **„Low Power Funkmodul für das 868 MHz Band“**  
Bieske B. (IMMS gGmbH)  
Entwicklerforum Low Power Design, München, 11/2001
- **„6th Status Seminar on Optical Data Storage“**  
Lange St. (IMMS gGmbH)  
2001 EUREKA blueSPOT , Villingen 11/2001
- **„Die Technische Universität Ilmenau - ein traditioneller Partner für Forschung und Entwicklung in Ostbrandenburg“**  
Prof. Dr. Scarbata G. (IMMS gGmbH)  
IHP Frankfurt/O., Workshop Kooperation Hochschule-Unternehmen, 12/2001
- **„Linux-basierter universeller Buskonverter für die Automatisierung“**  
Pietrusky J., Peukert R., Dr. Schröder C. (IMMS gGmbH)  
Fachzeitschrift "Electronic Embedded Systems", 11-12/2001

## Aufsichtsrat des IMMS

### *Vorsitz:*

Herr Dr. H. Hamacher  
Thüringer Ministerium für  
Wissenschaft, Forschung und  
Kunst (TMWFK), Erfurt

### *Stellv.:*

Herr J. Lange  
Thüringer Ministerium für Wirt-  
schaft, Arbeit und Infrastruktur  
(TMWA), Erfurt

### *weitere Mitglieder:*

Herr Dr. Hacker  
Jenoptik AG, Jena

Herr Dr. sc. techn. W. Hecker  
MAZeT GmbH, Erfurt

Herr Prof. Dr. G. Henning  
TU Ilmenau

Herr ORR M. Rupp  
Thüringer Finanzministerium  
(TFM), Erfurt

Herr H.-J. Straub  
X-Fab, Semiconductor  
Foundries GmbH, Erfurt

Herr Prof. Dr. H. Thust  
TU Ilmenau

## Wissenschaftlicher Beirat

### *Vorsitz:*

Herr Prof. Dr. E. Kallenbach  
TU Ilmenau / Fak. f.  
Maschinenbau

### *Stellv.:*

Herr K. Herre  
Infineon, Berlin

Herr Prof. Dr. Albrecht  
IAM Braunschweig

Herr Dr. W. Fuchs  
Carl Zeiss Jena

Herr W. Groß  
Technologiezentrum VDI/VDE  
Informationstechnik GmbH,  
Teltow

Herr Prof. Dr. H.-E. Hoenig  
Institut für Physikalische Hoch-  
technologie e. V., Jena

Herr Prof. Dr. D. Hofmann  
Erfurt

Herr Prof. Dr. G. Jäger  
TU Ilmenau / Fak. f.  
Maschinenbau

Herr Dr. B. Jakob  
Technologie- und  
Gründerzentrum GmbH, Ilmenau

Herr Prof. Dr. W. Karthe  
FhG Institut für Angewandte  
Optik und Feinmechanik, Jena

Herr Dr. J. Kosch  
X-Fab Erfurt

Herr Prof. Dr. H. Puta  
TU Ilmenau / Fak. f. Informatik  
und Automatisierung

Frau Prof. Dr. D. Schmitt-  
Landsiedel  
TU München / Fak. f. Elektro-  
und Informationstechnik

Herr L. Siegemund  
IHK Südthüringen, Suhl

Herr Prof. Dr. M. Weck  
Werkzeugmaschinenlabor RWTH,  
Aachen

### *ständige Gäste:*

Herr Dr. M. Kummer  
Thür. Ministerium für Wirtschaft,  
Arbeit und Infrastruktur

Herr Dr. K. Täubig  
Thür. Ministerium für  
Wissenschaft, Forschung und  
Kunst (TMWFK), Erfurt

Institut für Mikroelektronik- und  
Mechatronik - Systeme gGmbH

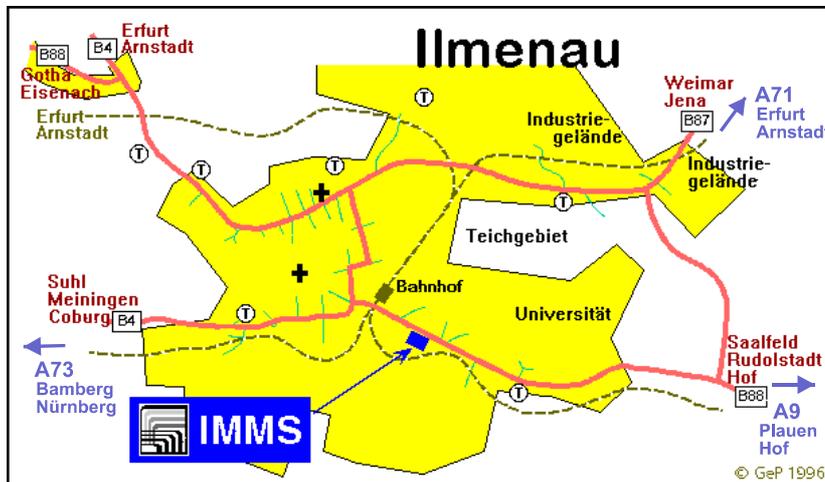
IMMS gGmbH

Langewiesener Strasse 22  
D - 98693 Ilmenau (Thüringen)

Geschäftsleitung:  
Prof. Dr. Gerd Scarbata  
Hans-Joachim Kelm

Sekretariat:  
Monika Schild

Telefon: +49 (3677) 6783-0  
Telefax: +49 (3677) 6783-37  
Email: [imms@imms.de](mailto:imms@imms.de)  
www: <http://www.imms.de>



Kontakte:

*System Design:*

Dr. - Ing. Christian Schröder  
Tel: +49 (3677) 6783-15 / Email: [christian.schroeder@imms.de](mailto:christian.schroeder@imms.de)

*Schaltungstechnik /  
Mikroelektronik:*

Prof. Dr. Franz Rößler  
Tel: +49 (361) 42766-39 / Email: [franz.roessler@imms.de](mailto:franz.roessler@imms.de)

*Schaltungstechnik /  
PCB - Technik*

Dr. - Ing. Peter Kornetzky  
Tel: +49 (3677) 6783-16 / Email: [peter.kornetzky@imms.de](mailto:peter.kornetzky@imms.de)

*Mechatronik:*

Dr. - Ing. Christoph Schäffel  
Tel: +49 (3677) 6783-33 / Email: [christoph.schaeffel@imms.de](mailto:christoph.schaeffel@imms.de)

*Analyse und Test:*

Dr. - Ing. Peter Kornetzky  
Tel: +49 (3677) 6783-16 / Email: [peter.kornetzky@imms.de](mailto:peter.kornetzky@imms.de)

Aussenstelle Erfurt:

Haarbergstrasse 67  
D - 99097 Erfurt (Thüringen)

Telefon: +49 (361) 42766-39  
+49 (361) 42766-01  
Telefax: +49 (361) 4170-162

Kontakt:

Prof. Dr. Franz Rößler  
Tel: +49 (361) 42766-39  
Email: [franz.roessler@imms.de](mailto:franz.roessler@imms.de)

