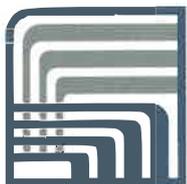


Innovation  
Kreativität  
Vision



**IMMS**

# **Jahresbericht 2004**

Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik - Systeme gGmbH

**Ihre Ziele setzen Sie sich - wir helfen diese verwirklichen**

# Inhaltsverzeichnis

Wer an den Mitteln für Forschung und Entwicklung spart, setzt die Zukunft der Wirtschaft und Gesellschaft aufs Spiel.....	4	
Die Strategie der Vernetzung.....	6	
Themenbereich „Mechatronik“.....	7	
Ausgewählte Fachberichte aus dem Themenbereich „Mechatronik“.....	8	
Themenbereich „System Design“.....	20	
Ausgewählte Fachberichte aus dem Themenbereich „System Design“.....	21	
Themenbereich „Schaltungstechnik / Mikroelektronik“.....	36	
Ausgewählte Fachberichte aus dem Themenbereich „Schaltungstechnik / Mikroelektronik“.....	37	
Themenbereich „Industrielle Elektronik und Messtechnik“...	45	
Ausgewählte Fachberichte aus dem Themenbereich „Industrielle Elektronik und Messtechnik“.....	46	
Mitgliedschaft in Verbänden, Fachgruppen etc.....	56	
Publikationen / Veröffentlichungen / Vorträge / Forschungsberichte / Patente.....	57	
Aufsichtsrat / Wissenschaftlicher Beirat.....	60	
Kontakt / Adresse.....	62	

# Wer an den Mitteln für Forschung und Entwicklung spart, setzt die Zukunft der Wirtschaft und Gesellschaft aufs Spiel.

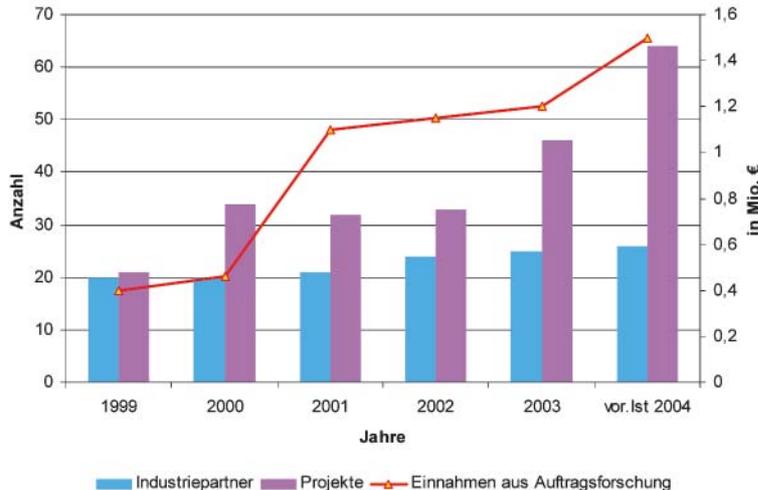
Quelle: BDI-„Für ein innovationsstarkes Deutschland (Ziffer 99)“ Juni 2004

Natürlich ist diese Überschrift provokativ – in Zeiten knapper Kassen. Aber immerhin: Es geht nicht nur um Sparen, sondern darum wie zukünftig wieder mehr Geld in die Kassen kommt. Deshalb muss sich die Politik im gleichen Maße wie die Unternehmen genau überlegen, in welche Aufgaben Sie das wenige, was noch zur Verfügung steht investiert.

*Die Thüringer Allgemeine veröffentlicht am 19.01.2005: Die Thüringer Wirtschaft zieht an. 86 Prozent der Firmen machen Gewinn oder arbeiten kostendeckend. Die Exporte befinden sich auf neuen Höchstwerten. Nach langer Flaute zieht die Konjunktur wieder an.*

*Thüringens Wirtschaft kehrt zurück auf Wachstumskurs. Dies ergab eine aktuelle Umfrage der Erfurter IHK. Danach bewerten 82 Prozent der befragten Unternehmer ihre Geschäftsaussichten positiv.*

Maßgeblich hierfür sind die Eroberung neuer Märkte, internationale Präsenz und natürlich Spitzenprodukte der Thüringer Industrie. Forschung und Entwicklung auf hohem technologischen Niveau sowie neue Methoden der Zusammenarbeit und die Beherrschung komplexer Entwicklungsprozesse sind dafür erforderlich.



**Abb. 1:** Darstellung Einnahmen aus Auftragsforschung

Das Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik- Systeme gGmbH konnte in diesem Sinne 2004 seine Forschungs- und Entwicklungskompetenzen kontinuierlich und erfolgreich ausbauen. Natürlich zählt hierzu auch, dass die IMMS gGmbH in eine neue Umgebung auf den Campus der Technischen Universität Ilmenau (TU), in das Ernst-Abbe-Zentrum für Forschung und Transfer umgezogen ist. Hierdurch haben sich die Arbeitsbedingungen wesentlich verbessert, wodurch sich insbesondere die Möglichkeiten

für die Forschung an Nanopositioniermaschinen, aber auch an hochfrequenten elektronischen Systemen erweitert haben. Zusammen mit seinen Möglichkeiten am Standort Erfurt ist das Institut nun in der Lage eine breite Palette modernster Voraussetzungen für die multidisziplinäre Erforschung und Entwicklung neuartiger Technologien und Methoden im Rahmen der Zusammenarbeit der Bereiche Mechatronik, Elektronik und im besonderen auch der Mikroelektronik sowie der Mikrosystemtechnik bereitzustellen.

In allen Tätigkeitsbereichen des Instituts hat sich erneut der multidisziplinäre Aspekt der Einbeziehung von Wissenschaftlern mit Spezialkenntnissen in der Mikroelektronik, Mechatronik, Informationstechnik/Informatik sowie der Festkörperelektronik in die Entwicklung komplexer technischer Systeme bestens bewährt.

In diesem Kontext haben sich die bestehenden Themenbereiche

- System Design
- Schaltungstechnik / Mikroelektronik
- Mechatronik und
- Industrielle Elektronik und Messtechnik

weiter auf entsprechende Aufgaben konzentriert und strategische Forschungsprogramme umgesetzt. Dass damit ein Erfordernis der Industrie erfüllt wurde, lässt sich nicht zuletzt an der positiven Entwicklung von Einnahmen aus industrieller Auftragsforschung (s. Abb. 1) ablesen.

Es erweist sich immer deutlicher, dass der Erfolg auf dem Weg zu innovativen, marktbestimmenden Produkten Zeit, Stabilität und Zuverlässigkeit, Geld und niemals nachlassendes Engagement erfordert. Deshalb wird das Institut auch in Zukunft seine Anstrengungen darauf richten, stabile langfristige Partnerschaften mit innovativen Unternehmen der Mikroelektronik- und Mechatronik-Branchen zu ermöglichen.

Von der Politik erwarteten wir auch weiterhin, hierfür die entsprechenden Rahmenbedingungen zu schaffen - auch in schwierigen Zeiten.

Unsere Erfahrung zeigt uns, Gemeinschaftsforschung macht vielen kleinen und mittleren Unternehmen erst eigene Forschung und Entwicklung möglich. Dies ist auch ein Quell für zukunftssichere Arbeitsplätze. Hierfür engagiert sich das IMMS aktiv an der Gestaltung von regionalen, branchenübergreifenden Clustern in den jeweiligen Technologiefeldern. Ziel ist es, technologische Kompetenzen zusammenzuführen,



gemeinsame Marktstrategien zu entwickeln und neue Geschäftsmodelle zu erschließen.

Die IMMS gGmbH ist Partner in den wichtigsten Thüringer sowie überregionalen Innovationsnetzwerken und industriellen Clustern, in den Branchen Fahrzeugtechnik, Mikrotechnik, Mikroelektronik und Optik.

Die Entwicklung fachlicher Kompetenzen steht im engen Zusammenhang mit dem Angebot der TU Ilmenau. Dem IMMS wurde von der TU Ilmenau bereits 1996 der Status AN- Institut an der TU Ilmenau verliehen. Gegenwärtig bestehen mit 12 Fachgebieten intensive Kooperationen in Forschung und Lehre sowie Möglichkeiten der gegenseitigen Nutzung der wissenschaftlichen Infrastruktur. Zahlreiche Studenten integrieren sich in die Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des IMMS, beginnend mit ihrer Tätigkeit als studentische Arbeitskräfte über Praktika, Studien- und Diplomarbeiten.

Andererseits bestreiten die wissenschaftlichen Mitarbeiter unseres Institutes Seminare, Praktika und Vorlesungen an den Fakultäten der Universität, so dass sich eine für beide Seiten vorteilhafte Kooperation fortsetzt und stetig weiter ausgebaut werden kann.

Der hier vorliegende Bericht enthält eine Übersicht der wesentlichen Kernkompetenzen unseres Institutes in den vier Themenbereichen.

Unsere Stärke liegt in der Multidisziplinarität, die sich mit hochqualifizierten wissenschaftlichen Mitarbeitern in den Disziplinen des Entwurfs mikro- und optoelektronischer sowie komplexer mechatronischer Systeme darstellt. Die Kompetenz und Kreativität unseres wissenschaftlichen Personals wird zunehmend unverzichtbarer Bestandteil für die Erarbeitung von Zukunftsstrategien unserer Industriepartner. Eine Zu-

**Abb. 2:** Ilmenau Campus der TU Ernst-Abbe-Zentrum für Forschung und Transfer

sammenarbeit wird nicht erst im Rahmen anwendungsnahe Forschung- und Entwicklung, sondern bereits im Prozess der Innovationsplanung und damit für das Finden von neuen Ideen, neuartigen Produkten sowie für die Abschätzung von deren Machbarkeit, unter Berücksichtigung neuester Technologien und Entwurfverfahren begonnen. Mit diesem Anspruch nehmen wir optimistisch die im Jahr 2005 zu bewältigenden Aufgaben in Angriff. Die Geschäftsleitung bedankt sich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern unseres Institutes für das gezeigte Engagement und sagt allen unseren Partnern aus Industrie, Wissenschaft und Politik, ebenso den Mitgliedern des Aufsichtsrates und des Wissenschaftlichen Beirates „Danke“ für die erfolgreiche Kooperation.



Hans-Joachim Kelm  
kfm. Geschäftsführer

Prof. Dr. Gerd Scarbata  
wiss. Geschäftsführer

# Die Strategie der Vernetzung

Neben der Konzentration auf marktorientierte Kompetenzbereiche ist ein weiteres strategisches Marketingziel der IMMS gGmbH die aktive Mitgestaltung von regionalen, branchenübergreifenden Clustern in den jeweiligen Technologiefeldern.

Die unterschiedlichen Kenntnisse in der Technologie, der dramatische Anstieg von Komplexität in der Forschung und Entwicklung und die Vertiefung von Arbeitsteilung in der Produktion bis hin zur Vermarktung, erfordern ein neues Miteinander der Akteure.

An der Bildung dieser Cluster werden Unternehmen und alle in der Region relevanten Einrichtungen der technologischen Infrastruktur beteiligt. Hierzu gehören Hochschulen, Forschungsinstitute, andere Technologie- und Gründerzentren, Bildungseinrichtungen sowie technologieorientierte Administratoren, Verbände u.a..

Cluster stellen eine innovative Form der Kooperation von Wirtschaft und Wissenschaft dar und zielen auf die kooperative Vernetzung aller für Innovationen wichtigen Akteure.

Die Clusterbildung ermöglicht Multiplikator- und Synergieeffekte, deren Wirkung und Nachhaltigkeit die Neugründung und Zukunftssicherung von Unternehmen fördert.

Für das Institut ist die „Strategie der Vernetzung“ ein wichtiger Schritt, um die Voraussetzungen für die Erschließung neuer Märkte zu schaffen, aber auch innovative Unternehmen für den eigenen Standort zu interessieren und/oder an diesen zu binden.

Einen Überblick zu den vielfältigen IMMS gGmbH-Aktivitäten vermittelt die nachfolgende Auswahl:



### edacentrum e.V.

Bündelung von F&E-Kompetenz an deutschen Forschungseinrichtungen auf dem Gebiet Electronic Design Automation (EDA)



Deutsch/niederländisches Netzwerk zur Schaffung von Standards für die industrielle Kommunikation über Firewire



### Live - Linux Verband

Deutscher Branchenverband der im Umfeld von Freier Software und Linux tätigen Firmen



Interaktives Informationscenter zwischen Hochschulen und Unternehmen in Thüringen



Netzwerk zwischen Wirtschaft, Wissenschaft sowie Beratungs- und Dienstleistungsfirmen der Halbleiterbranche



Automobilzulieferer-Verband in Thüringen, Forschung für die Automobilindustrie durch Thüringer Einrichtungen



Netzwerk für optische Technologien, Fachgruppen Optoelektronik und Bildverarbeitung



Fachverband für Sensorik e.V., ama-Wissenschaftsrat, Fachausschuss Mikrosystemtechnik und optische Sensorik



Interessenverbund von Bildungsanbietern und Bildungsnutzern verschiedenster Art, Zukunftskonferenzen und Erfindungsaktivitäten



Regionales Kompetenznetz zur Qualitätssicherung mittels Bildverarbeitungssystemen (VisQuaNet)



Netzwerk zur Verbindung traditioneller Kompetenzen in den Bereichen Bauwesen, Mikrosystemtechnik und Gerätetechnik



### Telematik-Cluster Mitteldeutschland

Netzwerk von Firmen im Schnittbereich von Telekommunikation, Informatik und Verkehr

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Wolfgang Sinn  
 Leiter strategisches Marketing  
 Tel: +49 (3677) 69-5514  
 Email: wolfgang.sinn@imms.de

# Mechatronik

## Ziele

Die Arbeitsschwerpunkte im Themenbereich Mechatronik sind:

- Präzisions-Direktantriebssysteme
- Analysegeräte und -instrumente sowie
- komplexe mechatronische Systeme.

Unsere Arbeitsweise ist dabei geprägt von der Umsetzung einer Idee bis zum Prototypen. Konzeptioneller Entwurf, Modellierung und Simulation, sowie Optimierung von Baugruppen und Gesamtsystemen nach vorgegebenen Kriterien sind Teil dieser Tätigkeiten. Diese werden unterstützt durch die Verwendung umfangreicher Softwaretools (Inventor, MDT, ProE, Ansys, Maxwell, Femlab, MATLAB / Simulink, dSpace etc.) sowie einer soliden messtechnischen Ausrüstung und Infrastruktur.

Zum einen erfordert das Design komplexer mechatronischer Systeme die enge, iterative Zusammenarbeit von Fachleuten verschiedenster Wissenschaftsdisziplinen, wie u.a. Konstrukteuren, Simulations-Fachleuten und Regelungstechnikern, nach neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen und Methoden sowie den Einsatz effektiver Werkzeuge und zum andern machen immer kürzere Entwicklungszyklen und eine stetig wachsende Komplexität von Systemen heute eine fundierte Modellierung und Simulation des statischen und dynamischen Verhaltens von Systemen auf einem sehr breiten Anwendungsfeld unumgänglich.

Dies ermöglicht bereits in der Entwurfsphase eine Verhaltensoptimierung und stellt ein effizientes Mittel zur Beurteilung der Realisierbarkeit und zur optimalen Ausschöpfung neuer Technologien dar.

Die Heterogenität von komplexen Systemen macht vielfach eine Zerlegung in domänenspezifische Teilsysteme notwendig. Das reduziert die Komplexität und ermöglicht den Einsatz von speziellen Simulationswerkzeugen, wie z.B. Netzwerkanalysatoren für die Elektroniksimulation, MATLAB/Simulink als mathematisches Simulationstool oder FEM Programmen für die detaillierte Simulation von statischen und dynamischen Deformationen sowie dem elektromagnetischen und thermischen Verhalten der Systeme. Für eine möglichst exakte Verhaltensbeschreibung des Gesamtsystems werden die Ergebnisse der Detailsimulationen in geeigneter Form in ein Gesamtmodell integriert. Um die Qualität der Simulationsergebnisse zu verifizieren, wird ein Abgleich der Modelle mit Messdaten von realen Systemen oder Experimentalaufbauten vorgenommen.

Nicht zuletzt ist für den Entwurf optimaler Steue-

rungen und Regelungen, z.B. für Bewegungssysteme, eine exakte Kenntnis des Systemverhaltens unabdingbare Voraussetzung. Ein solcher Reglerentwurf erfolgt vorteilhaft mit Hilfe von Rapid-Prototyping-Systemen (z.B. dSpace) die ein effizientes und schnelles Vorgehen, nicht zuletzt durch die Kopplung an MATLAB/Simulink, ermöglichen. Wesentliches Ziel der komplexen Simulation ist eine Minimierung der Designzyklen und eine Verkürzung der Entwicklungsphasen.

## Schwerpunkte und Anwendungsbe- reiche

Folgende Systeme wurden und werden derzeit entwickelt und untersucht:

- RheoFilm - Entwicklung eines Messgerätes zur Untersuchung rheologischer Eigenschaften kleiner Flüssigkeitsmengen - S. 8
- MODAN - Entwurf und Modellierung von Antriebssystemen für die Mikrosystemtechnik - S. 9
- Mikrostrukturierung - Modulare Fertigungseinrichtung für die Lasermikrobearbeitung von Mikrotools und medizinischen Instrumenten - S. 10
- InnoSKo - Innovative Steuer- und Konstruktionskonzepte für multiaxiale Antriebssysteme - S. 11
- Identifikation von Antriebssystemen - S. 13
- Bahninterpolation in mehreren Bewegungsebenen - S. 15
- SFB 622 - Entwicklung und Untersuchung mechatronischer Präzisionsantriebe - S. 16
- Simulation einer Reglerstruktur für einen planaren Hybridschrittmotor - S. 18

Künftig anvisierte Aufgabenstellungen sind:

- Antriebe für Waferpositioniersysteme
- Optische Oberflächenmesstechnik
- Nanopositioniersysteme großer Bewegungsbereiche

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Christoph Schäffel

Tel.: +49 (3677) 69-5560

Email: christoph.schaeffel@imms.de

# RheoFilm - Entwicklung eines Messgerätes zur Untersuchung der rheologischen Eigenschaften von Flüssigkeiten

EU, G6ST-CT-2002-50165

## Ziele

An diesem Europäischen Verbundprojekt waren neben der IMMS gGmbH zwei mittelständische Unternehmen aus Deutschland und je ein Unternehmen und eine Forschungseinrichtung aus Belgien, Spanien und der Schweiz beteiligt. Im Projekt erfolgte die Entwicklung und der Test von zwei Prototypen eines Messgerätes, eines sogenannten Rheometers, das der Untersuchung der mikrorheologischen Eigenschaften von Filmen dient. Für die Untersuchung der dünn- bis zähflüssigen organischen oder anorganischen Filme bzw. kleinen Flüssigkeitsmengen wurden im Projekt sowohl die Messverfahren als auch die Kalibrierverfahren für das Rheometer und die Kalibrierflüssigkeiten entwickelt. Grundlage dafür bildete ein entsprechendes Gerätekonzept, das neben der Mechanik- und Elektronikhardware auch die Regelalgorithmen und Steuerungs- und Auswertesoftware beinhaltet.

Eine wesentliche Anforderung an die Geräteentwicklung bestand darin, dass die Messgeräte und die Datenerfassungs- und Auswertesoftware onlinefähig gestaltet sein sollten, damit in einem Online-Ringtest die Leistungsfähigkeit nachgewiesen werden konnte.

## Forschungsverlauf und -stand

Ausgangspunkt der Projektbearbeitung war die Definition der Anforderungen an das Rheometer. Hierbei wurden die unterschiedlichen Anforderungen der Projektpartner berücksichtigt, die sich einerseits aus den verschiedenen Voraussetzungen der Laborausstattung ergaben und andererseits auf den unterschiedlichen Anwendungsbereichen beruhen.

Hierfür haben die Partner diejenigen spezifischen Anforderungen definiert, die sich aus ihren jeweiligen Forschungen im Grundlagenbereich (F&E - Einrichtungen) bzw. aus den Kundenanforderungen (Unternehmen) ergaben. Dies betrifft z.B. die Art der mit dem Rheometer zu untersuchenden Schmiermittel (Viskosität, Zusammensetzung etc.), die Gestaltung der Probekörperpaarung (Material, Oberflächenbeschaffenheit etc.) und die Versuchsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck, Gasgemisch, Versuchsdauer etc.).

Auf der Grundlage dieser Anforderungen entstand ein erster Prototyp des Rheometers (s. Abb. 1). Mit diesem Prototyp wurden die Umsetzung der Mess- und Kalibrierverfahren verifiziert. Aufgrund seiner Ausstattung stellte der Prototyp jedoch sehr hohe Anforderungen an die Laborausstattung, wie z.B. das Vorhandensein von Druckluft. Deshalb wurde ein zweiter Prototyp entwickelt, (s. Abb. 2), mit dem im Frühjahr



Abb. 1: Erster Prototyp des Rheometers

2004 der Online-Ringtest realisiert werden konnte. Bei dem Online-Ringtest wurden auf vier baugleichen Rheometerprototypen, die sich vor Ort bei den unterschiedlichen Forschungspartnern befanden, gleichzeitig die gleichen Experimente durchgeführt.

Sowohl die Steuerung aller Messgeräte als auch die Übertragung der Messdaten bzw. der ausgewerteten Daten erfolgte von Ilmenau aus.

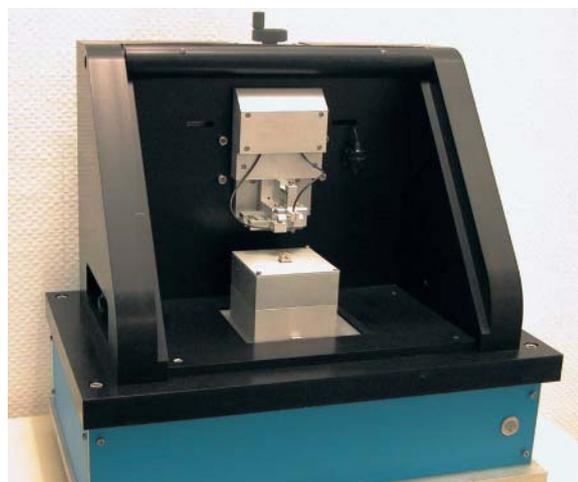


Abb. 2: Zweiter Prototyp des Rheometers

Nach dem erfolgreichen Online-Ringtest standen die vorhandenen Prototypen den Projektpartnern für weitere, eigene Untersuchungen zur Verfügung. Die Erfahrungen, die die Partner mit den Messgeräten machen, fließen in die Weiterentwicklung der Mess- und Auswerteverfahren und der Gerätetechnik ein.

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Frank Spiller

Tel.: +49 (3677) 69-5561

Email: frank.spiller@imms.de

# MODAN - Entwurf und Modellierung von Antriebssystemen für die Mikrosystemtechnik

BMBF, 169V1554

## Ziele

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundprojektes werden zwei Schwerpunkte bearbeitet. Der erste Schwerpunkt befasst sich mit der Evaluierung von Simulationssoftware, die den Entwicklungsprozess mechatronischer Antriebssysteme unterstützen. Ableitend daraus erfolgt die Weiterentwicklung der Entwurfsmethodik und der Simulationssoftware SimulationX und SESAM.

Der zweite Projektschwerpunkt befasst sich mit der Entwicklung verschiedener mechatronischer Antriebssysteme auf der Basis modularer Präzisionsantriebe, z.B. elektrodynamischer Direktantriebe, und modularer Mini- und Mikroantriebe, z.B. elektromagnetischer Resonanzaktoren. Weiterhin wird die Kombination o.g. Präzisionsantriebssysteme in mehrachsigen Bearbeitungsanlagen unter Fertigungsbedingungen untersucht.

## Forschungsverlauf und -stand

In Arbeitsgruppen wird seit Projektbeginn an der Evaluierung der Simulationstools am Beispiel ausgewählter Antriebe geforscht. Parallel dazu begann die Entwicklung verschiedener Antriebssysteme. Neben zahlreichen Voruntersuchungen an Versuchsaufbauten und Funktionsmustern entstanden z.B. der Prototyp des planaren elektrodynamischen Direktantriebs PMS100-3 (s. Abb. 1) und der Prototyp des elektrodynamischen Linearantriebes LMS 20.

Die Modellierung des planaren Antriebssystems erfolgte bisher über die miteinander gekoppelten Teilmodelle Elektromagnetik, Mechanikstruktur und Reglermodelle. Das elektromagnetische sowie das mechanische Verhalten wurde dabei mittels FEM simuliert, für die Modellierung des Reglers kam Simulink zur Anwendung.

Der Nachteil dieses Modellierungsansatzes besteht neben der höheren Rechenzeit für Simulationsrechnungen aufgrund der FE-Methode



Abb. 1: Elektrodynamischer Planarantrieb PMS 100-3 als Basis für Analysegeräte und -instrumente

in der indirekten Kopplung der Teilmodelle, bei der die modellhafte Abbildung aller Phänomene, z. B. der Einfluss von Temperaturänderungen auf das Systemverhalten, nicht oder nur mit großem Aufwand möglich ist. Ziel der Projektarbeiten ist es, diesen Nachteil der gekoppelten Teilmodelle durch eine Simulation des Gesamtsystems mit Netzwerkelementen zu umgehen. Das Netzwerkmodell wird in drei Stufen entworfen. In der ersten bereits realisierten Stufe wird das magnetische Verhalten durch ein Netzwerk abgebildet.

## Ausblick

Die laufenden Arbeiten befassen sich mit der Erweiterung des Modells um Mechanikelemente, bevor in der abschließenden Projektphase die Reglerkomponenten in das Modell einbezogen werden. Im weiteren Projektverlauf werden außerdem die begonnenen Entwicklungen der Antriebssysteme fortgesetzt.

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Frank Spiller

Tel.: +49 (3677) 69-5561

Email: frank.spiller@imms.de

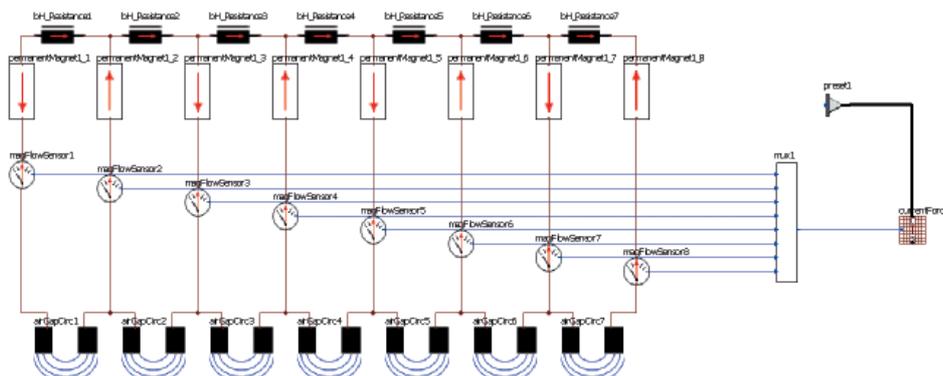


Abb. 2: Modellierung des Magnetkreises eines Antriebsstranges mit Netzwerkelementen in ITI SimulationX

# Mikrostrukturierung - Modulare Fertigungseinrichtung für die Lasermikrobearbeitung von Mikrotools und medizinischen Instrumenten

BMBF, 03i2912C

## Ziele

Im Rahmen des Forschungsverbundprojektes, das vom BMBF im Rahmen der InnoRegio - Initiative gefördert wird, soll die Technologie der Lasermikrobearbeitung entscheidend weiterentwickelt werden. Grundlage dafür sind die Ergebnisse des Projektes „Innovative Steuer- und Konstruktionskonzepte für multiaxiale Antriebssysteme“, das 2004 erfolgreich abgeschlossen werden konnte.

Ein Schwerpunkt der Entwicklung ist ein neues, modulares Maschinenkonzept für 3D-Bearbeitungssysteme einschließlich der Integrationsmöglichkeit für verschiedene Strahlquellen. Anwendungsgebiete dieser Lasermikrobearbeitungsanlagen sind einerseits die Fertigung medizinischer Instrumente, wie z.B. Stents, und andererseits die Herstellung von Mikrotools, wie z.B. Cantilever, die in Atomkraftmikroskopen oder Geräten der Mikro- und Nanomesstechnik eingesetzt werden.

Die hohen Anforderungen an die modularen Lasermikrobearbeitungsanlagen hinsichtlich Geschwindigkeit bei der Laserbearbeitung und Genauigkeit der 3D-Bahnkurven leiten sich einerseits aus den Anforderungen der Endanwender der Laserbearbeitungsanlagen ab, die hohe Durchsatzraten für einen wirtschaftlichen Betrieb verlangen, und andererseits aus den Anforderungen der Anwender der mit den Laserbearbeitungsanlagen hergestellten Produkte, die hohe Anforderungen an Genauigkeit und Oberflächengüte stellen.

Das Maschinenkonzept basiert auf dem elektrodynamischen Planarantrieb der IMMS gGmbH, der um ein bis drei weitere Antriebsachsen, z.B. für die z-Zustellung des am Portal befestigten Laserkopfes oder einer Drehachse für die Verdrehung des Werkstückes, erweitert werden soll, um die Bearbeitung von dreidimensionalen Objekten zu ermöglichen. Dazu wird ein neues Steuerungs- bzw. Regelungskonzept erarbeitet, das einen synchronisierten Betrieb der verschie-

denen Antriebsachsen und des Lasers ermöglicht.

## Forschungsverlauf und -stand

Seit Projektbeginn wurden umfangreiche Voruntersuchungen, z.B. zur Gestaltung des Kühlsystems für die Spulen des PMS 200 und zur Erhöhung der Positioniergenauigkeit durch die Korrektur der Fehler des Messsystems, durchgeführt.

Auf der Grundlage des gemeinsam mit den Projektpartnern erarbeiteten Maschinenkonzeptes begann die Entwicklung des ersten Prototypen (s. Abb. 1). Hierbei handelt es sich um eine vierachsige Maschine, die zusätzlich zum PMS 200 mit einer am Portal angebrachten z-Achse und einer auf dem Planarläufer oder der z-Achse montierten Drehachse ausgestattet werden kann.

Die konstruktiven Arbeiten wurden flankiert von Simulationen kritischer Bauteile, z.B. mittels FEM. Hierbei stehen neben den statischen und dynamischen Parametern insbesondere auch Reaktionen der Maschine auf thermische Einflüsse, z.B. durch den Energieeintrag der Antriebe, im Mittelpunkt der Betrachtungen.

## Ausblick

Mit Jahresbeginn 2005 erfolgt der Aufbau und die Inbetriebnahme des ersten Demonstrators der Lasermikrobearbeitungsanlage. Nach erfolgreichem Test dient sie insbesondere der Weiterentwicklung der Maschinenregelung.

Parallel dazu beginnt die Entwicklung des zweiten Demonstrators, der für Untersuchungen zur Austauschbarkeit der Strahlquellen vorgesehen ist. Die Demonstratoren drei und vier dienen der Entwicklung von den an die Bearbeitungsaufgabe angepasster Strahlquellen und spezieller Lasermikrobearbeitungsverfahren.

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Frank Spiller

Tel.: +49 (3677) 69-5561

Email: frank.spiller@imms.de

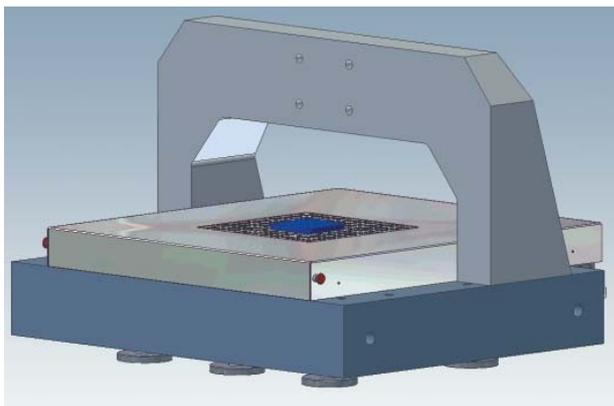


Abb. 1: CAD-Modell des ersten Demonstrators einer Lasermikrobearbeitungsanlage

# InnoSKo - Innovative Steuer- und Konstruktionskonzepte für multiaxiale Antriebssysteme

BMBF, 0312904A

## Ziele

Hochgenaue Antriebssysteme dienen u.a. bei der Laserpräzisionsbearbeitung zur Werkstückpositionierung.

Moderne Laserpräzisionsbearbeitungssysteme bedingen dabei einerseits verbesserte Leistungsparameter, wie Positioniergenauigkeit und Verfahrensgeschwindigkeit des Positioniersystems, und andererseits veränderte Funktionalparameter, wie eine größere Anzahl von Bearbeitungs- und Positionierachsen. So erfordert z.B. die Präzisionsbearbeitung von Stents (medizinische Instrumente) neben den planaren x-y-Achsen eine rotatorische Achse für die Stent- sowie eine z-Achse für die Laserpositionierung.

Die Entwicklung von Konzepten für solche multiaxialen Systeme sowie deren Validierung an Testmustern war Gegenstand eines gemeinsamen Verbundvorhabens mit den in der Region ansässigen Firmen IDAM GmbH & Co. oHG, LLT Applikation GmbH und TETRA GmbH (Ilmenau).

Das 2004 beendete zweijährige Projekt „Innovative Steuer- und Konstruktionskonzepte für multiaxiale Antriebssysteme (InnoSKo)“ wurde vom BMBF im Rahmen der InnoRegio-Initiative gefördert und war bei der inprosys-Initiative (Innovative Produktionssysteme) in Schmalkalden angesiedelt.



Abb. 1: 4D-System mit Laser

## Forschungsverlauf und -stand

Die Projektschwerpunkte waren breit gefächert und reichten von der Simulation und Optimierung von Antriebskomponenten mittels FEM über die Entwicklung von Regleralgorithmen und deren Implementierung in Testmustern bis hin zur Untersuchung neuer Reglerarchitekturen mit Hinblick auf Kostenreduktion bei gleichzeitiger Performance-Steigerung. Als Testmuster wurde dabei u.a. ein 4D-Antriebssystem realisiert, mit dem bei der Laserbearbeitung Genauigkeiten von  $\pm 5 \mu\text{m}$  erreicht wurden.



Abb. 2: Applikationsbeispiel: medizinische Nadeln

Das 4D-Antriebssystem besteht dabei aus einem im IMMS entwickelten planaren elektrodynamischen luftgeführten Direktantrieb, erweitert um eine Rotationsachse und eine z-Achse für die Laserpositionierung. Die Regelung dieses Testmusters erfolgt nach dem Prinzip der Bahnregelung in einem mitbewegten Koordinatensystem. Aus dem Vorteil des Reglerkonzeptes, der Kopplung aller Achsen in einer gemeinsamen Matrix, resultierte zugleich auch die zu lösende Problematik – das Finden einer Transformationsmatrix für Achsen mit unterschiedlichem Systemverhalten.

Der Regler des Testmusters wurde mit Simulink entworfen und mit dem vorhandenen Rapid-Prototyping System auf einer DSP-Karte implementiert. Ein solches DSP-System hat Nachteile hinsichtlich der Kosten und dem Performance-Update, da sowohl DSP-Prozessoren als auch DSP-Karten längere Produktzykluszeiten haben als z.B. herkömmlich PC-Prozessoren. Zur Vermeidung dieser Nachteile wurde innerhalb eines Projektschwerpunktes ein unter Real-Time-Linux (RT) lauffähiger Regler entwickelt.

Die Verwendung von RT-Linux als Betriebssystem ermöglicht dabei sowohl den Einsatz des Antriebssystems als OEM als auch direkt als User-Interface. Die Nutzung der Client-Server Technologie erlaubt darüber hinaus die Fernwartung des Systems.

## **Ausblick**

Innerhalb des Verbundvorhabens wurden Steuerkonzepte für hochgenaue multiaxiale (4D- und 5D-) Antriebssysteme entwickelt und an Testmustern validiert. Die zu realisierenden Eigenschaften der Regler, wie z.B. Achssynchronisation, waren dabei durch die Applikation Präzisions-Laserbearbeitung vorgegeben. So erfordert u.a. die Bearbeitung von Stents eine wahlweise Synchronisierung in der x-y-Ebene oder der x-rot x- Ebene. Im Testmuster wurden diese umschaltbaren Interpolationsebenen implementiert. Das Ziel für die Positioniersysteme der nächsten Generation ist es, eine Synchronisation aller - je nach Applikation bis zu fünf - Achsen zu realisieren. Die Arbeiten dazu werden im Rahmen des Folgeprojektes „Mikrostrukturierung“ durchgeführt.

Ein Schwerpunkt der Projektarbeiten war der Entwurf und die Implementierung eines Reglers unter RT-Linux. Als erstes Testmuster wurde dabei eine 2D-Bahnregelung realisiert. Innerhalb des Folgeprojektes „Mikrostrukturierung“ werden die begonnenen Arbeiten weitergeführt. Ziel ist dabei die reglerseitige Implementierung zusätzlicher Antriebsachsen sowie die Erhöhung der Bahngeschwindigkeit durch die Geschwindigkeitsoptimierung der Reglerzyklen.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Steffen Michael

Tel.: +49 (3677) 69-5565

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

# Identifikation von Antriebssystemen

## Ziele

Die Regelung innovativer Antriebssystemkonzepte, z.B. der an der IMMS gGmbH entwickelte PMS 200, beinhalten moderne Regelungsstrategien. Diese werden z.B. als Zustandsregelung mit Beobachter ausgeführt, wobei ein parametrisches Modell als Entwurfsgrundlage dient.

Je vollständiger ein System oder Prozess beschrieben ist, d.h. je mehr Informationen über ihn bekannt sind, um so besser lassen sich Steuerungs- und Regelungsstrategien ableiten.

Eine Form der Systembeschreibung sind parametrische Systemmodelle (Zustandsdifferentialgleichungen), deren parametrische Elemente noch quantitativ zu bestimmen sind. Eine andere, weit verbreitete Art lineare Systeme zu beschreiben, sind nichtparametrische Beschreibungsformen, z.B. Bodediagramme.

Das quantitative Ermitteln und die Interpretation dieser Beschreibungsformen aus aufgezeichneten Messsignalen standen im Mittelpunkt der folgenden Untersuchungen.

## Forschungsverlauf und -stand

Um Informationen über Systemeigenschaften zu erhalten, müssen diese Eigenschaften gezielt angeregt werden. Um Anregungssignale sinnvoll zu gestalten, ist eine theoretische Systemanalyse und apriori-Information nötig. Am IMMS wurde eine zweistufige Strategie entwickelt, Antriebssysteme zu identifizieren. Dabei wird zwischen der Anregung in offener Steuerkette (Stufe I) und im geschlossenen Regelkreis (Stufe II) unterschieden.

### Stufe I:

Zu Beginn des Entwurfs- und Optimierungsprozesses existiert noch kein Regler. Zum ersten Regler- und Beobachterentwurf wird ein einfaches Prozessmodell verwendet, dessen Parameter quantitativ zu bestimmen sind.

$$a = -D \cdot v + K_m \cdot i + F_c \cdot \text{sign}(v)$$

$a = dv/dt$ ...Beschleunigung,

$v = dy/dt$ ...Geschwindigkeit,

$i$ ... Strom, Km...Strom-Beschleunigungs-Faktor

$F_c$ ...Haftreibungskoeffizient

Die Steuergröße ist der Strom  $i$  (Eingang), die Messgröße ist die Position  $y$  (Ausgang).

Die Anregung eines Antriebssystems in offener Steuerkette ist bei schwacher Dämpfung, integralem Charakter und beschränkten Bewegungsbereichen der Regelstrecke problematisch, sodass bei der Wahl der Anregungssignalform sowie auch der Überwachung der Anregungssequenz sehr sorgfältig vorgegangen werden muss.

Des Weiteren werden Reibungsparameter aus

den gewonnenen Daten extrahiert, um deren nichtlinearen Einfluss mittels Vorsteuerung zu kompensieren (z.B. Haftreibung).

Die Messdaten müssen einen gewissen Informa-

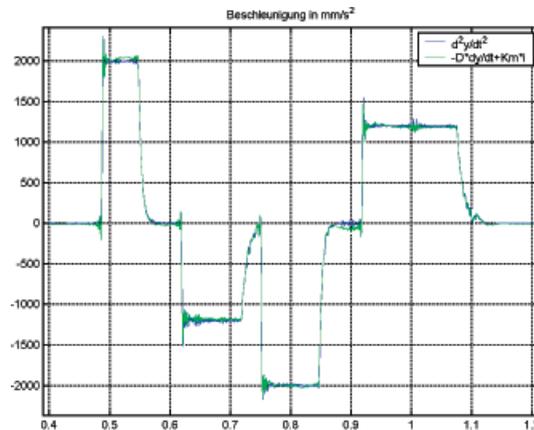


Abb. 1: Beschleunigungsverläufe, gemessen und simuliert

tionsgehalt besitzen, um erwartungstreue Parameterschätzungen erhalten zu können. Z.B. erhält man vertrauenswürdige Aussagen über den Strom-Beschleunigungs-Zusammenhang nur, wenn durch einen vorgegebenen Anregungsstrom auch ein ausgeprägtes Beschleunigungsverhalten in den Messsignalen zu erkennen ist. Es ist die Aufgabe des Identifikationsalgorithmus entsprechende Anregungssignale zu generieren und signifikante Signalabschnitte zur Parameteridentifikation heranzuziehen.

Nachdem systematische Störungen durch geeignete Filter in den Messsignalen minimiert worden sind (z.B. konstante Störkräfte durch Schrägstellung des Antriebs), werden die gefilterten Signale einem Parameterschätzverfahren (z.B. LS) zur Extraktion der Modellparameter übergeben

### Stufe II:

Nach Verifikation der Schätzergebnisse wird ein vorläufiger Regler und Beobachter entworfen und der Regelkreis geschlossen. Die anschließende Frequenzganganalyse ist nur sinnvoll, wenn sichergestellt ist, dass der Gesamtkreis bei Anregung lineares Verhalten zeigt.

Die Anregung  $z$  wird der Steuergröße  $u$  überlagert und die Systemreaktion  $y$  wird beobachtet. Dazu werden, wie in Abb. 2 gezeigt, drei Zeitreihen aufgezeichnet. Während dieser Zeit wird die Sollwertvorgabe  $w$  konstant gehalten.

Untersuchungen haben ergeben, dass die Wahl der Anregungssequenz einen entscheidenden Einfluss auf die Güte der Frequenzgangmessung hat.

Es kommen zwei verschiedene Verfahren zum Einsatz:

- Sequenzielle Anregung durch harmonische Signale jeweils fester Frequenz
  - Vorteil: • zuverlässige Schätzwerte
  - Nachteil: • niedrige Auflösung
  - lange Messzeiten
- Anregung durch spezielles Chip-Signal
  - Vorteil: • Auflösung hängt von der Messzeit ab
  - vergleichsweise kurze Messzeiten möglich

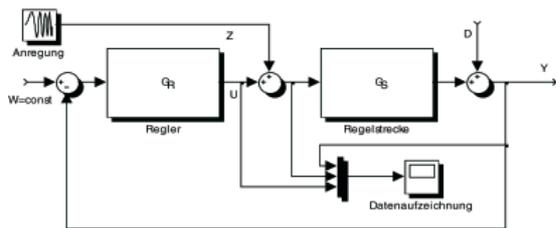


Abb. 2: Prinzip der Frequenzgangmessung

Die aufgezeichneten Signaldaten  $u$ ,  $u_z$  und  $y$  werden mittels FFT in den Frequenzbereich transformiert. Formal erhält man durch Division die gewünschten Frequenzgänge.

Es ergeben sich:

$$G_S = \frac{FFT\{y\}}{FFT\{u_z\}} \dots \text{Systemfrequenzgang}$$

$$G_R = -\frac{FFT\{u\}}{FFT\{y\}} \dots \text{Reglerfrequenzgang}$$

Aus diesen beiden Frequenzgängen können alle weiteren im Regelkreis berechnet werden. Die Darstellung erfolgt wie allgemein üblich im Bodediagramm.

Die Verifikation der Messungen wird anhand von Simulationen mit Hilfe des parametrischen Systemmodelles und der Berechnung der Signalkohärenz durchgeführt.

### Ausblick

Die entwickelte Vorgehensweise bei der Identifikation der Parameter wird im Weiteren auf verschiedene Antriebssysteme übertragen.

Hier arbeitet die IMMS gGmbH eng mit Industriepartnern zusammen, um praktikable Lösungen zu finden und bei der Interpretation der Ergebnisse zu unterstützen.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Torsten Maas

Tel.: +49 (3677) 69-5564

Email: torsten.maass@imms.de

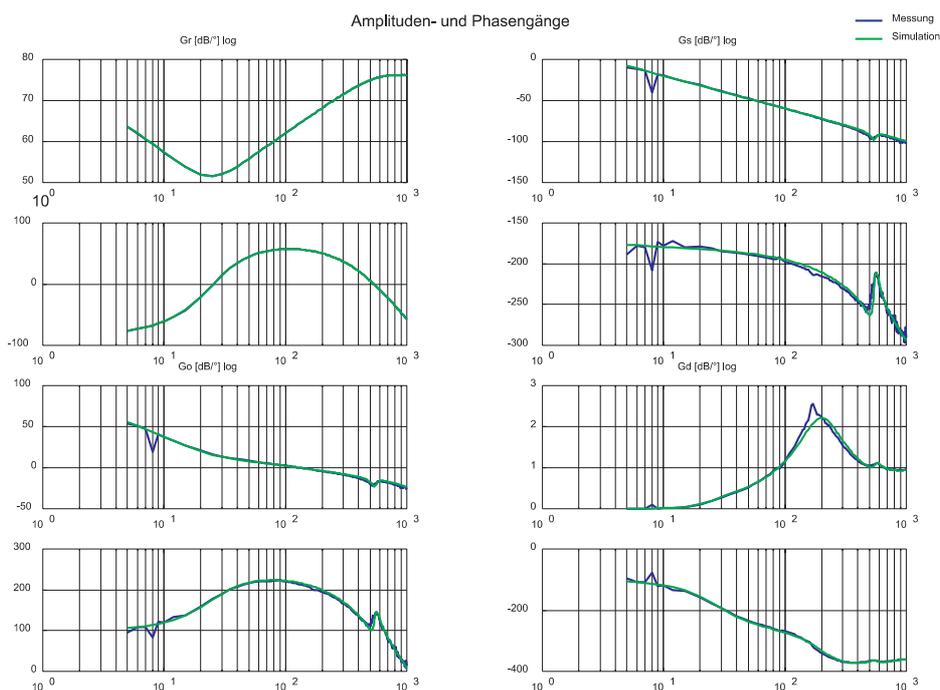


Abb. 3: Bodediagramme als Ergebnis der Frequenzgangmessung

# Bahninterpolation in mehreren Bewegungsebenen

## Ziele

Leistungsfähige Antriebssysteme sind neben den dynamischen Eigenschaften auch dadurch gekennzeichnet, dass sie in der Lage sind, komplizierte, mehrdimensionale Bewegungsabläufe zu realisieren.

Ein an der TU Ilmenau und an der IMMS gGmbH entwickelter und hochgradig spezialisierter Regelalgorithmus („vektorielle Bahnregelung“) eignet sich prinzipiell für die synchrone (interpolierte) Regelung von Bewegungssystemen in zwei Koordinatenrichtungen (z.B. X-Y-Bewegungsebene).

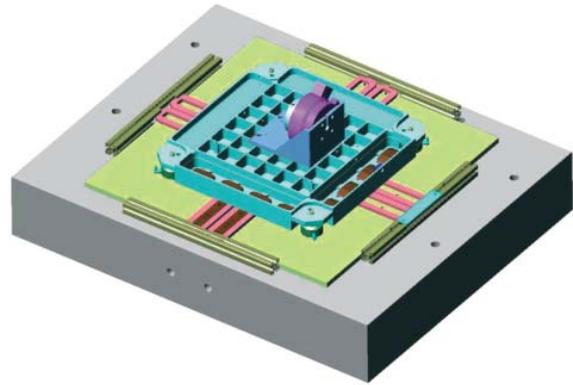
Durch die Erweiterung eines Planarantriebs um zusätzliche Bewegungssysteme, die Bewegungen in weiteren Koordinatenrichtungen ermöglichen, z.B. eine A-Achse (Rotation parallel zur X-Achse), und der Forderung nach synchronisierter Bewegung (Bahninterpolation), wurde eine Weiterentwicklung des Regelalgorithmus erforderlich. Diese Thematik war unter anderem Gegenstand im Forschungsprojekt „InnoSKo“ (s. S. 11) und einer an der IMMS gGmbH betreuten Diplomarbeit.

## Forschungsverlauf und -stand

Moderne Werkzeugmaschinen vereinen meist mehrere unterschiedliche Antriebskonzepte (Direktantriebe, Spindelantriebe, etc.). Die Regler werden traditionell achsspezifisch ausgelegt, und erhalten von einem übergeordneten Leitsystem die Sollwertvorgaben (z.B. Sollgeschwindigkeit und -position).

Der Kern der „vektoriellen Bahnregelung“ unterscheidet im Gegensatz dazu nicht nach realen Achsen, sondern ermöglicht auf elegante Art und Weise durch Ein- und Ausgangstransformationen die direkte Berücksichtigung der geforderten kinematischen Bahngrößen (Sollposition, geforderte Bahngeschwindigkeit, Maximalbeschleunigung, usw.). Das ist möglich, weil die Bewegung in Zielrichtung und Bahnabweichungsrichtung zerlegt wird.

In Anlehnung an das existierende Regelungskonzept und unter Berücksichtigung der eingeschränkten Leistungsfähigkeit der vorgegebenen Hardware, wurde in der ersten Entwicklungsphase ein Algorithmus entworfen, der es ermöglicht, zur Laufzeit die 2D-Achskombination (Bewegungsebene) frei wählen zu können. Beispielsweise kann zunächst eine synchronisierte Bewegung in der X-Y-Ebene und danach eine Bewegung in der X-A-Ebene ausgeführt werden. Die Lösungsansätze und Ideen wurden zuerst anhand von Simulationen untersucht und danach, dank einer durchgängigen Entwicklungskette (Designflow), direkt für einen realen



**Abb. 1:** Planarantrieb mit Drehachse

Demonstrator implementiert und getestet.

Das Konzept für den Demonstrator entstand auf der Grundlage der Anforderungen industrieller Projektpartner. Ein existierendes Planarantriebssystem (X-Y-Direktantrieb) wurde um eine A-Achse (rotatorischer Direktantrieb) und eine vertikale Z-Achse (Spindelantrieb) erweitert.

Der komplette Antrieb konnte erfolgreich in ein Laserbearbeitungssystem integriert werden. Die neue Funktionalität erweitert die Bearbeitungsmöglichkeiten enorm. So ist es mit einem CNC-Programm möglich, sowohl auf Ebenen wie auch auf gekrümmten Oberflächen (Zylindermantel) Konturen mit Genauigkeiten im unteren  $\mu\text{m}$ -Bereich zu realisieren. Durch das Einbinden einer Z-Achse ist eine Korrektur des Laserfokus und damit eine bessere Schneidqualität erreichbar. In einer zweiten Entwicklungsphase stand die Erweiterung der Transformationsalgorithmen im Mittelpunkt. Zum einen wurde der Grundgedanke der „vektoriellen Bahnregelung“ konsequent auf mehr als zwei Achsen erweitert.

Die Synchronisierung der Gesamtbewegung in (n) Koordinatenrichtungen erfolgt durch einen Zielrichtungsregler und (n-1)-unabhängig arbeitende Bahnabweichungsregler.

Zum anderen wurden auch alternative Möglichkeiten untersucht und in einer Diplomarbeit vergleichend gegenübergestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Ansprüche an die Leistungsfähigkeit der Hardware konnten die Algorithmen zunächst nur durch Simulationen untersucht und verglichen werden.

## Ausblick

Die positiven Simulationsergebnisse sollen im Weiteren durch reale Messdaten verifiziert werden. Dazu werden, nach der Lösung hardwarespezifischer Realisierungsprobleme, die Algorithmen auf bestehenden Systemen implementiert.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Torsten Maaß

Tel.: +49 (3677) 69-5564

Email: torsten.maass@imms.de

# SFB 622 - Entwicklung und Untersuchung mechatronischer Präzisionsantriebe

DFG, SFB 622

## Ziele

Seit dem Jahr 2002 ist die IMMS gGmbH als Forschungspartner im Sonderforschungsbereich (SFB) 622 „Nanopositionier- und Nanomessmaschinen“ der DFG tätig. Der SFB hat die Erarbeitung der wissenschaftlichen Grundlagen für die Realisierung von Nanopositionier- und -messmaschinen zum Ziel. Der Forschungsbedarf auf diesem Gebiet resultiert aus den stetig steigenden Genauigkeitsanforderungen für die Positionierung, Vermessung und Manipulation von Objekten in immer größeren Verfahrensbereichen, u. a. im Bereich zukunftsorientierter Technologien, wie der Halbleitertechnik, oder der Elektronenstrahl bzw. Röntgenlithografie. Als ein Teilprojekt innerhalb des SFB beschäftigt sich die IMMS gGmbH mit der Entwicklung von Nanopositioniersystemen großer Bewegungsbereiche. Die Forschungsarbeiten haben dabei die Realisierung eines Positioniersystems mit folgenden Parametern zum Ziel:

- Verfahrensbereich: 200 x 200 x 5 mm<sup>3</sup>
- Messauflösung: 0,1 nm
- Positionierungsunsicherheit: 3 nm
- Verfahrensgeschwindigkeit in x, y : 10 mm/s
- Umgebung: Luft, Klimakammer

Aus dieser Zielstellung leiten sich für die wissenschaftlichen Arbeiten folgende Schwerpunkte ab:

- Untersuchungen zur Eignung aerostatischer Führungselemente für Nanopositioniersysteme
- Entwicklung eines Gesamtkonzeptes für das zu realisierende System
- Auslegung, Optimierung funktioneller Konzeptdetails
- Schrittweiser Aufbau von Demonstratoren zur Validierung theoretischer Erkenntnisse

## Forschungsverlauf und -stand

In Fortführung der bisherigen Arbeiten zur Untersuchung der Eignung aerostatischer Führungselemente erfolgte die experimentelle Untersuchung aerostatischer Zylinderführungen. Die komprimierte Luft strömt bei derartigen Führungselementen durch einen porösen Zylinder radial in den umlaufenden Luftspalt und sorgt so für eine Zentrierung der Buchse auf der Führungsschneise. Insbesondere das Restrauschen der Führungselemente stellt mit Blick auf die Genauigkeitsanforderungen eine kritische Größe dar.

Um dieses genau zu erfassen, wurde ein Laserinterferometrischer Messaufbau mit einer Messauflösung von 0,1 nm realisiert. Die Messungen zeigen, dass im gesamten Betriebsbereich der Buchsen nur ein sehr geringes Restrauschen

mit Amplituden von weniger als 1 nm auftritt. Abbildung 1 zeigt beispielhaft einen gemessenen Zeitverlauf. Auf diese Weise konnte die Eignung der Führungselemente für Nanopositioniersysteme gezeigt werden.

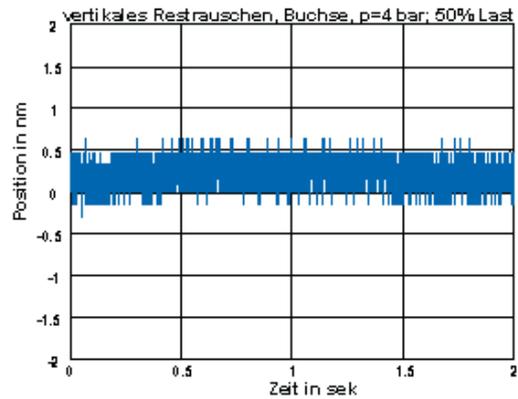


Abb. 1: Restrauschen zylindrischer Führungsbuchsen

Die zukünftigen Arbeiten auf diesem Gebiet sind auf den Betrieb in verspannten Anordnungen und insbesondere auf die Untersuchung des Energieeintrages in das System durch die einströmende Luft ausgerichtet.

Aufbauend auf der Konzeptentwicklung für ein planares Positioniersystem für 200 x 200 mm<sup>2</sup> bildeten die Konzipierung, Dimensionierung und der beginnende Aufbau eines Demonstrators für eine 200 mm Linearbewegung einen zweiten thematischen Schwerpunkt der Arbeiten.

Dieses Positioniersystem verfügt über einen linearen elektrodynamischen Direktantrieb mit bewegten Dauermagnetkreisen, wobei der Läufer mit Hilfe zylindrischer Buchsen aerostatisch geführt wird.

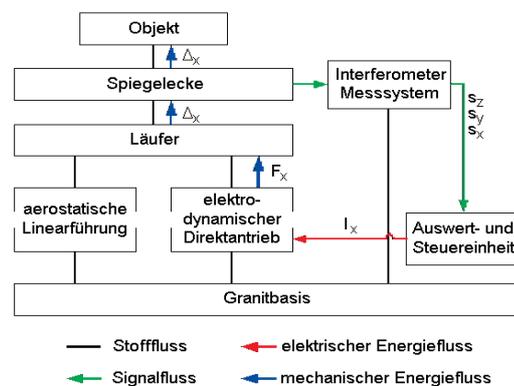


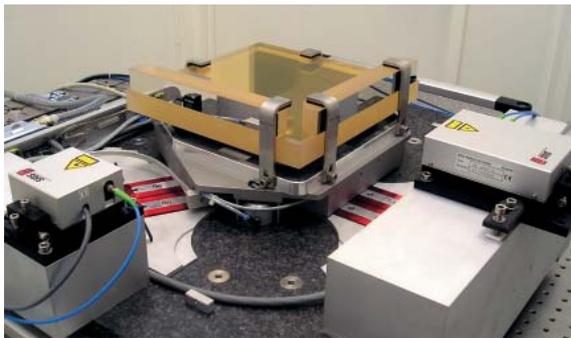
Abb. 2: Funktionsschema des Demonstrators

Eine mitbewegte Zerodur®-Spiegelecke dient als thermisch stabiler Reflektor für die Laserinterferometrische Messung der x-, y- und z- Position des Läufers. Abb. 2 verdeutlicht den funktionalen Aufbau des Demonstrators.

Neben der Gestaltung der Koppelstellen wurde hier besonderes Augenmerk auf das thermische Verhalten gerichtet und aus diesem Grund die Option zur Kühlung der Antriebsspulen vorgesehen.

Der Demonstrator bietet für zukünftige Arbeiten die Möglichkeit, das Antriebssystem als Ganzheit zu testen und insbesondere thermische und dynamische Eigenschaften eingehend zu untersuchen. Gleichzeitig wird durch die modulare Gestaltung eine praktische Erprobung funktionaler Details, wie z. B. einzelner Koppelstellen, innerhalb des Gesamtsystems möglich.

Das dritte Arbeitspaket bildeten experimentelle Untersuchungen zur erreichbaren Genauigkeit bei integrierten Mehrkoordinatenantrieben anhand des PMS100-3. Zu diesem Zweck wurde der planare Mehrkoordinatenantrieb in Dreiecksstruktur zusätzlich mit einem Interferometer - Messsystem mit 1 nm Messauflösung ausgestattet (s. Abb. 3).



**Abb. 3:** PMS100-3 mit Lasermesssystem

Mit dieser Konfiguration konnten erfolgreiche Versuche zur Inbetriebnahme des Lasermesssystems ohne mechanische Verdreh Sperre durchgeführt werden. Aus eingehenden Untersuchungen zum Betriebsverhalten des Systems konnten zudem eine Reihe von Ansätzen für die Steigerung der Genauigkeit und so wertvolle Erkenntnisse für zukünftige Entwicklungen gewonnen werden. Grundsätzlich zeigten die Arbeiten, dass die Verbindung von integriertem Mehrkoordinatenantrieb und Lasermesssystem ein technisch sinnvoller und viel versprechender Ansatz für die Gestaltung von Nanopositioniersystemen großer Bewegungsbereiche darstellt.

### **Ausblick**

Innerhalb der Fortführung der beschriebenen Arbeiten bilden die Untersuchung und die Weiterentwicklung des Demonstratormodells im Jahr 2005 den inhaltlichen Schwerpunkt. Dabei sollen insbesondere: genauigkeitsbegrenzende Faktoren identifiziert, Dimensionierungsregeln und Richtlinien für die Optimierung der Direkt-

antriebe abgeleitet und neue Erkenntnisse zur Gestaltung der Koppelstellen und der Spulen kühlung erzielt werden.

Parallel dazu wird die Erarbeitung eines übergreifenden Modells für derartige Antriebssysteme angestrebt, welches die internen Übertragungseigenschaften berücksichtigt. Mit Hilfe dieses Modells wird es möglich, das spätere Systemverhalten besonders hinsichtlich Dynamik und Genauigkeit bereits in frühen Entwicklungsphasen abzuschätzen.

Die Erweiterung des Demonstrators zu einem 2D - Positioniersystem stellt schließlich einen weiteren, wesentlichen Schritt auf dem Weg zur Realisierung der Zielstellungen des SFB 622 dar.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Steffen Hesse

Tel.: +49 (3677) 69-5567

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

Dipl.-Ing. Hans-Ulrich Mohr

Tel.: +49 (3677) 69-5568

Email: [hans-ulrich.mohr@imms.de](mailto:hans-ulrich.mohr@imms.de)

# HOPS - Simulation einer Reglerstruktur für einen planaren Hybrid-schrittmotor

TMWFK, B 609-01040

## Ziele

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-Antriebes, wie Spiel 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, lineare Schrittmotoren in der offenen Steuerkette zu betreiben. Benötigt wird statt dessen eine Regelung des Antriebs.

Im Rahmen des vom ehemaligen Thüringer Ministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kultur geförderten Verbundprojektes wurden moderne, nichtlineare Algorithmen zur Regelung von Schrittmotor-Direktantrieben entwickelt.

Diese sind so zu gestalten, dass unter Ausnutzung der Vorteile planarer Direktantriebe große Verfahrenswege, hohe Geschwindigkeitsverhältnisse und eine hohe Laufruhe bei allen Geschwindigkeiten realisiert werden. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sind spezielle Dynamik-Modelle sowie Konzepte und Algorithmen für geeignete Steuerungen zu entwerfen. Dabei liegt der Aufgabenschwerpunkt der IMMS gGmbH in der Entwicklung von Mehrachs-Zustandsregelungen für Bahnsteuerungen, die auch die Untersuchung von am Markt vorhandenen Mehrachs-Controllern auf ihre Eignung beinhaltet.

## Forschungsverlauf und -stand

Als eine kostengünstige Lösung für einen zukünftigen industriellen Einsatz hat sich der sogenannte SPiiPlus der Firma ACS Tech80 (USA /Israel) herausgestellt. Zu diesem Zweck wurde dessen Reglerstruktur mit Hilfe von MATLAB/Simulink nachgebildet und untersucht. Das Schema für eine Achse ist in Abbildung 1 dargestellt. Um eine erste Näherung für die Parameter (Regler- und Filtereinstellung) zu ermitteln, erfolgte die Simulation des linearen Motormodells (Doppelintegrator mit Dämpfungsglied) für eine Achse. Die entsprechenden Kenngrößen des Motors, wie Umrechnungsfaktor von Reglerstrom zu Beschleunigung etc., sind von dem später verwendeten Planarschrittmotor experimentell bestimmt und übernommen worden. Die Ermittlung der optimalen Reglereinstellungen erfolgte mit Hilfe von Frequenzganganalysen der Simulationsrechnungen. Außerdem wurden das Einschwingverhalten für schnelle Positioniervor-

gänge und das Reglerverhalten bei Messsignalrauschen bei der Bestimmung der Parameter berücksichtigt.

Im folgenden konnte das Modell auf die drei Achsen ( $x$ ,  $y$  und die Rotation in der Bewegungsebene) eines Planarschrittmotors erweitert werden. Im weiteren Verlauf wurde das Motormodell durch einen realen Planarschrittmotor eines Projektpartners ersetzt. Als Steuerhardware kam eine DS1103 von dSPACE zur Anwendung. Im Gegensatz zur 20 kHz Samplefrequenz des SPiiPlus lässt sich die Reglersoftware auf dem dSPACE-System nur mit 10 kHz realisieren, was nach bisherigen Erkenntnissen zu einer Verschlechterung der Performance führt.

Die Feineinstellung der Parameter (Abgleich zwischen Modell und realem Motor) erfolgte mit Hilfe von Frequenzgangmessungen. Eine weitere Forderung bestand darin, dass eine Interaktion zwischen zwei Einzelachs-Controllern des Planarantriebs möglich sein soll, die den Reglerstrom für die Verdrehung und den Strom für die Bewegung in  $y$ -Richtung zwei äquivalente Ströme in  $y_1$ - bzw.  $y_2$ -Richtung zuordnen, so dass sie der realen Anordnung der Antriebselemente in der Motorgeometrie entsprechen.

In der standardmäßigen Konfiguration der Reglersoftware war diese Kreuzverbindung zwischen zwei Achsen nicht vorgesehen, so dass eine Modifizierung der Firmware erforderlich war. Des Weiteren war in der Standardkonfiguration nur eine Kommutierung mit Sinus und Kosinus vorgesehen. Wie experimentelle Untersuchungen zeigten, verbessern sich die Eigenschaften des Reglers bzgl. Geschwindigkeitskonstanz und Steifigkeit durch gezieltes Einbringen von Oberwellen in die Kommutierungsfunktion, was wiederum zu einer Änderung an der Firmware führt.

Als ein weiterer Einflussfaktor für die Stabilität des Reglers erwies sich die Qualität der Positionsmesssignale. Der hier verwendete Motor verfügt über ein internes Hallsensormesssystem. Die Signale unterliegen zum Einen aufgrund ihrer magnetischen Eigenschaften einer Hysterese. Zum Anderen weisen die Signale einen recht hohen Rauschanteil auf, der durch Filter nur zum Teil eliminiert werden kann, da sich die Phasenverschiebung, die durch den Filter entsteht, negativ auf die Reglerstabilität auswirkt.

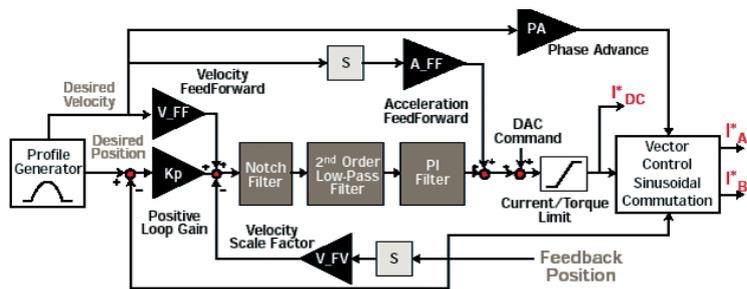


Abb. 1: Reglerstruktur des SPiiPlus für eine Achse

## Ausblick

Schwerpunkt weiterer Arbeiten ist es, die Ergebnisse der Simulation auf der entsprechend modifizierten Firmware des SPiiPlus zu verifizieren. Darüber hinaus wird daran gearbeitet, die Eigenschaften des Messsystems zu verbessern.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing.(BA) Jörg Peukert

Tel.: +49 (3677) 69-5570

Email: joerg.peukert@imms.de

## System Design

Der thematische Schwerpunkt des Themenbereiches (TB) „System Design“ lag 2004 weiter auf dem Entwurf und der Realisierung komplexer eingebetteter Systeme. Ein solches System muss immer als Einheit von Hardwareplattformen, Software- und Kommunikationskomponenten gesehen werden. Entsprechend dieser Auffassung unterteilt sich der Themenbereich in drei Themengebiete (TG), die jeweils einen der genannten Aspekte inhaltlich verfolgen und weiter entwickeln.

Im TG „Digitale Signalverarbeitung/programmierbare Hardware“ werden Hardware-Entwurfsmethodik (modellbasierter Entwurf), Hardware-Modellierung und -Realisierung auf verschiedenen Zielplattformen erforscht und entwickelt. Diese können z.B. ASIC, FPGA oder komplette PCB-Designs umfassen. Die Arbeit im TG „Busse und Netze“ umfasst industrielle Kommunikation, und im TG „Embedded Software/Automotive Systems“ stehen Softwareaspekte moderner eingebetteter Systeme im Mittelpunkt. Letztere umfassen Entwurfsmethodik mit modellbasierten Technologien (u.a. UML), den Entwurf applikationsspezifischer Software-Architekturen (Automotive, Wireless Communication) sowie deren werkzeuggestützte Implementierung, Treiber- und Plattformunterstützung sowie Entwicklung echtzeitfähiger Applikationen.

In erster Linie werden bei den Projektarbeiten weitestgehend freie Software bzw. Open-Source-Technologien (Linux, eCos) für die Entwicklung kundenspezifischer Produkte genutzt.

Die zurückliegende Phase des Know-How-Aufbaus auf diesem Gebiet wurde 2004 mit einem zusammenfassenden Bericht abgeschlossen.

Die praktische Umsetzung erfolgte u.a. in der Inbetriebnahme einer linuxbasierten Steuerung für einen mechatronischen Antrieb mit hoher Dynamik und Positioniergenauigkeit (s. S. 24).

Nach erfolgreichen Tests wurde in Zusammenarbeit mit der Fa. TETRA GmbH (Ilmenau) und dem TB Mechatronik die Entwicklung eines weiteren Steuermoduls für die Nachfolgeneration des Direktantriebs aufgenommen. Darüber hinaus wurden prototypische Produkte mit embedded Linux in Zusammenarbeit mit Thüringer Industriepartnern realisiert.

Auf Grund der Erfahrungen wurden Entwicklungsleistungen zum Linux-Support für die Prozessorhardware namhafter Hersteller angefragt und erbracht. Neu und exklusiv wurde echtzeitfähiges Linux auf der in den zurückliegenden Jahren im Bereich entwickelten Embedded-Linux-Plattform EmLIN realisiert und mittels eines Demonstrators präsentiert.

Auf dem Gebiet der Signalvorverarbeitung und -konditionierung in eingebetteten Systemen wurden durch den Einsatz programmierbarer Hardware Anwendungen konkrete Produktentwicklungen für Unternehmen realisiert. Ein Schlüssel für Effizienz und Qualität bei der Entwicklung ist dabei der konsequente Einsatz von MATLAB/Simulink als Einstiegspunkt und die automatische Codegenerierung für Zielplattformen. Zu diesen zählt seit Kurzem auch embedded Linux mit Echtzeitfähigkeit. Dem Open-Source-Gedanken folgend wurde 2004 die automatische Codeerzeugung auch unter Verwendung von Scilab/Scicos (s. S. 27) etabliert.

Auf dem Gebiet der Vernetzung eingebetteter Systeme konnte nach der Evaluierung der IEEE-1394b-Technologie (FireWire) für industrielle Anwendungen im Vorjahr die Ansteuerung von 1394b-Hardware von Linux aus demonstriert werden. Zusätzlich erfolgten Untersuchungen drahtloser Nahbereichsnetzwerke, die den Systemcharakter von morgen mit prägen werden.

Die Hauptaktivitäten auf dem Gebiet „Embedded Software/Automotive Systems“ bestanden 2004 in der Fortführung der gemeinsamen F&E-Aktivitäten mit der Fa. FALCOM bei der Portierung von eCos auf tief eingebettete Systeme und kundenspezifische Hardwarearchitekturen sowie die Applikationsentwicklung. Zu diesem Themenkomplex wurden auch Workshops und Schulungen durchgeführt. Weiterhin wurden die Arbeiten zum modellbasierten Entwurf bei der Entwicklung eingebetteter Kfz-Steuergeräte fortgesetzt.

Im Rahmen des zur BMBF-Förderinitiative Ekompas gehörenden Forschungsprojektes SpeAC II (s. S. 32) wurden an praktischen Beispielen aus aktuellen Schlüsselindustrien Untersuchungen zur Erhöhung der Entwurfs-effizienz durch Einsatz einer spezifikationsbasierten Entwurfsmethodik durchgeführt.

Für weitere Aktivitäten in Richtung zukünftiger Technologien der Signal- und Datenverarbeitung wurde eine Expertise für die Ausgabe 2005 der ITRS-Roadmap zu Status und Tendenzen der Einzelflussquantenelektronik als schnelle und zugleich verlustleistungsarme digitale Schaltungstechnik erstellt.

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Hannes Töpfer

Tel.: +49 (3677) 69-5540

Email: hannes.toepfer@imms.de

# Modulare Embedded-Linux-Hardwareplattform

## Ziele

Flexibilität bei der Entwicklung von universellen Plattformen ist eine Grundvoraussetzung.

Modularität stand deshalb auch bei der Entwicklung des Universellen Buskonverters EmLIN im Mittelpunkt. Herzstück des im Haus entwickelten eingebetteten Systems ist ein Prozessormodul mit der von der Fa. NetSilicon hergestellten Net+50-CPU. Hierbei handelt es sich um einen Prozessor mit ARM7TDMI-Kern ohne Memory Management Unit.

Nach Abschluss der Hardwareentwicklung - [1], es existieren mehrere Prozessormodule, Trägerplatinen sowie diverse IO-Module - wurde der Schwerpunkt der Forschung zunehmend auf die Softwareentwicklung verlagert, um der EmLIN-Plattform weitere Einsatzfelder zu erschließen.

## Forschungsverlauf

Im Rahmen der Softwareentwicklung wurde daher der universale Bootloader U-Boot für die EmLIN-Plattform portiert. Die Aufgabe eines Bootloaders ist das Laden und anschließende Ausführen eines Betriebssystems. Bootloader existieren für nahezu alle Computersysteme und -ausprägungen.

Zu den Bekanntesten im x86-Bereich zählen zum Beispiel der GRUB, der Lilo für Linux und der ntloader für windowsbasierte Betriebssysteme. Im Sektor der eingebetteten Systeme hat sich das Projekt U-Boot als Quasistandard etabliert.

Bei der praktischen Umsetzung wurden folgende Punkte berücksichtigt:

- Korrekte Initialisierung der CPU und Peripherie durch den Bootloader
- Kommunikation und Bedienung des Bootloaders über die serielle Schnittstelle der CPU in Verbindung mit dem Hostsystem ermöglichen
- Lese- und Schreibzugriff auf den Flashspeicher des Moduls durch einen Treiber
- Entwicklung eines Treibers für die interne Ethernetschnittstelle des Prozessors, der die vom Bootloader unterstützte Netzwerkfunktionalität realisiert
- das Booten von uClinux in unterschiedlichen Konfigurationen ermöglichen und testen

Zudem weisen Bootloader für eingebettete Systeme einige Besonderheiten auf, wenn auch die grundlegenden Funktionen die gleichen bleiben wie bei PC-Systemen. So muss den Einschränkungen eines eingebetteten Systems, zum Beispiel der Speichergröße, Rechnung getragen werden.

## Ergebnisse

Durch die Portierung des Bootloaders U-Boot konnte die Flexibilität sowie die Effizienz bei der Softwareentwicklung erhöht werden.

So kann zum Beispiel ein Betriebssystem-Image oder auch anderer Programmcode über eine serielle Verbindung oder über die Netzwerkschnittstelle des Net+50 Prozessors ohne zusätzliche Hardware wie einem JTAG-Debugger in den Speicher des eingebetteten Systems übertragen und gestartet werden.

Zudem erhält der Entwickler durch den uneingeschränkten Zugriff auf die Hardware des Systems ein Werkzeug, welches die weitere Entwicklung sowie die Fehlersuche in bereits vorhandener Software bedeutend vereinfacht.

Weiterhin wurde durch die Umsetzung des Real-time Application Interfaces für das EmLIN-Modul die Möglichkeit des Einsatzes in Echtzeitumgebungen geschaffen (s. S. 22).



**Abb. 1:** EmLIN3 Plattform

Ansprechpartner:

Thomas Elste

Tel.: +49 (3677) 69-5542

Email: [thomas.elste@imms.de](mailto:thomas.elste@imms.de)

[1] Embedded Linux Board EmLIN  
(Jahresbericht 2003, S. 26)

# Echtzeit-Linux auf x86- und ARM-Prozessoren

## Ziele

Der Einsatz von Linux in der Automatisierungstechnik ist weit vorangeschritten. Durch den offenen Quelltext, ein breites Angebot an Treibern sowie durch die relativ schnelle Einarbeitung in die Treiberprogrammierung erfreut es sich sowohl bei Ein- wie auch Umsteigern großer Beliebtheit. Ein wichtiger Aspekt in der Automatisierungstechnik sind Echtzeit-Anwendungen, zum Beispiel für Steuerungen.

Per Definition bedeutet Echtzeit, dass ein System im Ablauf vorhersehbar sein muss. Prozesse, die zu einem Zeitpunkt abgearbeitet werden müssen, dürfen nicht gestört werden. Mit den Erweiterungen RT-Linux und RTAI erhebt nun auch Linux den Anspruch, ein Echtzeit-Betriebssystem, kurz RTOS zu sein. Um den Anspruch zu untermauern wurde RTAI genauer unter die Lupe genommen und eingehend untersucht.

Im Zuge der Messungen wurden verschiedene Kernelversionen, RTAI Versionen sowie verschiedene Prozessoren miteinander verglichen. Entgegen der allgemeinen Annahme, dass schnelle Prozessoren bessere Echtzeiteigenschaften haben stellte sich heraus, dass langsamere Prozessoren stellenweise deutlich bessere Echtzeiteigenschaften haben können, als schnellere Prozessoren. Die Unterschiede sind in der Prozessorarchitektur sowie in der Optimierung der Software auf den Prozessor begründet. Als Ergebnis der Messungen erhält der Programmierer ein Gefühl dafür, welcher Prozessor mit welchem Linux für seine Aufgabe am Besten geeignet ist.

Die Messungen sollen als Anhaltspunkt und Vergleichsmaßstab für eigene Messungen dienen um den besten Prozessor zu finden.

In der Automatisierungstechnik werden außerdem sehr viele eingebettete Systeme mit anderen Formfaktoren und kleineren Anforderungen an die Hardware eingesetzt. Für diese Einsatzgebiete sind die herkömmlichen Linuxdistributionen zu mächtig. Außerdem besitzen die eingesetzten Prozessoren auf den späteren Einsatz zugeschnittene Peripherie und Hardwarevoraussetzungen. Zu diesem Zweck wurden spezielle Linuxdistributionen entwickelt. Diese Distributionen laufen auf einer Vielzahl von unterschiedlichen Prozessoren und Architekturen.

Leider hat in diesen Linuxdistributionen die Echtzeitfähigkeit noch nicht Einzug gehalten. Da genau dies aber in Zukunft immer mehr an Bedeutung gewinnt, wurde die Philosophie von RTAI aufgegriffen und auf ein embedded Linux angewendet.

Bei der Entwicklung eines Echtzeitsystems müssen folgende Anforderungen mindestens erfüllt werden:

- Deterministisches Verhalten
- Effiziente Bearbeitung von vielen externen Ereignissen (Interrupts)
- Schnelle Reaktion, d.h. geringer Overhead beim direkten Zugriff auf physikalische Hardware-Adressen bzw. geringer Overhead beim Kontextwechsel
- Kommunikationsfähigkeit mit nicht echtzeitfähigen Systemen

Aufbauend auf den Arbeiten von RTAI wurde eine Echtzeiterweiterung des embedded Linux für die ARM Prozessorarchitektur entwickelt. Einem Echtzeitbetriebssystem lassen sich einige grundlegende Aufgaben zuordnen.

Die wohl wichtigste ist das Taskmanagement und Scheduling.

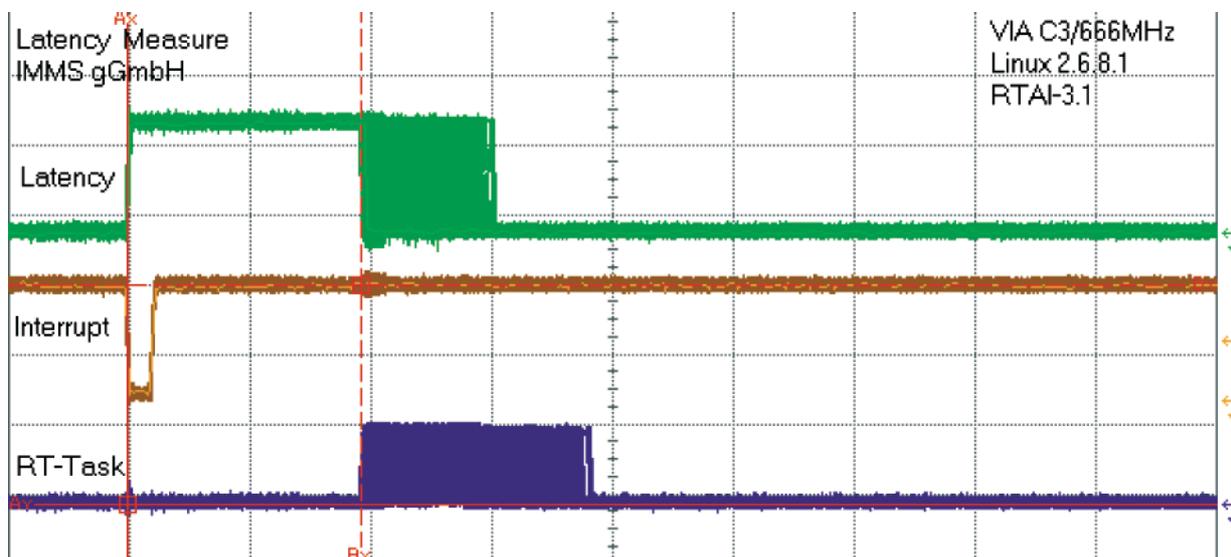
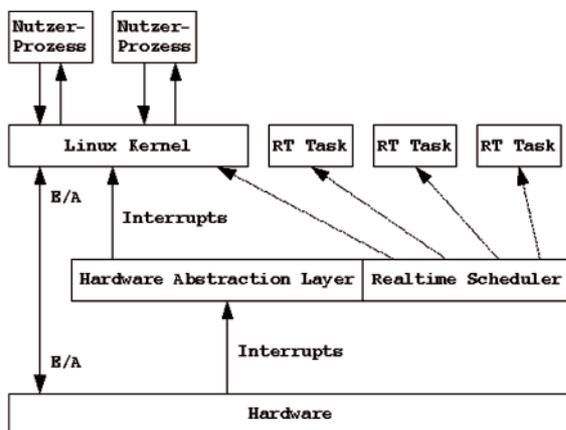


Abb. 1: Latenzzeitmessung mit RTAI

Hierbei geht es um die möglichst effiziente Verwaltung der in Tasks oder Prozesse eingeteilten Echtzeitaufgaben.

Dazu muss das Betriebssystem geeignete Schedulingverfahren zur Verfügung stellen, welche ein möglichst präzises Kontrollieren aller laufenden Tasks erlauben. In Echtzeitbetriebssystemen wird fast immer ein Prioritätsschema für die Tasks festgelegt. Innerhalb einer Prioritätsebene arbeitet der Scheduler meist nach dem Round-Robin- bzw. Zeitscheibenverfahren. Hierbei wird jedem wartenden Task ein Zeitintervall zugeteilt, in welchem dieser die Kontrolle durch die CPU erhält. Ist die Zeitscheibe des Task abgelaufen, so wird dieser vom Scheduler suspendiert und wieder an das Ende der Warteschlange der konkurrierenden Tasks angefügt.



**Abb. 2:** Micro-Kernel-Architektur von RTAI

Die Verwendung eines Echtzeitbetriebssystems bietet viele Vorteile. So lässt sich zum Beispiel die steigende Komplexität vieler Echtzeitsysteme oft nur effizient durch den Einsatz von solchen Betriebssystemen beherrschen.

Dadurch erhält man eine flexible Applikationschnittstelle für den komfortablen Zugriff auf die Hardware des Systems. Dies vereinfacht die Programmierung der eigentlichen Echtzeitaufgaben erheblich. Bietet das Betriebssystem standardkonforme Schnittstellen, so gewinnen die Anwendungen zusätzlich an Portabilität, was zum Beispiel den Aufwand für das Austauschen der Hardware minimiert. Die Grundlage hierfür ist der POSIX Standard.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. (FH) Jan Pietrusky  
 Tel.: +49 (3677) 69-5547  
 Email: jan.pietrusky@imms.de

Thomas Elste  
 Tel.: +49 (3677) 69-5542  
 Email: thomas.elste@imms.de

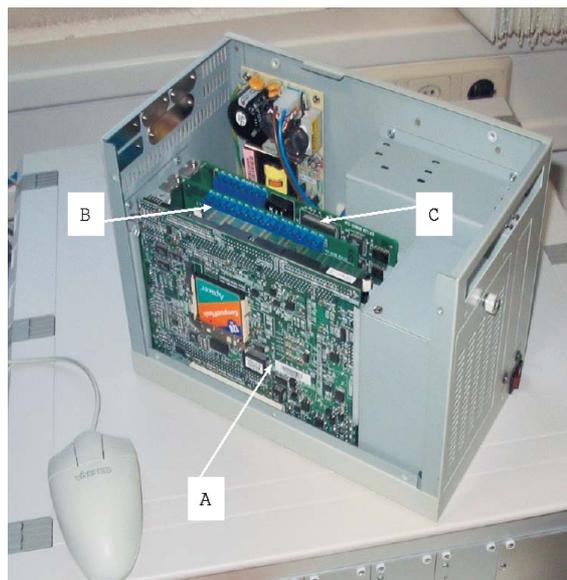
# Steuermodul für mechatronische Antriebe auf der Basis von Echtzeit-Linux

## Ziele

Regelungsaufgaben in der Mechatronik können mit spezieller Hardware und darauf zugeschnittenen Applikationsprogrammen erfüllt werden. Von größerer Universalität ist hingegen ein zunehmend zu beobachtender Trend, ein Betriebssystem als Laufzeitumgebung für die Regelungsprogramme zu nutzen. Damit kann zum einen Unabhängigkeit von den Hardware-details erreicht werden, zum anderen wird eine einheitliche Bedienschnittstelle bereit gestellt. Für viele Anwendungen ist die Echtzeitfähigkeit - d.h. die Gewährleistung der Abarbeitung bis zu einem vorgegebenen Zeitpunkt - wesentlich. Im Unterschied zur Verwendung proprietärer Echtzeitbetriebssystemen ermöglicht Open-Source-Software zusätzlich noch Unabhängigkeit vom Hersteller. Insbesondere Linux hat sich durch die Verfügbarkeit der Codequellen und die damit verbundene leichte Anpassbarkeit an den Einsatzzweck auch im industriellen Umfeld bewährt. Entscheidend für solche Anwendungen ist oft die Herstellung des erforderlichen deterministischen Verhaltens, über welches ein für allgemeine Zwecke entwickeltes Betriebssystem nicht a priori verfügt. Zur Lösung existieren verschiedene Ansätze, die durch Modifikation des Betriebssystemkerns (Kernel) bewirken, dass zur Laufzeit ein Minikernel die Interrupts von Hardware und Zeitgebern entgegen nimmt und für ein genaues Taktregime für in Echtzeit zu lösende Aufgaben vorgibt.

## Forschungsverlauf und -stand

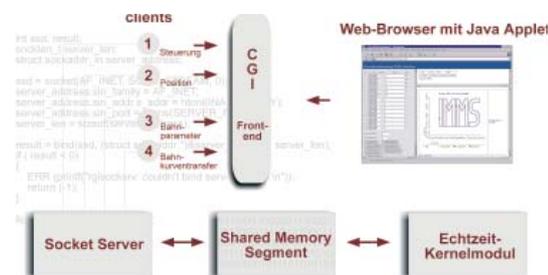
Ausgehend von Randbedingungen, die aus dem späteren Einsatzbereich resultierten, wurde das echtzeitfähige Linux-Steuermodul auf einem lüfterlosen Single-Board-Computer implementiert. Das in Abbildung 1 dargestellte Steuersystem enthält zudem eine A/D- und eine D/A-Wandlerkarte zur Aufnahme der Positionsdaten und Ausgabe der Steuersignale. Für die Gewährleistung der Echtzeitfähigkeit wurde eine RTAI (Real-Time Application Interface)- Erweiterung auf den Linux-BetriebssystemKern angewandt. Die Laufzeitbibliotheken und betriebssystemnahen Anwendungen wurden so zugeschnitten, dass eine speicherplatzsparende Implementierung auf einem Compact-Flash-Modul möglich war. Im vorgesehenen 200µs-Takt erfolgt die A/D-Wandlung sowie die Abarbeitung eines Reglerzyklusses. Darüber hinaus kann in diesem Zeitintervall die Nutzersoftware zur Gewährleistung der Ein- und Ausgabe bedient werden. Diese Vorgänge zur Interaktion umfassen z.B. den Transfer von Messdaten, Statusabfragen oder das Setzen von Bahndatenparametern.



**Abb. 1:** realisierte Steuereinheit: A - Prozessorplatine (Single-Board-Computer), B - D/A-Wandlerkarte, C - A/D-Wandlerkarte

Diese Operationen sind nicht zeitkritisch und laufen als Programme im Nutzerbereich ab. Sie kommunizieren mit den im Kernelbereich ablaufenden Echtzeit-Steuerungs-Tasks über ein gemeinsames Speichersegment (shared memory). Der nutzerseitige Zugriff auf dieses erfolgt über einen Socket-Server. Die zugehörigen Socket-Klienten für die jeweils gewünschten Vorgänge können über CGI aktiviert werden, so dass dem Nutzer die Bedienung per Web möglich ist. Abbildung 2 zeigt schematisch die Softwarekomponenten der Echtzeit-Motorsteuerung und ihr Zusammenwirken.

Mit dem Übergang auf die Linux-basierte Antriebssteuerung wurde ein kompaktes, echtzeitfähiges und kostengünstiges Steuermodul geschaffen, welches vielseitig einsetzbar und leicht in ein bestehendes Gesamtsystem zu integrieren ist.



**Abb. 2:** Softwarekomponenten der linuxbasierten Motorsteuerung

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Hannes Töpfer

Tel.: +49 (3677) 69-5540

Email: hannes.toepfer@imms.de

# Modellbasierter Entwurf mit konfigurierbarem Prozessorkern unter MATLAB/Simulink

## Zielstellung

Im Bereich der industriellen Automatisierungstechnik gibt es den anhaltenden Trend zur Dezentralisierung und Vernetzung von Systemen. Eine Folge dessen ist die zunehmende Integration von mehr Intelligenz in die Sensorik, um sowohl eine Entlastung der Steuerungsrechner zu erreichen, als auch standardisierte Schnittstellen zu implementieren.

Aufgrund zunehmender Integrationsmöglichkeiten gestalten sich Entwurfsabläufe im Bereich gemischter Hard- und Softwaresysteme sehr komplex. Meist sind dazu detaillierte Kenntnisse zur verwendeten Hardware erforderlich.

Die hier vorgestellte Herangehensweise basiert auf dem Entwurf eines Modells auf einer Abstraktionsebene, wo Applikations-Know-How erforderlich ist und kein spezielles Implementierungswissen verlangt wird.

Mit Hilfe eines automatisierten Designflows (s. Abb. 1) werden ausgehend vom Modell die benötigten Bestandteile der Soft- und Hardware erstellt. Daraus ist eine direkte Implementierung auf die Zielplattform möglich.

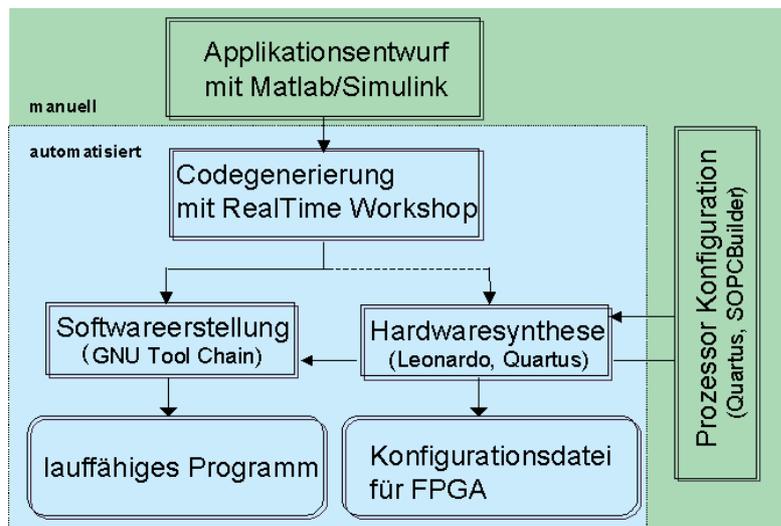


Abb. 1: MATLAB/Simulink-basierter Designflow

Für die Umsetzung wurde das Entwurfswerkzeug MATLAB/Simulink gewählt, da hier bereits umfangreiche Funktionsbibliotheken und die Voraussetzungen für eine Codegenerierung vorhanden sind.

Zur Realisierung eines durchgehenden Entwurfsablaufs vom Modell bis zur Netzliste bzw. bis zum lauffähigen Programm sind Erweiterungen im MATLAB/Simulink nötig.

## Forschungsverlauf und -stand

Im ersten Abschnitt lag der Schwerpunkt auf dem Gebiet der Softwareerstellung.

MATLAB/Simulink bietet mit dem RealTime Workshop (RTW) die Möglichkeit aus Modellen C-Code zu generieren. Der RTW stellt für verschiedene Prozessorarchitekturen so genannte Targets zur Verfügung. Damit erzeugter Programmcode eignet sich nicht für eine automatisierte Implementierung. Für eine konkrete Architektur muss ein spezielles Target entwickelt werden, welches eine angepasste Generierung von C-Code erlaubt. Der Quelltext kann dann ohne weitere manuelle Eingriffe zur Erstellung des ausführbaren Programms hergenommen werden.

Zur Demonstration der Methodik wurde eine Plattform mit konfigurierbarem Prozessorkern (Altera Nios™), frei programmierbarer Hardware und Schnittstellen (analog und digital) gewählt. Zunächst musste ein RTW-Target zur Codegenerierung für die Nios-Architektur erstellt werden, welches eine automatisierte Softwareerstellung, d. h. ohne manuelle Eingriffe, erlaubt.

Die wesentliche Steuerung der kompletten Codegenerierung des Modells erfolgt über ein speziell für die Nios™-Plattform implementiertes Target

zur Benutzung mit MATLAB/Simulink und RTW mit Embedded-Coder. Das Nios™-Target basiert auf dem bekannten Embedded-Real-Time-Target (ERT) des Embedded Coders und benötigt daher die selben Voraussetzungen (z.B. ausschließlich diskrete Modelle). Die wesentlichen Unterschiede zum ERT bestehen in der Bereitstellung einer Main-Funktion und einiger Interruptserviceroutinen, die eine geordnete Abarbeitung einzelner Funktionen ermöglichen.

Innerhalb der Main-Funktion ist die korrekte Einbindung und Initialisierung der Interrupt-serviceroutinen, welche letztendlich für

die schrittweise Ausführung des Modells verantwortlich sind, realisiert.

Als Interruptquellen können sowohl Komponenten des Mikroprozessors wie z.B. ein Timer als auch externe Schnittstellen verwendet werden. Zusätzlich wurde die Generierung eines passenden Makefiles zur Kompilierung des erzeugten C-Codes und der Aufruf eines Scripts, welches das Programm *make* ausführt, integriert.

Zahlreiche Optionen und Einstellungen, sowohl in den Schnittstellenblöcken als auch im Nios™-Target, ermöglichen eine weitgehende Anpassung der Simulation sowie Codegenerierung und Softwareerstellung an die Gegebenheiten

der jeweiligen Applikation. Zur Integration der Signalverarbeitung in eine Testbench (Gesamtsystem) sind Simulink-Modelle für die Schnittstellenmodule entwickelt worden.

Unter Verwendung von Simulink S-Funktionen wurde das Verhalten von der Analog/Digital- bzw. Digital/Analog-Schnittstelle jeweils als Block zur Verfügung gestellt. Diese können in einem Simulinkmodell der zu entwerfenden Applikation eingebunden werden.

Neben der exakten Simulation des Verhaltens der Hardware innerhalb des Modells, bereiten Teilfunktionen der S-Funktion die Codegenerierung für die jeweilige Schnittstelle vor. Die Codegenerierung läuft dann unter Verwendung eines jeder Schnittstelle zugehörigen Skripts und der durch die S-Funktion bereitgestellten Informationen ab. Dies ermöglicht eine weitgehende Trennung des Simulationsverhaltens von der Erzeugung des Quelltextes.

Dieses Prinzip kann auf beliebige Datenschnittstellen angewendet werden, um diese in die Simulationsumgebung und die Codegenerierung zu integrieren.

Der jetzige Entwicklungsstand erlaubt einen modellbasierten Entwurf sensornaher Signalverarbeitung mit MATLAB/Simulink für die vorgestellte Architektur. Durch die vorgenommenen Erweiterungen sind für die Erstellung der Software keine weiteren manuellen Schritte nach der Modellierung erforderlich.

## **Ausblick**

Der Ansatz soll durch Einbindung einer Codegenerierung für die Hardwarebestandteile innerhalb des Codesigns erweitert werden. Schon jetzt ist es durch die Verwendung spezieller Simulinkbibliotheken möglich, VHDL-Code für bestimmte FPGA-Technologien (Xilinx, Altera) zu erzeugen. Es ist allerdings auch durchaus denkbar, ähnlich wie für den Softwareteil, eigene Erweiterungen des RTW für die Hardwareerstellung vorzunehmen.

Im Bereich Softwareerstellung soll eine weitere Abstraktion durch Einsatz eines Betriebssystems erfolgen. Dazu laufen bereits Vorarbeiten durch die Portierung von eCos auf die Nios-Architektur.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Jens Zellmann

Tel.: +49 (3677) 69-5558

Email: jens.zellmann@imms.de

# Automatische Codegenerierung für Echtzeit-Linux

## Ziele

Die Effizienz eines Reglerentwurfs sowie die Konsistenz über mehrere Gerätegenerationen hinweg wird maßgeblich von der Durchgängigkeit des Entwicklungsablaufs bestimmt. Dieser beginnt zweckmäßig bei einer blockorientierten grafischen Problembeschreibung und endet beim Erzeugen bzw. Starten des binären Steuer-codes. Dazu existieren verschiedene Softwarewerkzeuge, welche durch Auswahl und Abstimmung aufeinander an die bestehenden Anforderungen angepasst werden müssen. Gewöhnlich wird auf Grund der Echtzeitanforderungen bei der Steuerung neben der PC-Software zur Bearbeitung auf Algorithmen-Ebene noch dedizierte Zusatzhardware zur Realisierung der zeitkritischen Steuerung selbst erforderlich. Dies hat wiederum Auswirkungen auf die Werkzeug-Auswahl. Mit der vorgestellten Entwicklung wurde angestrebt, auch für Echtzeit-Linux als Zielplattform einen effizienten Entwurfsablauf zu realisieren und dabei die von MATLAB/Simulink gewohnte Funktionalität als Ausgangspunkt beizubehalten.

## Forschungsverlauf und -stand

Der konkret vorliegende Algorithmus ist stark produktspezifisch geprägt und unterliegt auch innerhalb einer Problemklasse mit jeder Produktgeneration einer ständigen Weiterentwicklung. Daher wurde der Entwurfsablauf so gestaltet, dass der manuelle Anteil möglichst gering bleibt und die wesentliche Behandlung auf Ebene des Strukturbildes erfolgt. Als Werkzeug kommt vorzugsweise MATLAB/Simulink zum Einsatz. Mit Hilfe des Real-Time-Workshop-Zusatzes und einer bereits verfügbaren Erweiterung kann eine automatische Codegenerierung prinzipiell auch für Linux mit dem Real-Time Application Interface (RTAI) als Echtzeiterweiterung erreicht werden. Die Simulink-Linux-Schnittstelle besteht aus Dateien mit Informationen über das Zielsystem sowie aus Hilfsdateien für die Übergabe der Modellparameter in den ausführbaren Code. In der ursprünglichen Version war die Kommunikation zwischen Kernbereich und Nutzeranwendungen über FIFOs vorgesehen. Da im Fall von mechatronischen Antrieben die Bedienung - insbesondere die Parametrierung und Statuskontrolle - jedoch in hohem Maße bidirektional erfolgt, wurde neben der Anpassung und Implementierung des Codegenerators im Rahmen einer Diplomarbeit in die Schnittstelle eine Option zur Nutzung gemeinsamer Speicherbereiche implementiert. Die so gestaltete Lösung erwies sich als wesentlich flexibler und in guter Entsprechung zu den vorliegenden Anforderungen.

In Abbildung 1 ist der Simulink-basierte Entwurfsablauf für Echtzeit-Linux dargestellt. Den Ausgangspunkt bildet das vom Nutzer erstellte Modell (\*.mdl). Auf dieser Abstraktionsebene erfolgt modellbasiert die Entwicklung des Reglers. Spezifische Hardware-Aspekte wie die Adressierung der Wandlerkarten können über S-Funktionen berücksichtigt werden. Menügeführt kann dann entweder der C-Quelltext oder die Binärversion des Reglercodes erzeugt werden. Dabei wird im Hintergrund zunächst eine abstrakte Beschreibung in einem Pseudocode (\*.rtw) erzeugt, welche dann mit dem Target-Language-Compiler des Real-Time-Workshops in C-Code gewandelt wird. Der Binärcode hat die Form eines Kernelmoduls und wird zum Systemstart in den Betriebssystemkern geladen.

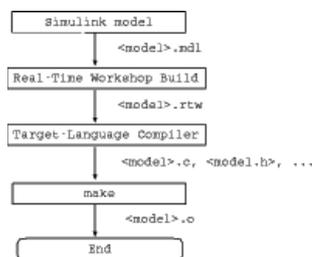


Abb. 1:

Ablauf der Codegenerierung: Ausgehend von einer Simulink-Darstellung des entworfenen Reglers erfolgt menügeführt die Erzeugung eines binären Softwaremoduls, welches nach Transfer auf die Zielplattform dort zur Systemstartzeit aktiviert wird

Alternativ hat sich eine automatisierte Codegenerierung für Echtzeit-Linux auch ausgehend vom Open-Source-Softwarepaket Scilab/Scicos als praktikabel erwiesen. Dieses nutzt eine ähnliche interne Schnittstelle zur Überleitung von einer grafischen Strukturbilddarstellung in ausführbaren Code. Im Rahmen der aktuellen Aktivitäten wurde das Potenzial dieser Modellierungszugangs erschlossen und zur Anwendung aufbereitet. In Abbildung 2 ist das grafische Eingabefenster von Scicos dargestellt.

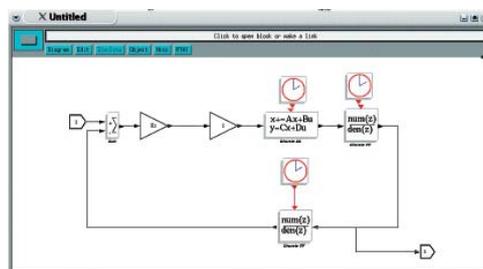


Abb. 2: Grafisches Eingabefenster von Scicos. Modelliert ist ein Temperaturregelsystem. Die Codegenerierung für RTAI wird über die entsprechende Schaltfläche in der Leiste am oberen Rand ausgelöst.

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Hannes Töpfer

Tel.: +49 (3677) 69-5540

Email: hannes.toepfer@imms.de

# eCos als Softwareplattform für eingebettete Geräte

## Zielstellung

In zunehmendem Maße besteht auch bei der Entwicklung von eingebetteten Geräten die Aufgabe darin, komplexe Applikationen zu realisieren. Durch den Einsatz eines Betriebssystems können auch bei diesen Geräten die Aufgaben zwischen Applikation und Betriebssystem aufgeteilt und damit u. a. die Programmierung der Applikation vereinfacht, ihre Erweiterbarkeit erleichtert und die Wiederverwendbarkeit verbessert werden. Mit diesem Hintergrund wurde in der IMMS gGmbH für einen Kooperationspartner ein geeignetes Betriebssystem ausgewählt und auf verschiedene Hardwareplattformen portiert.

## Forschungsverlauf und -stand

Im ersten Schritt wurde ein geeignetes Betriebssystem ausgewählt. Die Wahl fiel auf eCos. Diese Buchstaben stehen für „embedded Configurable operating system“. eCos ist ein Real-Time Operating System (RTOS) und kann „royalty-free“ eingesetzt werden.

Damit ist dieses RTOS für den Einsatz bei großen Stückzahlen bestens geeignet. Die aktuelle Version von eCos steht unter einer GPL-kompatiblen Lizenz [1]. Sie garantiert dem Anwender den vollen Zugriff auf das RTOS und schützt gleichzeitig sein firmeninternes Know-How.

eCos ist speziell auf die beschränkten Hardwareressourcen von eingebetteten Systemen zugeschnitten. Es besteht aus diversen Paketen, mit denen eine für die jeweilige Hardware und Aufgabenstellung geeignete Konfiguration zusammengestellt werden kann. Über die durch die Pakete bereitgestellten Konfigurationsoptionen ist dann eine weitere Optimierung möglich.

Da der Quellcode von eCos Open Source ist, können zusätzlich auch auf dieser Ebene noch Anpassungen durchgeführt werden. So bestehen nahezu unbegrenzte Möglichkeiten, das RTOS an die konkrete Aufgabenstellung anzupassen. eCos stellt alle die Funktionen zur Verfügung [2], die man von einem modernen Betriebssystem erwartet kann.

Innerhalb der eCos-Community wird dieses RTOS kontinuierlich gepflegt und weiterentwickelt. Damit ist es auch für zukünftige Aufgaben bestens gewappnet. Über verschiedene Mailinglisten werden Informationen ausgetauscht und Supportanfragen beantwortet.

Im zweiten Schritt wurde eCos auf eine NEC basierte Hardwareplattform portiert und beim Kooperationspartner eingesetzt. Mit der Portierung auf verschiedene ARM basierte Hardwareplattformen konnte eCos dann als Softwareplattform etabliert werden.

Zusätzlich wurden eigene Applikationen, die auf eCos aufsetzen, entwickelt (s. S. 30).

Die bisherigen positiven Erfahrungen veranlassten die IMMS gGmbH darüber hinaus, eine eigene eCos-Portierung auf die Nios-Plattform zu beginnen. Im Gegensatz zu den bisher eingesetzten Prozessoren handelt es sich hierbei um einen konfigurierbarem Prozessorkern, welcher in programmierbarer Hardware (FPGA) zum Einsatz kommt. Für diese Portierung wurde als Hardwareplattform das Altera Nios Development Board - Stratix Edition (Stratix 1s10) - ausgewählt (s. Abb.1).

Es bietet zahlreiche, konfigurierbare Schnittstellen, vielseitige Ein-/Ausgabemöglichkeiten und genug Speicher für komplexe Applikationen.

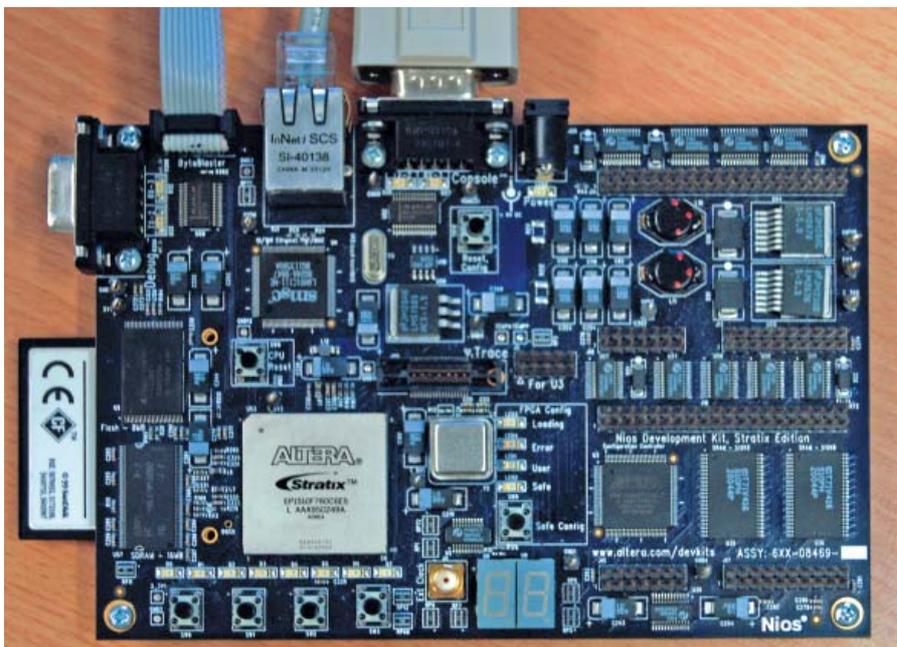


Abb. 1: Altera Nios Development Board

Auf dieser Basis kann man dann z.B. mit geringem Aufwand FPGA-Designs mit einer Ethernet-Schnittstelle versehen.

Ausgehend von einer vorhandenen unvollständigen eCos-Portierung ([3], nur Kernel und HAL) müssen diverse Anpassungen im eCos-Quellcode vorgenommen werden:

- Booten aus dem RAM und Anpassen der Adressbereiche (Speicher, I/Os, Resetvektor)
- Zusammenstellen der zu verwendenden Pakete (Treiber, Konfigurationsdaten und Skripte, um die für das jeweilige Target benötigten Quellen bereitzustellen)
- Bereitstellung eines Treibers (für den LAN91C111 und Altera Avalon Bus) zur Implementierung des TCP/IP-Stacks

Der eCos Bootloader RedBoot wurde bereits erfolgreich portiert.

## Ausblick

Inzwischen hat der Kooperationspartner die Plattformstrategie sowohl für die Software als auch die Hardware in seinem Unternehmen umfassend eingeführt und in verschiedenen Geräten eingesetzt. Er kann so die Vorteile der Plattformstrategie auf breiter Front nutzen.

Während der Arbeit an den eCos-Portierungen konnte auch auf Messen ein steigendes Interesse an eCos beobachtet werden. Dies ist ein Indiz dafür, dass viele in eCos ein geeignetes RTOS für eingebettete Systeme sehen.

Die IMMS gGmbH ist sicher, dass sich eCos auch auf der Nios-Plattform bewähren wird.

[1] <http://ecos.sourceware.org/license-overview.html>

[2] <http://ecos.sourceware.org/about.html>

[3] <http://haostudio.idv.tw>

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Axl Schreiber

Tel.: +49 (3677) 69-5545

Email: [axl.schreiber@imms.de](mailto:axl.schreiber@imms.de)

Dipl.-Ing. Jens Zellmann

Tel.: +49 (3677) 69-5558

Email: [jens.zellmann@imms.de](mailto:jens.zellmann@imms.de)

# Messung und Übertragung dynamischer Fahrzeugparameter unter Einsatz von Smart Wireless Communication Devices

## Zielstellung

Messwertaufnahme und -übertragung sind typische Einsatzgebiete von Smart Wireless Communication Devices (SWCD), welche im Mittelpunkt zahlreicher Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten der IMMS gGmbH stehen.

Als typische Applikation für SWCDs wurde im Rahmen des hier vorgestellten Projektes gemeinsam mit dem Fachgebiet Kraftfahrzeugtechnik der TU Ilmenau ein flexibles und kompaktes Messsystem für Fahrzeuganwendungen entwickelt.

Das Projekt sollte zu möglichst großen Teilen auf einem gemeinsam mit der Firma FALCOM entwickelten Hardware/Software-Plattformkonzept für SWCDs basieren.

## Forschungsverlauf und -stand

Für Ausbildungszwecke verfügt das Fachgebiet Kraftfahrzeugtechnik der TU Ilmenau über ein Modellfahrzeug im Maßstab 1:7 (s. Abb. 1). Das Fahrzeug ist ferngesteuert und ist mit einem Verbrennungsmotor ausgestattet.

Von besonderem Interesse bei der studentischen Ausbildung ist das dynamische Fahrzeugverhalten in bestimmten Fahrsituationen wie etwa beim Beschleunigen und Bremsen oder aber auch bei Kurvenfahrten.

Die Studenten sollen im Rahmen eines Praktikums Einblick erhalten, wie sich bestimmte konstruktive Maßnahmen (z.B. Verschieben des Schwerpunkts innerhalb eines Fahrzeuges) auf das Fahrverhalten auswirken.

Zu diesem Zweck wurde das Modellfahrzeug mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet. Neben einem 3D-Beschleunigungssensor gibt es ein Potentiometer zur Messung der Einfederung der vier Räder, einen Sensor zur Messung des Schwimmwinkels des Fahrzeuges und einen Geschwindigkeitssensor (ein induktiver Sensor am sogenannten Peisler-Rad).

Die Projektaufgabenstellung umfasste daher die Aufnahme der o.g. Messdaten in einer sinnvollen zeitlichen Auflösung (ca. 100 Datenwerte je Messgröße und Sekunde), deren lokale Speicherung sowie deren möglichst einfache Übertragung an einen externen Rechner (zur späteren Auswertung).

Weiterhin waren gegebene Einschränkungen bzgl. Größe und Stromverbrauch einzuhalten. Die unter diesen Bedingungen erzielte Lösung der Aufgabe beinhaltete sowohl eine spezifische Hardware als auch Software für das Fahrzeug und den Auswerterechner. Die Hardwarelösung basiert auf dem intelligenten Kommunikationsmodul F35-XXL-SI der Firma FALCOM.

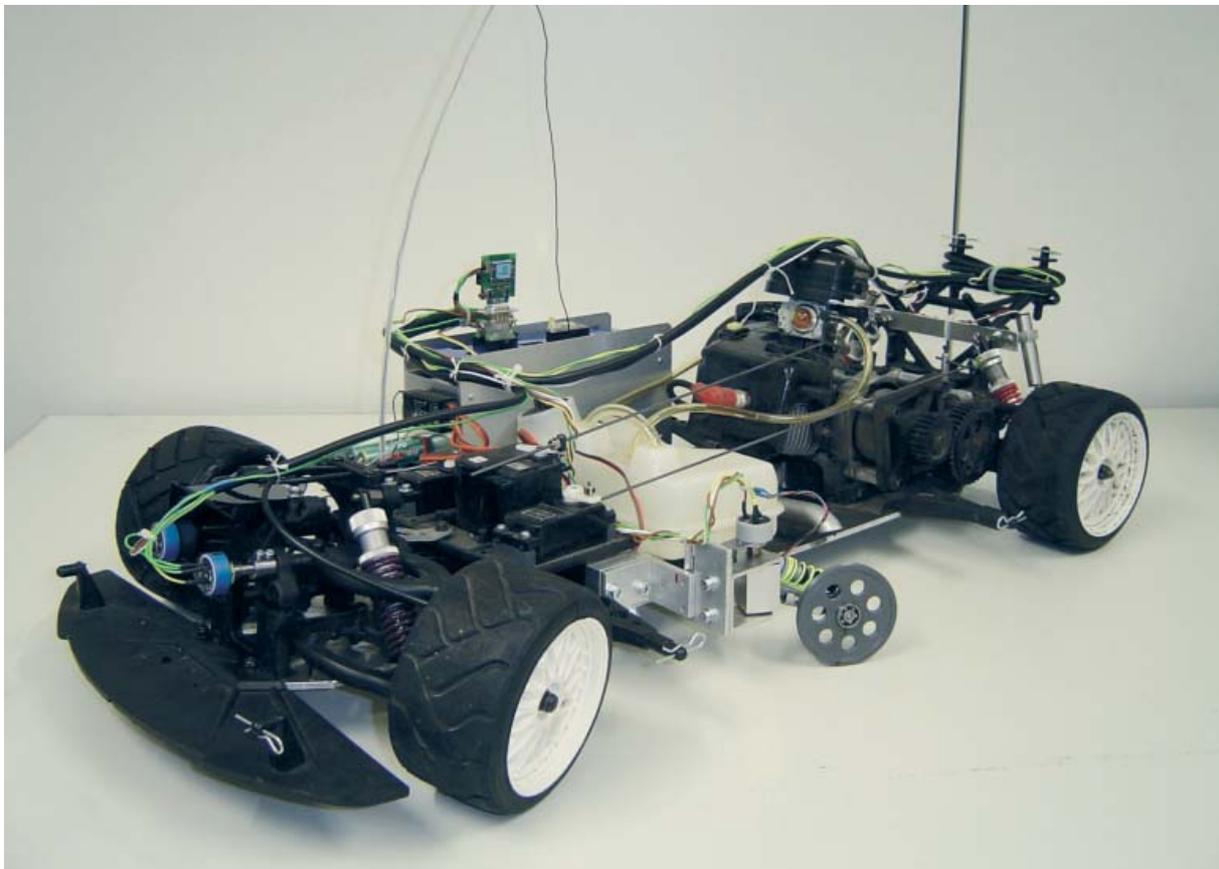


Abb. 1: Modellfahrzeug

Ergänzt wurde das Modul durch eine spezifische Erweiterungsplatine, welche vor allem die Eingangskanäle für die unterschiedlichen Messgrößen zur Verfügung stellt. Als Schnittstelle zur Datenübertragung dient ein RS232-Port, wobei ein zusätzlicher Bluetooth-Konverter den drahtlosen Zugang zum Modul im Fahrzeug ermöglicht.

Die Messung, Speicherung und Übertragung der Messwerte erfordert Software, welche sich innerhalb des Kommunikationsmodules im Fahrzeug befindet. Bei der Software handelt es sich um eine spezielle Applikation für das Echtzeitbetriebssystem eCos, welches auf dem F35-XXL-SI zur Verfügung steht. Die Software ist in der Lage, die Messung automatisch oder funkfern-gesteuert durchzuführen. Bestimmte Parameter (z.B. Messfrequenz) lassen sich über einen externen Rechner einstellen.

Zusätzlich wurde Software für einen externen Rechner implementiert, welche die Kontrolle der Messung und die Übertragung der aufgenommenen Messwerte komfortabel ermöglicht. Es stehen hierfür sowohl eine Java-basierte als auch eine spezielle Windows-Applikation zu Verfügung.

## **Ausblick**

Große Teile des Projektes wurden im Rahmen studentischer Tätigkeiten auf Seiten der IMMS gGmbH und der TU Ilmenau realisiert. Das Fahrzeug soll zusammen mit dem Messsystem im Rahmen eines studentischen Praktikums an der TU Ilmenau eingesetzt werden.

Es ist geplant, zusätzliche Busschnittstellen in das beschriebene Gerätekonzept zu integrieren. Zunächst sollen eine Ethernet- und eine CAN-Schnittstelle realisiert werden. Dadurch lässt sich das Messsystem z.B. zu einem intelligenten Bus-Gateway erweitern. Die Software soll ebenfalls schrittweise erweitert werden, wobei vor allem die Realisierung eines Embedded Web-Servers und die Verwendung bereits zur Verfügung stehender GPS-Positionsdaten im Mittelpunkt stehen.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Wolfram Kattaneck

Tel.: +49 (3677) 69-5544

Email: wolfram.kattaneck@imms.de

# Codesign von Architektur und Algorithmen unter Nutzung von MATLAB/Simulink

## Kurzfassung

Im Rahmen des SpeAC Projekts wurde ein komplexes Systemmodell gemeinsam mit einem Softwaremodell erstellt und simuliert.

Das Systemmodell, ein Pumpensystem mit einem sensorlosen 3-Phasen Motor und das Softwaremodell, der MLX16-Simulator, wurden zusammen unter MATLAB/Simulink verbunden und simuliert. Die Methodik wurde hinsichtlich der Verwendung von SystemC als standardisierte Sprache erweitert.

## Forschungsverlauf und -stand

Traditionelle Entwurfsphilosophien betrachten die Entwicklung von Hardware und Software getrennt voneinander. Die Software wird unter der Voraussetzung einer Spezifikation parallel zur Hardware implementiert. Ein weiterer Aspekt ist die steigende Integrationsdichte von integrierten Schaltungen, die einen Anstieg der Komplexität der zu entwickelnden Systeme zur Folge hat.

Der Systementwurf muss daher auf einer höheren funktionellen Ebene beginnen. Diese Entwürfe nennt man System-on-Chip (SoC).

Eine Vielzahl von namhaften EDA-Anbietern aus dem Bereich Systementwicklung unterstützen SystemC mit der Vision, Interoperabilität zu erreichen und den Hardware/Software- Entwicklungsablauf zu verbessern.

Abbildung 1 zeigt die allgemeine Entwurfsphilosophie für SystemC.

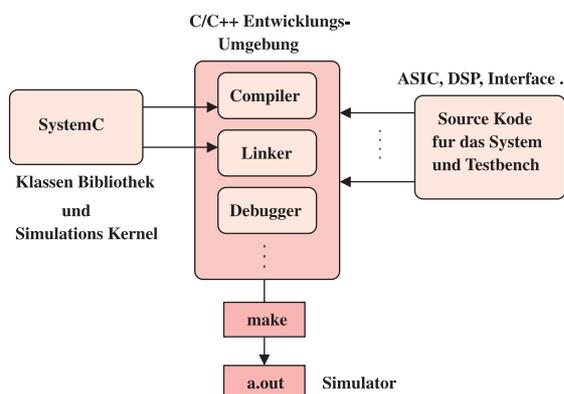


Abb. 1: Entwurfsphilosophie auf der Basis von SystemC

## Modellierungsvorgaben

In diesem Abschnitt werden die Systementwurfs- und Verifikationseigenschaften von SystemC anhand einer konkreten Implementierung eines MATLAB/Simulink-Modells untersucht. Das Gesamtsystem ist ein Teil eines Pumpensystems mit sensorlosem 3-Phasen-Motor.

Diese Applikation ist unter Windows mit MATLAB/Simulink realisiert und simuliert worden. Obwohl das Motor-Modell ein analoges Design darstellt, wird es mit SystemC modelliert.

Die komplette Blockstruktur für die Design-Architektur des Motor-Modells ist in Abbildung 2 dargestellt.

Jedes Modul von Top\_Design wurde zuerst in MATLAB/Simulink simuliert. Danach wurde die komplette Struktur mit der SystemC-Bibliothek unter Linux programmiert. Die elementaren mathematischen Operationen wie Multiplikation, Subtraktion oder die trigonometrischen Funktionen  $\sin(x)$ ,  $\cos(x)$  wurden aus der C/C++ Bibliothek genommen. Aber nicht jede mathematische Operation kann man der C/C++ Bibliothek entnehmen:

Komplexe Funktionen wie z.B. Integration, Laplace-Transformation sind nicht in der C/C++ Bibliothek enthalten. Bei dieser Beschreibung muss die mathematische Form zunächst vereinfacht werden, um sie dann unter Verwendung benutzbarer Module zu notieren. Weiterhin muss man für jede mathematische Form auch den Zeitschritt einbeziehen.

So muss man z. B. für das Modul Integrator alle Werte für jeden Zeitschritt ( $t_0$  bis  $t_n$ ) berechnen.

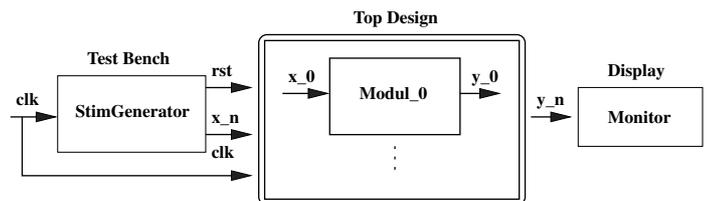


Abb. 2: Blockstruktur des Motor-Modells

Eine Motivation für die Anwendung von SystemC liegt darin, dass man schon bei der Programmierung die vorbereiteten Klassenfunktionen der C/C++ Library benutzen kann. Als Beispiel für die Umsetzung von Simulink-Funktionen nach SystemC sollen hier die Blöcke einer allgemeinen Transfer-Funktion und eines Integrators dienen. Die Transfer-Funktion kann man in allgemeiner Form schreiben:

$$y = \frac{1}{lm \cdot s + rm} \cdot U(s) = \frac{1}{lm \cdot \left( s + \frac{rm}{lm} \right)} \cdot U(s) \quad (1)$$

Nach Anwendung der Rücktransformation bekommt man die Differenzialgleichung

$$lm \cdot \frac{d}{dt}(t) + rm \cdot y(t) = u(t) \quad (2)$$

$$u(t) = 0, y(t) = y(0) \cdot e^{-\frac{rm}{lm} t} \quad (3)$$

Nach der Integration ist diese Form schon ausreichend für die weitere Verwendung unter SystemC.

Den Integrator kann man in allgemeiner Form (4) formulieren:

$$y(t) \int_{t_0}^{t_n} u(t) \cdot dt + y_0 \Rightarrow I_T = \sum_{k=1}^T S_k \cdot h \quad (4)$$

Bei fester Schrittweite ergibt sich

$$I_T = \sum_{k=1}^T h \cdot S_k = h \sum_{k=1}^T S_k \quad (5)$$

Diese mathematische Form (5) ist wieder geeignet für die direkte Implementierung in der Software. Für diese mathematische Anwendungen sind Funktionen und Klassen unter SystemC benutzbar.

Die Notation von *Klassen* in SystemC gestaltet sich nach folgendem Schema:

```
#ifndef CLASS_TEST_H
#define CLASS_TEST_H
class class_test
{ private : float test;
public : float funk_lap(float x, float y);
....
}
#endif
```

Die Notation von *Funktionen* erfolgt analog:

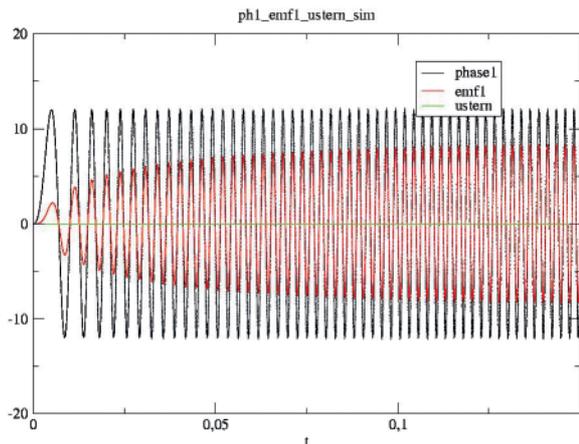
```
#include 'systemc.h'
#include 'class_test.h'
float class_test :: funk_lap(float x, float y)
{
    test =  $\frac{x}{A \cdot B} \cdot y$ ;

    return test;
}
```

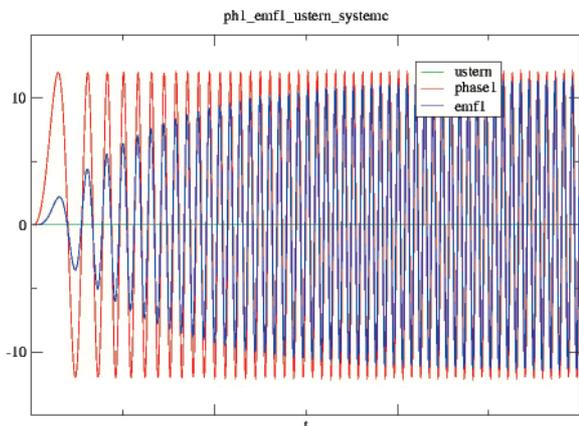
## Ergebnisse

Das komplette SystemC Motor-Modell wurde kompiliert mit dem GNU Compiler gcc. Für den Vergleich der Ergebnisse des MATLAB/Simulink Motor-Modells und des SystemC Motor-Modells wurde MATLAB/Simulink benutzt.

Die Ergebnisse der Implementierung des Motor-Modell in SystemC und in Simulink sind in den Abbildungen 3 und 4 dargestellt. Der Vergleich der Implementierung ergibt keine Unterschiede.



**Abb. 3:** Phase1, EMK1 und U-Stern für Motor-Ansteuerung - MATLAB/Simulink Modell



**Abb. 4:** Phase1, EMK1 und U-Stern für Motor-Ansteuerung - SystemC Modell

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Eva Ulicna

Tel.: +49 (3677) 69-5558

Email: [eva.ulicna@imms.de](mailto:eva.ulicna@imms.de)

# Beschleunigte Topologie-Rekonfiguration von Ethernet

## Zielstellung

Ethernet als eine der verbreitetsten LAN-Technologien involviert eine Reihe von Konzepten bzw. Mechanismen. Auf grundlegenden Konzepten wie der paketorientierten Datenübertragung nach dem CSMA/CD-Verfahren und der Identifikation von Netzknoten über MAC-Adressen aufbauend werden mit wachsender Komplexität von Netzwerken weitere Mechanismen erforderlich.

Der Zusammenschluss mehrerer Netzwerksegmente erfordert den Einsatz sogenannter Brücken (engl. bridges). Diese Brücken dienen dazu, Datenpakete von Segment zu Segment weiterzuleiten und operieren auf der Link-Layer-Ebene des OSI-Modells. Um dabei ein zirkuläres Routing von Paketen durch ringförmige Netzwerktopologien zu verhindern, muss unter allen Brücken eines Netzwerks eine Einigung über die Pfade getroffen werden, auf denen Pakete zwischen beliebigen Netzwerkteilnehmern weitergeleitet werden.

Diese Einigung wird als (gültige) Brückentopologie bezeichnet und unter Kommunikation zwischen den Brücken über einen verteilten Algorithmus und ein zugehöriges Protokoll, das Spanning-Tree-Protokoll (STP), realisiert.

Um die Interoperabilität von Ethernet-Hardware zu gewährleisten, sind die relevanten Mechanismen in IEEE-Standards spezifiziert. Für Ethernet-Bridging zeichnet in erster Linie der IEEE-Standard 802.1d (STP) verantwortlich, der nachträglich u.a. durch IEEE 802.1w (RSTP) erweitert wurde. Der per IEEE 802.1d gegebene STP-Algorithmus gewährleistet zwar effektiv ein Erreichen der vorgenannten Ziele, weist jedoch auch Defizite auf.

Ein wesentlicher Schwachpunkt ist die vergleichsweise lange Zeit, die nach dem Ausfall einer Verbindung verstreichen kann, bevor sich erneut eine gültige Topologie etabliert. Diese kann je nach konkreter Situation 30s oder mehr betragen und ist in erster Linie dadurch bedingt, dass der Algorithmus bewusst eine bestimmte Zeit verstreichen lässt, innerhalb der alle Brücken des Netzes sich auf den Topologiewechsel eingestellt haben sollten. Während dieser Zeit sind im Allgemeinen weite Teile des Netzwerks nicht erreichbar.

IEEE 802.1w versucht vordergründig, genau diesem Defizit dadurch zu begegnen, dass mit dem sogenannten Rapid-Spanning-Tree-Protocol (RSTP) eine bidirektionale Absprache (Handshaking) über Topologieänderungen zwischen benachbarten Brücken eingeführt wird, die die Zeit bis zum Erreichen einer neuen gültigen Topologie auf wenige Sekunden reduzieren kann.

Das IMMS hat sich in einem Projekt damit befasst, IEEE 802.1w unter Linux als Betriebssystem zu implementieren, um für ein Anwendungsszenario vernetzter Überwachungsgeräte eine hohe Erreichbarkeit der Netzwerkteilnehmer bei potenziell beeinträchtigten Hardware-Verbindungen untereinander zu realisieren.

Damit sollte es dem Kunden ermöglicht werden, Zuverlässigkeitskriterien zu erfüllen, welche mit einer STP-Implementierung nach IEEE 802.1d nicht gewährleistet gewesen wären.

Bis zum Zeitpunkt der Drucklegung dieses Berichtes existierte unter Linux keine andere, frei verfügbare Implementierung des RSTP-Algorithmus.

## Forschungsverlauf und -stand

IEEE 802.1w besteht in erster Linie aus Erweiterungen, daneben auch aus Modifikationen von IEEE 802.1d.

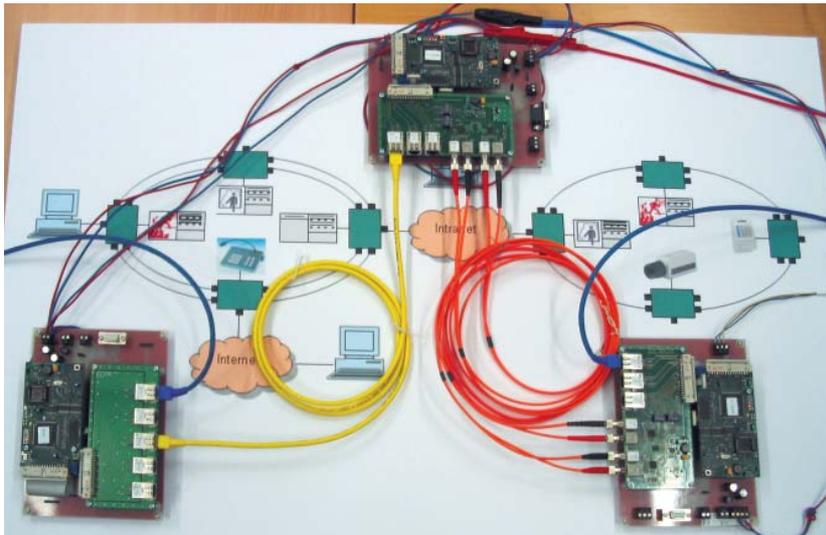
Der eigentliche RSTP-Algorithmus ist dabei sowohl über Zustandsdiagramme als auch textuell spezifiziert.

Als Basis der Implementierung wurde der (unter GNU-GPL-Lizenz vorliegende) Code der IEEE-802.1d-Implementierung des Linux-Kernels 2.4.19 zugrundegelegt und angepasst. Komplett ausgetauscht wurde dabei im Zuge der Umstellung von STP auf RSTP die Implementierung des Verhaltens der Brücke. Zum Zeitpunkt des Beginns der Umsetzung des Standards am Institut lag IEEE 802.1w lediglich als Entwurf vor.

Daher wurden die Zustandsdiagramme des Standards unter Beibehaltung der dort verwendeten Bezeichner möglichst direkt in eine übersichtliche Implementierung überführt und mit Verweisen auf die entsprechenden Gliederungsnummern des Standards versehen. Damit ist eine Zuordnung von Abschnitten des Codes zu den entsprechenden des Standards leicht möglich. Der Laufzeit-Nachteil gegenüber einer optimierten Implementierung wurde gegenüber dem Vorteil der besseren Wartbarkeit in Kauf genommen und generell als vernachlässigbar angesehen.

Um die Rekonfigurationszeit der RSTP-Implementierung weiter zu optimieren, wurde zusätzlich eine (im Standard nicht näher spezifizierte, aber empfohlene) Überwachung des Verbindungsstatus aller Ports der Brücken-Hardware realisiert. Damit werden ausgefallene Links deutlich schneller erkannt.

Der IEEE-802.1w-Standard sieht, genau wie bereits IEEE 802.1d, verschiedene konfigurierbare Parameter bezüglich des Verhaltens einer Brücke vor. Diese wurden über die Kernel-Konfigurationsschnittstelle (wahlweise textuelles oder menügestütztes Interface) ebenfalls konfigurierbar vorgesehen.



**Abb. 1:** Linux-Brücken-Module mit 802.1w - Implementierung

Neben dieser statischen Initialkonfiguration des Kernel-Brücken-Treibers stehen für die STP-Implementierung zur Laufzeitkonfiguration die sog. „bridge-utils“ zur Verfügung. Im Zuge der RSTP-Implementierung wurden auch diese so angepasst, dass gegenüber STP neu hinzugekommene Parameter laufzeitkonfigurierbar und abweichende Laufzeitinformationen der Brücke geeignet abrufbar sind.

Die Realisierung der RSTP-Implementierung hat die Erwartungen dahingehend erfüllt, dass die Rekonfigurationszeiten der Brückentopologie tatsächlich, je nach konkreter Änderung der Hardwaretopologie, im Bereich einiger hundert Millisekunden bis weniger Sekunden liegen.

### **Ausblick**

Nach Realisierung und Test der RSTP-Implementierung am IMMS steht nun die Praxiserprobung seitens des Kunden an.

Lassen sich damit dessen Zuverlässigkeitsanforderungen erfüllen, so belegt dies nicht nur die erfolgreiche Implementierung seitens des Instituts sondern auch die Überlegenheit von RSTP gegenüber STP anhand eines kommerziellen Szenarios.

Ansprechpartner:

Dipl.-Inf. Marco Götze

Tel.: +49 (3677) 69-5543

Email: marco.goetze@imms.de

Im Jahr 2004 wurden die Forschungsarbeiten zu effektivitätssteigernden Entwurfsverfahren kontinuierlich weitergeführt.

Schwerpunkte bildeten die Verfahren zur Optimierung analoger Systeme unter besonderer Berücksichtigung der Automatisierung der Dimensionierung bei vorgegebener Schaltungstopologie, der Entwurfszentrierung und Ausbeuteoptimierung. Die Designmethoden wurden besonders für Präzisions-Analogschaltungen, Sensorverstärker, optoelektronische Schaltungen, VCSEL-Treiber und Power-SOI-Schaltungen angewandt.

Fortschritte wurden in der Anwendung der formalen Verifikation auf Mixed-Signal-Systeme und Hardware/Software-Kombinationen erreicht. In der Simulation wurden elektrisch/nichtelektrische Mischsysteme untersucht. Die diesbezüglichen Forschungen wurden intensiv durch die EG und das BMBF gefördert. Für gute Unterstützung beim Transfer der Methoden in die industrielle Praxis gilt besonderer Dank dem ehemaligen Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Technologie und Arbeit. Ausgezeichnete Ergebnisse haben wir in Zusammenarbeit mit der MELEXIS GmbH (Erfurt) bei der Erforschung und Entwicklung neuartiger Schaltungskonzepte für DVD-Leseinheiten und optische Busse erreicht. Die in X-FAB-Technologie realisierten Schaltungen erreichen exzellente Parameter hinsichtlich Rauschen, Bandbreite, Offset. Erprobt wurden Sensorverstärker in SC-Schaltungstechnik. Systemarchitektur und Schaltungstechnik für Präzisions-Analogschaltungen wurden verbessert und weiterentwickelt. Praktisch erprobt wurden SOI-Schaltungen für Smart-Power-Schaltungen, EEPROMs, SRAMs und Spannungsregler in einem Temperaturbereich bis 300°C. Hochtemperaturschaltungen auf der Grundlage der SOI-Technologie wurden zu einem breiten Kompetenzfeld.

Die 20 Mitarbeiter haben 2004 fünf Diplomanden und sechs Praktikanten mit anspruchsvollen Forschungsaufgaben betreut. Gleichzeitig konnten so sechs neue leistungsfähige Mitarbeiter gewonnen werden.

Dem Themenbereich (TB) ist es 2004 gelungen, mehr industrielle Auftragsforschung einzuwerben. Basis hierfür ist die in vorausgegangenen Forschungsprojekten erworbene Anwendungs-kompetenz für neueste Methoden und Techniken und die Fähigkeit, höchste Ansprüche an die Einhaltung vorgegebener Parameter analoger Schaltungen bei gleichzeitig sehr straffen Zeitplänen zu realisieren, was allen Mitarbeitern stets besondere technische Lösungsideen, Gewissenhaftigkeit, Teamarbeit, Einsatzbereitschaft

und Können abverlangte. Hierdurch ist es gelungen, trotz der permanent schwieriger werdenden Randbedingungen öffentlicher Finanzierung von Forschung, den Institutsteil Erfurt kontinuierlich weiter zu entwickeln. Die traditionelle Zusammenarbeit mit den Thüringer Mikrosystem- und Halbleiterproduzenten sowie Forschungseinrichtungen hat sich weiter sehr gut entwickelt, wurde ausgebaut und von öffentlicher Förderung unabhängiger, was perspektivisch sehr wichtig sein wird. In wichtigen Projekten mit den USA und Japan wurde wissenschaftliches Neuland erfolgreich erforscht und im Zusammenwirken mit der Thüringer Mikroelektronik- und Mikrosystemindustrie praktisch umgesetzt.

Der so gewachsene Erfahrungsschatz bildet eine sehr solide Grundlage, um schwierige Systementwicklungen für industrielle Partner zu übernehmen. Die technologische Breite reicht dabei von den traditionellen CMOS- und BiCMOS- bis zu SOI-Technologien und mikromechanischen, optoelektronischen und magnetischen Systemen. Die modularen Technologien der Industriepartner ermöglichen es, die innovativen Ideen mit guten Parametern praktisch umzusetzen.

Forschungsbeispiele:

- Erforschung des ESD-Verhaltens
- Entwicklung von Design-Kits für neue Technologien (SOI, 0.35- $\mu$ m-BiCMOS)
- Modellierung aktiver und passiver integrierter Elemente, Parameterextraktion
- Neue analoge Grundschaltungen mit verbesserter Robustheit und verbesserten Parametern
- Designzentrierung, Ausbeuteoptimierung
- Fehleranalyse und Optimierung auf der Grundlage der symbolischen Analyse
- Architekturoptimierung auf der Grundlage von VHDL-AMS und den erarbeiteten Modellen
- Neue System-Simulationsmethoden
- Verifikation komplexer Systeme
- Sicherung der Testbarkeit der Schaltungen
- Optoelektronische und HF-Messungen
- Hochtemperaturmessungen

Die vorliegenden Berichte sind als Anregungen und Aufforderung für den Leser zu verstehen, mit uns gemeinsam neue integrierte Mikrosysteme und Systeme on Chip zu erdenken und zu realisieren. Die Bemühungen des TBs sind darauf gerichtet, die Europa- und weltweite Forschungsarbeit voranzubringen und industriewirksam umzusetzen.

Ansprechpartner:

Prof. Dr. sc. techn. Franz Rößler

Tel.: +49 (361) 4276639

Email: franz.roessler@imms.de

# Entwicklung eines EEPROM-Speichers in SOI

EU, G1RD-CT-2002-00729

## Zielstellung

Im Rahmen des EU-Förderprojektes ATHIS (Advanced Techniques for High temperature System-on-Chip) wurden im Themenbereich SOI innerhalb der letzten beiden Jahre statische random access memories (SRAM) entwickelt. Im letzten Jahr wurde das Augenmerk auf die Entwicklung eines electrically erasable programmable read-only memory (EEPROM) gelegt, der gemeinsam mit dem SRAM in einem Multi-Chip-Modul Anwendung finden soll.

## Forschungsverlauf und -stand

Eine EEPROM-Speicherzelle besteht aus einem Floating-Gate-Transistor (Speichertransistor) und einem Auswahl-Transistor, der den Zugriff auf bestimmte Zellen einer Speichermatrix erlaubt.

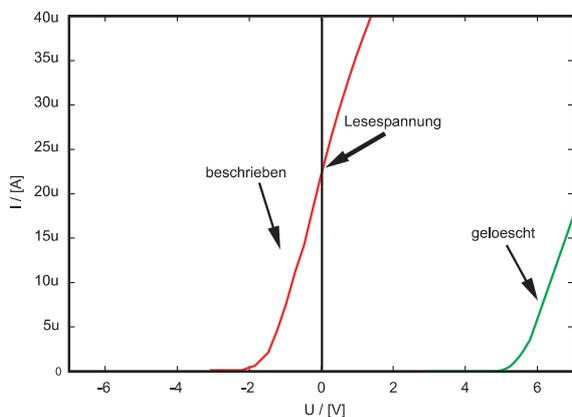


Abb. 1: Transferkennlinie einer beschriebenen und einer gelöschten EEPROM-Zelle

Der Auswahltransistor muss hierbei ein Hochvolttransistor sein, da er Programmierspannungen von 16 V - 18 V standhalten muss.

Um parasitäre Einflüsse aufgrund des Floating-Body-Effektes zu vermeiden, muss das Body-Gebiet sowohl des Speicher- als auch des Auswahltransistors über Film-Kontakte angeschlossen werden. Diese Methode ruft allerdings neue Probleme bei Temperaturen oberhalb von 200°C hervor, wo die erhöhten temperaturabhängigen Leckströme zu einem Verlust der gespeicherten Informationen in nicht ausgewählten Zellen führen können.

Um dies zu vermeiden, wurde ein neuer Transistor-Entwurf erarbeitet. Dieses neue Bauteil ist ein bidirektionaler Hochvolttransistor mit einem separat ansteuerbaren Body-Kontakt direkt unterhalb des Transistor-Gates. Es ermöglicht zuverlässiges Schalten in allen Betriebszuständen.

Während des Lese-Modus und im Leerlauf wird der Body-Anschluss mit Masse verbunden und hält so die Body-Source-Diode des Hochspan-

nungstransistors in Umkehrrichtung.

Somit liegt am unbeschalteten Drain-Anschluss der nicht ausgewählten Zellen maximal eine Diode-Flussspannung an, was einen Verlust von Ladung vom Floating-Gate und damit Datenverlust zuverlässig verhindert. Im Schreib- und Löschmodus muss am Body-Anschluss eine Spannung kleiner als  $V_{PP}$  und größer als 0 V anliegen, um einen Durchbruch des Transistors zu verhindern. Ein Schaltbild dieses neuen Zellen-Entwurfs ist mit einem Schema der angelegten Spannungen in Abbildung 2 zu sehen.

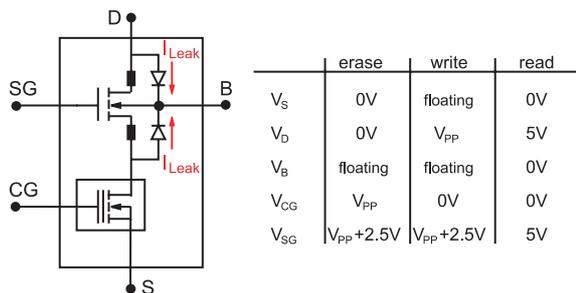


Abb. 2: Schaltskizze und Betriebsmodi der neuartigen Speicherzelle

Es wurden Messungen durchgeführt, die die Effektivität des behandelten Prinzips zeigten (s. Abb. 3).

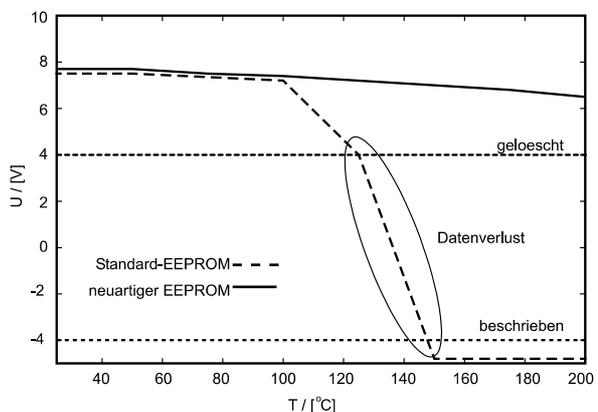


Abb. 3: Schwellspannungsverschiebung einer Speicherzelle über der Temperatur bei der Programmierung von Nachbarzellen

## Ergebnis

Basierend auf dem beschriebenen Zellenentwurf wurde ein Speicherbaustein entwickelt. Die kritischen Punkte in diesem Design sind: die am Body-Anschluss des Auswahltransistors anliegende Spannung und ihre Erzeugung sowie der Aufbau der Speicherzellenmatrix unter Beachtung der Body-Ansteuerung während der verschiedenen Betriebsmodi. Weiterhin sollte der Aufbau der Zellenmatrix modular sein. Dies ermöglicht eine einfache Veränderung der

Größe, um den Speicher für verschiedene Anwendungen speziell anpassen zu können.

All diese Punkte konnten erfolgreich umgesetzt werden. Es wurde ein Layout für einen 32x16 Bit großen Speicher entwickelt, in dem alle Randbedingungen erfüllt werden konnten. Sowohl die Speichermatrix als auch die Peripherie-Elemente wurden als Standardzellen entworfen, um den EEPROM modular aufbauen und bei Bedarf vergrößern zu können.

Die Ansteuerung des Body-Anschlusses der Speicherzellen geschieht entsprechend des Betriebsmodus innerhalb des Schaltkreises. Damit erhält man einen Speicher, der sich durch hohe Zuverlässigkeit in rauer Umgebung und einen geringen Flächenverbrauch auszeichnet.

### **Ausblick**

In den ersten Monaten des kommenden Jahres wird zunächst der EEPROM Speicher gefertigt werden. Darauf wird eine Charakterisierung des Speichers im kompletten Temperaturbereich von -40 bis 220°C folgen. Parallel hierzu werden Strukturen, die zur Weiterentwicklung des EEPROM entworfen wurden, untersucht werden. Aus den Testergebnissen können Rückschlüsse für das Re-Design des für das Multi-Chip-Modul benötigten Schaltkreises gezogen werden. Hierbei muss vor allem auf zwei Punkte Wert gelegt werden.

Zum einen soll der Speicher als 5 V-only-Schaltkreis betrieben werden, was die Nutzung einer Ladungspumpe notwendig macht. Zum anderen sollen die Peripherieschaltungen noch weiter optimiert werden, um ein möglichst kompaktes Layout zu erhalten.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Sonja Richter

Tel.: +49 (3677) 69-5586

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

Dipl.-Ing. Dagmar Kirsten

Tel.: +49 (3677) 69-5586

Email: [dagmar.kirsten@imms.de](mailto:dagmar.kirsten@imms.de)

# Schaltungstechnik für Hochtemperaturanwendungen

## Ziele

Eine der herausragenden Eigenschaften von Silicon-on-Insulator (SOI) Bauelementen ist die Möglichkeit zum Einsatz bei hohen Temperaturen: oberhalb dem üblichen Bereich für Standard-CMOS-Technologien (125°C - 150°C) bis hin zu 250°C.

Im Rahmen der Zusammenarbeit mit dem Industriepartner X-FAB Semiconductor (SOI-Design-Kit-Entwicklung) wurden analoge Zellen für Hochtemperaturanwendungen entwickelt. Den aktuellen Stand sowie ausgewählte Beispiele werden hier präsentiert.

## Forschungsverlauf und -stand

Die eingesetzte Technologie (X110) ist für den Hochtemperatureinsatz optimiert, z.B. liegen die Schwellspannungen bei 27°C:

$V_{th,n}=1.55\text{ V}$ ,  $V_{th,p}=1.25\text{ V}$

und bei 210°C:

$V_{th,n}=1.1\text{ V}$ ,  $V_{th,p}=0.9\text{ V}$ .

Es wurde ein kleiner Satz von analogen Zellen:

- Band-Gap
- Komparatoren: n-input, p-input, Hysterese-Komparator
- Operationsverstärker
- 10 Bit DAC
- 10 Bit ADC

von uns entwickelt und messtechnisch (Themebereich Industrielle Elektronik und Messtechnik) charakterisiert.

Die Messergebnisse bestätigen die Funktionalität der entwickelten Bauelemente, insbesondere bei hohen Temperaturen, ein Beweis für die Zuverlässigkeit von Technologie und Design-Umgebung (Werkzeuge). Diese IPs (Intellektual Property) sind einerseits eine gute Grundlage für die Entwicklung weiterer Analogzellen und andererseits geeignet für den direkten Einsatz in komplexeren integrierten Schaltungen (IC).

Beispielhaft werden die Ergebnisse zu 2 Analogzellen dargestellt: ein 10 Bit Analog-Digital-Wandler (ADC) und der dazugehörige Digital-Analog-Wandler (DAC), letzterer verfügbar auch als separates Bauelement (IP).

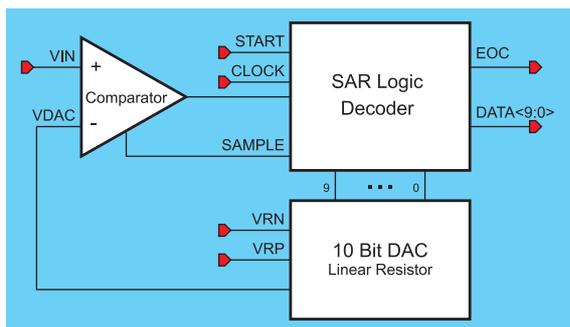


Abb. 1: Blockschaltbild 10 Bit ADC

Die Funktion ist im Blockschaltbild (s. Abb.1) dargestellt.

Es basiert auf zwei linearen Widerstandsteilern (zwei Ketten für grobe und feine Auflösung), getrieben durch eine Successive-Approximation-Register(SAR)-Logik.

Die Wandlung funktioniert bei einer externen Clock-Frequenz von 1 bis 2 MHz was zu Sampling-Raten von bis zu 200 kS/s ( $R_{sample}$ ) führt. Einige typische Parameter des ADCs sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Parameter	Wert
Temperaturebereich	-40 °C - 225 °C
Auflösung	10 Bit
INL	$\pm 1,0\text{ LSB}$
DNL	$\pm 0,7\text{ LSB}$
P	4 mW
$f_{clock}$	1-2 MHz
$R_{sample}$	90-180 kS/s
$V_{RP} - V_{RN}$	5V
Abmessungen	1,0 x 0,8 mm

Tab. 1: Parameter 10 Bit ADC

Abbildung 2 zeigt die integrale (INL) und die differentiale (DNL) Nichtlinearität des DACs für vier unterschiedliche Temperaturen:

- 40°C, 27°C, 125°C und 210°C.

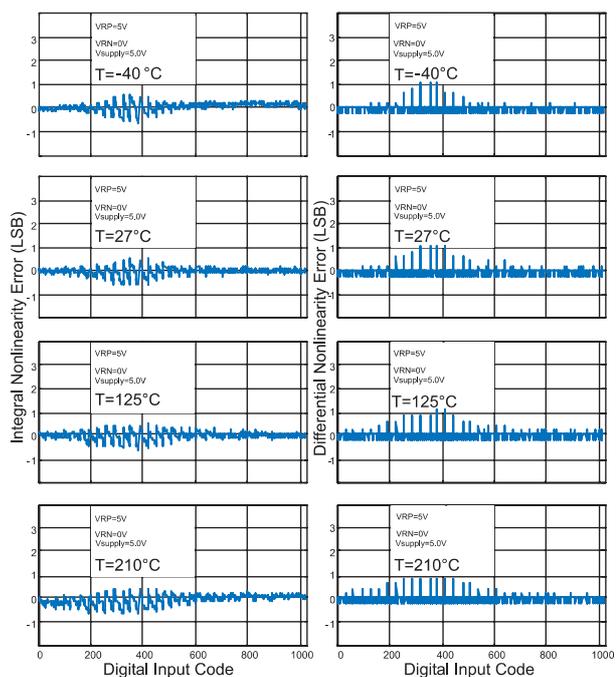
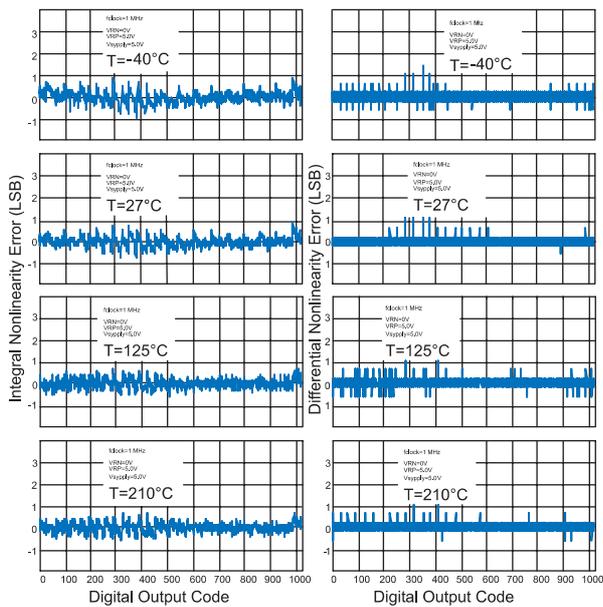


Abb. 2: 10 Bit DAC – integrale und differentiale Nichtlinearität



**Abb. 3:** 10 Bit ADC - integrale und differentiale Nichtlinearität

Abbildung 3 beinhaltet die entsprechenden Abhängigkeiten für den ADC. Man kann eine leichte Verbesserung der Genauigkeit beider Bauelemente mit Erhöhung der Temperatur feststellen, was dem Absinken der Schwellspannungen zu verdanken ist. Damit werden die Schaltgeschwindigkeiten der CMOS Schalter in den Widerstandsketten positiv beeinflusst.

### Ausblick

Der Augenmerk der aktuellen und der künftigen Arbeit auf dem Gebiet Schaltungstechnik für Hochtemperaturanwendungen konzentriert sich auf die Entwicklung weiterer Analogblöcke (IPs) für den Einsatz in komplexen integrierten Schaltungen für Anwendungen im erweiterten Temperaturbereich (von -50°C bis 220°C).

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Valentin Nakov

Tel.: +49 (3677) 69-5584

Email: valentin.nakov@imms.de

# Konfigurierbare Interfaceschaltung für kapazitive Sensoren

B 609-01030

## Zielstellung

Kapazitive Sensoren spielen eine immer größer werdende Rolle in der Mikrosystemtechnik. Das liegt vor allem an der zunehmenden Verwendung der Mikromechanik für die Druck- und Inertialsensorik (Beschleunigungssensoren, Gyroskope), als auch an der Einführung neuer Sensorprinzipien, wie zum Beispiel Streufeldkondensatoren. Um in diesem wachsenden Markt bestehen zu können, ist es nötig, für diese Sensoren neuartige Ausleseschaltungen zu entwerfen, da die alten Methoden für resistive Sensoren nicht verwendbar sind. Aus diesem Grund wurde das vom ehemaligen Thüringer Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst geförderte Projekt CapSens ins Leben gerufen. Die IMMS gGmbH arbeitet in diesem Projekt mit verschiedenen Thüringer Partnern zusammen (X-FAB Semiconductor Foundries AG, Melexis GmbH Erfurt, CiS, IL Metronic,  $\mu$ -Sen). Ziel dieses Projektes ist der Entwurf eines Transducers für kapazitive Sensoren, der aus einer Interfaceschaltung zum Sensor, einem ADC zur Digitalisierung der Signale und einer digitalen Signalverarbeitungseinheit zur Bearbeitung der Signale besteht. Das Kernstück, die Interfaceschaltung zur Wandlung eines Kapazitätswertes in einen Spannungswert, soll hier kurz vorgestellt werden.

## Forschungsverlauf und -stand

Zu Beginn des Projektes wurde in Zusammenarbeit mit den Partnerfirmen eine Spezifikation für die Interfaceschaltung entworfen, die möglichst vielen Anwendungsfällen Rechnung trägt und somit eine hohe Wiederverwendbarkeit der Ergebnisse garantiert.

Aus diesem Grund haben wir uns entschieden, eine digital konfigurierbare Schaltung zu entwerfen, die es dem Anwender ermöglicht, das System einfach an seine Applikation anzupassen. Um dieses hohe Maß an Flexibilität, Genauigkeit, Geschwindigkeit und Integrierbarkeit zu erreichen, wurde die Interfaceschaltung als Switched-Capacitor (SC) Schaltung implementiert. Das Blockschaltbild des Systems aus Schaltern, Kondensatoren, Operationsverstärkern und externen Bauelementen (durch gestrichelte Linie gekennzeichnet) ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Interfaceschaltung hat insgesamt 11 Betriebsmodi. Damit können beispielsweise Differenzkondensatoren, Kondensatoren mit Massekontakt, Kombinationen aus Sensor- und Referenzkondensator und auch angeregte Kondensatoren ausgelesen werden.

Die Interfaceschaltung kann auch in rückgekoppelten Systemen und für das Auslesen eines

externen Temperaturwiderstandes verwendet werden. In einem Betriebsmodus zum Auslesen eines kapazitiven Sensors mit einer zugehörigen Referenzkapazität besteht zum Beispiel folgender Zusammenhang zwischen Ausgangsspannung und Sensorkapazität:

$$V_{OUT} = \frac{V_{REF}}{C_I} (C_S - C_R)$$

Des Weiteren ist es möglich, je nach Betriebsmodus bis zu vier verschiedene Korrekturmodi zu aktivieren (keine Korrektur, Offsetkorrektur durch Spannungsaddition, Pseudo-Fully-Differential Auslesemodus und eine Kombination der beiden Letzten).

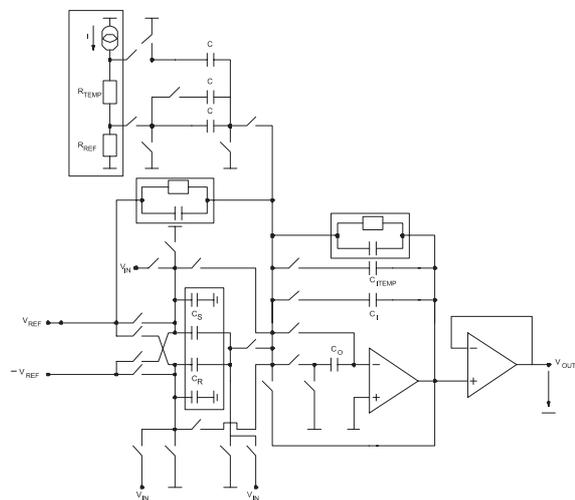


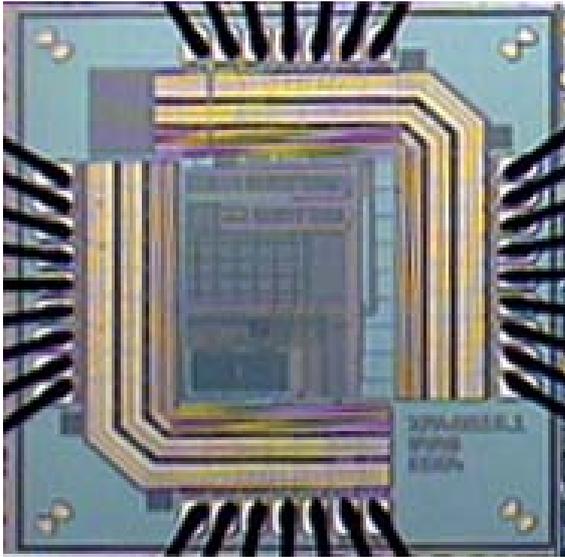
Abb. 1: Blockschaltbild der konfigurierbaren Interfaceschaltung

Auch die Verwendung einer externen Integrationskapazität bzw. eines externen Rückkopplwiderstandes ist möglich.

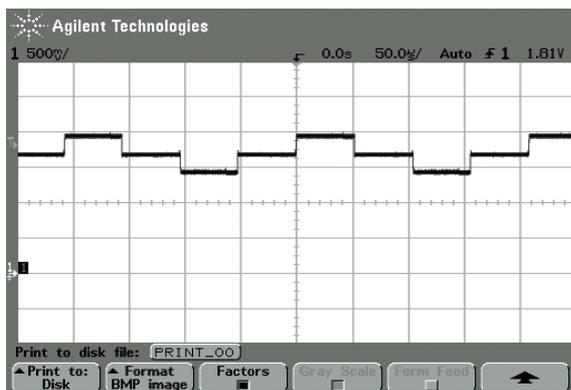
Die Schaltung wurde in der XC035LV Technologie der X-FAB AG implementiert. In Abbildung 2 ist ein Chipfoto der Interfaceschaltung dargestellt. Abbildung 3 zeigt die Ausgangsspannung der Interfaceschaltung bei einer Referenzspannung von 1 V, einer Sensorgröße von 15 pF und einer Referenzgröße von 10 pF. Zusätzlich ist bei dieser Messung der Pseudo-Fully-Differential Auslesemodus zur Offsetunterdrückung aktiv. Im Augenblick wird an der genaueren messtechnischen Charakterisierung der Interfaceschaltung hinsichtlich Linearität und Rauschen gearbeitet.

## Ausblick

Zum Abschluss des CapSens Projektes wird ein Demonstrator aus den entwickelten Komponenten Interfaceschaltung, ADC und digitale Signalverarbeitung aufgebaut.



**Abb. 2:** Chipfoto der konfigurierbaren Interfaceschaltung



**Abb. 3:** Oszilloskopbild der Ausgangsspannung der Interfaceschaltung

Dieser Demonstrator kann dann als Rapid-Prototyping Plattform für die Entwicklung von kapazitiven Sensorsystemen verwendet werden, um diese schnell und erfolgreich am Markt zu platzieren.

Weiterhin wird bei unseren Partnerfirmen CiS (Erfurt) und IL Metronic (Ilmenau) die Funktion der Interfaceschaltung im Zusammenspiel mit einem Sensor getestet, um die Verwendbarkeit der Schaltung in einer realen Applikation nachzuweisen.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Sascha Thoß

Tel.: +49 (361) 663-2532

Email: sascha.thoss@imms.de

# Verifikation hardwarenaher Software

## Ziele

Im Automobil kommen zunehmend kleine Mikrocontroller zum Einsatz, die eine Vielzahl einfacher Steuerungsaufgaben übernehmen. Diese Mikrocontroller sind meist mit der erforderlichen Peripherie auf einem Chip integriert. Da diese SOC auch zunehmend in sicherheitskritischen Anwendungen Einzug halten, ist eine Verifikation zwingend erforderlich.

Die in den letzten Jahren etablierte formale Verifikation der Hardware deckt nur einen Teil dieses komplexen Systems ab. Unentdeckt bleiben zum Beispiel Fehler im Mikrocontrollerprogramm oder im Zusammenspiel von Hard- und Software. Für eine komplette Verifikation muss jedoch die Software des Mikrocontrollers mit eingeschlossen werden.

Im Projekt VALSE-XT entwickeln die Melexis GmbH (Erfurt) und die IMMS gGmbH Methoden um hardwarenahe Software formal zu verifizieren.

## Forschungsverlauf und -stand

Für die formale Verifikation wurde das im Projekt von Infineon bereitgestellte Tool GateProp verwendet. Als Mikrocontroller kam der MLX16, ein 16 Bit RISC Prozessorkern der Melexis, zum Einsatz. Dieser Mikrocontroller steht als Verilog-Netzliste zur Verfügung. Im Folgenden soll das Vorgehen bis zum derzeitigen Stand kurz skizziert werden.

Als erster Schritt wurde untersucht, ob das Prozessormodell überhaupt von GateProp verarbeitet werden kann. Es zeigte sich, dass es sehr gut möglich ist ein GateProp konformes Abbild des MLX16 zu erzeugen. Nach der Identifizierung der internen Zustände, wie Phasenzähler war es möglich einzelne Befehle und einfache Befehlsfolgen zu verifizieren.

Im zweiten Schritt wurde dieses Prozessormodell um einen Programmspeicher erweitert. Dieser Speicher ist eine Verilog-Beschreibung des ROM-Inhaltes und wird aus einem vom Compiler erzeugten Hex-File generiert. Ein einfaches parametrisierbares RAM-Modell wurde in einer weiteren Ausbaustufe des Demonstrators hinzugefügt. Damit wurden Befehlsfolgen über 128 Einzelbefehle verifiziert.

Damit aber die Einflüsse der Hardware richtig abgebildet werden können, ist es nötig die Software in ihrer realen Umgebung zu überprüfen. Als Zielsystem für die Untersuchungen wurde eine Schaltung ausgewählt, die zum Ansteuern von Fensterhebermotoren eingesetzt werden soll. Sie ist dabei per Software anpassbar an unterschiedlichste Fahrzeugtypen und Ausstattungsmerkmale. Sie enthält neben dem MLX16 eine Reihe von Sensoreingängen, die es ermög-

lichen zum Beispiel ein Hindernis beim Schließen der Fenster zu detektieren. Über einen LIN-Bus kann ein Datenaustausch mit anderen Knoten im Auto hergestellt werden. Einen vereinfachten Aufbau dieses Chips zeigt Abbildung 1.

Der Digitalteil dieser Schaltung wurde durch die bereits erwähnten RAM/ROM Modelle der vorigen Arbeit ergänzt. Nach einigen Modifikationen der Netzliste und eine geeignete Außenbeschaltung konnte der Digitalteil von GateProp verarbeitet werden.

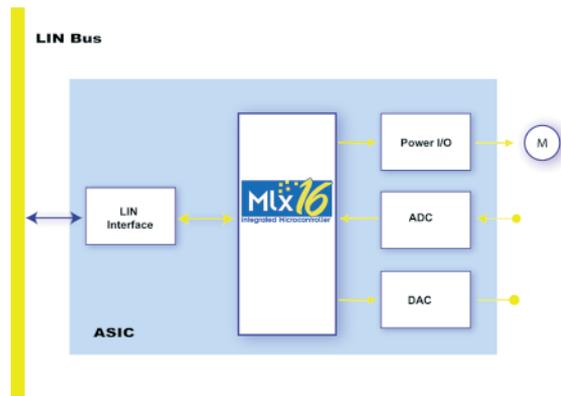


Abb. 1: Beispielapplikation Fensterheber

Zuerst wurde ein stabiler Zustand des Systems nach dem Reset verifiziert. Aus diesem können in folgenden Verifikationen weitere, beliebige Befehlsfolgen innerhalb des Programmspeichers verifiziert werden. Erste Versuche ermöglichten es eine Verifikation über 16 Befehle auszuführen. Als nachteilig erwiesen sich jedoch bisher die langen Rechenzeiten.

## Ausblick

Im weiteren Projektverlauf wird untersucht, wie einfache Programmbeispiele verifiziert werden können. Weiterhin soll ein Vergleich von Simulation mit Verifikation erfolgen.

Mit zukünftigen Rechnergenerationen muss das derzeitige Problem der langen Rechenzeiten für die Erzeugung GateProp konformer Abbildungen gelöst werden, um rasant steigende Komplexitäten der nächsten Chip-Generationen bewältigen zu können.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. (FH) Mario Hahn

Tel.: +49 (361) 663 2551

Email: mario.hahn@imms.de

# Design und Charakterisierung von HF-Demonstrator-Zellen für das Design-Kit der X-FAB Semiconductor Foundries AG (Erfurt) in der Technologie XB06

## Ziele

Die von der X-FAB angebotene 0.6  $\mu\text{m}$  BiMOS-Technologie XB06 ermöglicht die Realisierung von Hochfrequenz-ASICs für Frequenzen bis zu 1 GHz. Der erfolgreiche Entwurf solcher HF-ASICs ist jedoch für potentielle Kunden mit beträchtlichen Schwierigkeiten verbunden, da die erforderlichen Kenntnisse im integrierten HF-Schaltungsentwurf und der HF-Messtechnik oft nicht in ausreichendem Maße vorhanden sind. Um Kunden den Einstieg in den Entwurf von HF-ASICs zu erleichtern, soll für das Design-Kit der X-FAB AG eine Bibliothek mit typischen HF-Zellen entstehen. Durch die messtechnische Charakterisierung wird die Genauigkeit der Simulationsmodelle demonstriert und nicht simulierbare Effekte werden erfasst.

Kunden der X-FAB können dann für ihre Entwicklungen auf eine Bibliothek von zuverlässigen, charakterisierten HF-Zellen zurückgreifen. Bei veränderten Anforderungen besteht das Angebot der IMMS gGmbH, die HF-Zellen entsprechend anzupassen oder neue HF-Zellen zu entwickeln.

## Forschungsverlauf und -stand

Um eine möglichst breite Verwendbarkeit zu ermöglichen, sollen die HF-Zellen in einem Spannungsbereich von 2.5 V bis 5.5 V funktionsfähig sein. Es wird ein Temperaturbereich von  $-40^{\circ}\text{C}$  bis  $125^{\circ}\text{C}$  angestrebt. Als Arbeitsfrequenzbereich wurde das ISM-Band um 868 MHz ausgewählt. Die Entwicklung der HF-Demonstrator-Zellen wurde in drei Arbeitspakete aufgeteilt. Das Arbeitspaket 1 umfasst den Entwurf einer für HF-Zwecke geeigneten Bias-Zelle sowie eines vollständig integrierten LC-VCOs.

Die LC-VCOs verwenden die in der Technologie

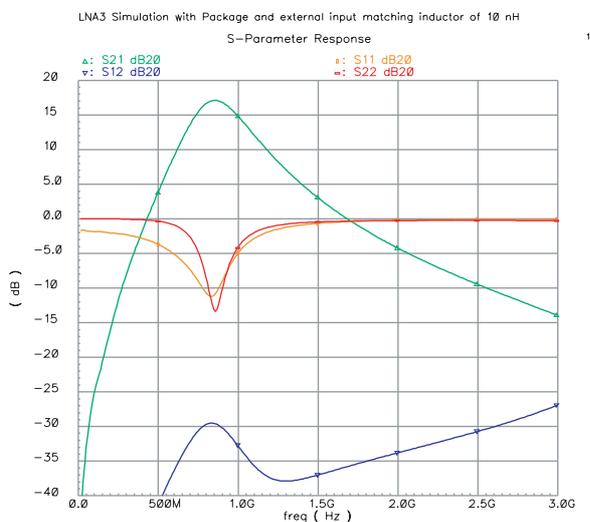


Abb. 2: S-Parameter-Simulation des oben gezeigten LNA-ICs mit Gehäusemodell

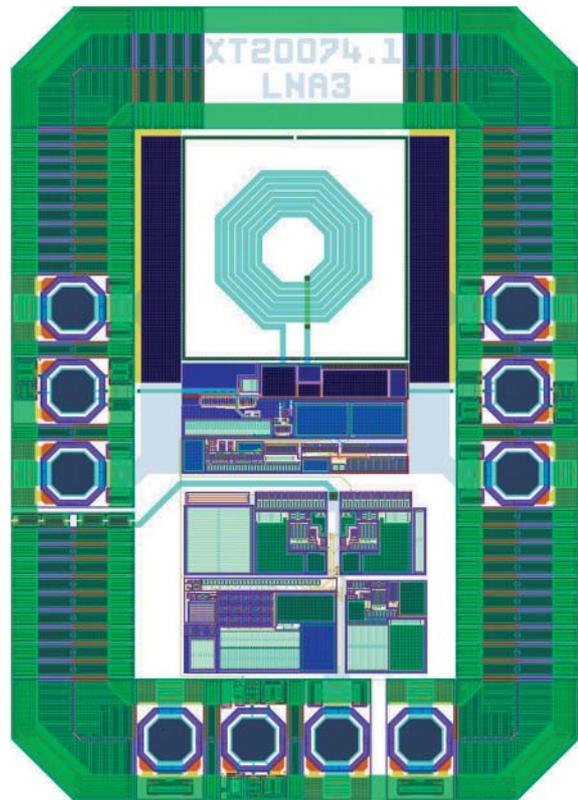


Abb. 1: Layout eines LNA-Test-IC

XB06 verfügbaren integrierten Induktivitäten und Varaktoren. Insgesamt wurden drei VCO-Varianten verschiedener Komplexität realisiert. Bias-Zelle und LC-VCOs wurden schon prozessiert, erste Messungen haben die prinzipielle Funktion gezeigt. Zur Zeit findet die detaillierte Charakterisierung statt.

Im Arbeitspaket 2 werden ein Prescaler, LNAs sowie ein Ring- oder Relaxations-VCO entworfen. Insgesamt wurden vier LNA-Varianten für verschiedene Anforderungen realisiert. Prescaler und LNAs werden zur Zeit prozessiert, der VCO befindet sich noch in der Design-Phase. Das Arbeitspaket 3 enthält einen Power Amplifier und einen Mischer. Die Bearbeitung wird Anfang 2005 starten.

## Ausblick

Im Jahr 2005 erfolgt der Entwurf der noch fehlenden Zellen sowie die vollständige Charakterisierung. Für die Zukunft ist die Erstellung von ähnlichen Zellen für die 0.35  $\mu\text{m}$ -CMOS-Technologie der X-FAB AG geplant.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Peter Teichmann

Tel.: +49 (361) 663-2510

Email: peter.teichmann@imms.de

## Industrielle Elektronik und Messtechnik

Einen Schwerpunkt im Jahr 2004 bildete das Messtechniklabor in der Außenstelle des IMMS in Erfurt. Es wurde begonnen, den Test optoelektronischer Schaltungen und integrierter Schaltkreise zu etablieren.

Mit der Testentwicklung für dynamische Charakterisierung oder den Linien- und Flächenscans von Fotodioden wurden die neuen Kompetenzen der IMMS gGmbH am Mikroelektronikstandort Erfurt Südost nachgewiesen. Neue Kooperationsbeziehungen entstanden zu Firmen des Applikationszentrums Mikrosystemtechnik Erfurt Südost. Die Zusammenarbeit von Design und Test wurde in der IMMS gGmbH vorangebracht. Speziell für SOI-Entwicklungen wurde das Equipment für den Hochtemperaturtest ausgebaut. 2005 wird der Devicetest bis 350°C ermöglicht. Durch gemeinsame Angebote für Design- und Testaufgaben wurde die Zusammenarbeit mit den Forschungs- und Industriepartnern ausgebaut. Beispiele hierfür sind Design- und Temperaturcharakterisierung von Analogzellen sowie von HF-Demonstratorzellen für Designkits.

Das Messtechniklabor der IMMS gGmbH in Erfurt Südost hat sich als Drehscheibe für eine effektive Zusammenarbeit der IMMS-Mitarbeiter verschiedener Themenbereiche mit der Thüringer Mikroelektronik / Mikrosystemtechnik entwickelt. Mit dem Umzug ins neue Ernst-Abbe-Zentrum auf den Campus der Technischen Universität Ilmenau verbesserten sich die Arbeitsbedingungen spürbar. So verfügen die Messtechniklabore nun über mehr Raum. Ein Labor ist mit einer geschirmten Kabine ausgestattet.

Dies ermöglicht die Bearbeitung neuer Testaufgabenstellungen. Es wurde mit der Messtechnikentwicklung zum 1/f-Rauschen begonnen, und erste Demonstratoren konnten erfolgreich charakterisiert werden. Mit der Anschaffung eines neuen Waferprobers werden auch in Ilmenau automatisierte on-wafer Messungen im Temperaturbereich von -55 °C bis 200 °C möglich.

Für die langfristige Zusammenarbeit mit wichtigen Forschungs- und Industriepartnern wurden im Jahr 2004 die Voraussetzungen gefestigt.

Für den Testsupport von Cell-Q-Devices der X-FAB Semiconductor Foundries AG (Erfurt) wurden kosteneffektive Lösungen erarbeitet, die eine Wiederverwendbarkeit der Testhardware gestatten und mit einer Standardisierung bei der Testprogrammentwicklung minimalen Aufwand bei der Typenpassung sicherstellt.

Schwerpunkte stellen hierbei die Verifizierung von I/O-Stufen und Memories in Silicon sowie Power- und Timinganalysen von Logik-Zellen in neuen Halbleitertechnologien dar.

Im Bereich der Evaluierung und Charakterisie-



rung von kundenspezifischen HF-Schaltkreisen wird der Themenbereich (TB) „Industrielle Elektronik und Messtechnik“ (IEM) der IMMS gGmbH seine Tätigkeitsfelder ausweiten und Aspekte von Serientestumgebungen in die Testentwicklung von HF-ASICs einbeziehen sowie mit Grundlagenuntersuchungen die Time-to-Market und die Qualität von Testentwicklungen verbessern. Durch Zusammenarbeit mit der Mixelis GmbH Erfurt wird die Nutzung von high-end Testsystemen und Handlingtechnik ermöglicht. Aufgrund der Komplexität der Aufgabenstellungen bringt diese langfristige Kooperation Vorteile für beide Partner.

Die Kompetenzen des TB IEM umfassen folgende Schwerpunkte, die auch in den kommenden Jahren zielstrebig weiter ausgebaut werden:

- HF-Charakterisierung
- HF-Rauschparametermessung
- Parametermesstechnik und Modellbildung
- 1/f-Rauschmessung
- Evaluierung und Test von HF-ASICs
- Test optoelektronischer Schaltkreise
- Testsupport für Technologie und Design
- Qualitätssicherung in der Halbleiterindustrie
- Test im Hochtemperaturbereich
- Leistungselektronik für mechatronische Antriebe
- Batteriemangement für Li-Ionen-Akkus
- Dimmbare Vorschaltgeräte für Leuchtstofflampen

Der TB unterhält vielfältige Kooperationsbeziehungen zur Mikroelektronikindustrie Thüringens und Deutschlands und ist mit Testentwicklungen in Forschungsprojekten des Freistaates Thüringen, des BMBF und der Europäischen Union eingebunden.

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Klaus Förster

Tel.: +49 ( 3677) 69-5520

Email: klaus.foerster@imms.de

# Entwurf und HF-Charakterisierung von SiC - MESFETs

TMWFK, B 607-02006

## Ziele

In Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien (ZMN, [www.zmn.tu-ilmenau.de](http://www.zmn.tu-ilmenau.de)) und dem Institut für Festkörperelektronik der TU Ilmenau ([www.tu-ilmenau.de/site/fke](http://www.tu-ilmenau.de/site/fke)) wurde ein HF-Testfeld zur Charakterisierung von SiC-MESFETs entworfen.

Dieser Entwurf war Bestandteil des durch das ehemalige Thüringer Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst geförderten Projektes Neue Materialkombinationen für SiC-Feld-effekttransistoren (NeMaSiC).

Das Halbleitermaterial Siliziumkarbid (SiC) gestattet auf Grund der hohen Bandlücke von 3 eV und einer hohen Sättigungsdriftgeschwindigkeit die Realisierung von HF-Bauelementen für hohe Leistungen und hohe Betriebstemperaturen. Auf Grund der sehr aufwendigen Halbleitertechnologie befindet sich jedoch die Entwicklung entsprechender Bauelemente erst am Anfang und es gibt derzeit nur wenige Firmen, die Wafer oder Bauelemente auf SiC-Basis entwickeln oder anbieten (u.a. die Fa. Cree, Inc. / [www.reee.com](http://www.reee.com)).

## Forschungsverlauf und -stand

Realisiert wird ein Metal-Semiconductor Field-Effect Transistor (MESFET), wie er z.B. auch aus der GaAs-Technologie bekannt ist.

Es wurde ein Testfeld entworfen, welches SiC-MESFETs mit zwei unterschiedlichen Technologie- und Layoutvarianten enthält:

- Zuführung des Gateanschlusses über eine Nitridschicht bzw. direkt über die Pufferschicht
- Ausführung des Gateanschlusses rechteckig bzw. trapezförmig

Darüber hinaus wurden die Gatelängen der MESFETs variiert ( $L_g$  1, 2, 3, 5 und 7  $\mu\text{m}$ ) bei einer einheitlichen Gateweite von  $W=180 \mu\text{m}$ .

Die recht großen Gatelängen sind den Möglichkeiten der verfügbaren Technologie geschuldet und sind für praktisch verwendbare HF-Bauelemente viel zu groß (zum Vergleich: bei typischen

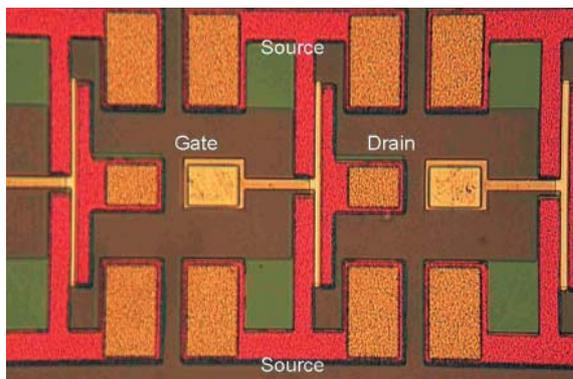


Abb. 1: MESFET mit Anschlüssen zur Antastung mit GSG-Messspitzen

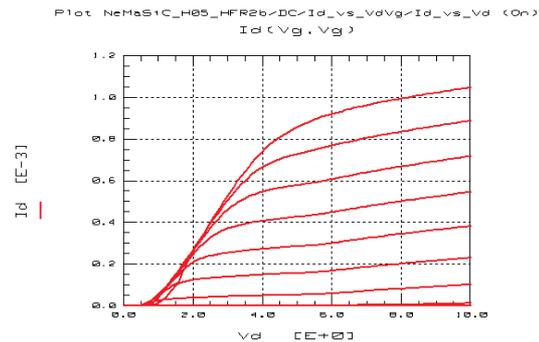


Abb. 2: Ausgangskennlinienfeld  $I_d = f(V_{ds}, V_{gs})$  eines SiC-MESFET,  $L_g = 2 \mu\text{m}$ ,  $W = 180 \mu\text{m}$

GaAs-MESFETs beträgt die Gatelänge deutlich unter  $1 \mu\text{m}$ ). Ziel des Projektes war deshalb lediglich die Demonstration eines funktionstüchtigen SiC-MESFET, dessen Grenzfrequenz bedingt durch die recht große Gatelänge nicht sehr hoch sein kann.

Eine detaillierte Beschreibung der im ZMN verwendeten Technologie ist in [1] zu finden.

Um an einem Transistor on Wafer HF-Messungen durchführen zu können, müssen seine Anschlüsse so gestaltet sein, dass sie mit geeigneten Messspitzen angetastet werden können.

Abbildung 1 zeigt einen Ausschnitt des Testfeldes mit einem MESFET, dessen Anschlüsse mit GSG (Ground-Signal-Ground) - HF-Probes kontaktiert werden können. Gut sind in diesem Ausschnitt die unterschiedlichen Gatelängen und die Gatezuführung zu erkennen, welche den MESFET in zwei Halbtransistoren teilt, die so praktisch parallel geschaltet sind.

Neben den eigentlichen Transistoren wurden noch Open- und Short-Strukturen entworfen, die für das Deembedding erforderlich sind.

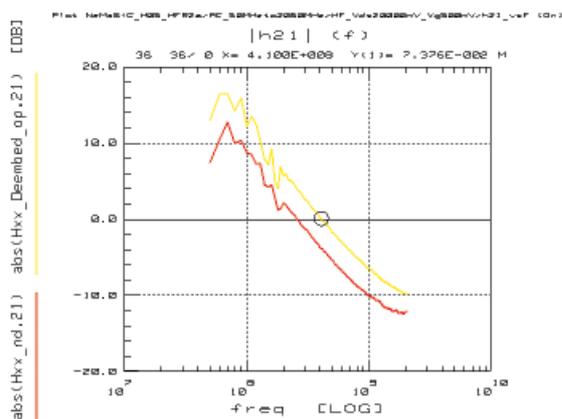
Erst das Deembedding gestattet die Bestimmung der den Transistor charakterisierenden Grenzfrequenzen  $f_T$  und  $f_{MAX}$  ohne den parasitären Einfluss von Zuleitungen und Bondpads.

Die Messung erfolgte durch das an der IMMS gGmbH verfügbare Messsystem HP 85122.

Es gestattet DC-Messungen und HF-Messungen bis 50 GHz on Wafer. Zur Messung und Auswertung ist das Parameterextraktionsprogramm ICCAP verfügbar.

Zunächst wurden DC-Messungen vorgenommen, welche die Steuerwirkung des Transistors demonstrieren. Abbildung 2 zeigt ein Ausgangskennlinienfeld  $I_d = f(V_{ds}, 0 \dots 10 \text{ V}, V_{gs}, -3 \dots 2 \text{ V})$ , wie es typisch ist für MESFETs.

Weiterhin wurden an ausgewählten Bauelementen S-Parametermessungen bei unterschiedlichen DC-Arbeitspunkten durchgeführt und die dabei erreichbare Grenzfrequenz  $f_T$  extrahiert.



**Abb. 3:**  $|h_{21}|(f)$  für einen SiC-MESFET,  $L_g=2\mu\text{m}$ ,  $W=180\mu\text{m}$  mit und ohne Deembedding

Abbildung 3 zeigt für einen  $2\mu\text{m}$ -MESFET exemplarisch den Verlauf von  $|h_{21}|(f)$ , aus welchem sich die Grenzfrequenz  $f_T$  ergibt (gelb mit/rot ohne Deembedding).

In Abbildung 4 ist dieser Verlauf noch einmal für Transistoren mit unterschiedlichen Gatelängen von 2, 3, 5 und  $7\mu\text{m}$  dargestellt (mit Deembedding), was den starken Einfluß der Gatelänge auf die Grenzfrequenz eines MESFET zeigt:

$L_g = 2\mu\text{m}$   $f_T = 580\text{ MHz}$

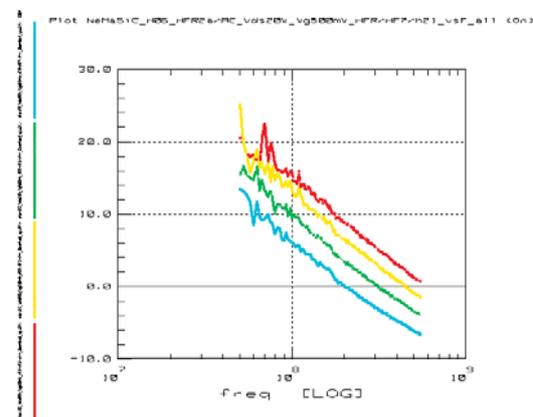
$L_g = 3\mu\text{m}$   $f_T = 437\text{ MHz}$

$L_g = 5\mu\text{m}$   $f_T = 307\text{ MHz}$

$L_g = 7\mu\text{m}$   $f_T = 200\text{ MHz}$

Bei der Messung des Testfeldes mußte leider festgestellt werden, dass alle HF-Transistoren mit der kürzesten Gatelänge von  $1\mu\text{m}$  auf Grund der begrenzten lithografischen Möglichkeiten nicht funktionstüchtig waren.

In Tabelle 1 sind noch einmal die Grenzfrequenzen für unterschiedliche Technologie- und Layoutvarianten zusammengestellt:



**Abb. 4:**  $|h_{21}|(f)$  für SiC-MESFET mit  $L_g=2, 3, 5$  und  $7\mu\text{m}$  (rot/gelb/grün/blau)

$f_T / \text{MHz}$	$L_g$			
	$2\mu\text{m}$	$3\mu\text{m}$	$5\mu\text{m}$	$7\mu\text{m}$
Gatezuführung rechteckig auf Puffer	580	437	307	200
Gatezuführung rechteckig auf Nitrid	572	495	290	220
Gatezuführung trapezförmig auf Puffer	540	422	287	188
Gatezuführung trapezförmig auf Nitrid	602	437	285	205

## Ausblick

Die SiC-Technologie befindet sich derzeit noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium und es gibt bislang nur ganz wenige Firmen, welche SiC-Wafer, eine entsprechende Technologie oder gar SiC-Bauelemente anbieten können.

Es konnte gezeigt werden, dass mit der am ZMN entwickelten Silizium-Karbidtechnologie funktionstüchtige SiC-MESFETs entworfen und präpariert werden können.

Für einen einzelnen  $2\mu\text{m}$ -Transistor wurde eine maximale Schwingfrequenz  $f_{\text{MAX}}$  von  $1,3\text{ GHz}$  gemessen, was in etwa den Simulationen entspricht.

Dabei ist hervorzuheben, dass es sich um eine vollständig neu entwickelte Technologie handelt und es für den Entwurf des Testfeldes einschließlich der zu erarbeiteten Design-Rules keinerlei Erfahrungswerte gab.

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Uwe Baumann

Tel.: +49 (3677) 69-5527

Email: uwe.baumann@imms.de

- [1] Design- und Technologieoptimierung sowie Prozessmanagement von SiC-Transistoren; Diplomarbeit von C. Fachmann, vorgelegt an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der TU Ilmenau, Registrierungsnummer 2141-01D-04

# Rauschmessungen im EMV-geschirmten Labor

## Aufbau eines EMV-geschirmten Messlabors mit halbautomatischem Waferprober

Der Betrieb hochsensibler Messtechnik erfordert eine geeignete Betriebsumgebung (Staubfreiheit und Klimatisierung), da Umwelteinflüsse direkten Einfluss auf die Messgenauigkeit und die Reproduzierbarkeit der Messungen nehmen. Neben diesen Grundvoraussetzungen ist entsprechend der Messaufgabe dafür Sorge zu tragen, dass störende Umwelteinflüsse von Messgerät und Messobjekt ferngehalten werden (Erschütterungen, thermische und klimatische Einflüsse, elektromagnetische Felder).



Abb. 1: halbautomatischer Waferprober PA200 in geschirmter Kabine

Ein besonderes Problem bildet in dieser Hinsicht der zunehmende elektromagnetische Störpegel den unterschiedlichste Geräte und Dienste generieren. Mobilfunknetze (D1, D2, E-Netz) und funkgestützte Bürokommunikation (DECT-Telefone, Funkmäuse- u. Tastaturen, WLAN, Bluetooth) sind allgegenwärtig.

Mit dem Umzug der IMMS gGmbH in das neu gebaute Gebäude der Ernst Abbe Stiftung auf dem Campus der TU Ilmenau ergab sich die Möglichkeit die an der IMMS gGmbH verfügbare HF-Messtechnik in einer EMV geschirmten Kabine unterzubringen.

Die Schirmdämpfung beträgt > 90 dB in einem Frequenzbereich von 0,01 ... 26000 MHz.

Die erforderliche Netzeinspeisungen zum Betrieb der Messgeräte erfolgt über Durchführungsfilter, die eine wirkungsvolle Störunterdrückung auf den Netzleitungen gewährleisten. Darüber hinaus besteht über Lichtwellenleiterkabel die Möglichkeit alle Steuerungsvorgänge von aussen vorzunehmen, so dass auch die erforderliche Rechentechnik mit PCs und Monitoren ausserhalb der Kabine platziert werden können.

Damit ist sichergestellt, dass Störeinflüsse von aussen auf die zu messenden Messobjekte weit-

gehend minimiert werden, was insbesondere bei der Durchführung von Rauschmessungen von besonderer Bedeutung ist. Ein moderner halbautomatischer 8“-Waferprober PA 200 der Firma Suss mit Thermochuck ermöglicht Temperaturmessung von -65°C ... 200 °C. Die zusätzliche Schirmung des gesamten Chucks mit Nadeln bzw. Sondenhaltern (Probe Shield) gestattet die Messung kleinster Ströme bis hinunter in den sub-fA-Bereich. Damit ist dieser Prober bestens prädestiniert für Rauschmessungen on Wafer.

## Messung der Rauschparameter und des 1/f-Rauschen

Das niederfrequente Rauschen wird, auf Grund des Verlaufes der Rauschleistungsdichte über der Frequenz, auch häufig als 1/f-Rauschen bezeichnet. Diese Messung stellt dabei eine prinzipiell andere Messaufgabe dar als die der HF-Rauschmessungen.

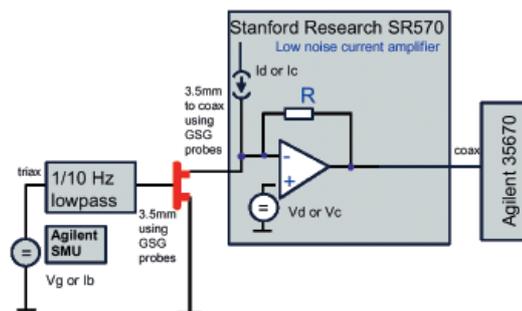


Abb. 2: Schematischer Aufbau des Testsystems

Mittels eines dynamischen Signalanalysators (FFT-Analyse) wird die spektrale Rauschleistungsdichte über der Frequenz gemessen. Die dafür erforderliche rauscharme Versorgung der Messobjekte (BJTs oder MOSFETs) erfolgt über spezielle Filter und aus einem rauscharmen Stromverstärker SR 570 von Stanford Reseach, welcher während der Messung aus Akkus betrieben wird um auszuschließen, dass Rauschteile aus den Spannungsquellen die Ergebnisse überlagern. Abbildung 2 zeigt die Prinzipschaltung für eine 1/f-Rauschmessung.

Aus der Messung des 1/f-Rauschens können letztendlich die für die Bauelementemodellierung benötigten Parameter AF und KF extrahiert werden. Für Messung und Extraktion wird das Parameterextraktionsprogramm ICCAP mit dem dazugehörigen Noise-Modelling-Toolkit eingesetzt. Mit der an der IMMS gGmbH verfügbaren Technik ist es somit möglich, eine komplette Rauschcharakterisierung vorzunehmen.

Bei der Entwicklung und Charakterisierung moderner HF-Bauelemente gewinnt neben der S-Parameter-Messung die Bestimmung der Rauschparameter zunehmend an Bedeutung.

Diese qualifizieren das Übertragungsverhalten von Vierpolen in realen Schaltungen und unter realitätsnahen Einsatzbedingungen.

Unter Rauschparametern versteht man die minimale Rauschzahl  $F_{\min}$ , die optimale Quellimpedanz  $Y_{\text{opt}}$  und den äquivalenten Rauschwiderstand  $R_n$ .

Die Rauschzahl  $F$  eines Vierpols ist von der dem Messobjekt angebotenen Quellimpedanz abhängig. Deshalb ist es für die Bestimmung der Rauschparameter erforderlich, für die Messobjekte unterschiedliche Quellimpedanzen bereitzustellen. Dies geschieht mit dem elektronischen Tunersystem NP5 von ATN Microwave.

Eine entsprechende Software gestattet die Steuerung der Messgeräte, die Messwernerfassung sowie die Auswertung und Visualisierung der Ergebnisse. Diese Rauschparametermessungen können mit zwei unterschiedlichen Tunersystemen im Frequenzbereich von 0,3 ... 6 GHz und von 2 ... 26 GHz on Wafer durchgeführt werden.

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Uwe Baumann

Tel.: +49 (3677) 69-5527

Email: [uwe.baumann@imms.de](mailto:uwe.baumann@imms.de)

# Evaluierung, Charakterisierung und Test von HF-ASICs

## Ziele

Basierend auf den Ergebnissen der Zusammenarbeit mit der Firma Melexis GmbH (Erfurt) werden Erfahrungen vorgestellt, die bei der Entwicklung von HF-ASICs gewonnen wurden. Dabei wird auf die speziellen Probleme bei Evaluierung, Charakterisierung und IC-Test näher eingegangen.

## HF-ASICs

Der Trend zur Miniaturisierung erfordert einen steigenden Integrationsgrad und bedingt eine höhere Komplexität der integrierten Schaltungen. Mit Standardprodukten lässt sich meist keine optimale Lösung erzielen. So bietet sich der Einsatz eines applikationsspezifischen Schaltkreises, eines ASICs an.

Die Besonderheit bei ASICs liegt darin, dass eine vom Endanwender detailliert vorgegebene Spezifikation zu erfüllen ist.

## Evaluierung

Die Evaluierung der ICs bildet die Brücke zwischen dem Design und der Produktion. Dazu muss der Schaltkreis auf einem der Anwendung möglichst nahe kommenden Board in Betrieb genommen werden (s. Abb. 1).

Die bei HF-ASICs unumgänglichen externen HF-Komponenten müssen abgeglichen und optimiert werden. Dabei ist es zwingend notwendig, dieselben Komponenten einzusetzen, wie sie beim Design in der Simulation und beim Endanwender in der Produktion verwendet werden.

Da über die Funktionsfähigkeit der einzelnen



Abb. 1: Evaluationboard für HF-ASIC am NWA

produzierten ICs zu Beginn keine konkrete Aussage getroffen werden kann, muss auf dem Evaluationboard eine HF-taugliche IC-Fassung eingesetzt werden, die auch im Produktionstest verwendet werden kann.

Im gezeigten Beispiel handelt es sich um einen ASIC der Firma Melexis, der für passives Rei-

fendruck-Monitoring (TPMS) und Drehmoment-sensorik (Torque) in der Automobilbranche eingesetzt wird.

## HF-Messungen / Charakterisierung

Die typischen Baugruppen in solch einem HF-ASIC sind Empfänger (LNA, Mischer, ZF-Verstärker, Demodulator), Sender (PA, Modulator) und Frequenzauflösung (PLLs, VCOs, Teiler). Zur Evaluierung und Charakterisierung sind folgende Messungen mit den entsprechenden Messgeräten notwendig:

- Verstärkung / IP3 / Selektivität / Anpassung (LNA, Mischer, ZF)
- Empfindlichkeit / Signal-Rausch-Verhältnis (Demodulator, Empfänger insgesamt)
- Spektrum, Harmonische, Spurious (PA, Modulator, Sender insgesamt)
- Phasenrauschen (PLL, VCO, Referenz)
- Einschwingzeiten, Locktime (PLL, Tx, Rx)

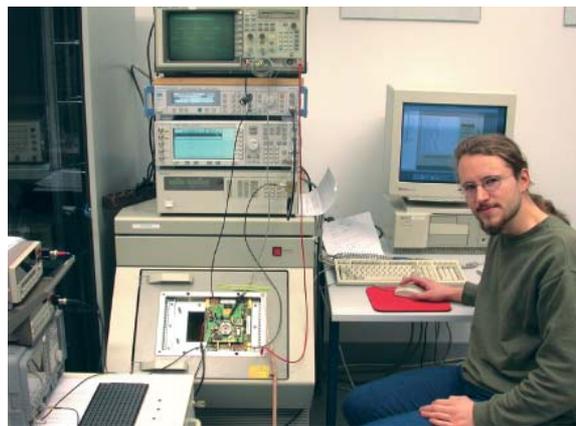


Abb. 2: Vorserientest am HP82000 Tester

Diese Messungen sind zur Betrachtung des „worst case“ unter Variation der Parameter Betriebsspannung und Temperatur durchzuführen (Abb. 2). Der Vergleich mit den Simulationsergebnissen erlaubt die Aussage, welche Toleranzen im Halbleiterprozess schaltungstechnisch ausgeglichen werden können.

## Produktionstest

Auf der Grundlage der Ergebnisse von Evaluierung und Charakterisierung werden Aufgaben für ein mögliches Re-Design abgeleitet. Weiterhin fließen die Erkenntnisse in die Hardware- und Testerprogrammentwicklung für den Produktionstest ein.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Björn Bieske

Tel.: +49 (3677) 69-5526

Email: bjoern.bieske@imms.de

## Zielstellung

Der verstärkte Einsatz von optoelektronischen Bauelementen zur Datenübertragung oder zum Auslesen von Speichermedien erfordert eine bessere Charakterisierung dieser Schnittstelle. Im Vordergrund stehen dabei die Eigenschaften der Fotodioden, die die Wandlung der optischen in elektrische Signale vornehmen. Durch die statische und dynamische Analyse dieser Vorgänge ist eine Steigerung der Funktionalität möglich.

## Forschungsverlauf und -stand

Die Untersuchungen können sowohl auf Wafer- als auch auf Deviceebene durchgeführt werden. An der IMMS gGmbH stehen dazu eine optische Bank sowie ein halbautomatischer Waferprober PA200 der Firma SÜSS-MicroTec zur Verfügung. Beide Systeme sind speziell für den Test optoelektronischer Bauelemente ausgelegt.

Am Waferprober wird dies durch die Montage eines Kreuztisches an der Oberseite des Mikroskops erreicht. Dadurch konnte die Ausstattung des Waferprobers so erweitert werden, dass eine optische Anregung des zu untersuchenden Chips erfolgen kann.

Dazu wird ein Lichtwellenleiter am Arm des Kreuztisches befestigt. Das zugeführte Licht fällt nun durch das Mikroskop auf das Bauelement. Mit diesem Aufbau können minimale Strahldurchmesser bis zu  $1\ \mu\text{m}$  erreicht werden.

Zur Variation der Wellenlänge des anregenden Lichts ist der Austausch der Laserquelle erforderlich, die den Lichtwellenleiter speist. Die exakte Positionierung des Lichtflecks wird durch die Bewegungen des Kreuztisches mit einer Auflösung von  $0,1\ \mu\text{m}$  ermöglicht.



Abb. 1: Kreuztisch am PA200 mit Lichtwellenleiterkupplung

Das Gesamtsystem besitzt somit einen optischen Eingang und einen oder mehrere elektrische Ausgänge. Zur Messung der Ausgangsgrößen werden digitale Multimeter bzw. Oszilloskope eingesetzt. Mit Hilfe des Strahlteilers wird ein geringer Teil der Eingangslichtleistung einem optischen Leistungsmesser zugeführt. Dadurch ist der Leistungspegel des anregenden Lichtflecks zu jedem Zeitpunkt exakt bestimmbar. Zur Berechnung der optischen Empfindlichkeit eines Bauelementes wird der Quotient aus Aus-

gangsspannung und Eingangslichtleistung gebildet. Diese beiden Größen müssen zeitgleich mit dem Messsystem erfasst werden.

Um diese Synchronität zu gewährleisten, muss das Testsystem über eine zentrale Steuerung verfügen. Durch den Einsatz eines PCs, verschiedener Bussysteme und eines Steuerprogramms ist die automatische Steuerung des Messablaufs möglich.

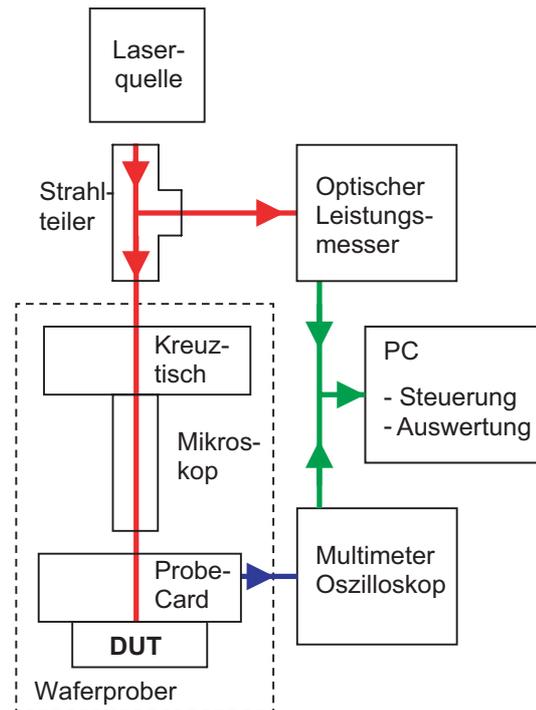


Abb. 2: Schematischer Aufbau des Testsystems

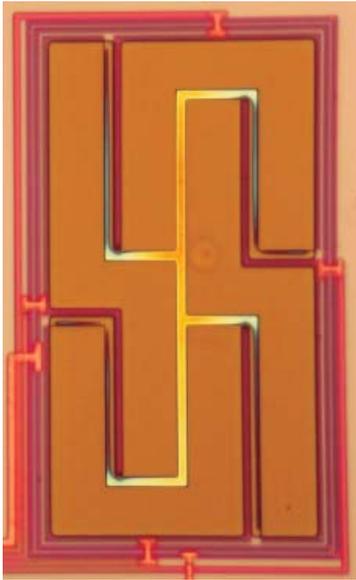
Im Laufe des letzten Jahres ist dadurch ein Programm entstanden, das diese Aufgabe übernehmen kann. Über die Oberfläche der Software lassen sich folgende Parameter einstellen:

- Koordinaten des Scanbereiches
- Anzahl der Messpunkte
- Form des Scanweges (Parallelen, Mäander, Spirale)
- Auswahl der Messgeräte
- Parameter des Kreuztisches (Geschwindigkeit, Beschleunigung, Integrationszeit, ...)

Ein typisches Beispiel dafür ist ein Flächenscan. Dabei überstreicht ein Lichtfleck mit konstanter Lichtleistung einen definierten Bereich. Am Ausgang der Schaltung werden die Messwerte für jeden angefahrenen Punkt aufgenommen.

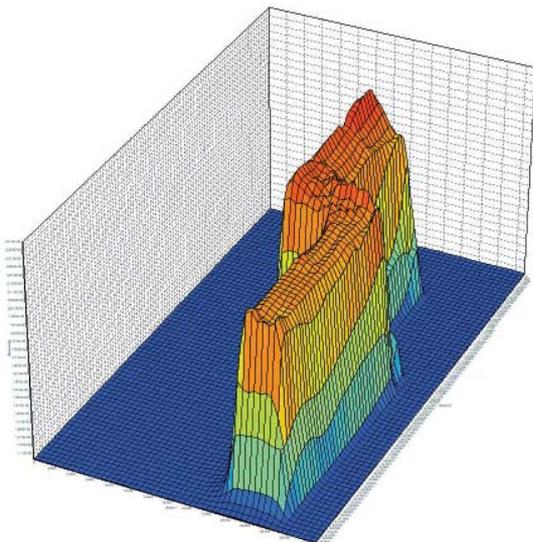
Daraus ergibt sich ein dreidimensionales Abbild der gescannten Chipfläche, das die Unterschiede in der Lichtempfindlichkeit widerspiegelt.

In Zusammenarbeit mit der Firma Melexis GmbH (Erfurt) wurden verschiedene Dioden des OEIC MLX75002 charakterisiert.



**Abb. 3:** Diodenfeld des MLX75002

Ein Teil dieser Arbeit umfasste auch einen Flächenscan, der das Übersprechverhalten der einzelnen Dioden untereinander untersuchte. Dabei wurde das gesamte Diodenfeld gescant jedoch nur ein Ausgang abgefragt. Als Ergebnis erhielt man die Ausgangsspannung bzw. die Empfindlichkeit über dem Ort als dreidimensionale Darstellung. In Abbildung 4 ist deutlich eine einzelne Dioden des Feldes zu erkennen.



**Abb. 4:** 3D-Darstellung der aufgenommenen Messwerte über dem Ort

## Ausblick

Am Waferprober sollen zukünftig verstärkt auch dynamische Messungen durchgeführt werden. Parallel dazu ist ein Ausbau der Testmöglichkeiten an der optischen Bank geplant.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Michael Meister

Tel.: +49 (3677) 69-5525

Email: michael.meister@imms.de

# Testsupport für digitale Cell-Quality-Devices

## Ziele

Für die Qualitätssicherung des Herstellungsprozesses integrierter Bauelemente und die Überprüfung der Parameter von Standardelementen für Entwurfsbibliotheken werden sogenannte Cell-Quality-Devices (CQD) verwendet.

In Zusammenarbeit mit der X-FAB Semiconductor Foundries AG (Erfurt) wurde eine Test- und Analyseumgebung entwickelt, die flexible Messungen an digitalen CQDs im standardisierten CC68-Gehäuse mit bis zu sechs Versorgungsanschlüssen ermöglicht.

## Forschungsverlauf und -stand

Kernstück der Testumgebung ist der Digitaltester HP82000 (s. Abb. 1). Er besitzt 120 I/O Kanälen mit einer Datenrate bis zu 200Mhz. Im Zusammenspiel mit einer System Stromversorgung HP6626A können von ihm vier Versorgungsspannungen direkt bereitgestellt werden.

Zur Bereitstellung der weiteren Spannungen werden zwei extern angeschlossene SourceMeter K2400 und K2420, die auch für die IDDQ-Messungen eingesetzt werden, verwendet.

Zur Adaption der Bauelemente an den Tester wurde das Loadboard (s. Abb. 2) entworfen. Das Bauelement wird dabei in einer Open-Top-Testfassung aufgenommen.

Die Spannungsversorgungsanschlüsse des Bauelements können vom Tester gesteuert und über ein Relaisfeld einzeln mit den vorhandenen Stromversorgungen verbunden werden.



Abb. 1: Digitaltester HP82000

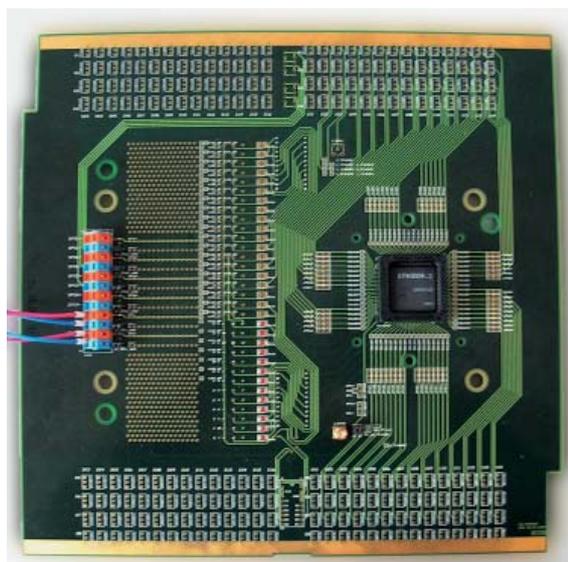


Abb. 2: Test-Loadboard für digitale CQDs

Hierdurch ist eine flexible, testbezogene Variation der Stromversorgungsparameter sowie deren Messung möglich. Die Aufschaltung von externen Messinstrumenten kann über zwei SMA Buchsen erfolgen.

Zur Temperierung der Bauelemente im Bereich von - 55 bis 150°C wurde ein Thermostrom TP04300 verwendet.

Zur Steuerung der gesamten Testumgebung wurde ein Programm in VEE entwickelt, welches das Equipment über den GPIB-Bus steuert. Hierdurch kann ein schneller, automatisierter Ablauf erreicht werden, bei dem nur der Bauelementewechsel manuell erfolgen muß. Aus den Testergebnissen können weiterhin automatisch Reports erstellt werden.

Mit der beschriebenen Testumgebung wurden ein CDQ erfolgreich charakterisiert.

## Ausblick

Mit dem Entwurf des Loadboards und der Steuersoftware wurde die Grundlage für einen effizienten Testsupport für digitale CQDs gelegt.

Schwerpunkte stellen hierbei die Verifizierung von I/O-Stufen und Memories in Silicon sowie Power- und Timinganalysen von Logik-Zellen in neuen Halbleitertechnologien dar. Für das kommende Jahr ist der Testsupport für eine Vielzahl digitaler CQDs geplant.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Roman Paris

Tel.: +49 (3677) 69-5523

Email: roman.paris@imms.de

# HF-Charakterisierung von Bauelementen und Baugruppen

TMWFK, B 509-03006

## Zielstellung

Die ständig wachsenden rechentechnischen Möglichkeiten erlauben zuverlässige Simulationen von Bauelementen und Schaltungen.

Um exakte Parametersätze und Modelle erstellen und verifizieren zu können, ist es notwendig, zuverlässige Messungen bis in den HF-Bereich durchführen zu können.

Auch der Nachweis der Funktionsfähigkeit von Produkten bis hin zur EMV-Konformität ist ohne eine umfassende HF-Messtechnik nicht denkbar.

## Spektralanalyse

Bei dieser Art von Messung werden die Komponenten eines Signals über der Frequenz gemessen. Mit der an der IMMS gGmbH vorhandenen Messtechnik lässt sich der Frequenzbereich bis 26 GHz abdecken. Mögliche Messparameter sind:

- Frequenzen
- Oberwellen / Harmonische
- Spurious
- Modulationsqualität
- Leistungsmessung

Mit speziellen Zusatzoptionen zum Spektralanalysator lassen sich folgende, ergänzende Messungen durchführen:

- Rauschzahlen (NF)
- Verstärkung
- Großsignalmessungen (IP3, P1 dB)
- Reflektometermessungen (Kabelfehler)
- Phasenrauschen

Gerade die Phasenrauschmessungen sind für das Design von Oszillatoren von entscheidender Bedeutung.

Als Beispiel sei hier die on-wafer Charakterisierung von VCO-Zellen mit unterschiedlichen Schaltungstopologien angeführt (s. Abb. 1).

## Netzwerkanalyse

Die IMMS gGmbH verfügt über Netzwerkanalysatoren, die bis 50 GHz arbeiten.

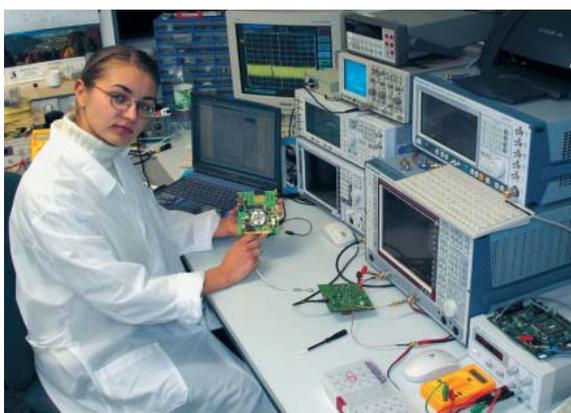


Abb. 2: Charakterisierung am HF-Messplatz

Neben der Nutzung von konventionellen 2-Port-Geräten besteht auch die Möglichkeit, 4-Port-Messungen bzw. die Bestimmung von differentiellen/symmetrischen S-Parametern zu realisieren.

Auch hier erweitern Zusatzoptionen der Geräte die Messmöglichkeiten:

Verstärkungsmessung (vektoriell, S21)

- Anpassungsmessungen (komplex, S11)
- Frequenzgangsmessungen
- Kompressionsmessungen
- Frequenzumsetzende Messungen (Mixer)
- Zeitbereichsmessungen (orts aufgelöst)

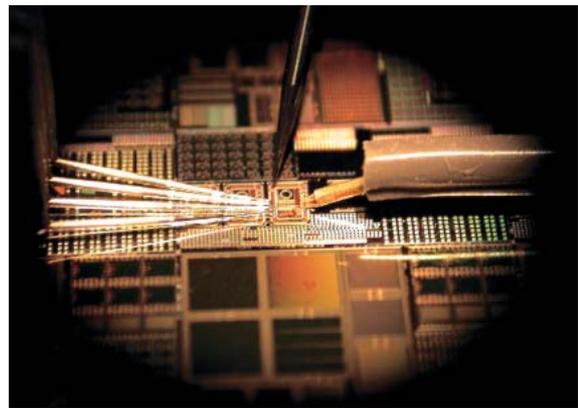


Abb. 1: VCO-Messungen on wafer (X-Fab AG)

So wurden im Rahmen des vom Land Thüringen geförderten Projektes „MoDaS“ (Modulare Datenübertragungs-Systeme) integrierte Induktivitäten on wafer charakterisiert. Diese sollen in LC-VCOs zur Frequenzerzeugung bei 900, 2400 und 5600 MHz eingesetzt werden.

## Impedanzmessungen

Als Untermenge zur Netzwerkanalyse sind die Impedanzmessungen zu sehen. Mit speziellen RLC-Messbrücken können z.B. C/V-Kennlinien von Bauelementen aufgenommen werden.

## Signalgenerierung

Zur Erzeugung von Signalen, wie sie moderne Funkssysteme verwenden, stehen I/Q-quadraturmodulierbare Generatoren zur Verfügung. Damit lassen sich komplexe Signale bis 6 GHz erzeugen. Neben den klassischen Modulationsverfahren AM und FM, sind durch Nutzung des I/Q-Modulators, gängige Mobilfunkstandards wie GSM implementiert.

Als Optionen beinhalten die Geräte arbiträre Wellformgeneratoren, die das Basisband im NF-Bereich abbilden können.

Außerdem ist es möglich, Bitfehlerraten (BER) von digitalen Signalen und Systemen zu messen (s. Abb 2).

### Zeitbereichsmessungen

Die Analyse der Kurvenform von Signalen bis zu 3 GHz ermöglichen digitale Oszilloskope. Mit vielfältigen Analysemöglichkeiten ausgestattet können Messungen im 50 Ohm System oder (bei Nutzung von Tastköpfen) hochohmig, single ended oder differentiell durchgeführt werden.

### Rauschmessungen

Eine breite Palette von Messungen können an der IMMS gGmbH durchgeführt werden:

- *Rauschparameter:*  
Hier werden von Einzelbauelementen die Rauschparameter minimale Rauschzahl  $F_{\min}$ , Optimale Rauschanpassung  $G_{\text{opt}}$  und der Rauschwiderstand  $R_n$  bestimmt.
- *1/f-Rauschen:*  
Von Transistoren wird das niederfrequente Rauschen gemessen und modelliert.
- *Phasenrauschen:*  
Die spektrale Reinheit bzw. der Jitter von Oszillatoren wird in Abhängigkeit vom Offset zum Träger gemessen.

Da alle Arten von Rauchmessungen sehr empfindlich auf Umgebungseinflüsse (HF-Signale, Temperaturänderungen) reagieren, steht für diese Messungen eine abgeschirmte Messkammer mit zur Verfügung (Abb 3).



Abb. 3: Waferprober im abgeschirmten Raum

### Kontaktssysteme

Alle Messungen können mit verschiedenen Arten der Kontaktierung der Bauelemente und Baugruppen vorgenommen werden:

- *Koaxialsysteme:*  
Hier kommen bei der Messung von Baugruppen koaxiale Steckverbinder zum Einsatz (SMA, K, 2,4 mm, BNC, N).

- *Test Fixture (Messfassung):*  
Für planare Aufbauten im Microstrip- oder Coplanar-Design bietet sich der Einsatz der Messfassung bis zu 40 GHz an (s. Abb. 4).
- *On Wafer:*  
Für die Messungen auf dem Wafer können HF-Probes (ACP, koaxial auf coplanar), DC-Nadeln (einzelne oder mehrfache) oder Probcards mit vielen Nadeln im definierten Layout eingesetzt werden. Sowohl manuelle als auch automatische Waferprober sind vorhanden (s. Abb. 1, 3).

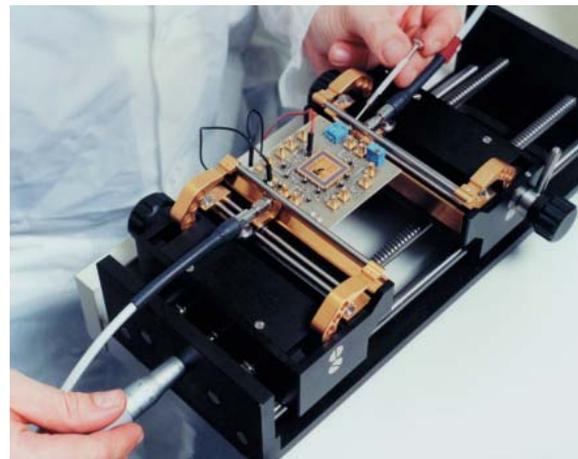


Abb. 4: Messung in HF-Testfixture

### Temperaturbereich

Die Messungen können im Bereich von  $-60^{\circ}\text{C}$  bis  $+300^{\circ}\text{C}$  durchgeführt werden. Um dies zu realisieren stehen folgende Einrichtungen zur Verfügung:

- Thermo-Chuck für Waferprober
- Klimaschrank
- Hochtemperaturofen
- Thermostream

Auf Erfahrungen in spezieller Aufbau- und Verbindungstechnik für Hochtemperaturanwendungen kann an der IMMS gGmbH zurückgegriffen werden.

### Ausblick

Der Beitrag ist nur ein grober Überblick über die Messmöglichkeiten des Instituts. Hauptaugenmerk ist die Realisierung von unkonventionellen Messverfahren. Bei unterschiedlichsten Messungen stehen sich meistens Zeit- und Frequenzbereich konträr gegenüber. Hier die optimale Lösung zu finden, ist neben herkömmlichen Messungen Hauptanliegen der IMMS gGmbH.

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Björn Bieske

Tel.: +49 (3677) 69-5526

Email: [bjoern.bieske@imms.de](mailto:bjoern.bieske@imms.de)

## Mitgliedschaften in Verbänden, Fachgruppen etc.

- **1394automation e. V.**
- **AMA Fachverband für Sensorik e.V.** - *Wissenschaftsrat, Fachausschuss „Mikrosystemtechnik und optische Sensorik“*
- **American Chamber of Commerce**
- **automotive thüringen e. V.** - *Automobilezulieferer Thüringen e. V.*
- **DFAM** - *Deutsche Forschungsgesellschaft für die Anwendung der Mikroelektronik e.V.*
- **DFN** - *Deutsches Forschungsnetz*
- **EIBA** - *EUROPEAN INSTALLATION BUS ASSOCIATION*
- **EUROPRACTICE** - *European Commission initiative*
- **Fraunhofer Gesellschaft** / IOF Jena
- **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
- **GNT** - *Gesellschaft zur Förderung neuer Technologien Thüringen e. V.*
- **IEEE** - *Circuit and Systems Society; Electron Devices Society; Solid-State Circuits Society*
- **InnoRegio Südthüringen e. V.**
- **ITG-Arbeitskreis** - *„Zusammenarbeit Industrie und Hochschulen“*
- **ITG Fachgruppe** - *„CAD für den Analogschaltentwurf“*
- **Lernende Region IIm-Kreis**
- **Linux LIVE Verband e. V.**
- **Mitglied des „Inneren Arbeitskreises“ FUTUR des BMBF**
- **MSDN** - *MICROSOFT DEVELOPERS NETWORK*
- **MTT Mikrotechnik Thüringen e. V.**
- **OptoNet e. V. Thüringen** - *Fachgruppe Optoelektronik und Bildverarbeitung*
- **Silicon Saxony e. V.**
- **Steuergremium des EDACentrums**
- **TZM Erfurt** - *Technologie-Zentrum-Mikroelektronik e. V.*
- **USB** - *Implementer Forum*
- **VDE / VDI** - *Fachgesellschaften ITG, EKV und GMM*
- **VDE / VDI** - *Arbeitskreis „Mikrotechnik Thüringen“*
- **VDMA** - *Arbeitskreis „Nutzergruppe Mikrosystemtechnik“*
- **VSIA** - *VITAL SOCKET INTERFACE ALLIANCE*

## Publikationen / Veröffentlichungen / Vorträge / Forschungsberichte / Patente

- **A new tool for industrial tribology - Filling the gap between macro- and nano-tribology**  
Achanta S., Drees D., Celis J.-P., Mollenhauer O., Dr. Spiller F. (IMMS gGmbH); 14th International Colloquium „Tribology and Lubrication Engineering“; 13.01.-15.01.2004, Esslingen
- **OPV und TIA-Optimierung mit WiCkeD**  
Dr. Boos V., Lange St.; Workshop „Effizienzsteigerung und Ausbeuteverbesserung im analogen Schaltungsentwurf mit WiCkeD“; 20.01.2004, Erfurt
- **Echtzeitsteuerungstechnik für hochdynamische Antriebe**  
Dr. Töpfer H., Braczek M., Elste Th., Grunert S., Dr. Schröder Ch.; Workshop „Innovative Produkte im Spannungsfeld von Entwicklung und Vermarktung“; 23.01.2004, Ilmenau
- **Elektrodynamische Antriebe für die Mikro- und Nanotechnik**  
Dr. Schäffel Ch.; Workshop „Innovative Produkte im Spannungsfeld von Entwicklung und Vermarktung“; 23.01.2004, Ilmenau
- **Optische Kommunikation nach IEEE 1394b über Polymeroptische Fasern**  
Dr. Töpfer H.; 18. Fachgruppen ITG-FG 5.4.1. „Optische Polymerfaser“; 09.03.2004, Erfurt
- **Modellierung von Mikroprozessoren mit MATLAB/Simulink**  
Hahn M.; Fachzeitschrift „Design & Elektronik“; Ausgabe 02, S. 40 ff
- **Evaluierung, Charakterisierung und Test von HF-ASICs**  
Bieske B., Dr. Förster K.; 3; 2004; ITG/GI/GM; 29.02.-02.03.2004, Dresden
- **Steuerung elektronischer Antriebe mit RTAI**  
Dr. Töpfer H.; Linux-Automation-Konferenz 2004; 04.-05.03.2004, Hannover
- **Flexibler Buskonverter mit µC-Linux**  
Peukert R.; Linux-Automation-Konferenz 2004; 04.-05.03.2004, Hannover
- **Dynamic measurements on organic FETs**  
Hörselmann P., Dr. Kornetzky P., Herasimovich A., Dr. Scheinert S.; Frühjahrstagung des Arbeitskreises Festkörperphysik (AKF) der DPG; 08.03.-12.03.2004, Regensburg
- **Silicon-On-Insulator circuits for application at high temperatures**  
Dr. Nakov V.\*, Dr. Nuernbergk D.\*, Richter S.\*, Bormann St.\*, Dr. Schulze V.\* (\*IMMS gGmbH), Richter S.; Workshop „SOI NATO Advanced Research“; 25-30.04.2004, Kiev, Ukraine
- **A novel low leakage EEPROM cell for application in an extended temperature range (-40°C up to 225°C)**  
Richter S., Dr. Nuernbergk D.\*, Kirsten, D.\*, Richter S.\* (\*IMMS gGmbH); Workshop „SOI NATO Advanced Research“; 25-30.04.2004, Kiev, Ukraine
- **Dynamische, mechatronische Motorsteuerung - Echtzeit-Linux zur Ansteuerung hochdynamischer Direktantriebe**  
Dr. Schröder Ch., Dr. Töpfer H.; Fachzeitschrift „Elektronik“; Ausgabe 09, S. 86 ff
- **Noise behaviour of aerostatic bearings for Ultra-Precisions Stages**  
Dr. Schäffel Ch., Hesse St.; 4th euspens International Conference and 6th Annual General Meeting, 30.05-03.06.2004, Glasgow / England

- **Planar Motion System for a Nanopositioning- and Nanomeasuring Machine (NPMM, NMM) with 200x200m<sup>2</sup> operating range**  
Dr. Schäffel Ch., Hesse St., Mohr H.-U.; 4th euspen International Conference and 6th Annual General Meeting, 30.05-03.06.2004, Glasgow / England
- **Intelligente Datenerfassungs- und -übertragungsmodule für den Einsatz in Personen- und Nutzfahrzeugen**  
Kattaneck W.; automotive thüringen e.V.-Workshop „High-tec im Auto“; 16.06.2004, Ilmenau
- **Aspekte der Systemintegration von supraleitender Hochgeschwindigkeits-Digitalelektronik**  
Dr. Töpfer H.; „Kryo 2004“ Kryoelektronische Bauelemente; 12.-14.09.2004, Goslar
- **RSFQ Logic Devices**  
Dr. Töpfer H.; ITRS-Roadmap „Emerging and Research Logic Devices“ Workshop; 24.09.2004, Leuven / Belgien
- **High-speed optoelectronic interface for RSFQ superconductive electronics**  
Badi S., Febvre P., Eusebe H., Roux J.F., Coutaz J.L., Krotkus A., Ebert B., Dr. Töpfer H. \*, Ortlepp, Th.\* (\*IMMS gGmbH), Uhlmann F.H., Kunert J., Fritsch L., Meyer H.-G.; 5th SCENET School „Superconducting Materials and Applications“; 30.08.-10.09.2004, Salamanca / Spanien
- **Vernetzung intelligenter Knoten im Automatisierungsbereich auf Basis neuer Betriebssysteme und Bustechnologien**  
Pietrusky, J. (IMMS gGmbH), Dr. Arlt, St.; Abschlussbericht Intelli-Net-Projekt, FKZ: B 609-99023, Ilmenau
- **Modulare Präzisionsantriebe für MEMS und Laserfertigung**  
Mollenhauer, O., Dr. Spiller, F. (IMMS gGmbH), Pause, S., Rode, D.; Statusseminars zum Verbundprojekt „MODAN“; VDE/ VDI-Tagung „Elektrisch - mechanische Antriebssysteme“; 06.-07.10.2004, Fulda
- **A 900-MHz Fully Integrated LC-VCO for ISM Applications**  
Teichmann P. (IMMS gGmbH), Peter J., Dr. Laute A.; European Conference on Wireless Technology; 11.-12.10.2004, Amsterdam/Niederlande
- **Linux und Echtzeit ohne MMU**  
Peukert R., Elste, Th.; Fachzeitschrift „Elektronik - SOC System on Chip“; Ausgabe 10, S. 16 ff
- **Designing a Low-Noise VCO**  
Dr. Laute A., Peter J., Teichmann P. (IMMS gGmbH); Fachzeitschrift „Microwaves & RF“, Ausgabe 11
- **Design Methodologies for Flux Quantum Circuits**  
Dr. Töpfer H.; 336. WE-Heraeus-Seminar „Processing of Quantum Information in RSFQ Circuits and Qubits“; 29.11.2004, Bad Honnef
- **Design of a Superconductor-to-Semiconductor Interface Circuit for High Data Rates**  
Ortlepp Th., Schwemlein R., Flamm J., Wunsch S., Crocoll E., Dr. Töpfer H. (IMMS gGmbH) Uhlmann, F.H., Siegel. M.; 336. WE-Heraeus-Seminar „Processing of Quantum Information in RSFQ Circuits and Qubits“; 29.11.2004, Bad Honnef

- **Technology and Design of RSFQ Circuits for Operation at High Temperatures**  
Cassel D., Ortlepp Th., Ilin K.S., Pickartz G., Kuhlmann B., Dittmann R., Klushin A., Dr. Töpfer H. (IMMS gGmbH), Uhlmann, F.H., Siegel. M.; 336. WE-Heraeus-Seminar „Processing of Quantum Information in RSFQ Circuits and Qubits“; 29.11.2004, Bad Honnef
- **Heterogeneous multi-abstraction level simulation and co-simulation**  
Ulicna E.; MEDEA+ A508 SpeAC Meeting; 30.11.2004 Paris
- **Modellbasierter Entwurf mit konfigurierbarem Prozessorkern**  
Zellmann J.; Fach- und Kooperationsworkshop „MATLAB-Integration und Performanceanalyse“; 08.12.2004, Dresden
- **Signalverarbeitung digitalisierter Sensorsignale eines Smartsensors in MATLAB/Simulink für FPGA-Implementierung**  
Ulicna E.; Fach- und Kooperationsworkshop „MATLAB-Integration und Performanceanalyse“; 08.12.2004, Dresden
- **Bi-Decomposition of Function Sets in Multiple-Valued Logic for Circuit Design and Data Mining**  
Lang Ch., Steinbach B.; Artificial Intelligence in Logic Design (Ed. S. Yanushkevich), Kluwer Academic Publishers, S. 73–107, 2004
- **Exploiting Functional Properties of Boolean Functions for Optimal Multi-Level Design by Bi-Decomposition**  
Steinbach B., Lang Ch.; Artificial Intelligence in Logic Design (Ed. S. Yanushkevich), Kluwer Academic Publishers, S. 159–200, 2004
- **Bi-Decomposition of Function Sets using Multi-Valued Logic**  
Lang Ch.; Ausgezeichnete Informatikdissertationen 2003 (Hrsg. D. Wagner et al.), GI-Edition Lecture Notes in Informatics, S. 111–119, 2004
- **Patent DE10303643**  
„Verfahren zur Herstellung von Substratkontakten bei SOI-Schaltungsstrukturen“  
Steffen Richter, Wolfgang Göttlich, Dr. Dirk Nuernbergk

## Aufsichtsrat des IMMS

### *Vorsitz:*

Herr Dr. K. Bartolmé  
Thüringer Kultusministerium (TKM),  
Erfurt

### *Stellv.:*

Herr K. Täubig  
Thüringer Ministerium für Wirtschaft,  
Technologie und Arbeit (TMWTA),  
Erfurt

### *weitere Mitglieder:*

Herr Dr. Hacker  
High Tech Private Equity GmbH,  
Düsseldorf

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

Herr Prof. Dr. G. Henning  
TU Ilmenau

Frau OR E. Strauch  
Thüringer Finanzministerium (TFM),  
Erfurt

Herr Prof. Dr. K. Augsburg  
TU Ilmenau

## Wissenschaftlicher Beirat

### *Vorsitz:*

Herr Prof. Dr. E. Kallenbach

InnoMas GmbH,  
Ilmenau

### *Stellv.:*

Herr K. Herre

Zentrum Mikroelektronik  
Dresden AG

Herr Prof. Dr. Albrecht

IAM Braunschweig

Herr Dr. W. Fuchs

Herr W. Groß

Technologiezentrum VDI/VDE  
Informationstechnik GmbH,  
Teltow

Herr Prof. Dr. H.-E. Hoenig

Institut für Physikalische  
Hochtechnologie e.V.,  
Jena

Herr Dr. B. Jakob

Technologie- und Gründerzentrum GmbH,  
Ilmenau

Herr Prof. Dr. W. Karthe

FhG Institut für Angewandte  
Optik und Feinmechanik,  
Ilmenau

Herr Dr. J. Kosch

X-FAB Semiconductor Foundries AG,  
Erfurt

Herr Prof. Dr. H. Puta

TU Ilmenau / Fak. für Informatik  
und Automatisierung

Frau Prof. Dr. D. Schmitt-Landsiedel

TU München / Fak. für Elektro-  
und Informationstechnologie

Herr L. Siegemund

IHK Südthüringen, Suhl

Herr Prof. Dr. M. Weck

Werkzeugmaschinenlabor RWTH,  
Aachen

Herr Prof. Dr. D. Hofmann

Steinbeis Transferzentrum, Erfurt

Herr Prof. Dr. G. Jäger

TU Ilmenau / Fak. für Maschinenbau

### *ständige Gäste:*

Herr Dr. M. Kummer

Thüringer Ministerium für Wirtschaft,  
Technologie und Arbeit (TMWTA), Erfurt

Herr Dr. K. Täubig

Thüringer Ministerium für Wirtschaft,  
Technologie und Arbeit (TMWTA), Erfurt

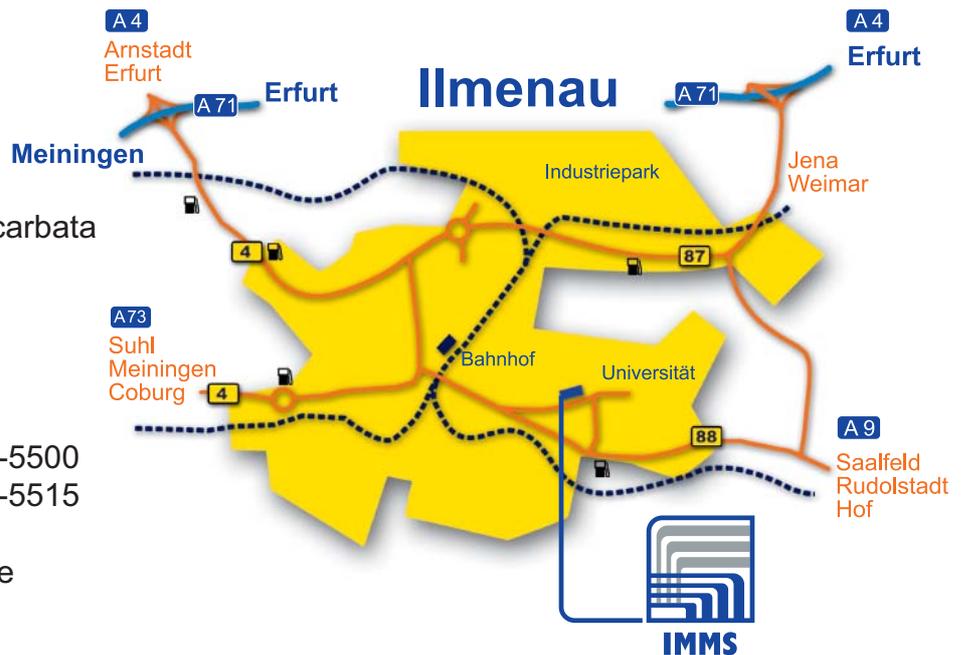
# Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik - Systeme gGmbH IMMS gGmbH

Ehrenbergstr. 27  
D - 98693 Ilmenau  
(Thüringen)

Geschäftsleitung:  
Prof. Dr.-Ing. habil. G. Scarbata  
H.-J. Kelm

Sekretariat:  
Monika Schild

Telefon: +49 (36 77) 69-5500  
Telefax: +49 (36 77) 69-5515  
Email: [imms@imms.de](mailto:imms@imms.de)  
www: <http://www.imms.de>



## Kontakte:

System Design: PD Dr. - Ing. habil. Hannes Töpfer  
Tel.: +49 (3677) 69-5540 / Email: [hannes.toepfer@imms.de](mailto:hannes.toepfer@imms.de)

Schaltungstechnik /  
Mikroelektronik: Prof. Dr. sc. techn. Franz Rößler  
Tel.: +49 (361) 427-6639 / Email: [franz.roessler@imms.de](mailto:franz.roessler@imms.de)

Industrielle Elektronik  
und Messtechnik: Dr. - Ing. Klaus Förster  
Tel.: +49 (3677) 69-5520 / Email: [klaus.foerster@imms.de](mailto:klaus.foerster@imms.de)

Mechatronik: Dr. - Ing. Christoph Schäffel  
Tel.: +49 (3677) 69-5560 / Email: [christoph.schaeffel@imms.de](mailto:christoph.schaeffel@imms.de)

Marketing: Dr. - Ing. Wolfgang Sinn  
Tel.: +49 (3677) 69-5514 / Email: [wolfgang.sinn@imms.de](mailto:wolfgang.sinn@imms.de)

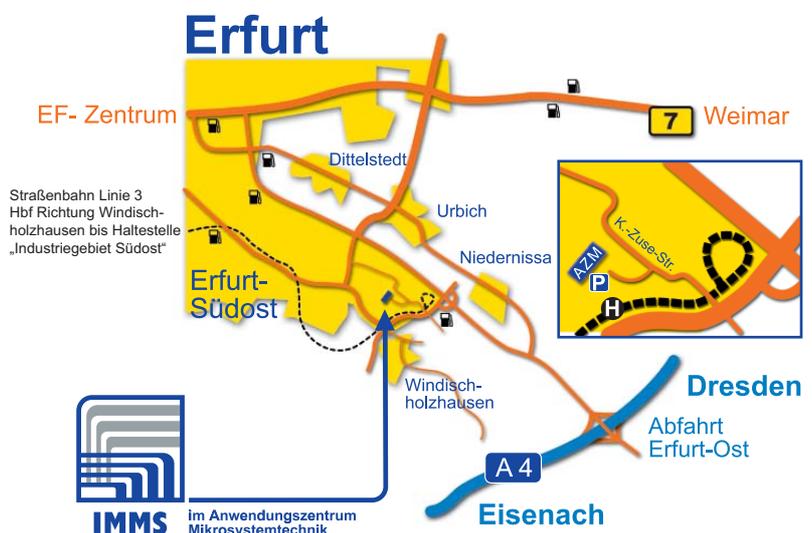
## Institutsteil Erfurt:

Konrad-Zuse-Str. 14  
D - 99099 Erfurt (Thüringen)

Telefon: +49 (361) 427-6639  
Telefax: +49 (361) 417-0162

## Kontakt:

Prof. Dr. sc. techn. Franz Rößler  
Telefon: +49 (361) 427-6639  
Email: [franz.roessler@imms.de](mailto:franz.roessler@imms.de)



[www.imms.de](http://www.imms.de)

**Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik - Systeme gGmbH**

**Standort Ilmenau -  
IMMS gGmbH**

Ehrenbergstr. 27  
D - 98693 Ilmenau (Thüringen)  
Telefon: +49 (36 77) 69-55 00  
Telefax: +49 (36 77) 69-55 15

**Standort Erfurt - IMMS gGmbH  
Institutsteil Schaltungstechnik /  
Mikroelektronik**

Konrad-Zuse-Str. 14  
D - 99099 Erfurt (Thüringen)  
Telefon: +49 (3 61) 6 63-25 00  
Telefax: +49 (3 61) 6 63-25 01