

IMMS

INSTITUT FÜR MIKROELEKTRONIK-
UND MECHATRONIK-SYSTEME gGMBH

**JAHRESBERICHT
ANNUAL REPORT 2007**

Das Institut	4
Vorwort	5
Strategisches Konzept	7
Bündelung der Kräfte in Wirtschaft und Wissenschaft	10
Modellbasierte Entwurfstechnik	12
Eingebettete Linux-Plattform zur sensornahen Signalverarbeitung	13
EtherCAT-basierte Echtzeitvernetzung mit Linux.....	15
„IMMS-Concept Truck“ - Forschungsplattform und Technologiedemonstrator.....	17
Parameteridentifikation von MEMS auf Waferebene mittels dynamischer Messungen.....	19
Präzisionsantriebstechnik	22
Der Wachstumskern VERDIAN – Vernetzte Integrierte Magnetische Direktantriebe	23
Multiaxiales Antriebssystem für Präzisions- bearbeitung und 3D-Messtechnik	25
Präzisionsantriebstechnik - Sonderforschungsbereich 622	27
Steuerungs- und Kommunikationstechnik	31
Der Wachstumskern CBS - Customer Bautronic System.....	32
Sensornetzwerken mit großer Kommunikations- reichweite und bidirektionalem Datentransfer	34
Verteilte Regelung für Mehrachsantriebe.....	37
Modulare Hard- und Softwareplattform für verteilte Regelungen	39
Integrierte Schaltungstechnik	42
OKTOPUS.....	43
Schaltungstopologien	45
Präzisionsverstärker	48
Test von differentiellen 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee ICs	51
Verbesserung von Ausbeute und Integrations- grads von HF-ICs für ISM-Anwendungen.....	56
Namen, Daten, Publikationen	59
IMMS - Aktivitäten 2007	60
IMMS - Berufsausbildung Mechatroniker und Bürokauffrau.....	61
Institut in Zahlen	63
Publikationen / Vorträge / Posterpräsentationen	64
Patentanmeldungen / Diplomarbeiten / Studienjahresarbeiten.....	66
Impressum.....	67
Anfahrtswege	68

The Institut	4
<i>Preamble</i>	5
<i>Strategic Concept</i>	7
<i>Combining the Strengths of Business and Science</i>	10
Model-based design technology	12
<i>Embedded Linux Platform for Sensor-Integrated Signal Processing</i>	13
<i>EtherCAT-based Real-Time Networking with Linux</i>	15
<i>„The IMMS Concept Truck“ - Research and Technology Demonstrator</i>	17
<i>Parameter Identification of MEMS at Wafer Level Utilizing Dynamic Measurements</i>	19
Precision drive technology	22
<i>Innovative Regional Growth Cores VERDIAN – networked integrated magnetic direct drives</i>	23
<i>Multi-Axial Drive System for Precision Processing and 3D Measurements</i>	25
<i>Precision Drive Technology – Collaborative Research Center 622</i>	27
Control and communication technology	31
<i>Innovative Regional Growth Cores CBS – Customer Bautronic System</i>	32
<i>Wide Area Sensor Networks with Bidirectional Data Transfer</i>	34
<i>Distributed Control Systems for Multi-axial Drives</i>	37
<i>Modular Hardware and Software Platform for Distributed Control Systems</i>	39
Integrated circuit engineering	42
<i>OKTOPUS</i>	43
<i>Circuit Topologies</i>	45
<i>Precision Amplifier</i>	48
<i>Test of Differential 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee ICs</i>	51
<i>Improving yield and integration level of ISM band RF ICs</i>	56
Names, Facts, Publications	59
<i>IMMS Activities 2007</i>	60
<i>Vocational Training as Mechatronician and Office Administrator</i>	61
<i>Institut in figures</i>	63
<i>Publications / Lectures / Posters</i>	64
<i>Patent Applications / Diploma Theses / Study Project Papers</i>	66
<i>Imprint</i>	67
<i>How to find us</i>	68

Das Institut

The Institute



2007 war ein spannendes und anspruchsvolles Jahr für das Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik- Systeme. Es war das Jahr, in dem der neue wissenschaftliche Geschäftsführer Prof. Dr.-Ing. Ralf Sommer gemeinsam mit der Leitung des Hauses seine strategischen Ziele formulierte und gleichzeitig die Bundesregierung mit ihrer nationalen „High-tech-Strategie für Deutschland“ klare Maßstäbe für Innovation aus Forschung und Entwicklung setzte.

Prof. Sommer formulierte seine Zielvorstellungen folgendermaßen: „*Ich möchte mit der IMMS gGmbH Spitze im Bereich Innovationen, F&E, Kundenorientierung und Qualität sein. Gemeinsam werden wir mit frischen Ideen, Leidenschaft und Initiativen die Herausforderungen der Zukunft meistern - für Thüringen, aber auch verstärkt mit internationaler Orientierung.*“ Diesen Zielstellungen folgend, hat das Institut seine wissenschaftlichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in vier Kerngeschäftsfeldern zusammengefasst:

- Integrierte Schaltungstechnik
- Modellbasierte Entwurfstechniken
- Präzisionsantriebstechnik
- Steuerungs- und Kommunikationstechnik

Das wurde auch nach Außen ab März 2007, im neuen Internetauftritt der IMMS GmbH sichtbar.

Das Engagement des Instituts in regionalen Wachstumskernen und Thüringer Clusterinitiativen wurde 2007 weiter intensiviert. In den Wachstumskernen VERDIAN (s. S. 23) und Customer Bautronic Systems (CBS, s. S. 32) konzentriert sich das Institut aktiv in seinen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf Multidiziplinarität mit klarem Marktbezug. Wissenschaftler mit Spezialkenntnissen in der Mikroelektronik, Mikrosystemtechnik, Mechatronik, Informationstechnik/Informatik sowie der Kommunikationselektronik arbeiten intensiv zusammen und entwickeln neuartige und innovative komplexe technische Systeme für die beteiligten Industriekonsortien. Die Forschungsbeiträge des Instituts ermöglichen den Industriepartnern ihre Produktivität und Effizienz bei verbessertem Qualitätsansniveau zu steigern und gleichzeitig die Funktionalität und Wettbewerbsfähigkeit ihrer Produkte zu erhöhen. Die erzielten Ergebnisse sind eng mit den strategischen Zielen der beteiligten Industrieunternehmen verbunden und schaffen die Voraussetzung für nachhaltig wirksame Wettbewerbsvorteile und Sicherheit für Investitionen.

Das Institut hat sich international weiter geöffnet. Dies belegen unter anderem der Besuch einer Wissenschaftsdelegation von Moskauer Energetischen Institut, die Teilnahme an internationalen Wirtschaftsmessen (Micronora/Frankreich) oder neue Kooperationsvereinbarungen mit internationalen Partnern.

2007 was an exciting and challenging year for the Institute for Microelectronic and Mechatronic Systems. It was the year in which the new scientific director, Prof. Dr.-Ing. Ralf Sommer, formulated his strategic objectives along with other directors of the institute and also the year in which the German federal government set clear standards for research and development-based innovation in its national „High-tech Strategy for Germany“ initiative.

Professor Sommer stated his objectives as follows: “I want IMMS GmbH to be the best in innovation, R&D, customer service, and quality. Together we can meet the challenges of the future with fresh ideas, passion, and initiative – not only for the State of Thuringia, but also on an international level.” On the basis of these objectives, the institute has grouped its scientific research and development activities into four core business areas:

- *Integrated circuits*
- *Model-based design technologies*
- *Precision drive technology*
- *Control and communication technology*

This information has also been available to the public since March 2007 on the new Internet Web site of IMMS GmbH.

The institute’s commitment to regional growth cores and Thuringian cluster initiatives was further intensified in 2007. In the VERDIAN (see page 23) and Customer Bautronic Systems (CBS, see page 32) growth cores, the institute is actively focusing its research and development activities on a multidisciplinary basis with a clear market orientation. Scientists with special expertise in microelectronics, microsystem engineering, mechatronics, information engineering/information technology, and communication electronics are collaborating intensively and developing new and innovative complex technical systems for the participating industry consortiums. The research contributions of the institute make it possible for industry partners to increase their productivity and efficiency at higher quality levels while improving the functionality and competitiveness of their products. The achieved results are closely connected to the strategic goals of the participating industry companies and provide the condition for sustained and effective competitive advantages and investment security.

The institute has also continued to expand its international presence. This is evidenced by, among others, the visit of a scientific delegation from the Moscow Energy Institute, participation in international trade shows (Micronora in France), and reaching new cooperation agreements with international partners.

Neben neuen Geschäftsanbahnungen war die Präsentation der Leistungsfähigkeit des Instituts häufig gefragt. Davon überzeugten sich im Laufe des letzten Jahres nationale und internationale Vertreter aus Wirtschaft und Politik. Beispielsweise genannt sei hier der Thüringer Kultusminister Prof. Dr. Jens Goebel, der dem Institut seine Unterstützung bei der weiteren Entwicklung zusagte: „Ihr Institut prägt die technologische Infrastruktur in Thüringen entscheidend mit. Das wird vom Kultusministerium mitgetragen.“ Weiterhin öffnete das Institut im April und Mai seine Türen der Öffentlichkeit und präsentierte sich in den in Erfurt und Ilmenau in den „Langen Nächten der Wissenschaften“.

Die zu bewältigenden Aufgaben 2007 waren von Themenvielfalt und Komplexität geprägt und wurden von den Mitarbeitern des Instituts hervorragend gemeistert. Dies zeigte sich auch durch die Auszeichnung für Thüringer Wissenschafts- und Wirtschaftserfindungen anlässlich der 59. Internationalen Fachmesse für „Ideen - Erfindungen - Neuheiten“ (IENA 2007) im November. Hier erhielt die IMMS GmbH eine Silbermedaille für das zum Patent angemeldete intelligente Energiesystem „Energieautarke Stromversorgungseinheit für ein funkgestütztes Prozessüberwachungsmodul“.



Dipl.-Ing.
Hans-Joachim Kelm
kfm. Geschäftsführer
Financial Managing Director

Univ. Prof. Dr.-Ing.
Ralf Sommer
wiss. Geschäftsführer
Scientific Managing Director

In addition to new business initiatives, a presentation of the institute's capabilities was frequently sought after as well. Over the last few years, both national and international representatives from the economic and political spheres have become convinced of the institute's ability to deliver results. For instance, the Minister for Education in Thuringia, Prof. Dr. Jens Goebel, pledged his support to the institute in its further development: "Your institute plays a major role in shaping the technological infrastructure of Thuringia. The Ministry of Education will support the institute's activities." The institute also opened its doors to the public in April and May and presented itself during the "Long Night of Sciences" events in Erfurt and Ilmenau.

The main tasks of 2007 were notable for their sheer complexity and diversity, and the institute's staff completed them with outstanding success. In fact, the efforts of the institute were recognized by an award for Thuringian scientific and economic inventions at the 59th International Trade Fair for „Ideas – Inventions – New Products“ (IENA 2007) in November. The IMMS GmbH received the silver medal for its „energy-autarkic power supply unit for a wireless-supported module for process monitoring,“ which is a patent-registered intelligent energy system.

Haupt Herausforderungen und Schwerpunkte

Ein neues Ziel des Instituts ist die Schaffung eines gemeinsamen, verbindenden wissenschaftlichen Unterbaus, der die Bereiche Mikroelektronik und Mechatronik stärker methodisch und konzeptionell vereint, indem übergreifende fundamentale Zusammenhänge und Herausforderungen von der gleichen mathematisch orientierten wissenschaftlichen Basis aus, mit verwandten Methoden und Werkzeugen und dadurch entstehenden neuen Synergiepotentialen angegangen werden.

Die drei Herausforderungen, denen sich das Institut in diesem Zusammenhang stellt, sind „Heterogenität und Komplexität“, „Zuverlässigkeit und Robustheit“ sowie „Leading-Edge“. Erstere sind eine direkte Folge des Moore'schen Gesetzes, wobei die Beherrschung der Heterogenität durch die enger werdende Kombination mechatronischer und elektrischer Komponenten bestimmt wird und das Zusammenspiel von Hard- und Software, meist in der Steuerung und Regelung, zusätzliche Herausforderungen bereithält. Das Meistern von Abhängigkeiten und Rückwirkungen ist kompliziert, da die Einzelkomponenten nicht wie bisher unabhängig voneinander optimiert werden können, um zu einem optimierten System zu gelangen. Das System muss immer in seiner Gesamtheit betrachtet und optimiert werden, was eine domänenübergreifende Simulation und Analyse unter Einbeziehung der Hierarchie und die Handhabung verschiedener Abstraktionsebenen erforderlich macht. „Zuverlässigkeit und Robustheit“ sind Anforderungen, die heutzutage oft mit Schlagworten wie „Zero Defect“ und „First-Time-Right“ verbunden werden. Das bedeutet: Sicherheit und Langlebigkeit und damit Unempfindlichkeit gegenüber Fertigungsstreuungen und Alterung. Neben der Modellierung und Simulation dieser Effekte bedarf es weiterhin anspruchsvoller Verfahren für die Entwurfszentrierung und Ausbeuteoptimierung. „Leading-Edge“ steht für den Anspruch des Instituts, mit neuen Entwurfsstrategien, innovativen Methoden und Techniken wissenschaftlich und technisch ganz vorne mit dabei zu sein, Höchstperformance zu erreichen und bestehende Grenzen durch „We know how.“ zu überwinden.

Aufbau eines „Zentrums für Designtechnologie und komplexe Systeme“

Im Zusammenhang mit dieser strategischen Ausrichtung des Instituts steht ein neues Konzept zum gemeinsamen Aufbau eines „Zentrum für Designtechnologie und komplexe Systeme“. Dieses Zentrum wird für Thüringen der Mittelpunkt und Kristallisationskern für einen Kompetenz- und Exzellenzcluster sein, in dem sich die regionale Industrie und die Wissenschaftseinrichtungen organisieren, um sich in Kooperation mit überregionalen Partnern internationale Spitzenpositionen in Forschung und Ausbildung zu si-

Main Challenges and Focus Areas

The new objective of the institute is to create a shared scientific framework that can unite the microelectronic and mechatronic fields in a more methodical and conceptual manner by approaching the main fundamental relationships and challenges from the same mathematical basis using comparable methods and tools.

The three challenges the institute wants to address in this framework are „heterogeneity and complexity,“ „reliability and robustness,“ and „leading edge“. The first challenge is the direct consequence of Moore's Law, where control over heterogeneity is determined by the increasingly intimate combination of mechatronic and electrical components and the interplay of hardware and software, which frequently gives rise to further control challenges. Mastering dependencies and after-effects is a complicated task because individual components cannot be optimized independently of each other, as was done in the past, and then combined into a single optimized system. The system must always be viewed and optimized as a whole, which means cross-domain simulation and analysis that includes the hierarchy and the handling of various abstraction levels are a key requirement. „Reliability and robustness“ are demands typically associated with catch phrases such as „zero defect“ and „first time right.“ This challenge involves achieving security and sustainability and thus protection against manufacturing dispersions and aging. Besides the modeling and simulation of these effects, sophisticated procedures for design alignment and yield optimization also remain a necessity. „Leading edge“ refers to the institute's desire to be at the forefront of science and engineering with new design strategies and innovative methods and technology, to reach the highest level of performance, and to overcome all existing boundaries through „we know how.“

Development of a „Center for Design Technology and Complex Systems“

The strategic orientation of the institute also includes a new conceptual plan for the joint development of a „Center for Design Technology and Complex Systems.“ For the State of Thuringia in Germany, this center will serve as the focal point for crystallizing a competence and excellence cluster in which regional industry partners and scientific institutions can better organize themselves and secure a leading position on the world stage in research and training in cooperation with supraregional partners. The goal of the center is to ensure the sustainable ability to methodically design complex systems through the use of modern computer tools. Its research activities will focus on helping manage current and future circuit and system complexity and develop methods and tools for increasing

chern. Ziel des Zentrums wird es sein, die Designfähigkeit für komplexe Systeme methodisch und durch den Einsatz modernster Computerwerkzeuge nachhaltig sicherzustellen. Die Forschungen sollen dazu beitragen, die gegenwärtige und zukünftige Schaltungs- und System-Komplexität zu bewältigen, Methoden und Werkzeuge zu entwickeln, um die Entwurfsproduktivität zu steigern und gleichzeitig die Entwurfsqualität und Robustheit der Schaltungen zu garantieren.

Die Beherrschung dieser Anforderungen ist eine Voraussetzung für die internationale Wettbewerbsfähigkeit in der Mikroelektronik, Mikrosystemtechnik und Mechatronik. Auf Grund der außerordentlich hohen Dynamik der Designtechnologie für komplexe Systeme müssen durch die Forschung gleichermaßen die Entwurfswerkzeuge ständig verbessert, die Entwurfsmethodiken kontinuierlich verändert und die Entwicklungsingenieure permanent fortgebildet werden.

Die Designtechnologie erforscht die Gesamtheit der Methoden, Schaltungen und Werkzeuge für die Realisierung von Mikro- und Nanosystemen. Das automatisierte Zusammenspiel dieser Komponenten wird durch die EDA gewährleistet. Die Abkürzung EDA steht für Electronic Design Automation, was mit Entwurfsautomatisierung übersetzt werden kann. EDA stellt damit für die Mikroelektronik eine Enabling-Technologie dar, die über Erfolg und Misserfolg zukünftiger Entwürfe entscheidet.

Schlüssel für Schaltungs- und Systementwurf sind innovative, hochleistungsfähige Entwurfsmethoden und Entwurfswerkzeuge, die die Industrie maximal beim Entwurf und der Entwicklung ihrer Produkte unterstützen. Besonders für komplexe Designs, wie z.B. den Analog- und Mixed-Signal-Schaltungsentwurf, liegen in diesen rechnergestützten Entwurfswerkzeugen in Verbindung mit einer systematischen Anwendungsmethodik gegenwärtig die größten Herausforderungen. Nur wer diese bewältigt, kann auch in Zukunft die technologischen Möglichkeiten ausnutzen und weiterhin wirtschaftlich erfolgreich sein.

Im „Zentrum für Designtechnologie und komplexe Systeme“ sollen hierfür alle notwendigen wissenschaftlichen und technischen Kompetenzen gebündelt werden:

- Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Entwurfsmethodik, Schaltungstechnik und Werkzeuge
- Systematisierung und Vereinheitlichung von Entwurfsmethoden, Modellierungs- und Simulationsverfahren, nicht nur auf die Analogschaltungsentwicklung beschränkt, sondern domänenübergreifend im Sinne einer multi-physikalischen Herangehensweise an den Gesamtsystementwurf mit elektrischen und mechatronischen Komponenten
- Transfer der Forschungsergebnisse in eine breite indus-

design productivity while also guaranteeing circuit design quality and robustness.

Meeting these demands is a necessity if one wants to be internationally competitive in the fields of microelectronics, microsystem engineering, and mechatronics. Due to the extraordinarily high dynamics of design technology for complex systems, the design tools must be continually improved, the design methodology continuously modified, and the development engineers constantly trained – all on the basis of research.

Design technology explores the entirety of the methods, circuits, and tools used in implementing micro and nano systems. The automated interplay of these components is ensured by EDA, or Electronic Design Automation. EDA therefore represents an enabling technology for micro engineering that determines the success or failure of future designs.

The key to circuit and system design lies in innovative, high-performance design methods and tools that fully support the design and development of industry products. Particularly with respect to complex designs such as analog and mixed signal circuit design, for example, the biggest challenges today lie in these computer-aided design tools in conjunction with a systematic application methodology. Only those capable of meeting such challenges can take advantage of the technological opportunities of the future and remain profitable.

All the scientific and technical competencies necessary for this will be bundled in the “Center for Design Technology and Complex Systems”.

- *Research and development in the field of design methodology, circuit engineering, and tools*
- *Systemization and standardization of design methods, modeling, and simulation methods that are not limited to analog circuit development but applicable to all domains in the sense of a multiphysical approach to the entire system design with electrical and mechatronic components*
- *Transfer of research results into wide industrial use based on the best international parameters*
- *Development of an excellent training model that combines the fundamental theoretical and practical know-how and skills in the area of micro and nano-electronics with comprehensive knowledge of design methodology and modern design and simulation tools*

Close integration in the existing competency fields of the university, especially from a multidisciplinary standpoint, is decisive – design technology must serve as the link between various disciplines.

- trielle Verwertung mit internationalen Spitzenparametern
- Herausbildung einer exzellenten Lehre, die tiefgreifende theoretische und praktische Kenntnisse und Fähigkeiten im Bereich der Mikro- und Nanoelektronik mit übergreifendem entwurfsmethodischen Wissen und modernen Entwurfs- und Simulationswerkzeugen verbindet.

Dabei entscheidend ist die enge Einbindung in die bestehenden Kompetenzfelder der Universität, gerade auch unter multidisziplinären Gesichtspunkten – Designtechnologie als Bindeglied zwischen den verschiedenen Disziplinen einzusetzen.

Mit dem neuen erworbenen Wissen sollen innovative Methoden und Werkzeuge zur Schaltungs- und System-Entwicklung entwickelt werden, mit dem Ziel den Know-how-Transfer insbesondere in Industriebetriebe und KMUs, die keine eigene Werkzeugentwicklung durchführen oder CAD Abteilungen haben, zu ermöglichen. Hierfür haben die Kooperationen mit führenden EDA-Herstellern, wie z.B. Cadence, MunEDA und dem Fraunhofer ITWM, eine entscheidende Bedeutung. Sie schafft die Voraussetzung, an international vorderster Front mitwirken zu können und innovative Designmethodiken, direkt gerichtet auf die Anforderungen der Industrie, zu entwickeln sowie für die Werkzeuge eine Entwurfs- und Arbeitsumgebung zu schaffen, die im Rahmen des Technologietransfers von der Industrie optimal genutzt werden kann. Es ist beabsichtigt, zukünftig einen Teil der Toolentwicklung an der Technischen Universität Ilmenau und die Anwendungsentwicklung am IMMS durchzuführen.

Bereits heute bestehen hohe Anforderungen an den Kenntnisstand der Mitarbeiter in Betrieben, die CAD einsetzen und sich mit der Entwicklung komplexer Systeme befassen. Die Industrie fordert deshalb ein Ausbildungsprofil, das diesem Anspruch gerecht wird. Das „Zentrum für Designtechnologie und komplexe Systeme“ muss sich deshalb auch um die Ausbildung von Ingenieuren für die regionalen Industriepartner kümmern. Die universitären Ausbildungsschwerpunkte müssen sich auf die mathematischen Grundlagen orientieren, in die Tiefe gehen und gleichzeitig die Verbindungen zwischen Mechatronik, System-Architekturentwurf, Sensorik, Mikroelektronik, Technologie, Schaltungsentwurf und Software herstellen, um eine solide Basis für weitere Synergien und ein übergreifendes Systemverständnis zu schaffen. Die außeruniversitäre Ausbildung muss sich ergänzend hierzu auf Anwendungsaspekte und die Förderung konkreter Problemlösungskompetenzen richten, was gleichbedeutend mit dem Transfer der wissenschaftlichen Erkenntnisse in die betriebliche Praxis ist.

This newly acquired knowledge will be used to create innovative methods and tools for circuit and system development with the goal of enabling the transfer of expertise, especially in industrial plants and small and medium-sized companies that do not develop their own tools or have their own CAD department. Cooperation with the leading EDA manufacturers such as Cadence (see separate article), MunEDA, and the Fraunhofer ITWM plays a critical role in this regard. Cooperation provides the basis for being able to participate at the international forefront and develop innovative design methodologies directly tailored to the needs of industry and to create a design and work environment for the tools that can be used by industry in an optimal manner in the course of technology transfer. The intention is to carry out some of the tool development at the Technical University of Ilmenau and all the application development at the IMMS in the future.

Even today, the requirements for employee skill levels in industrial plants that use CAD and develop complex systems are very high. As a result, the industry needs a training model that can satisfy these requirements. This means the “Center for Design Technology and Complex Systems” must also see to the training of engineers for regional industry partners. The main university education areas must be oriented toward mathematical frameworks, offer in-depth information, and establish the relationships between mechatronics, system architecture design, sensors, microelectronics, technology, circuit design, and software in order to create a solid basis for further synergies and comprehensive system understanding. Training outside of the university must be oriented toward application aspects and the encouragement of concrete problem-solving skills, which essentially is about transferring scientific knowledge into operational practice.

Combining the Strengths of Business and Science

Mit der Hightech-Strategie hat die Bundesregierung eine nationale Innovationsstrategie entwickelt, um Deutschland an die Spitze wichtiger Zukunftsmärkte zu führen. Sie verfolgt damit eine Zielrichtung für mehr Innovationen aus Partnerschaften zwischen Wirtschaft und Wissenschaft. Dies ist in der Forschungsstrategie der Thüringer Landesregierung verankert.

Für die IMMS GmbH bedeutet dies, seine Brückenfunktion von der universitären Forschung zur industriellen Anwendung im besonderen Maße gerecht zu werden und die Thüringer Wirtschaft aktiv mit voran zutreiben.

Für den Freistaat Thüringen bieten sich jetzt gute Chancen, die Investitionen in Forschung und Entwicklung zu forcieren. Durch das anhaltende Wachstum beginnen sich die Kassen in Wirtschaft und Staat wieder zu füllen. Dies eröffnet Spielräume, die konsequent für die Zukunftssicherung genutzt werden müssen. Was zeichnet erfolgreiche Branchen aus? Welche Strukturen und Herangehensweisen fördern die Entwicklung innovativer Produkte? Diese Fragen haben wir im Institut zusammen mit Partnern am Beispiel einer Querschnitts-Branche mit den Bereichen Mikro-Sensorik, -Aktorik, -Elektronik, -Systemtechnik sowie der Mess-/Prüftechnik in Thüringen untersucht.

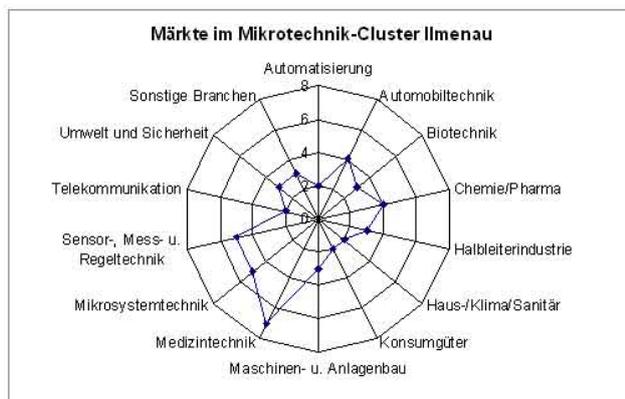


Abb. 1: Märkte im Mikrotechnik-Cluster Ilmenau
(Darstellung nach Anzahl von Unternehmen und Instituten) (Quelle: IVAM 2007)

Fig. 1: Markets in the Microtechnology Cluster at Ilmenau
(Display of number of companies and institutes) (source: IVAM 2007)

Dieser Branche ist es gelungen, sich auf den internationalen Märkten (Grafik) als Technologie-, Innovations-, und Qualitätsführer in einer Nische zu positionieren. Ihre exzellente Wettbewerbsposition verdanken die Unternehmen dieser Branche insbesondere der Fähigkeit, innovative Technologien so in kundenspezifische Lösungen umzusetzen, dass sie höchsten Anforderungen an Qualität, Präzision und Flexibilität genügen. Als Schlüssel zum Erfolg hat sich der effektive Einsatz der vorhandenen Ressourcen, wie beispielsweise der hohe ingenieurtechnische Fachkräfteanteil, erwiesen. Die Unternehmen nutzen nicht nur zunehmend neue Konzepte der Produktentwicklung, sondern gehen auch Entwick-

The High-Tech Strategy of the German federal government is a national plan for encouraging innovations and ensuring a place for Germany at the top of tomorrow's markets. One of the key goals of this strategy is to achieve more innovations in partnerships between private and academic sectors. This is firmly established in the research strategy of the Thuringia state government.

For IMMS GmbH, this has meant performing its special role as a bridge between academic research and industrial applications and thus actively driving the Thuringia economy forwards.

Thuringia is now taking advantage of the excellent opportunities to invest in research and development. The continued growth has helped fill the coffers for both public and private sectors. This grants all participants greater latitude for investing in future technologies. What are the hallmarks of a successful sector? Which structures and approaches support the development of innovative products? Together with their partners in industry, the institute has used these questions as a launching point for defining a new development strategy based on the 'enabling industries' of micro sensors and actuators, electronics, system technology, as well as measuring and testing technology in Thuringia.

In these niche sectors, Thuringia-based companies have been able to maneuver into world-leading positions (see diagram) with respect to technology, innovation, and quality. Companies can attribute their excellent competitive position in these sectors largely to their outstanding ability to develop customer-specific solutions using innovative technologies that meet the highest demands with respect to quality, precision, and flexibility. The key to their success has been the effective use of all available resources such as the large number of highly qualified engineers and technicians at these companies. In addition

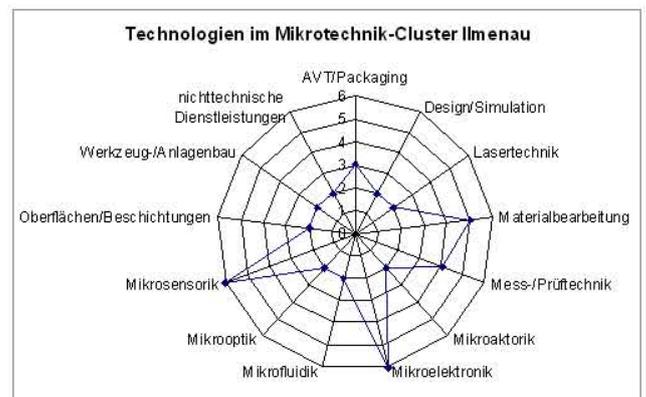


Abb. 1: Technologien im Mikrotechnik-Cluster Ilmenau
(Darstellung nach Anzahl von Unternehmen und Instituten) (Quelle: IVAM 2007)

Fig. 1: Technologies in the Microtechnology Cluster at Ilmenau
(Display of number of companies and institutes) (source: IVAM 2007)

lungskooperationen mit externen Forschungseinrichtungen oder anderen Unternehmen ein.

Wachstumskerne, wie VERDIAN (Vernetzte integrierte magnetische Direktantriebe) (s. S. 23) und CBS (Customer Bautronic System) (s. S. 32) und Cluster wie EIMuG (Elektronische Mess- und Gerätetechnik) haben sich gebildet. In diesem Rahmen gelingt es den Thüringer Firmen, sich trotz durchschnittlicher Forschungs- und Entwicklungsintensität als Technologieführer auf internationalen Märkten zu behaupten.

Um auch in Zukunft in Thüringen neue internationale Trends zu setzen, müssen die Akteure bei innovativen Produkten und Dienstleistungen einen Schritt weiter gehen. Künftig reicht es nicht mehr aus, einzelne Funktionalitäten weiter zu entwickeln. Es müssen mehr Systemintegrationen folgen und die hierfür notwendigen Prozesse und Prozesszusammenhänge betrachtet und verbessert werden. Das erfordert von den Unternehmen, sich noch stärker als bisher an den Anforderungen des Markts und an den Bedürfnissen der Kunden zu orientieren. Heute steht häufig die Funktionalität beziehungsweise Vielfalt der Funktionen eines Produktes im Vordergrund. Wenn es uns jedoch gelingt, nicht nur Einzelproblemstellungen zu lösen, sondern das Ganze zu betrachten, eröffnen sich neue Möglichkeiten und Chancen zur Innovation. Hierzu gehört auch die Schärfung einer branchenübergreifenden Sichtweise. Für diese Herausforderungen ist das Institut mit seinen Kernkompetenzen

- Integrierte Schaltungstechnik
- Modellbasierte Entwurfstechnik
- Präzisionsantriebstechnik, sowie
- Steuerungs- und Kommunikationstechnik

gut gerüstet.

In technologischer Hinsicht ist zu erwarten, dass Informations- und Kommunikationstechnologien der Haupttreiber von Veränderung bleibt. Perspektivisch deutet sich eine Konvergenz von Nano-, Bio-, Informations- und Kommunikationswissenschaften an.

Ein Markt mit großem wirtschaftlichen Potential für die Zukunft ist die Energie- und Umwelttechnik, die auch genügend Forschungspotential besitzt, um unser Wissen und Können in wertschöpfende Produkte und Dienstleistungen einzubringen.

Ansprechpartner / contact:

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

to using progressively newer concepts in product development, these companies have also initiated development collaborations with external research departments and/or other companies.

Various clusters have been formed, such as VERDIAN (Network-based Integrated Magnetic Direct Drives) (see page 23), CBS (Customer Bautronic Systems) (see page 32), and EIMuG (Elektronische Mess- und Gerätetechnik – Electronic Measurement Technology and Instrumentation).

Within this framework, the Thuringia companies have managed to emerge as international technology leaders despite a relatively average level of research and development intensity.

To ensure that Thuringia-based companies continue to set new trends in the future, the participants must go one step further in developing innovative products and services. Soon it will no longer suffice to simply continue developing the various technologies alone. An increased degree of system integration is necessary and the necessary processes and process contexts must be taken into consideration and improved. This requires that companies increase their level of engagement in directing their efforts toward the demands of the marketplace and their customers. Currently, a product's functionality or range of functionality has been dominant. However, by looking beyond each of the problems to be solved and viewing the product as a whole, companies will be exposed to new possibilities and chances for innovation. Of course, this involves intensifying the intersectoral efforts between companies.

Our institute is well-equipped to meet these challenges thanks to its core competencies in the following areas: Integrated circuits

- Model-based design technology
- Precision drive technology
- Controller and communication technology

In terms of technology, developments in information and communication technology are expected to be the main drivers of change. The current outlook indicates an increasing convergence between nanotech, biotech, IT, and communication technologies.

A future market with economic promise is without doubt the energy and environmental technology sector. Here, there is much need for research work, and our expertise and abilities can be used to realize profitable new products and services.



Modellbasierte Entwurfstechnik



Model-based design technology

Embedded Linux Platform for Sensor-Integrated Signal Processing

Bei der Systemintegration von Sensorik, insbesondere bei einer großen Anzahl von Sensoren, ist es vorteilhaft, mehr Intelligenz in die Sensoreinheiten zu verlagern. Dadurch lassen diese sich einfacher ins Gesamtsystem integrieren. Weiterhin erhöht dieser Ansatz die Modularität und damit die Erweiterbarkeit und Wartbarkeit des Systems. Zum Erreichen dieser Eigenschaften erfolgt die Signalbereitstellung durch sensornahe Signalverarbeitung.

An der IMMS GmbH wurde eine Linux-Plattform zur sensornahen Signalverarbeitung entwickelt. Sie basiert auf dem Digitalen Signalprozessor Blackfin von Analog Devices. Um die Plattform in ein Gesamtsystem zu integrieren, enthält sie eine Vielzahl von Schnittstellen, wie Ethernet, RS232, CAN, USB sowie analoge Ausgänge.

Zur Aufnahme der eigentlichen Messhardware dienen vier Adapterslots. Jeder von ihnen besitzt eine analoge Signalleitung, welche von einem A/D-Wandler mit bis zu 50 MHz abgetastet wird. Des Weiteren stehen die in der Sensorik üblichen Schnittstellen SPI, I²C sowie einige digitale I/O-Leitungen zur Verfügung. Eine wesentliche Anforderung an eine sensornahe Signalverarbeitungsplattform ist ein geringer Stromverbrauch. Die Leistungsaufnahme des entwickelten Systems liegt bei ca. 2 W.

Als Betriebssystem kommt das Open-Source-Betriebssystem μ Linux zum Einsatz. Es wurde speziell für eingebettete Systeme entwickelt, die nicht immer alle Eigenschaften herkömmlicher Prozessorarchitekturen mitbringen.

Die Verwendung dieses Betriebssystems bietet den Vorteil, dass sich Anpassungen an spezielle Applikationen wesentlich einfacher vornehmen lassen und die Entwicklungszeiten sich dadurch erheblich verkürzen. Schnittstellen können unkompliziert ins System integriert werden. Durch die Verwendung von Programmbibliotheken können bereits realisierte Funktionen in neue Applikationen übernommen bzw. eingebunden werden, wie z.B. optimierte Signalverarbeitungsalgorithmen wie Filterung oder Transformation.

Anwendungsbeispiel: Drahtloses Hochtemperaturmesssystem

Gemeinsam mit der Thüringer Firma H.-Heinz-Meßwiderstände GmbH wird ein System zur drahtlosen Abfrage passiver Hochtemperatursensoren entwickelt.

Die Messelektronik des zu entwickelnden Systems erzeugt einen Hochfrequenzimpuls der über eine Sende- und Empfangsantenne abgestrahlt wird. Dieser Impuls wird durch die Antenne des Temperaturfühlers empfangen und zum Sensor übertragen. Der Sensor, ein AOW-Resonator, wird angeregt und schwingt auf seiner Eigenfrequenz. Über die Fühlerantenne wird diese Schwingung wieder abgestrahlt. Nach Beendigung des Anregungsimpulses wird, aufgrund

When sensors are to be integrated into a system – in particular when the system contains a large number of sensors – it is often advantageous to use highly intelligent sensors. These are easier to integrate into the entire system. Furthermore, this approach increases the modularity of the system, which in turn makes it more extendable and easier to maintain. To achieve these system features, the signals are processed directly at the sensors.

The nonprofit enterprise IMMS GmbH has developed a Linux platform for directly processing signals at the sensors. This platform is based on the digital Blackfin processor from Analog Devices. It can also be integrated into a system using a range of ports such as Ethernet, RS232, CAN, USB, and even analog outputs.

The four adapter slots are provided to hold the actual measurement hardware. Each of these contains an analog signal line that is sampled at up to 50 MHz by an A/D converter. Furthermore, common sensor interfaces such as SPI, I²C, and digital I/O ports are also available. One of the main requirements of direct sensor signal processing is the low power consumption. The power consumption of the developed system is approx. 2 W.

μ Linux, an open-source product, has been implemented as the operating system. This system is specially designed for embedded systems where the processor architecture is often different from typical systems.

The advantage of this operating system is that it can be easily adapted to special applications, and development cycles are therefore considerably quicker. The ports can be integrated into the system in an uncomplicated manner. Through the use of program libraries, it is possible to integrate or embed previously developed functions (e.g., optimized signal processing algorithms such as filtering or transformations) in new applications.

Application Example: Wireless High-Temperature Measuring System

A wireless system for polling passive high-temperature sensors has been developed in collaboration with the Thuringia-based company H.-Heinz-Meßwiderstände GmbH. The electronics of the measurement system to be developed generates a high-frequency pulse that is transmitted by a transmitter/receiver antenna. This pulse is received by the antenna of the temperature probe and forwarded to the sensor. The sensor – a SAW resonator – is excited and begins to vibrate at its resonance frequency. The sensor antenna retransmits this frequency. Once the exciter pulse is stopped, the inner energy store of the sensor allows the sensor to continue transmitting this frequency for a short period (a few μ s). This signal can be detected by the antenna and forwarded to the electronic measurement

innerer Energiespeicher des Sensors, für einen kurzen Zeitraum (wenige μs) dieses Signal weiterhin gesendet. Es kann über die Antenne detektiert und an die Messelektronik weitergeleitet werden. Die Messelektronik ermittelt aus diesem Signal die Sensoreigenfrequenz und aus der hinterlegten Frequenz-Temperaturkennlinie die Temperatur des Sensors.

Überall dort, wo der Einsatz üblicher Sensorik aufgrund der Umgebungsbedingungen nicht möglich ist - dazu gehören erhöhte Temperaturen und Drücke oder auch das Stören der Verkabelung - ist der Einsatz von Sensorik, welche auf akustische Oberflächenwellen (AOW) basiert, äußerst interessant. Dies ist zum Beispiel bei der Prozessüberwachung in Lötöfen zur Bestückung von Leiterplatten der Fall.

Ansprechpartner / contact:

Dipl.-Inf. Stefan Schramm
Tel: +49 (3677) 69-5547
Email: stefan.schramm@imms.de



Abb. 1: realisierte Hardware-Plattform

Fig. 1: Implemented hardware platform

system. This system determines the resonant frequency of the sensor from this signal and determines the temperature according to the stored frequency-temperature characteristic of the sensor.

In all scenarios where the given conditions do not allow the use of conventional sensors – this includes high temperature and/or pressure environments or where cables are unwanted – surface acoustic wave (SAW) sensors are a very attractive alternative. A prime example is process monitoring in soldering furnaces used to mount components onto printed circuit boards.

Zielstellung

In der Industrieautomatisierung spielen Echtzeitbusse in zunehmendem Maße eine wichtige Rolle. Besonders im Bereich hochdynamischer Direktantriebe, der für die IMMS GmbH seit vielen Jahren einen Schwerpunkt in der Mechatronik darstellt, ist diese Thematik seit einiger Zeit hochaktuell und bildet den Hauptgegenstand der Aktivitäten der Arbeitsgruppe Mehrkoordinaten-Direktantriebe (MKDA) im Wachstumskern VERDIAN (s. S. 23). Letztlich ist die Echtzeitvernetzung mehrerer Regelungskomponenten unabdingbar für die Realisierung verteilter Regelungen (s. S. 37).

Zur Realisierung solcher verteilten Regelungen für hochdynamische Antriebe kommen die meisten herkömmlichen Feldbusse, wie z.B. CAN, nicht in Betracht, da diese in der Regel nicht für die erforderlichen hohen Datendurchsätze und Regelzyklen ausgelegt sind. Industrial Ethernet als eine Gattung von Vernetzungslösungen für industrielle Anwendungen, die zum Teil auf Standard-Ethernet-Komponenten aufsetzt, erscheint dahingegen als vielversprechender Ansatz. Mittlerweile findet sich am Markt eine Vielzahl derartiger Standards, wie PROFINET, ETHERNET Powerlink oder SERCOS-III, die häufig Weiterentwicklungen bestehender Feldbus-Standards sind.

Forschungsverlauf und -stand

Innerhalb der Arbeitsgruppe MKDA des Wachstumskerns VERDIAN (s. S. 23) fand bereits in einer frühen Phase eine Festlegung auf EtherCAT als bei allen Partnern zugrunde gelegter Industrial-Ethernet-Standard statt, um so eine Basis für eine gemeinsame Technologieplattform zu schaffen, die wechselseitige Kompatibilität und Interoperabilität gewährleistet.

EtherCAT ist ein ursprünglich von der Firma Beckhoff entwickeltes, mittlerweile als IEC 61158 standardisiertes Busprotokoll, das von der EtherCAT Technology Group (ETG) ^[1] spezifiziert wird. Dieses Konsortium hat weltweit ca. 600 Mitglieder, darunter auch die IMMS GmbH. EtherCAT basiert auf dem Physical Layer von Ethernet (IEEE 802.3) und sieht eine physisch linien- oder baum-, logisch ringförmige Busstruktur mit einem Master und bis zu 2^{16} Slaves vor. Eine Besonderheit des Konzeptes besteht darin, dass in den Slaves Daten „im Durchlauf“ in Pakete eingefügt bzw. aus diesen gelesen werden und so jeder Slave nur eine minimale Verzögerung (meist ca. 1 μ s bei komplexen Slaves) verursacht. Hierzu ist jedoch der Einsatz von Spezial-Hardware in den Slaves notwendig - typischerweise ein ASIC oder ein FPGA mit entsprechendem IP - Core. Während es für Windows-basierte Regelungen mit z.B. der Software TwinCAT ^[3] der Firma Beckhoff eine leistungsfähige Grundlage für EtherCAT-basierte Regelungsanwendungen gibt, ist Vergleichbares unter Echtzeit-Linux (RTAI, Xenomai) als lizenz-

Objective

Real-time busses are playing an increasingly important role in industrial automation applications. In particular, high-dynamic direct drives – a mechatronic technology that has been a major focus of work at IMMS GmbH for many years – are currently a hot topic. These drives are also the main area of concentration for the activities of the VERDIAN growth core for multicoordinate direct drives (see page 23). After all, real-time networking between multiple controller components is a key requirement in achieving distributed control systems (see page 37).

When implementing distributed control systems for high-dynamic drives, conventional field bus technologies such as CAN are not an option since they are usually not designed to handle high data rates and fast control cycles. Industrial Ethernet – a networking solution for industrial applications partially based on standard Ethernet components – is a much more promising approach. A range of industrial standards – such as PROFINET, ETHERNET Powerlink, or SERCOS-III – have already been established for Industrial Ethernet, and many, of these represent further developments to existing field bus standards.

Research Progress and Status

The partners in the MKDA work group of the VERDIAN Innovation Regional Growth Core decided at an early phase to standardize on the EtherCAT Industrial Ethernet standard. Thus, EtherCAT is to form the basis of the common technology platform and ensures mutual compatibility and interoperability between applications.

EtherCAT, a technology originally developed by the Beckhoff company, has been specified by the EtherCAT Technology Group (ETG) ^[1] as a standardized bus protocol in IEC 61158. In the meantime, this consortium has expanded to include approx. 600 members, with IMMS GmbH among them. EtherCAT is based on the physical layer of Ethernet (IEEE 802.3) and prescribes a physical line or tree logically ring-shaped bus structure with one master and up to 2^{16} slaves. A special aspect of this concept is that the slaves write to or read from data packets “on the fly”. Thus, each slave only causes a minimum delay (in the range of approx. 1 μ s for complex slaves). This requires using special hardware in the slaves – typically an ASIC or FPGA with a corresponding IP core.

For Windows applications, TwinCAT ^[3] from Beckhoff is a powerful software package for EtherCAT-based control applications. In contrast, there are no solutions offering a comparable scope of functionality available for license lost-free real-time operating systems (RTOS) such as real-time linux (RTAI, Xenomai). There are a few projects un-

kostenfreies Echtzeit-Betriebssystem (RTOS) in nur begrenzt nutzbarem Umfang verfügbar. Auf Seiten des Masters gibt es zwar einige wenige Projekte zur Schaffung einer Open-Source-Lösung, jedoch weisen diese zum Teil aufgrund ihres frühen Entwicklungsstadiums eine begrenzte Performanz und/oder ein begrenztes Feature-Set auf. Insbesondere fehlt die Unterstützung der im EtherCAT-Standard vorgesehenen Uhrensynchronisation zwischen den Busteilnehmern. Auf Slave-Seite finden sich als einzige für eine Linux-Unterstützung vorbereitete EtherCAT-Controller die Bausteine der Serie netX der Firma Hilscher ^[2], die jedoch Einschränkungen hinsichtlich Protokollumfangs und Performanz aufweisen.

EtherCAT unter Linux nutzen zu können, stellt für die IMMS GmbH ein wichtiges Kriterium bei den Arbeiten innerhalb des Wachstumskerns dar, da ein Industrie-PC (IPC) mit Linux eine flexiblere Plattform ist als weniger performante eingebettete Systeme. Arbeiten dazu waren die Implementierung eines Treibers und die Portierung von anwendungsnahem Code auf eine Linux-Plattform sowie die Erweiterung des Open-Source-Masters der IgH ^[4] hinsichtlich der Unterstützung des netX 500-Chips.

Ergebnis und Ausblick

Auf Basis des entwickelten Treibers wurde bisher eine grundsätzliche Nutzbarkeit des netX 500- Bausteins unter Linux erreicht und Performanzmessungen möglich. Messungen konnten Aussagen zu mit dem erweiterten Open-Source-EtherCAT-Master erreichbaren Zykluszeiten liefern. Laufende Arbeiten zielen zudem auf eine Erweiterung des Funktionsumfangs der Implementierung des EtherCAT-Masters sowie der Portierung auf eine ARM9-Plattform. Ein für die Automatisierungsmesse SPS/IPC/DRIVES'07 geschaffener Demonstrator (s. Abb. 1) zeigt anschaulich die Ansteuerung einer Reihe von Standard-EtherCAT-Klemmen durch den Open-Source-Master unter Linux und damit die Realisierbarkeit verteilter, Linux-basierter EtherCAT-Regelungen auf Basis des erreichten Arbeitsstandes. Weitere Arbeiten werden sich mit der Realisierung einer EtherCAT-PCI-Einsteckkarte für IPCs befassen, um diese als leistungsfähige EtherCAT-Slaves für verteilte Anwendungen betreiben zu können. Auf dieser Basis soll letztlich eine Experimentalplattform für die Evaluierung von Konzepten für verteilte Regelungen (s. S. 37) entstehen.

Ansprechpartner / contact:
Dipl.-Inf. Thomas Elste
Tel.: +49 (3677) 69-5543
Email: thomas.elste@imms.de

[1] <http://www.ethercat.org/>

[2] http://de.hilscher.com/files/hcde_netX-Flyer_11-2007_V1.pdf

[3] <http://www.beckhoff.de/german/twincat/>

[4] <http://www.etherlab.org/de/ethercat/>



Abb. 1: EtherCAT mit Linux

Fig. 2: EtherCAT with Linux

derway for developing an open-source solution for the bus master. However, since most of these are in an early phase of development, their performance and/or feature set is still limited. In particular, there is still no support for clock synchronization between bus nodes as prescribed by the EtherCAT standard. On the slave side, the only EtherCAT controllers supported by Linux are the netX modules from the Hilscher ^[2] company, but these are also limited with respect to protocol support and performance.

Use of EtherCAT under Linux is a key criterion for the work of IMMS GmbH within the growth core. The reason for this is that distributed control systems are currently being developed (as described above) for industrial PCs (IPCs) under Linux which are much more flexible and powerful than typical embedded systems. Much work has been done throughout 2007. This has included implementing a driver, porting application-level code to the Linux platform, and adding support for the netX 500 chip to the open source master being developed by IgH ^[4].

Results and Perspective

Using the recently developed driver as a basis, it has become possible to use the netX 500 chip in Linux and to measure the performance. Consequently, these measurements have made it possible to determine the cycle times achievable using the extended open source EtherCAT master. Current work is focusing on extending the scope of functionality of the implemented EtherCAT master and also porting this to the ARM9 platform. A demonstration system (see Fig. 1) created for the automation trade show SPS/IPC/DRIVES 2007 presents a system for controlling a series of standard EtherCAT terminals using an open source master under Linux. This serves to show that distributed, Linux-based EtherCAT control systems can already be implemented with the current level of expertise. In the future, an EtherCAT PCI plug-in card will be developed for IPCs so that these can be operated as powerful EtherCAT slaves in distributed control systems. Once this basis has been established, an experimental platform is to be developed where the various concepts of distributed control systems can be evaluated (see page 37).

„The IMMS Concept Truck“ - Research and Technology Demonstrator

Der „IMMS - Concept Truck“ ist eine von der IMMS GmbH in den letzten Jahren entwickelte Forschungs- und Demonstrationsplattform. Mit dem Truck verfügt das Institut über ein innovatives Demonstrationssystem für neuartige Anwendungen und Systemlösungen aus den Bereichen Sensorik, Signalverarbeitung, eingebettete Steuerungen und Maschine-Maschine-Kommunikation (M2M).

Neben der Technologiedemonstration dient die entwickelte Plattform für Untersuchungen wachsender Funktionsumfänge von komplexen Systemen unterschiedlichster Branchen. Hier liegt der Fokus vor allem bei der Erforschung komplexer Entwurfsprozesse und -werkzeuge, wobei sich schwerpunktmäßig mit modellbasierten Methoden beschäftigt wird.

Der „IMMS - Concept Truck“ besteht neben der eigentlichen Fahrzeugbasis aus folgenden Funktionsgruppen:

- CAN-Bus vernetzte elektronische Steuereinheiten zur Realisierung von Fahrzeugsteuerfunktionen wie Antriebs-schlupfregelung (ASR), Tempomat, Licht und Diebstahlwarnanlage (DWA)
- GPS-basierte Positionserfassung
- Überwachung des Frachtguts durch sensorische Erfassung von Temperatur und Erschütterungen
- modulares Gateway zur drahtlosen Fernabfrage und -diagnose von Fahrzeug- und Frachtdaten per WLAN und GSM/GPRS

Die enge Integration dieser Teilfunktionen ermöglicht neuartige Anwendungsszenarien wie z.B. die lückenlose, automatische Überwachung sensibler Frachtgüter inkl. Protokollierung und Fernzugriff.

Eine Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten des „IMMS - Concept Trucks“ kann durch die sensorische Erfassung der physikalischen Größen mittels selbstorganisierender drahtloser Sensornetze (Wireless Sensor Networks - WSN) erreicht werden. WSN ermöglichen eine wesentlich feingranularere und flexiblere Überwachung von Frachtgut. So kann z.B. die Temperatur oder Feuchtigkeit direkt innerhalb der Transportbehälter durch miniaturisierte Funksensorknoten gemessen werden. Die so erhaltenen Daten werden - ggf. über mehrere Zwischenstationen - zu einer zentralen Gatewayeinheit übertragen, wo sie ausgewertet und weitergeleitet werden können. Die Gatewayeinheit kann die Daten sowohl für eine Fernabfrage per GSM/GPRS als auch lokal zur Verfügung stellen. So ist beispielsweise die Ankopplung an sogenannte On-Board-Units (OBUs) im Truck denkbar, so dass deren Kommunikationseinheiten für die Datenübertragung genutzt werden können.

Der industrielle Einsatz von WSN ist derzeit noch problematisch. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Insti-

The “IMMS Concept Truck” has been developed in the past years by IMMS GmbH as a platform for demonstrating research and technology. The truck is an innovative means for the institute to demonstrate new applications and system solutions for sensors, signal processing, embedded controllers, and machine-to-machine (M2M) communication.

In addition to being used in technology demonstrations, this truck is a platform for investigating the expanding functionality of complex systems in a range of industrial applications. For the most part, this focuses on studying complex design processes and tools with a concentration on model-based methods.

In addition to the actual vehicle, the “IMMS Concept Truck” is equipped with the following features:

- CAN bus network for realizing vehicle controller functions such as traction control system (TCS), cruise control, light, and anti-theft alarm system (ATA)
- GPS (global positioning system)
- Cargo monitoring using sensors to detect temperature and jolting
- Modular gateway for wireless polling/diagnosis of vehicle and cargo data using WLAN and GSM/GPRS.

The highly integrated subfunctions allow for completely new application scenarios such as continuous, automatic monitoring of sensitive cargo together with data logging and remote access features.

The range of potential applications for the “IMMS Concept Truck” can be extended by capturing the pertinent data using self-organizing wireless sensor networks (WSN). Using WSN, it is possible to monitor cargo to a much higher degree of precision and with more versatility than previously. Thus, it is possible to measure the temperature or humidity directly inside the transport container using miniaturized wireless sensor nodes. The data captured from these sensors is transmitted – sometimes via multiple intermediate nodes – to a central gateway unit, where it can be processed and/or passed on for further use. The gateway unit can transfer the data to remote applications via GSM/GPRS or to local applications. For example, the data could be transferred to on-board units (OBUs) in the truck, thus making it possible to use the communication units there for data transmission purposes.

It is still problematic to use WSN in industrial applications. Research and development work at the institute is currently concentrating on the following aspects:

tuts sind daher auf die Untersuchungen von:

- Robustheit, Störsicherheit und Fehlertoleranz der drahtlosen Nachrichtenübertragung im Nahbereich,
- kosten- und bauraumoptimierte Hardware,
- Wartungsfreiheit durch weitgehende Energieautonomie,
- Reduzierung des Datenvolumens durch lokale Vorverarbeitung und Merkmalsextraktion aus multisensorischen Informationen und
- standardisierte Einbindung von WSN in übergeordnete Datenverarbeitungsprozesse

ausgerichtet.

Als Ergebnis der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der IMMS GmbH entstehen innovative Systemlösungen und Anwendungsszenarien für Transport und Logistik, welche die Potenziale modernster Hardware- und Softwaretechnologien aufzeigen. Mit dem „IMMS - Concept Truck“ können diese anschaulich visualisiert werden.

Ansprechpartner / contact:

Dipl.-Ing. Wolfram Kattaneck
Tel.: +49 (3677) 69 55-44
Email: wolfram.kattaneck@imms.de

- *Robustness, interference resistance, and fault tolerance of short-range wireless data transmission*
- *Hardware optimization with respect to costs and installation space*
- *Freedom from maintenance using autonomous power supplies*
- *Reduction of data volume using local preprocessing and feature extraction from multisensor data*
- *Standardized integration of WSN in higher level data processing.*

Research and development work at IMMS GmbH has resulted in innovative system solutions and scenarios for trucking and freight forwarding applications, which exploit the advantages offered by state-of-the-art hardware and software technology. The IMMS Concept Truck provides a vivid means of demonstrating these new applications.



Abb. 1: Modulares Maschine-Maschine-Kommunikations-Gateway

Fig. 2: Modular machine-to-machine communication gateway

Zielstellung

Testmethoden für MEMS, wie z.B. Drucksensoren, setzen zurzeit mehrheitlich auf Packaging-Ebene auf. Testverfahren auf Waferebene besitzen demgegenüber den Vorteil einer signifikanten Kostenreduktion durch die entfallenden Packaging- und Assembly-Schritte bei detektierten defekten Dies.

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes PARTEST wurde ein Verfahren zur Identifikation von Geometrie- und Materialparametern auf Waferebene über die optische Messung ihrer Out-of-plane-Eigenfrequenzen entwickelt. Basis dieser Identifikation ist eine FE-Modalanalyse, aus der sich die funktionale Abhängigkeit der Eigenfrequenzen von den interessierenden Sensorparametern ableiten lässt. Die Kenntnis dieser funktionalen Abhängigkeiten erlaubt die Identifikation der Sensorparameter aus den gemessenen Frequenzgängen in einem inversen Identifikationsalgorithmus. Innerhalb des Projektes wurden so die Parameter, wie Dicke und Stress, von Drucksensoren und Beams identifiziert. Weiterhin ließen sich nicht modellierbare Phänomene, wie z.B. Membran-Cracks, detektieren.

Forschungsverlauf und -stand

Die Module des in Abb. 1 dargestellten Messsystems sind ein in den Micro-System-Analyzer MSA400 von Polytec integriertes konfokales Laser-Doppler-Vibrometer, ein halbautomatischer Süß-Prober und eine elektrostatische Anregungseinheit. Die Anregungseinheit besteht aus einem Hochspannungsverstärker und einer Elektrode, die eine berührungslose Anregung von Eigenfrequenzen im MHz-Bereich ermöglicht. Das optische Messsystem und der Prober sind softwareseitig gekoppelt und erlauben so die automatische Messung eines kompletten Wafers.

Die Parameteridentifikation basiert auf FE-Simulationen, die für jeden Sensortyp einmal vor den Messungen durchgeführt werden müssen. Für die Berechnung der Parametermatrizen wurden FE-Modelle von z.B. Drucksensoren in Ansys implementiert. Durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Passivierungsschichten und Silizium sind Membranen und Beams im Regelfall vorgespannt. Dem Rechnung tragend wird eine nichtlineare prestressed Modalanalyse durchgeführt. Weitere Einflüsse wie z.B. der umgebende Luftdruck bei Absolutdrucksensoren sind ebenso in den Modellen berücksichtigt.

Die Parameteridentifikation lässt sich entsprechend Abb. 2 in die Module Mess- und Simulationseinheit sowie das eigentliche Identifikationstool mit den Submodulen Peak-Picking, polynomialer Approximation und Optimierungseinheit gliedern.

Objective

The majority of test methods for MEMS such as pressure sensors are currently being performed at the packaging level. Test methods at the wafer level currently have the advantage that they lead to significant cost savings by eliminating the need for packaging and assembly steps when a defective die is detected.

The PARTEST project sponsored by the German Federal Ministry of Education and Research focuses on identifying geometrical and material parameters at the wafer level by measuring out-of-plane resonance frequencies using optical methods. These are identified using FE modal analysis, which is used to derive the functional dependency between the resonant frequency and the sensor parameters being investigated. Once these functional dependencies are known, an inverse identification algorithm can be used to determine the sensor parameters from the measured frequency response. Until now, this project has been successful at identifying parameters such as the thickness and stress of pressure sensors and beam. Furthermore, it has also been possible to detect phenomena that cannot be modeled such as membrane cracks.



Abb. 1: Messsystem bestehend aus Prober, optischer Messeinheit und elektrostatischer Anregung

Fig. 1: Measurement system consisting of test sample, optical measuring unit, and electrostatic exciter

Research Progress and Status

The modules of the measurement system shown in Fig. 1 consist of a confocal laser Doppler vibrometer that is integrated in the MSA400 Micro System Analyzer from Polytec, a semiautomatic prober from SUSS, and an electrostatic excitation unit. The excitation unit consists of a high-voltage amplifier and an electrode, which permits the resonance frequencies to be excited in the MHz range. The

Die von ANSYS erstellten Parametermatrizen werden polynomial approximiert, um die Optimierungsrechnungen effizient durchführen zu können. Basierend auf einer definierten Genauigkeit wird dabei der Polynomgrad automatisch gewählt.

Das Messsystem liefert die Frequenzantwort des Sensors. Der implementierte schnelle und robuste Algorithmus des Peak-Picking Submoduls detektiert Peaks mit kleinen Amplituden ebenso wie eng nebeneinanderliegende Peaks, wie sie bei Unsymmetrien in quadratischen Membranen auftreten können. Im Optimierungsmodul erfolgt dann abschließend mittels nichtlinearer Least-Square-Verfahren die Identifikation der Parameter.

Beim Design des Identifikationstools wurde mit Hinblick auf einen automatischen Produktionstest besonderes Augenmerk auf eine effiziente und intuitive Nutzerschnittstelle gelegt.

Ein erstes Release des Identifikationstools ist in MATLAB realisiert und ermöglicht mit dem beschriebenen Messsystem-Setup die Parameteridentifikation eines Dies innerhalb von 2-3 Sekunden. Durch eine Optimierung der Kommunikation zwischen Prober und Messsystem sowie die Implementation des Identifikationstools in C++ lässt sich die Messzeit noch auf eine Sekunde reduzieren.

Zum Test des Verfahrens wurden die Parameter verschiedener Wafer von Absolutdruck- und Relativdrucksensoren identifiziert. Die Ergebnisse wurden an ausgewählten Sensoren mit zerstörenden Messmethoden validiert. Die optisch gemessenen und die berechneten Werte der Membrandicke weisen eine sehr gute Übereinstimmung auf und differieren im Maximum um 2%.

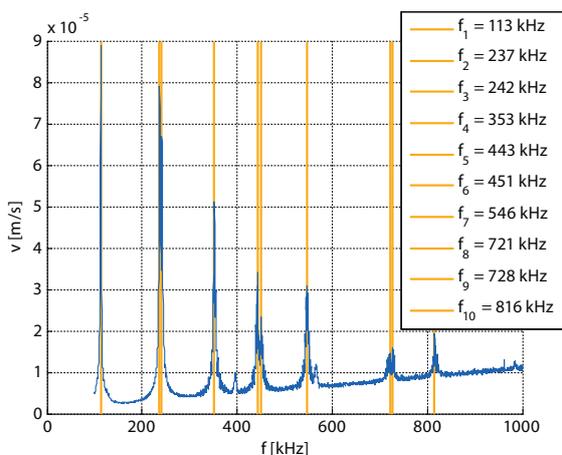


Abb. 3: Frequenzgang eines gemessenen Relativdrucksensors mit Eigenfrequenzen

Fig. 3: Frequency characteristic of measured relative pressure sensor with resonance frequencies

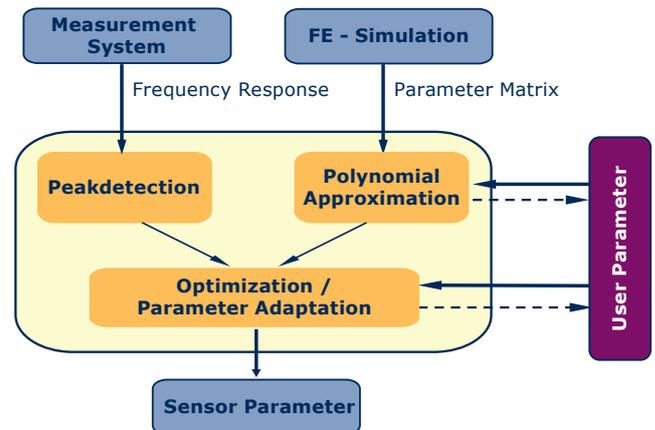


Abb. 2: Struktur der Identifikation

Fig. 2: Structure of identification

optical measurement system and the prober are linked via software and thus allow entire wafers to be measured automatically.

The parameters are identified using FE simulation that has to be performed once in advance for each of the sensor types to be tested. To calculate the parameter matrices, FE models were implemented (e.g., for the pressure sensors) in Ansys. Due to the varying thermal coefficients of expansion between the passive layers and silicon, most membranes and beams are pre-stressed. To accommodate this effect, a nonlinear pre-stressed model analysis is performed. These models also take additional factors into consideration such as the ambient air pressure for absolute pressure sensors.

As shown in Fig. 2, the parameters identification approach consists of measurement and simulation units as well as the actual identification tool with its submodules peak picking, polynomial approximation and optimization unit.

The parameter matrices created using ANSYS are approximated using polynomials to increase the efficiency of the optimization calculations. Based on a definite precision, the polynomial degree is chosen automatically.

The measurement system determines the frequency response of the sensor. The detection of peaks within the frequency response is done by the peak picking submodule. The fast and robust algorithm of this submodule is able to detect small amplitude peaks as well as densely packed peaks as can occur with nonsymmetric square membranes. Finally, the optimization module identifies the various parameters using a nonlinear least square method.

The identification tool has been designed with an efficient and intuitive user interface to allow for largely automated production processes.

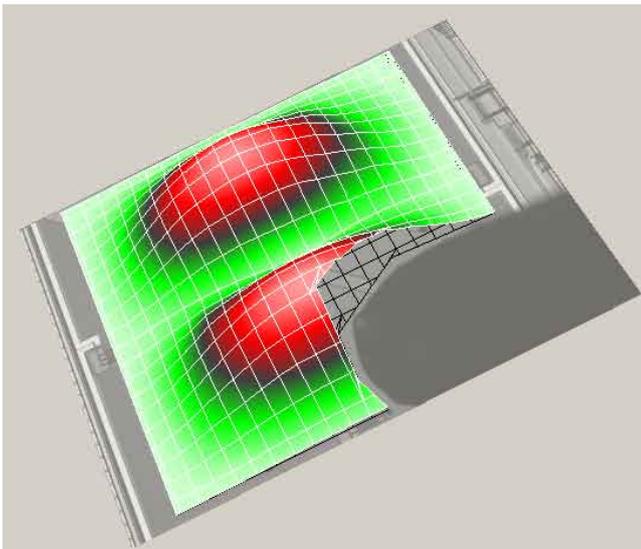


Abb. 4: Eigenform der zweiten Eigenfrequenz eines Relativdrucksensors

Fig. 4: Natural mode of 2nd harmonic resonance frequency in a relative pressure sensor

Ausblick

Das vorgestellte Verfahren eignet sich für die schnelle und genaue Parameteridentifikation von MEMS mit charakteristischen Out-of-plane-Eigenschwingungen.

Im zurückliegenden Zeitraum lag der Fokus auf der Identifikation von Drucksensoren (Membrandicke und Passivierungsstress). Für die Prozessierung von dünnen Mehrschichtsystemen bis in den nm-Bereich, wie sie zunehmend Anwendung finden, ist die Kenntnis des Schichtstresses von elementarer Bedeutung. Dem Rechnung tragend soll das vorgestellte Verfahren zukünftig bei der Bestimmung von Stress und des Stressgradienten in solchen Schichten angewandt werden.

Im Rahmen weiterführender Arbeiten ist die Überführung des Identifikationstools von matlab in C++ vorgesehen mit Hinblick auf eine industrielle Anwendbarkeit der Software.

Ansprechpartner / contact:

Dipl.-Ing. Steffen Michael
Tel.: +49 (3677) 69-5565
Email: steffen.michael@imms.de

The first release of the identification tool has been implemented with MATLAB and, together with the measurement system described above, allows the parameters to be identified in 2 to 3 seconds. By optimizing the communication between the probe and the measurement system as well as implementing the identification tool in C++, measurement times can be reduced to just 1 second.

In testing this procedure, the parameters were identified for various wafers of absolute and relative pressure sensors. The results have been validated for the selected sensors using destructive measurement methods. The optical measurements and the calculated values of the membrane thickness correlate very well to each other and differ by a maximum of 2%.

Perspective

The methods introduced here are suitable for quickly and accurately identifying MEMS parameters with characteristic out-of-plane resonance frequencies.

Until now, the focus has been on identifying pressure sensors (membrane thickness and passivation stress). To process thin membrane systems in the nm range, which are being used in ever more applications, one must know the layer stress. To account for this, the method described above shall be used in the future to calculate the stress and stress gradients in these types of layers.

Forthcoming work will also involve transferring the identification tool from MATLAB to C++ with the aim of making the software suitable for industrial applications.

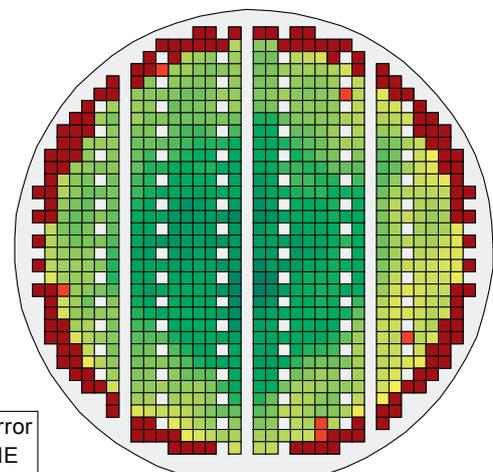


Abb. 5: Wafermap identifizierter Membrandicken

Fig. 5: Membrane thickness detected by wafer map



Präzisionsantriebstechnik



Precision drive technology

Der Wachstumskern VERDIAN – Vernetzte Integrierte Magnetische Direktantriebe

Innovative Regional Growth Cores VERDIAN – networked integrated magnetic direct drives

Das Förderprogramm „Innovative regionale Wachstumskerne“ der BMBF richtet sich an regionale Kooperationen, die über eine Plattformtechnologie verfügen und wesentliche Alleinstellungsmerkmale in ihrem Kompetenzbereich aufweisen.

Im Wachstumskern „VERDIAN“ arbeiten zehn Unternehmen aus der Rennsteigregion sowie die IMMS GmbH und die TU Ilmenau mit den FG Feinwerktechnik, Mechatronik und Entwurf Mechatronischer Antriebe sowie dem fakultäts-übergreifenden Institut für Mikro- und Nano-Technologien auf dem Gebiet der Direktantriebstechnik zusammen.

Mechatronische Direktantriebe sind dadurch gekennzeichnet, dass einerseits die Aktoren in die zu betätigenden Wirkelemente und andererseits auch Steuerungselektronik, Regelalgorithmen und Software integriert sind. Diese komplexen Systeme erfordern den Entwurf und eine Optimierung als Gesamtsystem. VERDIAN verfolgt dabei die Strategie, ausgehend von neuen Funktionsprinzipien der magnetischen Direktantriebe, unter Anwendung des ganzheitlichen Entwurfs, sowie neuer magnetischer Werkstoffe, Sensoren und Steuerungstechnik, Lösungen und Produkte mit neuen Eigenschaften zu erzielen.

In einer ersten F&E-Phase, die vom BMBF mit Fördermitteln unterstützt wird, erfolgt die Umsetzung der o.g. Strategie am Beispiel von:

- Proportional-, Schalt- und Sondermagneten
- kompakten regelbaren Wasserpumpen für die Automobilindustrie
- ultraflachen Schrittmotoren für die Kälte und Klimatechnik
- miniaturisierten Magnetventilen für die Pneumatikindustrie
- Mehrkoordinatenantrieben für Mess-, Inspektions- und Qualitätssicherungssysteme, Laserpräzisionsbearbeitungssysteme, Pick-and-Place-Systeme und Mikroproduktionssysteme.

The “Innovative Regional Growth Core” support program of the German Federal Ministry of Education and Research is oriented toward regional cooperations between companies with special platform technologies and unique selling characteristics in their areas of expertise.

The Innovative Regional Growth Cores VERDIAN consists of ten companies in the Rennsteig region of Thuringia together with IMMS and the TU Ilmenau faculties of Precision Engineering, Mechatronics and Design of Mechatronic Drives, and the interdisciplinary Institute of Micro and Nano-Technologies in the field of Direct Drive Technology.

Mechatronic direct drives are characteristically equipped with actuators in the active components and also include integrated controller electronics, controller algorithms, and software. With systems as complex as these, it is necessary to design and optimize the entire system as a whole. VERDIAN is pursuing the following strategies to develop products and solutions with new features:

- *Continued use of functional principles of magnetic direct drives*
- *Use of holistic design principles*
- *Use of new magnetic materials, sensors, and controller electronics.*

In an initial R&D phase subsidized by the German Federal Ministry of Education and Research, the strategy described above is to be implemented in the following projects:

- *Proportional, switching solenoid, and special magnets*
- *Compact controllable water pumps for the automotive industry*
- *Extremely flat stepper motors for refrigeration and air-conditioning applications*
- *Miniaturized solenoid valves for pneumatic applications*



Abb. 1: VERDIAN - die Bündnispartner

Fig. 1: VERDIAN – the consortium partner

Die Vision von VERDIAN ist es, die Rennsteigregion innerhalb von zehn Jahren zu einem weltweit führenden Anbieter für vernetzte integrierte magnetische Direktantriebe zu entwickeln. Der Verbund plant, für diesen Zeitraum, eine Umsatzsteigerung von 152 Mio € auf 400 Mio € und eine Verdopplung der Arbeitsplätze auf 800 zu erreichen. Dabei ist das Konsortium offen für die Aufnahme weiterer Firmen, in den Verbund, um die Entwicklung der Region zum High-Tech-Zentrum für magnetische Direktantriebe nachhaltig zu forcieren.

Eng verbunden mit den strategischen Zielen der Unternehmen erforscht und entwickelt die IMMS GmbH maßgeschneiderte Lösungen, die den Industriepartnern langfristig Wettbewerbsvorteile und Investitionssicherheiten bieten. Deshalb werden durch das Institut in interdisziplinären Arbeitsgruppen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu folgenden Schwerpunkten realisiert:

- Entwicklung von multiaxialen Antriebssysteme für die Präzisionsbearbeitung und für die 3D-Messtechnik (s. S. 25)
- Entwicklung von verteilten Regelungen für Mehrachs antriebe (s. S. 37)
- Entwicklung einer Echtzeitvernetzung für die Steuerung für Mehrachsantriebe (s. S. 15)
- Entwicklung einer modulare Hard- und Softwareplattform (s. S. 39)

Ansprechpartner / contact:

Dr.-Ing. Frank Spiller
Tel.: +49 (3677) 69-5561
Email: frank.spiller@imms.de

- *Multicoordinate drives for measuring, inspection, and quality assurance systems, laser machining systems, pick-and-place systems, and micro-production systems*

The vision of VERDIAN is to develop the Rennsteig region within the next ten years into a worldwide leader of network-based integrated magnetic direct drives. During this period, the group is planning to increase sales from €152 million to €400 million and to double the number of jobs to 800. This consortium is open to accept other companies so that the region can develop to become a sustainable high-tech center for magnetic direct drives.

Closely connected to the strategic goals of the participating companies, IMMS is researching and developing customized solutions that provide the industrial partners with competitive advantages and security of investment. Thus, IMMS has chosen to concentrate on the following research and development areas with its interdisciplinary research and development teams:

- *Development of multi-axial drive systems for precision machining and for 3D measuring applications (see page 25)*
- *Development of distributed control systems for multi-axial drives (see page 37)*
- *Development of real-time networks for controlling multi-axial drives (see page 15)*
- *Development of a modular hardware/software platform (see page 39)*

Multi-Axial Drive System for Precision Processing and 3D Measurements

Sowohl Präzisionsfertigung als auch Messtechnik, z.B. in der Qualitätssicherung, verlangen nach hochdynamischen mehrachsigen Positionerbewegungen, die Positionier- und Bahngenauigkeiten im sub- μm -Bereich realisieren. Zur planaren Positionierbewegung, die z.B. bei der Laserpräzisionsbearbeitung von Blechteilen zur Anwendung kommen, sind zukünftig auch räumliche Bahnkurven zu realisieren, z.B. in der 3D-Messtechnik. Die Bewegungsbereiche reichen dabei von 100 mm bis 400 mm je Achsrichtung.

Zielstellung

Ausgehend von den bisher durch die IMMS GmbH entwickelten linearen und planaren elektrodynamischen Direktantriebe mit Bewegungsbereichen bis 250 mm x 250 mm (s. Abb. 1 und Abb. 2), sollen im Projekt VERDIAN neue Maschinenkonzepte für modular aufgebaute multiaxiale elektromagnetische Antriebssysteme mit größeren Verfahrbereichen bei gleichzeitiger Steigerung der Positionier- und Bahngenauigkeit entwickelt werden. Dazu werden zahlreiche Grundlagenuntersuchungen mit drei Zielen durchgeführt. Das erste Ziel besteht in der grundlegenden Analyse der bereits realisierten Systeme, um weitere Erkenntnisse, z.B. über Einflussfaktoren auf die Genauigkeit diese komplexen Maschinen, zu erhalten. Ein zweites Ziel besteht in der Modularität und Austauschbarkeit der Antriebs-, Steuerungs-, Regelungs- und Softwarekomponenten einschließlich aller Schnittstellen. Damit sind eine arbeitsteilige Entwicklung und Fertigung sowie ein optimaler Service möglich. Drittes Ziel ist die Schaffung von Voraussetzungen für eine für die Endapplikation optimierte Auslegung der multiaxialen Antriebssysteme, ausgehend vom Modulkonzept. Ableitend daraus ist ein Schwerpunkt die Ermittlung von Funktionsstrukturen für modular aufgebaute multiaxiale Antriebssysteme unter Berücksichtigung der verschiedenen Antriebsprinzipien, der Aufbauvarianten, der verwendeten Komponente etc. Hierbei erfolgt eine sehr enge Zusammenarbeit mit den Fachgebieten Feinwerktechnik und Entwurf Mechatronischer Antriebe (Fak. Maschinenbau) der TU Ilmenau.

Weitere Grundlagenuntersuchungen befassen sich mit räumlich und funktional verteilten Steuerungs- und Regel-

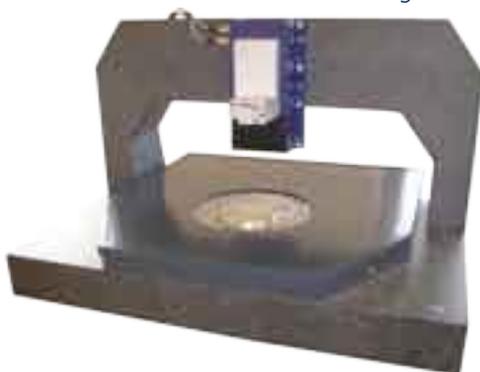


Abb. 1: Planarer elektrodynamischer Direktantrieb PPS 100-3-1-V3

Fig. 1: Planar electro-dynamic direct drive PPS 100-3-1-V3

Both precision manufacturing and measuring technology – in quality assurance applications for instance – require highly dynamic multi-axis positioning movements for achieving positioning and contour path precisions in the sub- μm range. In the future, planar positioning tasks – as required for precision laser machining of sheet metal components – are to be extended with 3D contours. This technology is also required for 3D measurements, for instance. The travel range varies from 100 mm to 400 mm depending on the axial direction.

Objective

IMMS has already developed linear and planar electro-dynamic direct drives with travel ranges of 250mm x 250 mm (see Figs. 1, 2). In the VERDIAN project, new machine concepts are to be developed for modular multi-axial electromagnetic drives with larger travel ranges and improved positioning and contour path precision. This requires much fundamental research following three main objectives. One objective is to perform a thorough analysis of the systems that have already been realized and thus gain more knowledge about the various factors affecting the precision of these complex machines. Such knowledge will assist further research and development work. The second objective is to realize drive, controller, and software components that are fully modular and interchangeable - including the various interfaces. This will make it possible to divide the labor between development and manufacturing, and also helps to optimize servicing tasks. The third objective is to establish the conditions for designing multi-axial drive systems so that they are always perfectly designed for the final application.

Therefore, this work concentrates on determining the functional structures in modular multi-axial drives with consideration of the various drive principles, construction variants, path and angle measurement systems, and other aspects. This requires close cooperation with the Precision Engineering and Design of Mechatronic Drives departments within the Faculty of Mechanical Engineering at the TU Ilmenau. Additional fundamental research is being performed on the spatial and functional strategies of distributed control systems for multi-axial drive systems in applications with high dynamic and precision requirements (see page 37). This is a prerequisite for realizing the various power classes of electronics in axis-integrated control systems with distributed intelligence. The modules communicate to each other using a flexible real-time Ethernet network, which is being developed on a mutual basis for the consortium on the basis of existing standards (see page 15).

The machine is to be operated and controlled using modular control software, which can be configured specifically

strategien für mehrachsige Antriebssysteme mit hohen Dynamik- und Genauigkeitsanforderungen (s.S.). Diese sind Voraussetzung für die achsintegrierte Steuer- und Regel-elektronik verschiedener Leistungsklassen, die die verteilte Intelligenz enthalten soll. Die Kommunikation zwischen den Modulen erfolgt auf der Grundlage einer flexiblen, echtzeitfähigen Vernetzung auf Ethernet-Basis, die in Anlehnung an bestehende Standards einheitlich für das Konsortium entwickelt wird (s. S.). Die Maschinensteuerung erfolgt auf der Grundlage einer modularen Steuerungssoftware, die applikationsspezifisch konfigurierbar sein soll und die Möglichkeiten zur Parameterselbsterkennung, Selbstdiagnose und Selbstkalibrierung enthält. Weitere Softwarekomponenten dienen der Ferndiagnose und Fernwartung sowie dem sensorgestützten Machine-Health-Monitoring (s. S.). Die Grundlagenuntersuchungen sind die Voraussetzung für die geplanten Entwicklungen von zwischen den Partnern untereinander abgestimmten Komponenten für intelligente, echtzeitfähig vernetzte Direktantriebe bzw. antriebssysteme, deren Funktionalität mit einem Experimentalaufbau zu Projektende demonstriert werden soll.

Forschungsverlauf und stand

Neben den Grundlagenuntersuchungen werden Lasten- und Pflichtenhefte erarbeitet sowie Werkstoffuntersuchungen und Technologieentwicklungen realisiert. Weitere Schwerpunkte sind Konzeptionen für neue Aktoren, Weg- und Winkelmesssysteme, Gestell- und Gehäusesysteme sowie andere Komponenten. Flankierend zu den Arbeiten an den Maschinen- und Komponentenkonzepten werden die Methodiken und Hilfsmitteln für den systematischen Entwurf komplexer mechatronischer Systeme weiterentwickelt. Dazu zählen der Funktion-Struktur-Speicher, die Bewertungs- und Auswahlverfahren, Gestaltungsrichtlinien sowie die Modellierung und Simulation, u.a. statische, dynamische und thermische FEM-Simulationen, und der Aufbau eines Hardware-in-the-Loop-Prüfstandes.

Ausblick

Im weiteren Verlauf der Projektbearbeitung werden am Institut neben den Arbeiten in den o.g. Schwerpunkten weitere Experimentalaufbauten, die der Untersuchung wesentlicher Teilaspekte dienen, realisiert. Dazu gehören Untersuchungen an Lagerungen und Führungen, zum thermischen Verhalten von Baugruppen und der EMV, die Erarbeiten der Maschinekonzepte für modular aufgebaute multiaxiale elektromagnetische Antriebssysteme, Schwingungsuntersuchungen an Maschinen zur Beurteilung der Aufstellbedingungen u.a.m.

Ansprechpartner / contact:

Dr. Frank Spiller

Tel.: +49 (3677) 69-5561

Email: frank.spiller@imms.de



Abb. 2: Laserpräzisionsbearbeitungsanlage mit planarem elektro-dynamischem Direktantrieb PPS 250-4-1-V1 (Quelle: LLT Appli-kation GmbH)

Fig. 2: Laser precision machining system with planar electro-dynamic direct drive PPS 250-4-1-V1 (reference: LLT Applikation GmbH)

for each application and which is equipped with automatic parameter detection, auto-diagnosis, and auto-calibrate functions. Other software features will include remote diagnosis and maintenance as well as sensor-aided machine health monitoring (see page 39). This fundamental research is a prerequisite for the planned development work to be performed by the VERDIAN partners. The functionality of these mutually compatible components for intelligent, real-time, network-based direct drives and drive systems is to be demonstrated with an experimental system at the completion of the project.

Research Progress and Status

During the first part of the project, fundamental research has been performed and will be continued. In addition to work on the functional structures such as the action and traveling principles, key tasks include completing the system specification, testing materials, and developing technologies. Other areas of focus include conceptions for new actuators, path and angle measurement systems, frames and enclosure systems, and other components. In addition to developing the machine and component concepts and performing fundamental research as described above, efforts will also be focused on continuing to develop the methodology and means for systematically designing complex mechatronic systems. These include the Function structure memory, the Analysis and evaluation methods, the Completion of design guidelines, the modeling and simulation, such as FEM simulations for determining the effects of resonances, external vibrations, and thermal effects and the structure of a "hardware-in-the-loop" test rig.

Perspective

In continuing this project, the institute will complete work on the main areas of distributed controller systems for multi-axial drives, real-time networks for controlling multi-axial drives and modular hardware and software platform. Besides the fundamental research activities described above, research will be performed on multi-axial drive systems for precision machining and 3D measurement applications. Moreover, additional experimental systems will also be realized.

Precision Drive Technology – Collaborative Research Center 622

Die Entwicklungstrends auf dem Gebiet der mehrdimensionalen Präzisionspositioniertechnik werden vor allem durch die Halbleiterindustrie, in zunehmendem Maße auch durch Optik-, Mikro- und auch Nanotechnologien definiert und gehen hin zu höchster Präzision in immer größeren Verfahrbereichen. So fordern die effektive Strukturierung und Vermessung von Masken und Wafern, wie auch die Vermessung großvolumiger mechanischer Präzisionsbauteile Positionierbereiche bis zu 300 mm x 300 mm und Reproduzierbarkeiten und teilweise auch Unsicherheiten im Bereich weniger Nanometer. Bisherige, konventionell strukturierte Antriebssysteme stoßen bei diesen hohen Anforderungen aus Industrie und Forschung zunehmend an ihre Grenzen.

Zielstellung

Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich die IMMS GmbH intensiv mit der Entwicklung von Präzisionsantriebssystemen. Das Ziel der Forschungsarbeiten ist die Erarbeitung der wissenschaftlichen Grundlagen für die Realisierung von Nanopositioniersystemen für große Verfahrbereiche und deren anschließende Umsetzung in konkreten Anwendungen. Dabei bilden die hervorragenden Positioniereigenschaften integrierter Mehrkoordinatendirektantriebe, sowie das Know-how und die langjährigen Erfahrung des Instituts in der Auslegung und Gestaltung dieser Positioniersysteme die Basis für deren Weiterentwicklung zu Nanopositioniersystemen. Besonders die Antriebsintegration zu einem planaren Direktantriebssystem mit einer einfachen kinematischen Struktur, wenigen bewegten Teilen in Verbindung mit den Vorteilen einer aerostatischen Führung des Läufers, ermöglichen eine einzigartige Kombination von Dynamik und Präzision.

Mit diesen Forschungsarbeiten ist das Institut als ein Teilprojekt in den Sonderforschungsbereich 622 „Nanopositionier- und Nanomessmaschinen“ der TU Ilmenau eingegliedert. Für die hier angestrebte Anwendung als Nanomessmaschine nimmt die Maschinenmetrologie eine besondere Rolle ein und bestimmt die Randbedingungen für das einzusetzende Positioniersystem. So kommen Laserinterferometer als hochauflösende Weg- und Winkelmesssysteme zum Einsatz, die so angeordnet sind, dass Fehler erster Ordnung („Abbe-Fehler“) minimiert werden. Die Aufgabe des Positioniersystems besteht in der Positionierung des Reflektors, der als Zerodur - Raumspiegel ausgeführt ist und zusammen mit dem Messobjekt bewegt wird. Langfristig wird die Realisierung eines Systems mit folgenden Eigenschaften angestrebt:

- Verfahrbereich: 350 x 350 x 50 mm³
- Messauflösung: 0,1 nm
- Positionierungsunsicherheit: 3 nm
- Verfahrgeschwindigkeit in x, y : 10 mm/s
- Umgebung: Klimakammer, Vakuum

Current development trends in multidimensional precision positioning technology are largely led by the semiconductor industry but also increasingly by optics, micro, and nanotechnology. The general tendency is toward maximum precision for increasingly large ranges of travel. Applications where masks and wafers are to be structured accurately and efficiently or where high-volume precision components are to be measured require travel ranges of up to 300 mm x 300 mm, reproducibilities, and, to certain degree, even uncertainties in the range of just a few nanometers. With the ever higher requirements of industry and research, conventionally structured drive systems are increasingly reaching their limits.

Objective

In view of this background, IMMS GmbH is working intensively on the development of precision drive systems. The goal of the research work is to develop the scientific fundamentals for nanopositioning systems with large travel ranges and to realize such systems for specific applications. By building on the outstanding positioning capabilities of integrated multi-coordinate direct drives and our institute's many years of experience and expertise in designing and configuring such positioning systems, we intend to continue this work with the goal of realizing nanopositioning systems. In particular, use of an integrated planar direct drive with a simple kinematic design and few moving parts together with the advantages of aerostatic slider guidance make it possible to achieve a unique combination of dynamics and precision.

This research work is a subproject in the Collaborative Research Center 622 "Nanopositioning and Nanomeasuring Machines" of TU Ilmenau. The nanomeasuring machine application described here makes special allowance for machine metrology and determines the basic requirements for the positioning system to be developed. Thus, laser interferometers are used as high-resolution position and angle measurement systems, which are arranged to minimize first-order errors ("Abbe error"). The task of the positioning system is to position a Zerodur reflector (spatial mirror) and to move it together with the device under test. In the long term, a system with the following properties is being planned:

- *Travel range: 350 x 350 x 50 mm³*
- *Measurement resolution: 0.1 nm*
- *Positioning uncertainty: 3 nm*
- *Travel speed in x, y: 10 mm/s*
- *Surrounding: Climatic chamber, vacuum*

The following research goals were derived from the system properties above:

Aus dieser Zielstellung leiten sich die wissenschaftlichen Arbeitsziele ab:

- Reduzierung der Positionierungsunsicherheit planarer Direktantriebe bis in den Bereich weniger Nanometer
- Untersuchung der Einflussfaktoren und Hauptansatzpunkte für die Erzielung geringster Positionierungsunsicherheiten bei Verfahrbereichen von einigen 100 mm
- Entwicklung von Konzepten für vakuumtaugliche Antriebssysteme mit großen Verfahrbereichen (350 mm x 350 mm)

Forschungsverlauf- und -stand

Die vielfältigen Arbeits- und Forschungsbereiche für das Erreichen dieser Zielstellung lassen sich in zwei Gruppen zusammenfassen:

- Erfassung, Reduzierung bzw. Eliminierung externer und interner Störungen
- Verbesserung und Optimierung der Systemübertragungseigenschaften

Gegen externe Störungen, wie z.B. Gebäudevibrationen und Schall, wird hauptsächlich eine möglichst gute Isolation bzw. Abschirmung eingesetzt. Bei intern generierten Störungen wie z.B. der Erwärmung der Motorspulen oder der Beeinflussung des Messraumes durch den Luftstrom der Luftlager wird durch gezielte Auslegung und Optimierung der einzelnen Baugruppen und durch den Einsatz einer hochgenauen Temperierung bzw. Abdichtung eine Minimierung der Störwirkung erreicht.

Die Verbesserung und Optimierung der Systemeigenschaften beinhaltet vor allem die Realisierung eines geeigneten Übertragungsverhaltens des elektromechanischen Systems. Dies umfasst die Gestaltung und Simulation des mechanischen Systems genauso wie die FEM-basierte Auslegung der Motorspulen und der Kommutierung, die Erfassung ortsabhängiger Effekte sowie die Modellierung und Simulation

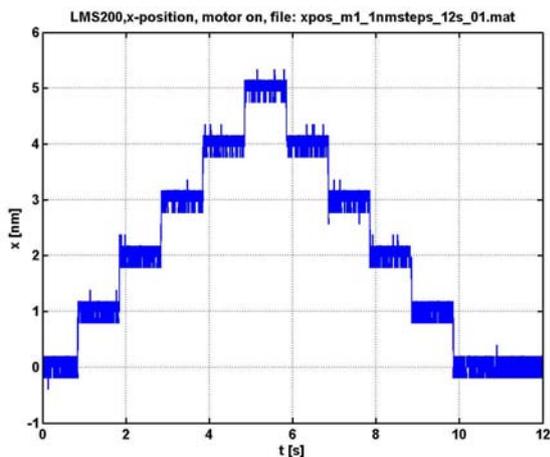


Abb. 1: Positionierung in Schritten mit $\Delta x = 1$ nm mit dem LMS200 (Primärwerte)
Fig. 1: Positioning in steps of $\Delta x = 1$ nm using LMS200 (primary values)

- Reduction of positioning uncertainty of planar direct drives down to a range of just a few nanometers
- Investigation of factors and main approaches for achieving a reduction in positioning uncertainty for travel ranges of a few 100 mm
- Development of concepts for vacuum-compliant drive systems with large travel ranges (350 mm x 350 mm)

Research Progress and Status

The many facets of the work and research performed on this project can be classified in two groups:

- Detection, reduction, and/or elimination of external and internal disturbance
- Improvement and optimization of system transfer behaviour.

To eliminate external disturbances such as floor vibration and acoustic noise, excellent insulation or shielding is required. To reduce the effect of disturbances originating within the system such as motor coil heating or airflow from the air bearings, the various components are to be specially designed and optimized, and high-precision tempering and sealing procedures are to be implemented. The main aspect of improving and optimizing the system is to achieve a suitable electromechanical transfer function. This encompasses the design and simulation of the mechanical system as well as the FEM-based design of the motor coils and commutation, detection of local effects, and also modeling and simulating mechatronic systems as closed loops.

The results achieved with the LMS200 serve to illustrate the effectiveness of these measures. The LMS200 is a linear positioning system with a travel range of 200 mm and was introduced in the 2006 annual report. By implementing the measures described above, it was possible to reduce the servo error of the LMS200 to below 0.5 nm, thus making it possible to use step sizes of $\Delta x = 1$ nm and smaller (Fig. 1).

However, further investigations revealed significant fluctuations in the achievable servo error between 0.4 nm and 1.6 nm within the given travel range (Fig. 2, u_{x-1}). One possible cause for this effect is the position-dependent change in the transfer function of the mechanical system. By making detailed measurements, it is possible to determine the position-dependent shift in the resonance frequencies and take these into consideration in the controller model.

A second possible cause for the offset deviation is a change in the motor constant K_m within the area of travel. By measuring the true force-displacement characteristic and using this as a basis for recalculating the

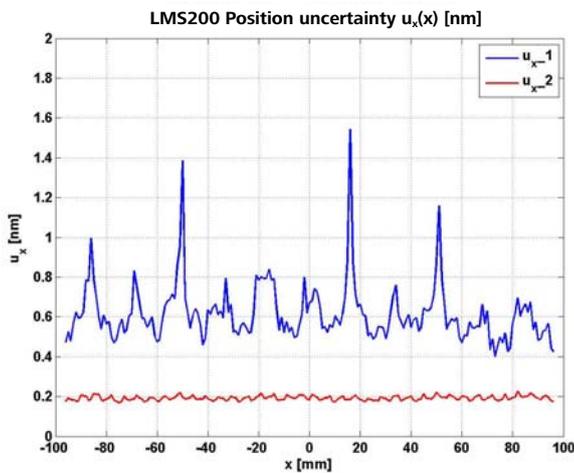


Abb. 2: Regelabweichung des LMS200 innerhalb des Verfahrbereiches
 Fig. 2: Servo error of LMS200 within the travel range

des mechatronischen Systems als geschlossener Regelkreis. Ein Beispiel für die Wirksamkeit dieser Maßnahmen sind die am LMS200 erzielten Ergebnisse. Der LMS200 ist ein lineares Positioniersystem für einen Verfahrbereich von 200 mm und wurde im Jahresbericht 2006 vorgestellt. Durch die Umsetzung der oben beschriebenen Maßnahmen konnte die Regelabweichung des LMS200 bereits bis auf unter 0.5 nm reduziert werden, so dass Schritte mit Schrittweiten von $\Delta x = 1$ nm und darunter möglich sind (s. Abb. 1). Eine eingehende Untersuchung zeigte jedoch, dass innerhalb des Verfahrbereichs deutliche Schwankungen der erreichbaren Regelabweichung zwischen 0.4 nm und 1.6 nm auftreten. (s. Abb. 2, u_{x-1}). Eine Ursache hierfür ist die ortsabhängige Änderung des Übertragungsverhaltens des mechanischen Systems. Durch detaillierte Messung kann die ortsabhängige Verschiebung der Resonanzfrequenzen des mechanischen Systems ermittelt und im Reglermodell berücksichtigt werden. Eine zweite Ursache für die Variation der Regelabweichung ist die Änderung der Motorkonstante k_m innerhalb des Verfahrbereiches. Durch eine Messung der realen Kraft-Weg-Kennlinie und eine Neuberechnung der Kommutierung auf dieser Basis konnte Schwankung deutlich reduziert werden. Im Ergebnis der Arbeiten werden so ortsabhängige Änderungen im Antriebssystem berücksichtigt, was eine Regelabweichung von $u_x < 0.3$ nm im gesamten Verfahrbereich ermöglicht (s. Abb. 2, u_{x-2}).

Zur gezielten Analyse des Einflusses verschiedener Störungen innerhalb des Antriebssystems wurde für den LMS200 ein dynamisches Fehlerbudget aufgestellt. Dabei werden die Teilsysteme des elektromechanischen Systems durch rechnerisch ermittelte Übertragungsfunktionen, wie auch auf Basis von gemessenen Übertragungseigenschaften modelliert. Als Störungen werden Wandlerrauschen (ADC, DAC), Rauschen von Endstufen und Messsystem, Fundamentvibrationen und Vibrationen durch die Spulenkühlung berücksichtigt (s. Abb. 3).

commutation, it was possible to reduce these fluctuations significantly. The final results of this research work take the position-dependent changes of the drive system into consideration, thus making it possible to achieve an servo error deviation of $u_x < 0.3$ nm throughout the entire travel range (Fig. 2, u_{x-2}).

To specifically analyze the effects of various disturbance factors within the drive system, a dynamic error budget has been deployed for the LMS200. To do this, the various electromechanical subsystems are modeled using the computed transfer functions as well as the measured transfer behavior. Noise from the converters (ADC, DAC), amplifier noise and measurement system noise, vibrations in the building foundation, and vibrations in the coil cooling have all been taken into consideration (see Fig. 3).

The result of the dynamic error budget is the cumulative amplitude spectrum of the position signal x and, for large frequencies, this corresponds to the standard deviation of the signal (see Fig. 4). Based on the cumulative amplitude spectrum, it is possible to evaluate how the various disturbance factors contribute to the total uncertainty as well as their distribution as a function of frequency. In this way, it is possible to directly identify the critical disturbing factors and determine appropriate corrective measures.

To transfer the results and extend the investigations to a multidimensional application, a test system was set up using the PPS100-3 planar motor. The travel range of the positioning system is \varnothing 100 mm, and the displacement and angle are measured using laser interferometers. This concept makes use of a Zerodur slider, which thus serves directly as the measurement mirror and eliminates the need to mount an additional spatial mirror onto the slider. In the first step of realizing this project, the system was assembled using an otherwise identical slider made of aluminum.

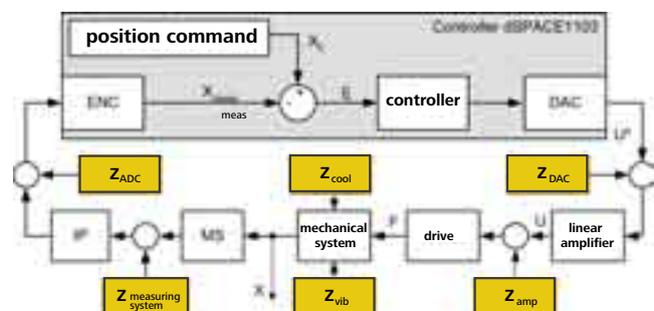


Abb. 3: Simulationsmodell mit Störungen
 Fig. 3: Simulation model with disturbances

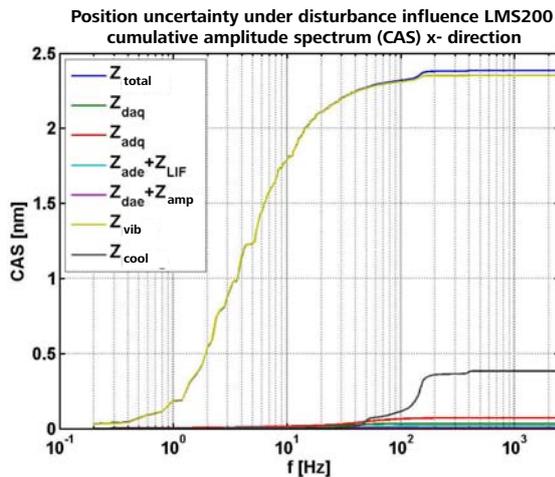


Abb. 4: Kumuliertes Amplitudenspektrum
Fig. 4: Cumulative amplitude spectrum

Im Ergebnis liefert das dynamische Fehlerbudget das kumulierte Amplitudenspektrum des Positionssignals x , welches für große Frequenzen der Standardabweichung des Signals entspricht (s. Abb. 4). Anhand des kumulierten Amplitudenspektrums kann nun der Beitrag der verschiedenen Störungen zur Gesamtunsicherheit und auch deren frequenzabhängige Zusammensetzung beurteilt werden. Auf diese Weise können kritische Störungen direkt identifiziert und Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden.

Zur Übertragung der Ergebnisse und Erweiterung der Untersuchungen auf eine mehrdimensionale Anwendung wird ein Testaufbau mit dem Planarmotor PPS100-3 realisiert. Das Positioniersystem hat einen Verfahrbereich von $\varnothing 100$ mm und die Weg- und Winkelmessung erfolgt auch hier mit Laserinterferometern. Das Konzept sieht einen Läufer aus Zerodur vor, der die Messspiegel direkt trägt, so dass keine zusätzliche Raumspiegelecke vom Läufer zu tragen ist. In einem ersten Realisierungsschritt erfolgt die Inbetriebnahme des System mit einem baugleichen Läufer aus Aluminium.

Ausblick

Zukünftige Arbeiten auf diesem Gebiet umfassen die Inbetriebnahme des Planarmotortestaufbaus und die schrittweise Umsetzung des Zerodur-Läufer Konzeptes. Darüber hinaus fließen die bisherigen Erkenntnisse in die Konstruktion und den Aufbau eines mehrachsigen Demonstrators für $\varnothing 250$ mm ein. Langfristig besteht das Ziel der Arbeiten auf dem Gebiet der Präzisionsantriebstechnik in der Realisierung eines Präzisionspositioniersystems mit einem Verfahrbereich von 350 mm x 350 mm und magnetischen bzw. aerostatischen Führungen für den Einsatz im Vakuum.

Perspective

Future work in this area will involve putting the planar motor test setup into operation and thus gradually implementing the Zerodur slider concept.

Furthermore, the expertise gained over past projects will be used in constructing and setting up a multi-axial demonstration system with a travel range of $\varnothing 250$ mm.

Our long-term research goal in precision drive technology is to develop a precision positioning system with a travel range of 350 mm x 350 mm with magnetic and/or aerostatic guidance for use in vacuum.

Ansprechpartner / contact:

Dipl.-Ing. Steffen Hesse

Tel.: +49 (3677) 69-5567

Email: steffen.hesse@imms.de

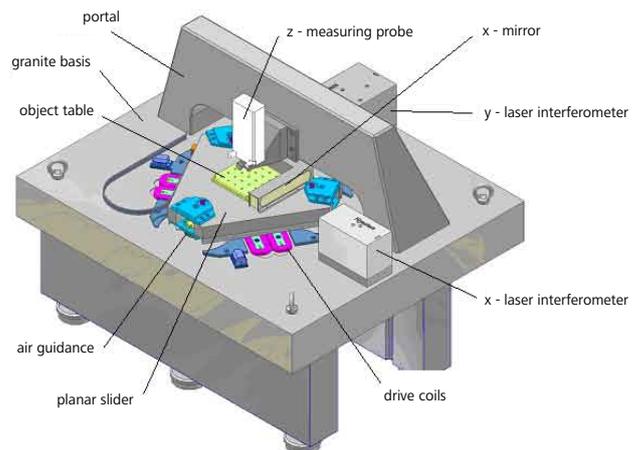


Abb. 5: 3D-Entwurf des Testaufbaus mit Planarmotor PMS100-3
Fig. 5: 3D design of test setup with planar motor PMS100-3



Steuerungs- und
Kommunikationstechnik



Control and
communication technology

Innovative Regional Growth Cores CBS – Customer Bautronic System

Im Wachstumskern "Customer Bautronic System" [1] sind neun regionale Partner mit der Zielstellung vereinigt, eine Systemplattform für eine erstmals durchgängige Nutzerintegration bei der Planung, Konfiguration und Betrieb von Gebäudeautomation zu schaffen. Damit soll erreicht werden, dass ein Gebäudenutzer sein individuelles Optimum bezüglich

- Nutzwert,
- Kosten / Effizienz und
- Nachhaltigkeit

erreichen kann. Eine entscheidende Komponente hierbei ist ein Nutzerpräferenzmodul. Die mit diesem Modul erzielten Daten dienen als Grundlage, um eine für diese Zielstellung angepasste, innovative technische Gebäudeumgebung entstehen zu lassen, die beispielhaft in den drei Marktsegmenten Bürogebäude, Bahnhöfe und Seniorenheime prototypisch umgesetzt wird. Abbildung 1 zeigt den Workflow für die Umsetzung der Ziele der CBS-Initiative. Die Arbeiten der IMMS GmbH liegen dabei im Bereich der Messwerterfassung mittels vernetzter Sensoren.

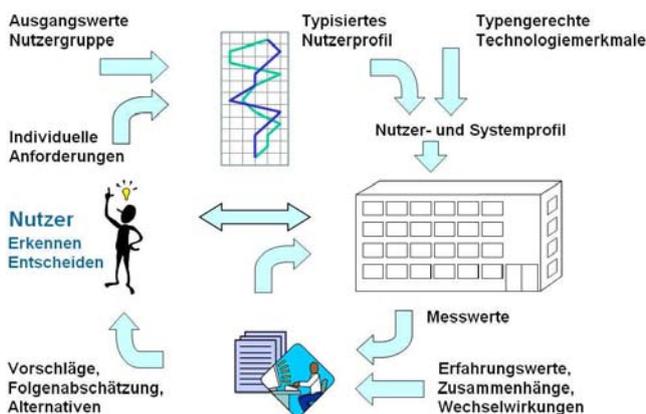


Abb. 1: CBS – Prozess – Nutzerintegration (Quelle: Innovative Netzwerke in Thüringen e.V.)

Die wesentliche Innovation im CBS-Ansatz besteht darin, dass – ähnlich wie es in vielen Bereichen praktiziert wird – auch im Bauprozess eine Integration des Kunden bzw. Nutzers erreicht werden soll. Zur technischen Umsetzung wurden von der IMMS GmbH zunächst Möglichkeiten des Einsatzes von verteilter Sensorik als auch Aktorik konzeptionell aufbereitet. Diese sollen auf eine Weise umgesetzt werden, die ein erforderliches Maß an Informationsvielfalt bei geringem Einbauvolumen und sehr niedriger Verlustleistung aufweist. Diesen Anforderungen gerecht zu werden, ist nicht nur eine ingenieurwissenschaftliche Herausforderung an sich, sondern angesichts der gegenwärtigen Klimadiskussion Ausdruck eines zeitgemäßen Forschungs- und Entwicklungsparadigmas.

Hierbei sollen auch auf vorliegende Erfahrungen zur Energiegewinnung aus der Umgebung zurück gegriffen werden. Dabei erfolgt eine enge Zusammenarbeit mit den Partnern

The "Customer Bautronic System" [1] Innovative Regional Growth Core is a cooperative initiative between nine regional companies with the common objective of developing a state-of-the-art system platform that integrates users in planning, configuration, and operation of building automation. As a final result, building users should be able to achieve an optimum in

- User value
- Cost / efficiency
- Sustainability.

A user preference module is at the core of CBS systems. Using this to obtain some data as a basis, this group is to develop a highly customized, innovative technical environment for buildings starting with prototypical projects for the three market segments of office buildings, train stations, and retirement homes. Fig. 1 shows the workflow for the implementation of the CBS goals. The activities of IMMS GmbH focus on the acquisition of measurements using a sensor network.

The main innovation in the CBS approach is to integrate customers and/or users in the construction process – a method that is already common practice in many other areas. In implementing the technical aspects of this idea, IMMS GmbH has first begun by developing a system concept for distributed sensor and actuator networks. These networks must be able to provide the necessary information with small size requirements and low energy losses. Complying with these requirements is not only an engineering task – in consideration of the current climate issues, this is representative of today's research and development paradigm. The network concept is to exploit existing expertise on the extraction of energy from the surrounding environment. This involves close cooperative efforts with partner companies IBS Dr. Döllekes GmbH and FH Erfurt / IBIT, who are responsible for collecting data on specific customer and user requirements and developing guidelines for the type of sensor data, the data rates, and controller modalities. Additional research collaborations are underway with partners Desotron GmbH, HÖRMANN Funkwerk Kölleda GmbH, and FH Jena, all with the goal of realizing a user-integrated, functional building control and monitoring system.

Current endeavors have involved developing a concept for measurement station networks, sensor data capture, and implementation of the software platform. Current research concerns the interplay between topological and topographical aspects of sensor networks with the aim of ensuring secure data transfer through a minimum of sensor nodes as well as distribution of signal processing tasks among the various sensor network nodes. The use of low power loss microcontroller platforms together with

IBS Dr. Döllekes GmbH (Erfurt) und der Fachhochschule Erfurt / IBIT, die die spezifischen Kunden- und Nutzeranforderungen statistisch erheben und daraus Vorgaben für zu erfassende Sensorinformationen, Datenraten und Steuerungsmodalitäten ableiten. Weitere enge Forschungsk Kooperationen bestehen zu den Thüringer Partnern Desotron GmbH (Sömmerda), HÖRMANN Funkwerk Kölleda GmbH und Fachhochschule Jena mit dem Ziel, eine nutzerintegrierte operative Gebäudesteuerung und -überwachung zu schaffen.

Im Verlauf der bisherigen Arbeiten wurden konzeptionelle Arbeiten zur Vernetzung von Messstationen, zur Sensordatenerfassung und zur Ausführung der Softwareplattform durchgeführt. Aktuelle Forschungsgegenstände sind dabei u.a. das Wechselspiel zwischen topologischen und topografischen Aspekten der Sensorvernetzung mit der Zielstellung, sichere Übertragung von Werten mit minimalem Einsatz an Sensorknoten zu gewährleisten, sowie die Verteilung von Signalverarbeitungsaufgaben in den Knoten des Sensornetzes. Von Vorteil für eine energieeffiziente Ausführung von Sensornetzwerken hat sich die Verwendung verlustleistungsarmer Mikrocontrollerplattformen in Verbindung mit dem Betriebssystem TinyOS erwiesen.

Angestrebt wird, dass die Entwicklung bis zum Jahre 2011 so weit fortgeschritten ist, dass marktreife Produkte eingeführt werden können. Für 2012 wird ein Wachstum bei den Industriepartnern um ca. 100 zusätzliche Mitarbeiter und eine zusätzliche Wertschöpfung von ca. 18 Mio. € möglich sein.

Ansprechpartner / contact:

PD Dr.-Ing. habil. Hannes Töpfer
 Tel. +49 (3677) 69-5540
 Email: hannes.toepfer@imms.de

[1] Das Förderprogramm „Innovative regionale Wachstumskerne“ des BMBF richtet sich an regionale Kooperationen, die über eine gemeinsame Systemplattform verfügen und wesentliche Alleinstellungsmerkmale in ihrem Kompetenzbereich aufweisen.

the TinyOS operating system has proven advantageous in realizing energy-efficient sensor networks.

The goal is to continue developing this processing until, by 2011, the technology has advanced to the point where market-ready products can be introduced. By 2012, these industrial partners are expecting to add some 100 new employees and create additional value of about 18 million euros.

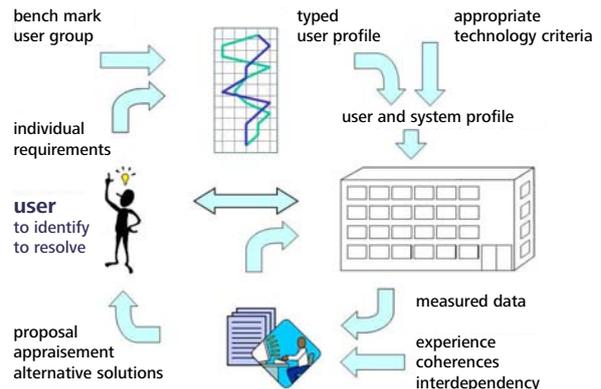


Fig. 1: Process user integration (source: Innovative Netzwerke in Thüringen e.V.)

[1] The "Innovative Regional Growth Cores" support program of the German Federal Ministry of Education and Research is oriented towards regional cooperations between companies which have continuous with system platform and unique selling characteristics in their areas of expertise.

Zielstellung

Das klassische Sensornetzwerk besteht aus einer Reihe autonomer Teilnehmer, den so genannten Motes. Jeder Teilnehmer überwacht einen oder mehrere Sensorwerte, zeichnet diese auf und leitet sie über das Netzwerk zu einem Ziel weiter. Diese Art von Netzwerk besitzt meist eine hohe Teilnehmerdichte, das heißt ein Mote hat eine Vielzahl weitere Nachbarn in seiner unmittelbaren Reichweite. Daten und im speziellen Sensorwerte treten relativ selten auf. Paketverluste sind in den meisten Fällen unkritisch. Fehlende Messwerte einer Messreihe können zum Beispiel durch Interpolation ausgeglichen werden. Oft ist die Platzierung und die Einsatzbedingungen bereits im Vorfeld bekannt. So lässt sich ein Netzwerk unter festen Randbedingungen wie Reichweite und Datenübertragungsrate entwerfen.

Die von der IMMS GmbH angestrebte Implementierungsvariante zielt jedoch auf eine Anwendung im Grenzbereich ab – dem Ausdauersport in beliebigem Gelände.

Kooperationspartner des Instituts ist eine Thüringer Firma, die im Bereich Orientierungslauf autarke Identifikations- und Zeitnahmesysteme für eine Vielzahl von Outdoor-Sportarten als Weltmarktführer entwickelt, um Teilnehmern, Organisatoren und Zuschauern aktuelle Informationen in Echtzeit zur Verfügung zu stellen. Diese sind durch die systemeigene Infrastruktur weltweit auf beliebigen Wettkampfarealen einsetzbar, ohne dass spezielles, externes Servicepersonal benötigt wird. Aufgrund der Besonderheiten der elektromagnetischen Umgebung eines Terrains mit Vegetation und hoher Mikrowellendämpfung sind die Hindernisse bei der technischen Realisierung hoch, sodass die Entwicklung von Sensornetzwerken in diesem Anwendungsbereich durch eine hohe Forschungslastigkeit geprägt ist.

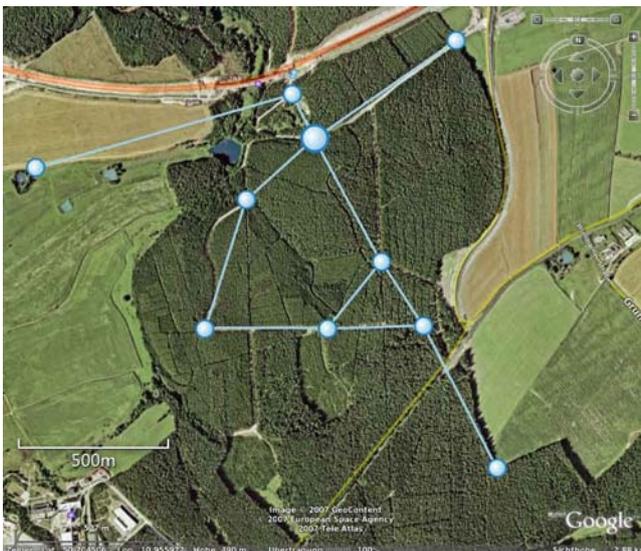


Abb. 1: Typische Topografie eines Sensornetzwerkes mit großer Kommunikationsreichweite

Fig. 1: Typical topography of a wide area sensor network

Objective

Conventional sensor networks consist of a series of autonomous nodes. Here, each node monitors one or more sensor variables, records them, and transmits them through the network to the intended receiver. These types of networks often have a high nodal density, i.e., each node is surrounded by many other nodes in the immediate vicinity. Data and especially sensor values occur quite rarely. In most cases, data packet losses are not critical. For example, if data is missing from a series of measurements, the missing values can be interpolated from existing data. In many cases, the placement and usage conditions are known in advance. Thus, a network can be designed according to fixed constraints such as range and data transfer rate.

However, IMMS GmbH is looking to implement an application in a field that may not be particularly obvious – outdoor endurance sports.

A local company – a world-leading manufacturer of identification and time-recording systems for numerous types of outdoor sports – is cooperating with us in this effort to develop a system that can provide participants, organizers, and spectators with current information in real time. With its unique infrastructure, this system can be used anywhere in the world at any sports facility without the need for specially trained or external service personnel. Due to the electromagnetic properties of terrain with high vegetation and high microwave attenuation, the technical obstacles are considerable. Thus, development of sensor networks for this application area requires a significant amount of research.

Since the participants are spread across a wide area, each node will usually have just two to three neighbors in its direct vicinity. The entire network, on the other hand, contains as many as several hundred nodes. Furthermore, data packets are transmitted much more frequently than in conventional networks. Yet another difficulty is that packet losses cannot be tolerated with sensitive data. It is also not possible to define the later operating and ambient conditions during the design phase. Such a network could conceivably be used in a building, in a forest, or between rows of tall buildings in large cities.

Even though the most common destination will be the base station, some commands and confirmations will be sent in the opposite direction, i.e., back into the network. A further design criterion is that there is to be a slight latency between transmitting a data packet to the basis station and receiving a confirmation or reaction to the packet. Given these limiting factors, the system to be conceived moves further and further away from a conven-

Da die Teilnehmer großflächig verteilt sind, hat ein Mote im Regelfall nur zwei bis drei Nachbarn in seiner unmittelbaren Reichweite. Betrachtet man das vollständige Netzwerk, so soll dieses jedoch aus einer großen Teilnehmeranzahl, im Bereich von mehrere hundert Motes, bestehen. Pakete werden, im Vergleich zu den klassischen Netzen, relativ häufig gesendet. Erschwerend kommt hinzu, dass bei sensiblen Daten Paketverluste nicht tolerierbar sind. Die späteren Einsatz- und Umgebungsbedingungen können während der Entwurfsphase nicht festgelegt werden. So könnte das Netzwerk im Gebäude, im Wald oder zwischen den Häuserfluchten einer Großstadt zum Einsatz kommen. Zwar ist auch hier das häufigste Ziel die Basisstation, jedoch werden Kommandos und Bestätigungen in die Gegenrichtung, also in das Netzwerk hinein, gesendet.

Eine geringe Latenz zwischen einem an die Basisstation gesendeten Paket und einer Bestätigung oder Reaktion darauf, ist ein weiteres Kriterium für den Entwurf. Unter diesen Rahmenbedingungen entfernt man sich mehr und mehr vom klassischen Sensornetz und nähert den aus WLANs bekannten Strukturen an. Die zu Grunde liegenden Hardware-Plattformen bleiben jedoch weiterhin autonome Miniatur-Funkmodule auf Basis von Mikrocontrollern und Radio-Transceiver-Schaltkreisen.

Hardware und Betriebssystem

Ein wichtiger Punkt, vor allem in Bezug auf die Datentransferrate und Reichweite, ist die Auswahl der Hardware-Plattform. Eine Vielzahl von Herstellern bietet dafür vorgefertigte Lösungen an. Diese arbeiten meist auf der Basis eines Mikrocontrollers in Kombination mit einem extern angeschlossenen Transceiver-Schaltkreis. Optional lässt sich das Link-Budget bzw. die Reichweite durch den Einsatz eines extern angeschlossenen Verstärkers vergrößern.

TinyOS hat sich im Laufe der Zeit zu einem Quasi-Standard für Sensornetze entwickelt. Im Gegensatz zu ZigBee ist TinyOS ein frei verfügbares Betriebssystem. Als Programmiersprache wird die C-Erweiterung NesC verwendet. Eine Komponenten-Module Struktur ermöglicht die schnelle und einfache Entwicklung von Anwendungen und erleichtert die Portierung des Systems.

Routing-Protokoll

Ein Netzwerkteilnehmer kann die in seiner Reichweite befindlichen Nachbarn direkt erreichen. Ziel ist es aber, nicht nur mit den unmittelbaren Nachbarn, sondern auch mit allen anderen im Netzwerk eine Verbindung herzustellen und Daten auszutauschen. Um dies zu ermöglichen, ist ein Weiterleiten der Daten vom Start zum Ziel über verschiedenen Zwischenstationen notwendig. Die Suche und die Wahl einer entsprechenden Strecke durch das Netz nennt man

tional sensor network and becomes increasingly similar to a WLAN. Nonetheless, the hardware platform of choice remains miniature wireless modules consisting of microcontrollers and radio transceiver circuits.

Hardware and Operating System

A critical factor with respect to data transfer rates and range is the choice of hardware platform. There are a range of manufacturers with prefabricated hardware solutions. The majority of these operate on the basis of microcontrollers together with an externally connected transceiver circuit. Optionally, the link budget or range can be expanded using an externally connected amplifier.

Over the course of time, TinyOS has established the de facto standard for sensor networks. In contrast to ZigBee, TinyOS is an open source operating system. The NesC extension to the C language group is used to program these devices. The component-module structure accelerates and facilitates the application design process and simplifies porting to other operating systems.

Routing Protocol

A network node can communicate directly with nodes within its range. However, the goal is not to communicate directly with neighbors in the immediate vicinity but to be able to connect to all other network nodes and exchange data with them. To make this possible, data can be transmitted from its originating node to the destination across various intermediate nodes. The search for and choice of a route through the network is referred to a "routing". In contrast to conventional networks such as IP-based networks, alternative approaches and solutions were taken into consideration for routing in mesh networks. The networks are usually based on unreliable, asymmetric connections with a high degree of mobility among the various nodes. Due to this high degree of mobility, the information passing through the network topology toward a destination node is subject to constant changes, much in contrast to conventional networks. The main disadvantage here is that each node is basically an unreliable component that could potentially fail at any time.

By using a simulation, it is possible to learn about the network behavior and then analyze and optimize the chosen routing protocol. TinyOS comes equipped with a suitable simulator. TOSSim can simulate both "lossy" and "non-lossy" radio links.

Routing. Im Gegensatz zu traditionellen Netzwerken, wie zum Beispiel IP-basierte Netze, wurden für das Routing in Mesh-Netzwerken alternative Ansätze und Lösungen eingesetzt. Diese Netzwerke basieren häufig auf unzuverlässigen, asymmetrischen Verbindungen mit einer hohen Mobilität der Teilnehmer. Aufgrund ihrer Lebendigkeit sind die Informationen über die Netzwerktopologie und den Weg zu einem Teilnehmer, im Gegensatz zu klassischen Netzen, einer ständigen Änderung unterworfen. Dies hat auch den Nachteil, dass jeder Teilnehmer eine unzuverlässige Komponente darstellt, da er jeder Zeit, ohne Vorwarnung ausfallen kann.

Mit Hilfe der Simulation kann das Verhalten des Netzwerkes und des ausgewählten Routing-Protokolls analysiert und optimiert werden. In TinyOS ist bereits ein Simulator integriert. TOSSim ermöglicht die Simulation von verlustfreien und verlustbehafteten Funkverbindungen.

Zusammenfassung

Im Rahmen der beschriebenen Forschungsarbeiten wurde von der IMMS gemeinnützige GmbH ein Sensornetzwerk entworfen und realisiert, welches ein breites, über das von klassischen Systemen hinaus gehendes Anwendungsspektrum erschließt. Es erlaubt neben dem Versand beliebiger Datenpakete, markante Kennwerte des Netzwerkes aufzuzeichnen und auszuwerten. Die Optimierung des Routing-Protokolls ist der Schwerpunkt künftiger Arbeiten. Dazu zählt zum Beispiel eine kürzere Reaktionszeit auf Topologieänderungen, Fehlererkennung und -korrektur und eine Optimierung der Link-Kostenberechnung.

Ansprechpartner / contact:

Dipl.-Ing. Tobias Rossbach
Tel. +49 (3677) 69-5578
Email: tobias.rossbach@imms.de

Summary

In performing the research described above, IMMS GmbH has designed and implemented a sensor network that allows for a wide range of applications extending far beyond those of conventional networks. In addition to transmission of arbitrary data packets, this network also allows the distinct characteristics of a network to be recorded and evaluated. Optimization of the routing protocol will be at the core of future work. For example, this includes achieving quicker reaction times with changes in topology, fault detection, and correction, and optimization of link-cost calculations.

Zielstellung

Der Trend zu einer erhöhten Komplexität mechatronischer Systeme ermöglicht Geräten neue Einsatzgebiete und erweiterte Anwendungsmöglichkeiten. Um die Komplexität sowohl für den Entwurfs- und Inbetriebnahmeingenieure als auch für den Benutzer beherrschbar zu gestalten, spielt Modularisierung eine entscheidende Rolle.

Die Maschinensteuerung eines Mehrkoordinaten-Direktantriebes wurde speziell unter dem Aspekt der Modularisierung mit dem Ziel betrachtet, dass die Gesamtfunktionalität unbeeinflusst bleibt bzw. verbessert wird.

Forschungsverlauf und -stand

Eine sinnvolle Modularisierung ist nur dann möglich, wenn Teilfunktionalitäten in Modulen oder Komponenten zusammengefasst werden und diese über ein geeignetes Medium miteinander kommunizieren können. Hier sind bestehende Standards zu beachten bzw. neue Standards zu schaffen. Die Frage nach einem geeigneten Kommunikationsmedium stand zu Anfang im Mittelpunkt der Forschungsarbeiten an der IMMS GmbH. Nach umfangreichen Recherchen und Analysen hat sich für die Antriebstechnik EtherCAT als ein geeignetes echtzeitfähiges Bussystem herauskristallisiert (s. S. 15).

Ausgangspunkt der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur verteilten Regelung bildete der zentralisierte, monolithische Bahnsteuerungskern der bereits realisierten planaren Direktantriebe PPS (s. S.). Dieser geht davon aus, dass die Informationen aller Bewegungsachsen, Positionen, Geschwindigkeiten etc., und der diagnostizierte Maschinenzustand, Kühlwassertemperatur, Luftdruck etc., zentral und vollständig verfügbar sind.

Der spezielle 2D-Bahnregler der planaren Direktantriebe PPS arbeitet bisher mit Koordinatentransformationen und ist damit immer an der vom Aktor abzufahrenden Bewegungsbahn in Ziel- und Bahnabweichungsrichtung ausgerichtet. Den einzelnen Bewegungsachsen sind also keine eigene Regler zugeordnet. Dieses Bahnregelungskonzept wurde „virtuelle Kaskadenregelung“ genannt.

Im Zuge der Komponentenbildung und Modularisierung musste diese Philosophie aufgegeben werden. Jede Achse erhält nun „ihren“ Regler. Es stellte sich jedoch im Verlauf der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten heraus, dass viele Teile der bisher verwendeten Kaskadenregelung wieder vorteilhaft verwendet werden können.

Objective

The trend toward increased complexity of mechatronic systems makes it possible to use such systems for new applications and an extended range of applications. To help manage the complexity of these systems for purposes of design and installation engineering as well as for the end user, modularization is playing an ever more important role.

The potential for modularizing the control system for a multicoordinate direct drive machine was evaluated with the goal of maintaining or improving the functionality of the system as a whole.

Research Progress and Status

Modularization is only possible when partial functionality can be combined in modules or components and when these can communicate with each other across a suitable medium. Here, it is important to comply with all applicable standards. Wherever suitable standards do not exist, new ones shall be created.

The issue of which communication medium to use was initially one of the key research topics at IMMS GmbH. After completing extensive research work and analyses, we chose the EtherCAT real-time bus system for the drive system (see page 15).

As a starting point for research and development work on distributed control systems, we chose the centralized, monolithic, continuous path controller core of a previously realized PPS planar direct drive (see page 25). In this system, we assumed that information on the movement axes, position, speed information, etc., as well as on the diagnosed machine statuses, cooling water temperatures, air pressures, etc., was stored at a central location.

Previously, the special 2D continuous path controller of the PPS planar direct drive utilized coordinate transformations. Thus, it has always been oriented along the path of the actuator on its way toward the target or along the error path. The various axes of movement are not assigned to their own controllers. This path control concept is referred to as "virtual cascade controlling".

In the course of defining the modular components, it was necessary to abandon this philosophy. Each axis now has its own "controller." In the course of the research and development work, it became apparent that many parts of the previously used cascade controller could be reused to advantage.

An der IMMS GmbH wurde eine Testplattform geschaffen, die am Beispiel eines planaren Positioniersystems PPS200 mit einem Verfahrbereich 200mm den Test der neu entwickelten Algorithmen für eine verteilte Regelung von Mehrachsantrieben ermöglicht.

Die Implementierung des neuen Bahnreglerkonzeptes wird durch eine derzeit am Institut in Erarbeitung befindliche Diplomarbeit unterstützt, die im ersten Quartal 2008 fertig gestellt werden soll.

Ausblick

Hauptschwerpunkte der weiteren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf diesem Gebiet sind:

- Erarbeitung und Umsetzung einer Konzeption für die Reglerkommunikation, um alle für die Realisierung der Bahnsynchronität notwendigen Daten über den echtzeitfähigen Bus zu den Modulreglern übertragen zu können
- Erarbeitung und Umsetzung einer Konzeption für die flexible Inbetriebnahme und Konfiguration eines aus Antriebsmodulen generierten komplexen Antriebssystems
- Erarbeitung und Umsetzung einer Konzeption für die Gewährleistung der Maschinensicherheit.

Ansprechpartner / contact:

Dipl.-Ing. Torsten Maaß
Tel.: +49 (3677) 69-5564
Email: torsten.maass@imms.de

On the basis of the example of the planar positioning system PPS200 with a travel range of 200 mm, IMMS GmbH has developed a test platform where the recently developed algorithms can be used in a distributed control system for a multi-axial drive.

The implementation of the continuous path controller concept is currently being developed in a degree thesis project to be completed in the first quarter of 2008.

Perspective

The main areas of focus for future research and development work in this field include the following:

- *Creation and implementation of a controller communication concept, which will allow all data required for path synchronization to be transferred to the module controllers through a real-time bus*
- *Creation and implementation of a concept that allows for versatile installation and configuration of complex systems generated from various drive modules*
- *Creation and implementation of a concept that ensures machine reliability*

Abb. 1: Testplattform für verteilte Regelungen auf der Basis des PPS 200

Fig. 1: Test platform for distributed controllers based on PSS 200

Modular Hardware and Software Platform for Distributed Control Systems

Zielstellung

Ein wesentlicher Schwerpunkt der im Verbund mit den Partnern im Wachstumskern VERDIAN (s. S. 23) durchgeführten Arbeiten besteht in der Schaffung einer gemeinsam genutzten modularen Hard- und Softwareplattform für verteilte Regelungen. Der Begriff „verteilte Regelung“ bedeutet, dass im Gegensatz zur herkömmlichen Realisierung beispielsweise einer Antriebslösung als vollständig eigenkonzipiertes mechatronisches System mit einem die Hardware direkt steuernden zentralen Rechner ein höheres Maß an Modularität auf allen Ebenen angestrebt wird.

Die Motivation für die Auseinandersetzung mit verteilten Regelungen besteht darin, dass einerseits die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Regel- und Steuerkomponenten stetig steigt, andererseits aber dem beliebigen Ausbau der entsprechenden Rechner durch Kriterien, wie z.B. Lüfterlosigkeit, eine Grenze gesetzt ist. Gleichzeitig ist ein komplexer zentraler Regler für bspw. einen Planartisch, der für drei oder mehr Achsen zuständig ist, schwer zu warten und um zusätzliche Achsen zu erweitern. Beide Argumente legen es nahe, eine Modularisierung der Regel- und Steuerkomponenten anzustreben, d.h. die komplexe zentrale durch einfachere dezentrale Steuerungen zu ersetzen. Die sich daraus ergebenden Vorteile sind jedoch mit Schwierigkeiten an anderer Stelle zu erkaufen, wie etwa der durch die Vernetzung unweigerlich ins System gebrachten Latenz im Datenaustausch zwischen den einzelnen Reglerkomponenten und der Notwendigkeit zu deren Synchronisation. Konkrete Möglichkeiten zur Realisierung derartiger verteilter Anwendung sind ebenso noch Forschungsgegenstand wie Aussagen zu damit erreichbaren Leistungskenngrößen. Die Zielstellung verteilter Regelungen bedeutet für die Software, dass die monolithische Reglerstruktur aufgespalten und in kommunizierende Komponenten geringerer Komplexität zerlegt wird. Diese befinden sich zudem näher an einzelnen zugeordneten Komponenten der Hardware, die im Rahmen des Verbundprojektes unter den Partnern wechselseitig wiederverwendet werden sollen, um so auf der Basis einheitlicher, interoperabler Komponenten Entwurfsprozesse zu beschleunigen.

Die Schaffung einer modularen Hard- und Softwareplattform für verteilte Regelungen stellt somit einen gemeinsamen Schwerpunkt der Tätigkeiten der Partner innerhalb des Projektes dar. Bereits ohne eine verteilte Regelung im Sinne mehrerer komplexer, miteinander kommunizierender Regler ergibt sich aus diesen Komponenten ein deutlicher Nutzen für die Partner. Der Aspekt der Konzeption verteilter Regelungen bildet einen eigenständigen Schwerpunkt des IMMS GmbH (s. S. 37). Mit diesen einher gehen eigene Aktivitäten im Bereich der Realisierung der Echtzeitvernetzung (s. S. 15) mit der Zielstellung, eine Experimentalplattform als Basis für die Forschungen im Bereich verteilter Regelungen zu schaffen.

Objective

A key aspect in working with our VERDIAN partners (see page 23) has been the realization of a joint modular hardware/software platform for distributed control systems. Compared to conventional control systems, distributed control systems achieve a higher degree of modularity at all levels. An example of the conventional approach would be a custom mechatronic system where a central computer directly controls the hardware.

Our motivation for studying distributed control systems can be attributed to the increased performance requirements being placed on controller components as well as the fact that computers cannot necessarily be adapted to certain criteria such as "fan-less operation." At the same time, complex applications such as planar tables with three or more axes are difficult to service or extend with additional axes if a central control system is used. Both of these arguments are in support of increasing the modularity of the controller components. One way of doing this is to replace the complex central controllers with simpler peripheral controller components. However, the advantages gained by this approach must be balanced with difficulties elsewhere, such as the data transfer latencies introduced to the system by the distributed network components and the resulting necessity for synchronization. Current research is investigating specific solutions for implementing these types of distributed applications with the goal of determining the achievable performance parameters.

From the software point of view, the change to a distributed control system essentially means that the monolithic controller structure is divided up into several less complex components that can communicate with each other. Furthermore, these are located closer to the corresponding hardware components, all of which are in mutual use by each of the VERDIAN partners. This latter aspect helps to accelerate the design process since all partners use standardized interoperable components.

Thus, the creation of a modular hardware/software platform for distributed controllers is a main area of focus for all of the partners in the VERDIAN project. Even without the need for a distributed system consisting of multiple, complex, intercommunicating controllers, use of these components results in other benefits for the project partners. The design of distributed control systems is one of the main focuses of our own independent work at IMMS (see page 37). Together with this, we are also active in implementing real-time networks (see page 15) with the objective of establishing an experimental platform for further research in the field of distributed control systems.

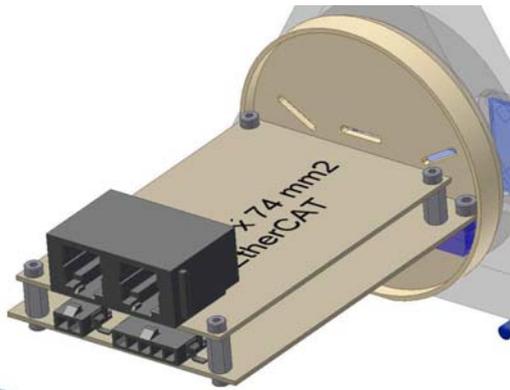


Abb. 1: Messkopf mit integrierter Signalverarbeitung
Fig. 1: Measuring head with integrated signal processing

Forschungsverlauf

Wesentlich für die Schaffung eines Portfolios interoperabler, gemeinsam genutzter Komponenten war die frühe Festlegung auf einen einheitlichen Busstandard für die Echtzeitvernetzung der Komponenten untereinander. Aus verschiedenen Gründen fiel die Wahl dabei auf EtherCAT, einen Industrial-Ethernet-Busstandard, der besonders kurze Regelzyklen ermöglicht (s. S. 15).

Beispiele für Komponenten, die im Verbundvorhaben von verschiedenen Partnern entwickelt werden, sind Endstufen verschiedener Leistungsklassen, achsintegrierbare Steuermodule wie programmierbare Prozessor- und Reglermodule, Interpolatoren und ein kompaktes Mastermodul. An der IMMS GmbH entstand ein Messkopf mit interner Verstärkung (s. Abb. 1). Dieser integriert einen A/D-Wandler, eine FPGA-basierte Signalverarbeitung sowie eine EtherCAT-Anbindung, um durch die Verkürzung der Signalwege systembedingt eingekoppelte Störungen zu minimieren. Die Signalverarbeitung des FPGAs wurde mit MATLAB/Simulink modelliert und per Code-Generierung synthetisiert.

Neben interoperablen Hardware-Komponenten hat sich der Verbund auch die Schaffung gemeinsam genutzter Komponenten für Inbetriebnahme- und Diagnose-Software als Ziel gesetzt. Diesbezügliche Arbeiten befinden sich jedoch mit Stand der Drucklegung dieses Berichts noch in der Spezifikationsphase.

Im Zuge der Untersuchung von Algorithmen zur Realisierung kommunizierender Regler ist deren Abbildung auf einzelne Steuerrechner notwendig. Hierfür sind Industrie-PCs (IPCs) vorgesehen, bei denen Echtzeit-Linux als Betriebssystem zum Einsatz kommt. Um bezüglich zukünftiger alternativer Echtzeitbusse flexibel zu sein und zugleich dem Regelungs-techniker die Konzentration auf Fragen der eigentlichen Regelung statt solche der Echtzeitvernetzung zu gestatten, entsteht ein Kommunikationsframework, welches die Spezifika der Buskommunikation abstrahiert und als Plattform

Research Progress

An important factor in creating our portfolio of interoperable mutually used components was to define –at an early stage – a common bus standard to be used for the real-time component networks. For a variety of reasons, we chose to use EtherCAT, which is an industrial Ethernet bus standard that allows for especially short control cycles. For more detailed information, refer to the article (see page 15).

Examples of components that have been developed by the various partners within this project include output stages with various power classes, integrated multi-axis controller modules such as programmable processor and controller modules, interpolators, and a compact master module.

IMMS has developed a measuring head with internal signal gain (see Fig. 1). With an A/D converter, FPGA-based signal processor, and EtherCAT link integrated in a single component, this leads to an increase in interference immunity by shortening the signal paths. The signal processing in the FPGAs has been modeled using MATLAB/Simulink and synthesized using code generation.

In addition to interoperable hardware components, the VERDIAN group has also set a common goal of developing mutually compatible software components for installation and diagnosis purposes. At the time of this printing, this work is still in the specification phase.

In order to study the communication algorithms for the controllers, it is necessary to implement these algorithms first on the various controller computers. For this purpose, industrial PCs (IPCs) with real-time Linux operating systems are to be used. To maintain flexibility and allow for alternative real-time bus systems to be used in the future and, at the same time, allow control system engineers to concentrate on the control system issues instead of real-time network problems, a communication framework has been established. This framework replicates the bus communication specifications and uses MATLAB/Simulink as the code generation platform. At the MATLAB/Simulink level, it is necessary to define appropriate model elements, which allow the bus to be used by the actual controllers irrespective of the bus that is actually in use.

Subsequent research goals consist in modeling distributed controllers in the entire system using UML or SysML, i.e., connecting multiple independent MATLAB/Simulink models within a UML or SysML model. This work should result in more flexible means of mapping models to the intended target platform (see Fig. 2) and it should be possible to run simulation and verification processes at the

für die Code-Generierung aus MATLAB/Simulink heraus dienen soll. Auf der Ebene von MATLAB/Simulink ist im Zuge dessen die Definition geeigneter Modellelemente nötig, die eine Nutzung des Busses durch den eigentlichen Regler unabhängig vom tatsächlich verwendeten Bus erlauben.

Ein darauf aufbauendes Forschungsziel besteht in der Modellierung des von verteilten Regelungen gebildeten Gesamtsystems mittels der UML bzw. SysML, d.h. der Verbindung mehrerer eigenständiger MATLAB/Simulink-Modelle innerhalb eines UML- bzw. SysML-Modells. Daraus sollen sich flexiblere Möglichkeiten der Abbildung vom Modell auf die jeweilige Zielplattform ergeben (s. Abb. 2), und es werden Simulation und Verifikation auf Gesamtsystem-Ebene ermöglicht. Hierzu sind zunächst noch evaluierende Arbeiten zu den Möglichkeiten der heterogenen Toolkopplung zwischen UML-CASE-Tools und MATLAB/Simulink im Gange.

Ergebnisse und Ausblick

Der bereits vorgestellte Messkopf mit integrierter Signalverarbeitung liegt mit Stand Dezember 2007 aufgebaut als Prototyp vor und wird - nach vorausgegangenen Simulationen - ersten Tests in Verbindung mit einem physischen Antrieb unterzogen. Der Messkopf wird im ersten Quartal 2008 den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

Im Zusammenhang mit den laufenden Arbeiten zur Echtzeitvernetzung (s. S. 15) ist vorgesehen, mittelfristig Linux-basierte IPCs, die als EtherCAT-Slaves komplexe Regelungsaufgaben als eigenständige oder verteilte Regler umsetzen, den Partnern ebenso wie Projekten im Hause als weitere Komponenten zur Verfügung stellen zu können. Es wird erwartet, dass diese Komponenten in Kombination mit den Ergebnissen der Arbeiten im Bereich der Algorithmen für verteilte Regelungen (s. S. 37) die Realisierung komplexer Regelungsaufgaben hochdynamischer Mehrkoordinaten-Antriebe mit neuen Leistungsparametern ermöglichen werden.

Langfristig werden die Aktivitäten der einzelnen Partner, d.h. die geschaffenen Hard- und Softwarekomponenten sowie die Ergebnisse der Arbeiten des IMMS im Bereich verteilter Regler, neben der Überführung in Produkte in einen gemeinsamen Demonstrator münden, der die Ergebnisse des Verbundprojektes veranschaulichen soll.

Ansprechpartner / contact:

Dipl.-Inf. Marco Götz
 Tel.: +49 (3677) 69-5542
 Email: marco.goetze@imms.de

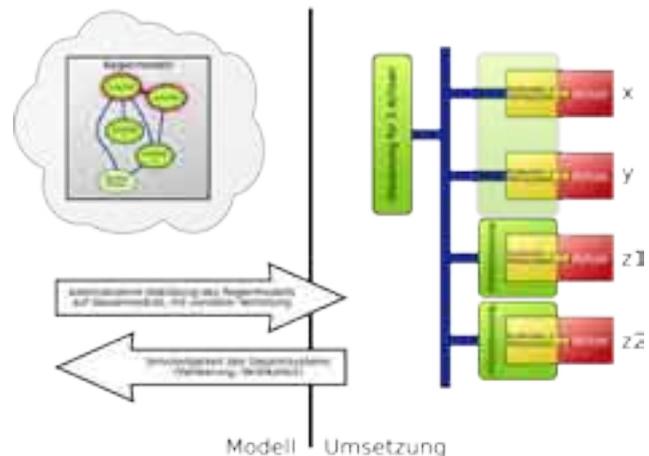


Abb. 2: Angestrebtes Verteilungskonzept
 Fig. 2: Goal for distribution concept

global system level. Before this can be done, however, it is necessary to complete the evaluation of the possibilities for creating heterogeneous tool links between UML-CASE tools and MATLAB/Simulink.

Results and Perspective

As of December 2007, the measuring head with integrated signal processing described above has been set up as a prototype and will, upon completion of the preliminary simulations, be subjected to the first tests in connection with a physical drive. The measuring head will be introduced to the VERDIAN project partners in the first quarter of 2008.

Relating to the current work on real-time networking (see page 15), an interim goal is to implement Linux-based IPCs as EtherCAT slaves for complex independent or distributed controllers. Once completed, these will also be made available to our project partners as well as for other internal projects. It is expected that these components –together with the results from the distributed control system algorithms under study (see page 37) – will make it possible to realize complex controller tasks in high-dynamic multicoordinate drives with a new level of performance.

In the long term, the activities of the various project partners (i.e., realized hardware and software components, results of IMMS research on distributed control systems) will lead to a range of new products and a joint demonstration system. This demonstration system will allow the project participants to present the results of their work.



Integrierte Schaltungstechnik



Integrated circuit engineering

OCTOPUS (BMBF, FKZ: 01M3182E, component of IKT 2020 support program)

Zielstellung

Das Projekt OKTOPUS steht für „Optimal-Konfigurierbare Test-Organisationsplattform mit Unterstützung der Synthese“. Dabei untersucht die IMMS GmbH gemeinsam mit den Industriepartnern Konrad GmbH (Radolfzell), Atmel Germany GmbH (Heilbronn), Melexis GmbH, X-FAB Semiconductor Foundries AG (beide Erfurt) sowie der Universität Nürnberg-Erlangen, Lehrstuhl für RS und dem Lehrstuhl für HF-Technik zukunftsorientierte, modulare Testkonzepte. Die Ziele des Projektes bestehen in der Erforschung einer Testplattform, die Hardwaregerüst, Softwareumgebung und Testentwicklungsmethodik umfasst.

Durch Skalierbarkeit der Testerarchitektur soll bei steigenden Anforderungen das Equipment mitwachsen können, ohne die Plattform verlassen zu müssen. Der Weg vom fertigkonfigurierten Großtester hin zum anwenderspezifisch konfigurierten Modultestsystem verspricht eine Reduzierung der Testkosten. Weitere Leistungsmerkmale sind die Zukunftssicherheit der Investition durch die Einsetzbarkeit von Modulen vieler Anbieter nach Industriestandards, automatische Systemkonfiguration sowie Testsyntheseunterstützung. Von besonderer Bedeutung für die IMMS GmbH als F&E-Partner ist die Migration vom Labor in die Fertigung, um Fortschritte der Testmethodik auch unter produktionsrelevanten Umgebungen anzuwenden.

Forschungsverlauf und -stand

Das Projekt ist von seinen Inhalten sehr komplex und gliedert sich in sieben Arbeitspakete:

- AP1** Erstellung der Spezifikation der Testplattform
- AP2** Testspezifikation und Testprogrammerzeugung
- AP3** Modellierung und Simulation
- AP4** Elektrische Schnittstellen und Prüfadapter
- AP5** Hardwarearchitektur
- AP6** Softwarearchitektur
- AP7** Systemverifikation

Entsprechend der vorhandenen Kompetenzen an der IMMS GmbH ist sie besonders in die Arbeitspakete AP2, AP4 und AP5 eingebunden. So erfolgte im AP1 eine Analyse von modularen Testplattformen, Anbietern und den gegenwärtig verfügbaren Leistungsparametern von modularen Testinstrumenten. Dabei wird die Bedeutung modularer Testsysteme für eine zukunftsfähige Ausrichtung der Messtechnik am Institut und für die Zusammenarbeit mit Partnern der Mikroelektronikindustrie und mit KMUs deutlich. Ausgehend von den Spezifikationen des am Institut vorhandenen Geräteparks von IC-Evaluierungstestsystemen und Stand-alone-Geräten sowie einer Analyse von gegenwärtigen und zu erwarteten Aufgabenstellungen wurden die Anforderungen der IMMS GmbH an künftige Testsysteme spezifiziert und so die Leistungsmerkmale der Testplattform festgelegt.

Objective

The OKTOPUS project stands for “Optimal Configurable Test Organization Platform with Synthesis Support”. In this project, IMMS is collaborating on future-oriented, modular test concepts with several other German companies, Konrad GmbH (Radolfzell), Atmel Germany GmbH (Heilbronn), Melexis GmbH and X-FAB Semiconductor Foundries AG (both from Erfurt), as well as with the Department of Circuit Design and the Department of High Frequency Engineering at the University of Nuremberg in Erlangen.

The goal of this research project is to develop a test platform that encompasses the hardware framework, software environment, and test development methodology. By having scalable test architecture, the test equipment will be able to keep pace with increasing demands without need for a change of test platform. By moving away from permanently configured large-scale testing applications and toward user-specific customized modular test systems, it should be possible to reduce test costs. Some other improvements include improving the sustainability of investments by ensuring compatibility with industry-standard modules from various vendors, automatic system configuration, as well as support for test synthesis. In its role as a research and development partner, IMMS wishes to ensure that new products and technologies migrate from the lab to production. Thus, new developments in test methodology can be used to advantage in actual manufacturing applications.

Research Progress and Status

The content of the project work is quite complex and includes both mixed-signal and RF tests, which are divided into seven work packages:

- WP1** Creation of test platform specifications
- WP2** Test specifications and test programming
- WP3** Modeling and simulation
- WP4** Electrical interfaces and test adapters
- WP5** Hardware architecture
- WP6** Software architecture
- WP7** System verification

In keeping with the core competencies at IMMS, the institute is heavily involved in work packages WP2, WP4, and WP5. In WP1 we have analyzed modular test platforms and vendors, and also determined the currently achievable performance parameters of modular test instruments. This work has revealed the importance of modular test systems for future-oriented measurement technology at the institute and for future cooperative efforts with partners in the microelectronics industry and other small to medium-sized companies. Starting with the specifications of the available IC test systems and stand-alone units

Weiterhin wurde als Schlüsselanwendung der Test von integrierten opto-elektronischen Schaltungen, die sowohl Mixed-Signal- als auch HF-Tests sowie die optische Stimulierung mit Spezialequipment erfordern, entschieden. Dabei sollen die Leistungsparameter der Testplattform anhand der drei folgenden Schaltungsgruppen mit unterschiedlicher Testkomplexität untersucht werden :

- PDICs (photo detecting integrated circuits)
- APCs (automatic power control)
- PDAs (photo diode arrays)

Die Entscheidung fiel auf diese Schaltungsgruppen, da am Institut sowohl das Schaltkreis-Design als auch die Testmethodik von optoelektronischer Schaltungen seit mehreren Jahren fest etabliert sind. Innerhalb des Arbeitspaketes AP2 wurden Testspezifikationen mehrerer PDICs und APCs analysiert und daraus eine gemeinsame Testspezifikation für künftige optoelektronische Bauelemente abgeleitet. Die dafür erforderlichen einzelnen Teststeps wurden für eine automatisierte Testprogrammerzeugung aufbereitet. Weiterhin erfolgten konzeptionelle Arbeiten für ein Organisationssystem für modulare Testsysteme, der Modellierung von Testerinstrumenten und des Testprogrammablaufs. Im Arbeitspaket AP4 Elektrische Schnittstellen und Prüfadapter für Mixed-Signal und HF wurde die Aufgabenstellung Signalintegrität für Mixed-Signal und HF-Messungen bearbeitet. Die Ergebnisse wurden im Meilensteinbericht „Recherche HF-Konzepte für produktionstaugliche Prüfadapter“ zusammengefasst. Darin sind HF-Leitungsführung on-Board, HF-Kabel und Steckverbinder und HF-Schalter ausgeführt. Es wird auf Loadboards, Probecards, anwenderspezifische Testlösungen, Handler für den Devicetest, Waferprober und Testsockets eingegangen.

Ausblick

OKTOPUS wurde im Juni 2007 gestartet und läuft bis Mai 2010. In den nächsten Jahren sollen Konzepte einer modularen Testplattform entwickelt und ihr Optimierungspotenzial für einen kosteneffizienten Test untersucht werden. Testermodule für Testplattformen sind am Markt verfügbar, nicht aber die Adaptierung zum Prüfling. Hier liegt ein Schwerpunkt auf dem Weg zum einsatzbereiten Testsystem. Auch hier sind neue Konzepte gefragt, die Testerressourcen flexibel und mit hoher Signalqualität zu routen. Diese Adaptierung für Anwendungen in der Mikroelektronik ist zu evaluieren und zu charakterisieren. Weiterhin sollen Selbsttest- und Kalibrier- Strategien untersucht werden.

Ansprechpartner / contact:

Dr.-Ing. Klaus Förster
Tel: +49 (3677) 69-5520 / +49 (361) 663-2504
Email: klaus.foerster@imms.de



Abb. 1: Modulares Testsystem / Fig. 1: Modular test system

as well as an analysis of all current and upcoming tasks, IMMS was required to provide details on future test systems and thus determine the performance specifications of the test platform. Furthermore, testing of integrated optoelectronic circuits was determined to be a key application. These require mixed-signal and RF-tests as well as optoelectronic stimulation with special equipment. Here, the performance parameters of the test platform were to be checked for the three following circuit groups using tests with varying degrees of complexity:

- PDICs (photo detecting integrated circuits)
- APCs (automatic power control)
- PDAs (photo diode arrays)

In work package WP2, test specifications of multiple PDICs and APCs were analyzed and a common test specification was derived from these for future optoelectronic components. The steps required for these tests were put together in such a way as to allow for automated test programming. Furthermore, an organizational system was conceived for modular test systems, modeling of test instruments, and test program execution. Work package WP4 encompassed work on signal integrity for mixed signals and RF measurements. This includes RF signal paths on PCBs, in RF cable, as well as in pluggable connectors and RF switches. This part of the project has involved work on load boards, probe cards, customized test solutions, handlers for device tests, wafer probes, and test sockets.

Perspective

OKTOPUS was started in June 2007 and will continue until May 2010. In the upcoming years, concepts for a modular test platform are to be developed and the optimization potential for a cost-efficient test is to be investigated. Tester modules for test platforms are currently available on the market but DUT adapters are not. This is a critical factor in realizing a test system that is ready for use. This requires new concepts for routing test resources flexibly and with high signal quality. Various adapters for microelectronic applications are to be evaluated and characterized. Furthermore, work is to be performed in evaluating various self-test and calibration strategies.

Einführung

Die Zielstellung des durch die IMMS GmbH bearbeitenden Projektes „Schaltungstopologien“ besteht in der Erhöhung der Design-Effizienz durch Wiederverwendung (reuse) von vorhandenen erprobten analogen und Mixed-Signal Grundschaltungen.

Zu diesem Zweck werden eine Bibliothek aus Grundbauelementen (primitive devices) sowie eine Bibliothek mit typischen Schaltungen wie Bias-Zellen, Bandgap-Schaltungen, Stromquellen, Spannungsfolger, Stromspiegel, Operationsverstärker, Ladungspumpen, Oszillatoren, Filter, ADC, DAC u.a. in einer ‚fabless‘ Technologie (Default-, Modellparameter) für die Design Umgebung von CADENCE® bereitgestellt.

Der Schwerpunkt der Arbeit am Institut besteht in der schrittweise Schaffung der Voraussetzungen zur erleichterten Übernahme/Überführung der Schaltungen in eine beliebige Technologie (Fab-spezifisch) durch:

- einfaches Skalieren
- schnelle Umdimensionierung von Grundelementen (primitive devices) bzw. von Grundschaltungsgruppen (Stromspiegel, Eingangs-, Differenz-, Biasstufen u.a.)
- automatische Konvertierung von Schaltungen in verschiedene Technologien unterschiedlicher Anbieter von Halbleitertechnologien

Forschungsverlauf und -stand

Für die Basistechnologie wurde ein EKV-Modellparametersatz (default) in einer 0.5 µm Technologie extrahiert und angepasst. Eine ausgewählte Schaltung wird zunächst durch eine ‚grobe‘ Skalierung der Transistorgeometrien (W/L-Verhältnisse) in eine konkrete Technologie überführt. Für die feinere Abstimmung der primitive Devices wurde ein so genannter Hand-Calculator basierend auf [1] entwickelt. Innerhalb der Design-Umgebung wäre das Simulieren jedes einzelnen Bauelementes (Transistor, Kondensator, Widerstand) sehr zeitaufwändig. Der hier beschriebene Hand-Calculator ermöglicht, die Auswirkung von Änderungen in Geometrie-, Modell- sowie elektrischen Daten zügig und bequem auf gewünschte Schaltungsparameter (Constraints) nachzuvollziehen.

Der Hand-Calculator ist vorerst auf die Berechnung von MOS-Transistoren innerhalb des EKV-Modells [2] beschränkt (vgl. Abb. 2). Ein BSIM3-Parser ist z. Zt. in Arbeit. Zur Realisierung wurde die Programmiersprache Tcl/Tk verwendet, wodurch eine plattformunabhängige Lösung (z.B. Solaris, Linux, Windows) geschaffen wurde. Der Calculator ist sowohl als selbständiges Programm als auch als Schnittstelle zur Designumgebung CADENCE benutzbar. Die CADENCE-Integration basiert auf die Inter-Process-Communication

Introduction

The objective of the “Circuit Topologies” project at IMMS GmbH is to increase design efficiency by reusing existing analog and mixed-signal circuits that have already been tried and tested.

With this goal in mind, libraries have been put together consisting of primitive devices as well as typical circuits such as bias cells, bandgap circuits, current sources, unity gain amps, current mirrors, op amps, charge pumps, oscillators, filters, ADC, DAC, and more. This libraries make use of “fabless” technology (default model parameters) for the CADENCE® design environment.

The focus of this work at the institute is to gradually realize each of the required conditions for easing the transfer of circuits to arbitrary technologies (fab-specific) using the following:

- Simple scaling
- Rapid redimensioning of primitive devices or from basic circuit groups (current mirror, input stages, differential stages, bias stages, etc.)
- Automatic conversion of circuits to various other technologies from various other semiconductor technology vendors

Research Progress and Status

A default EKV (Enz, Krummenacher, Vittoz) model parameter set was extracted and adapted using 0.5 µm technology. The selected circuit was first transferred to a specific

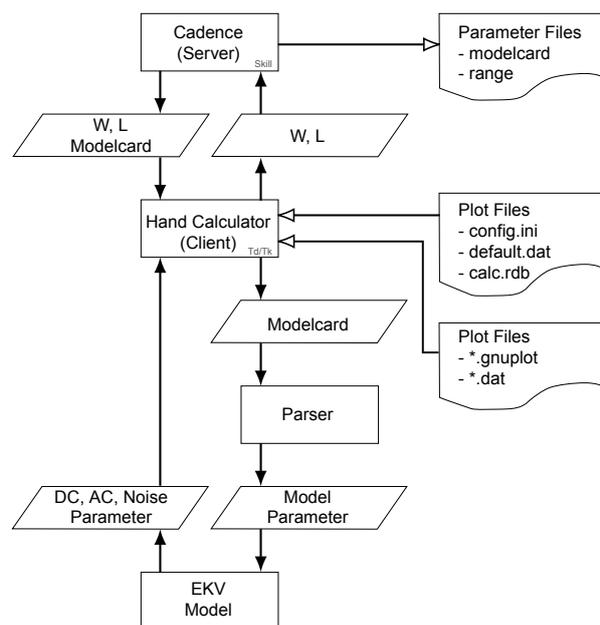


Abb. 1: Datenflussdiagramm Server(CADENCE) - Client(Hand Calculator)
Fig. 1: Data flow diagram server (CADENCE) client (hand calculator)

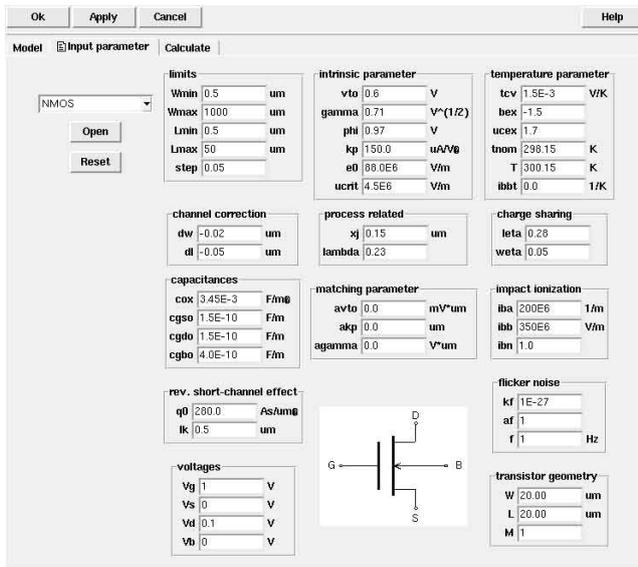


Abb. 2: Calculator: Eingabefenster - Modell-, Geometrie- und elektrische Parameter
 Fig. 2: Calculator: input screen – model, geometry, and electrical parameters

(IPC), wobei die Designumgebung als Server und der Hand-Calculator als Clientanwendung zusammenwirken. Die Dimensionierung der Grundelemente erfolgt nach folgendem Schema:

- Auswahl eines Bauelementes (MOS-Transistors)
- Start des Calculators mit Parameterübergabe (W, L und Modellparameter, s. Abb. 2)
- Einstellung des gewünschten/erforderlichen W/L-Verhältnisses, Berechnung relevanter Parameter: Strom, Kleinsignalparameter, Arbeitspunkt und -bereich (Sättigung, schwache, starke Inversion, s. Abb. 3)
- ermittelte Geometriewerte (W/L-Verhältnis) werden an die Design-Umgebung zurückgeliefert

Der Hand-Calculator kann zur Überführung einer vorhandenen erprobten Schaltung durch Umdimensionierung der Primitive Devices aus einer Default- in eine konkrete FAB-Technologie eingesetzt werden. Weiterhin ist er zum schnellen/bequemen Vergleich vorgegebener/vorhandener Schaltungen aus unterschiedlichen Technologien einer FAB bzw. aus Technologien unterschiedlicher FABs verwendbar. Und er ist ein nützliches Werkzeug zur Erhöhung der Design-Effektivität.

technology using “coarse” scaling of the transistor dimensions (W/L ratio). A hand calculator was developed on the basis of [1] to perform fine tuning on primitive devices. In a design environment, simulation of each separate component (transistor, capacitor, resistor) is very time consuming. The hand calculator described here makes it possible to quickly and easily retrace the effects of changes to geometry, model, and electrical data to the chosen circuit parameters (constraints).

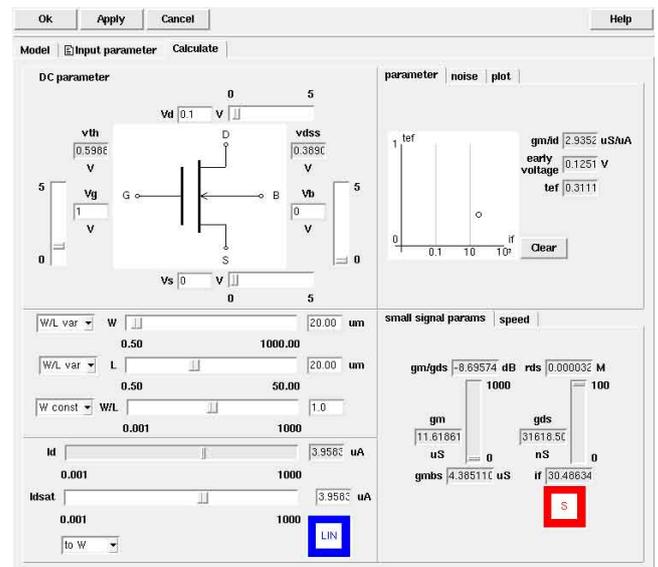


Abb. 3: Calculator: Hauptberechnungs-/Ergebnisfenster
 Fig. 3: Calculator: main calculation and results window

Initially, the hand calculator is limited to calculations for MOS transistors within the bounds of the EKV model [2] (see Fig. 2). A BSIM3 parser is currently in development. The hand calculator was programmed using the Tcl/Tk language, thus creating a platform-independent solution (e.g., Solaris, Linux, Windows). The calculator can be used as a stand-alone program as well as an interface to the CADENCE design environment. CADENCE integration is based on Inter-Process Communication (IPC), whereby the design environment functions as the server and the hand calculator as the client application. The primitive devices are dimensioned using the following procedure:

- Choice of device (MOS transistors)
- Start of calculator with parameter transfer (W, L, and model parameters; see Fig. 2)
- Setting of desired/required W/L ratio, calculation of relevant parameters: current, small signal parameters, bias point and range (saturation, weak inversion, strong inversion; see Fig. 3)
- Return of calculated geometry values (W/L ratio) to design environment.

Ausblick

Die weiteren Arbeiten haben folgende Schwerpunkte:

- Entwicklung von Extraktionstools für EKV-Modellparameter
 - ❖ aus Messungen an Bauelementen
 - ❖ aus vorhandenen Modellparametersätzen (z.B. BSIM3v3).
- Modellerweiterung des Calculator-Parsers: z.B. BSIM1, BSIM3 u.a.
- Verbesserung der CADENCE-Integration
- Strukturerkennung unter CADENCE und Dimensionierung größerer Schaltungsblöcke und -gruppen
- weitere Automatisierung der Schaltungskonvertierung mit dem Ziel Umwandlung ganzer Schaltungen.

Ansprechpartner / *contact*:

Dr.-Ing. Valentin Nakov

Tel.: +49 (3677) 69-5584

Email: valentin.nakov@imms.de

[1] PAD (Procedural Analog Design) Tool,
http://legwww.epfl.ch/CSL/PAD/PAD_pages/DesignToolHome.html

[2] M. Bucher, C. Lallement, C. Enz, F. Theodoloz and F. Krummenacher, „The EPFL-EKV MOSFET Model Equations for simulation, Version 2.6“ Technical Report, EPFL, July 1998, <http://legwww.epfl.ch/ekv>

You can use the hand calculator for any of the following:

- *Transfer of existing tested circuitry through redimensioning of primitive devices from default technology to specific “fab” technology*
- *Rapid and easy comparison of prescribed/existing circuits using various technologies of a “fab” or using technologies of various “fabs”*
- *Useful tool for increasing design efficiency.*

Perspective

Further work within the “Circuit Topologies” project will concentrate on the following areas:

- *Development of extraction tools for EKV modeling parameters:*
 - ❖ *from device measurements*
 - ❖ *from model parameter sets (e.g., from BSIM3v3)*
- *Model expansion of calculator parser: e.g., BSIM1, BSIM3, etc.*
- *Improvement of CADENCE integration*
- *Detection of structures in CADENCE and dimensioning of larger-sized circuit blocks and groups*
- *Further automation of circuit conversion with the goal of converting entire circuits*

Precision Amplifier (project „Programmable Preamplifiers“ -TMWTA, Project Nr.: 2006 FE 0075)

Problemstellung

Die Anwendbarkeit von CMOS - Operationsverstärkern in ASICs bei der Verwendung von hohen Schleifenverstärkungen der rückgekoppelten Schleife wird häufig durch das Rauschen und das Offset der Verstärker eingeschränkt. Mit kleiner werdenden Strukturabmessungen muss auch die Betriebsspannung verringert werden. Z. B. reduziert sich die Betriebsspannung von 5 V auf 3.3 V, wenn man von einer Technologie mit einer minimalen Kanallänge von $L_{\min} = 0.6 \mu\text{m}$ zu einer Technologie mit $L_{\min} = 0.35 \mu\text{m}$ übergeht. Hierdurch sinkt auch der erreichbare Signal-Rausch-Abstand.

Um kleine Sensorsignale zu verstärken, benötigt man Verstärker, welche ein geringes Rauschen aufweisen, eine hohe Verstärkung der offenen Schleife haben und einen abgleichbaren Offset besitzen. Zum Abgleich der Offsets werden verschiedene Verfahren angewendet.

Einerseits verwendet man den Laserabgleich von Widerständen. Diese Methode steht aber in der gewählten Technologie nicht zur Verfügung und erfordert zusätzliche Prozessschritte. Andererseits kann man analoge Schaltungen über Fuses oder Zenerdioden einstellen. Fuses und Zenerdioden werden in gewöhnlichen Technologien, die für analogen und Mixed-Signal Schaltungsentwurf vom Hersteller optimiert wurden, zur Verfügung gestellt. Der Nachteil dieser Technik ist, dass man viel Fläche für die zum Trimmen notwendigen Pads verbraucht. Die Anforderungen der Projektpartner an einen kontinuierlichen Verstärker waren deshalb:

- Hohe Verstärkung der offenen Schleife AOL (140 dB)
- Maximale Verstärkung der geschlossenen Schleife $A_{CL} = 10000$ (80 dB)
- Geringes Rauschen (20 nV/sqrt(Hz) bei 1 kHz)
- Geringe Stromaufnahme (kleiner 150 μA)
- Rail-to-Rail Funktion am Eingang und Ausgang ($V_{DD} = 3,3 \text{ V}$ XH035 Technologie)
- Kapazitive Last von 1 bis 300 pF
- Geringer Offset < 200 μV
- Offsetabgleichmöglichkeit.

Aufgrund dieser Anforderungen musste nach einem neuen Lösungsansatz für einen Operationsverstärker mit Offsetabgleich gesucht werden.

Lösung

In der Technologie XH035 sind EEPROM-Speicher verfügbar. Diese beinhalten Speicherzellen, welche über Fowler-Nordheim-Tunnelströme gelöscht und beschrieben werden können. In Abbildung 1a) ist das Speicherelement zur Speicherung von analogen Spannungswerten dargestellt. Der einzuspeichernde Spannungswert U_{Ref} liegt zum Beschreiben der Speicherzelle am positiven Eingang des Ope-

Problem

The usability of CMOS op-amps in ASICs with high gains in the feedback loop is often limited by noise and the amplifier offset. With increasingly small structural dimensions, it is also necessary to decrease the operating voltage. For example, the operating voltage is reduced from 5 V to 3.3 V after transferring from a technology with a minimum channel length of $L_{\min} = 0.6 \mu\text{m}$ to one with $L_{\min} = 0.35 \mu\text{m}$. As a result, the achievable signal-to-noise ratio also decreases.

To amplify small sensor signals, it is necessary to have amplifiers with low noise, high open-loop gain, and an adjustable offset. Various methods are used to trim the offset. One possibility is to trim the resistors using a laser. However, this method is not available in the selected technology and requires additional process steps. Another possibility is to trim the analog circuits using fuses or Zener diodes. Fuses and Zener diodes are available using conventional technologies optimized by manufacturers for analog and mixed signal circuits. The disadvantage of this technology is the additional space requirement for the pads. Thus, the project partner requirements for a continuous amplifier have been defined as follows:

- High open-loop gain AOL (140 dB)
- Maximum closed-loop gain $A_{CL} = 10,000$ (80 dB)
- Low noise (20 nV/sqrt(Hz) for 1 kHz)
- Low power consumption (smaller than 150 μA)
- Rail-to-rail function at input and output ($V_{DD} = 3.3 \text{ V}$ XH035 technology)
- Capacitive load of 1 to 300 pF
- Low offset < 200 μV
- Trimming capability

As a result of these requirements, research work has been performed in the "Integrated Circuits" Center of Excellence at IMMS GmbH with the goal of finding a new op-amp solution with trimming capabilities.

Solution

The XH035 technology contains EEPROM memory. These contain memory cells can be deleted and written by using Fowler-Nordheim tunneling currents. Figure 1a displays a memory element for storing analog voltage values. The voltage value to be written to the memory cell, U_{Ref} exists at the positive input of the op-amp. This is a high-voltage amplifier. The programming voltage U_{pp} is also the supply voltage. Node F of the memory element is connected to the gate of the negating input and the output of the amplifier is connected to injector C_{inj} to write to the memory cell. Thus, this is a unity gain amplifier. If the voltage at the two inputs differs, this difference will be amplified

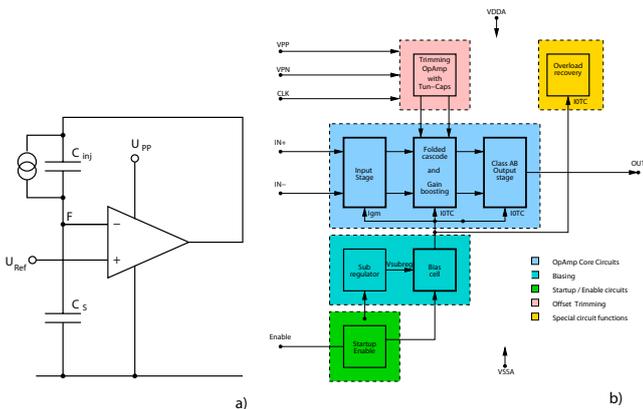


Abb. 1: a) Speicherstruktur b) Blockschaltbild
 Fig. 1: a) Analog memory structure b) Block diagram

rationsverstärkers an. Dieser ist ein Hochvoltverstärker. Die Programmierspannung U_{pp} ist seine Versorgungsspannung. Der Knoten F des Speicherelementes ist an das Gate des negierenden Eingangs angeschlossen, der Ausgang des Verstärkers an den Injektor C_{inj} zum Beschreiben der Zelle. Somit ist der Verstärker als Spannungsfolger beschaltet.

Ist die Spannung an beiden Eingängen unterschiedlich, wird die Differenz verstärkt ausgegeben. Am Ausgang liegt nun das Maximum an Spannung, also U_{pp} an. Damit setzt der Programmiervorgang ein, über C_{inj} fällt eine Spannung ab, die größer als die Einsatzspannung ist, und ein Tunnelstrom beginnt zu fließen. Nähert sich der Spannungswert auf dem Floating-Gate F der Referenzspannung U_{Ref} an, verringert sich die Spannung am Ausgang des Verstärkers, bis sie unter den Einsatzpunkt des Tunnelstromes fällt. Damit ist der Programmiervorgang abgeschlossen und der Wert von U_{Ref} auf dem Floating-Gate F abgelegt und kann ausgewertet werden.

Für die Anwendung als Analogwertspeicher werden andere Anforderungen gestellt als dies für Digitalspeicher der Fall ist. Während es zur Unterscheidung von zwei Zuständen „0“ und „1“ nur notwendig ist, dass die Leseschwelle von keinem der Werte über- bzw. unterschritten wird, verändern schon geringe Ladungsverluste den abgelegten Analogwert. Hier muss der Programmiervorgang genau gesteuert werden, damit der Analogwert nicht über- oder unterschritten wird. Abbildung 1b) zeigt das Blockschaltbild des Operationsverstärkers. Die elektrisch programmierbare Speicherstruktur stimmt während eines Abgleichschrittes mit kurzgeschlossenen Eingangs-Pins den Offset des Verstärkers ab. Der Vorteil der Methode liegt auf der Hand. Man muss nur noch zwei Programmierspannungen bereitstellen. Dies kann entweder durch eine interne Ladungspumpe erfolgen, oder man legt die erforderlichen Spannungen von außen während des Bauelemente-Tests an. Mit einer Ladungspumpe ist es möglich, die Verstärker bei jedem Einschalten neu abzugleichen und damit auf veränderte Umweltbedingungen sowie Alterung zu reagieren.

at the output. Thus, the maximum voltage U_{PP} is now at the output. At this point, the programming process begins and a voltage is applied to C_{inj} that is larger than the threshold voltage, thus causing the tunnel current to flow. If the voltage value approaches the floating gate F of the reference voltage U_{Ref} , the voltage at the amplifier output decreases until it is below the injection limit of the tunnel current.

This completes the programming phase and the value from U_{Ref} is applied to floating gate F for further processing. Analog data storage applications have different requirements from digital data storage. With digital data, it is only necessary to distinguish between two states, namely “0” and “1” by ensuring that the stored value is on one side or the other of the threshold. With analog data however, even the slightest changes in charge will cause a change in the analog value. Thus, programming must be precisely controlled to ensure that the value does not go below or above the analog threshold value. Figure 1b shows a block diagram of an op-amp. During the trimming step, the electrically programmable memory structure trims the amplifier offset by short-circuiting the input pin. The advantage of this method is apparent. It is only necessary to supply two programming voltages. These voltages can be provided from an internal charge pump or applied externally while testing the component. By using a charge pump, the amplifier can be trimmed each time it is started and thus accommodate changes in the surrounding conditions as well as component aging.

Results

Figure 2 displays two Bode diagrams of the amplifier that has been implemented. The values of the electrical load applied were $C_L = 100$ pF, $R_L = 10$ k Ω . The amplifier was operated at feedback loop gains of 100 (40 dB) and 10,000 (80 dB). A gain of 10,000 is only possible with a trimmed offset. The diagram shows that the amplifier achieves good stability values even when subjected to relatively large capacitive loads. Figure 3 displays the offset curve before and after programming. It is readily apparent that the offset in the input voltage range has decreased significantly from zero to 2 V (< 50 μ V). At an input voltage > 2 V, the value increases rapidly. This is due to the fact that a switchable complementary input stage was used. At around 2 V, this switches from a PMOS input stage to an NMOS input stage. This also causes a change in the offset. However, this is not critical since typical applications always use a DC bias point that lies between 0 and 2 V. Rail-to-rail compatibility is only required in order to use the op-amp in nonlinear applications. Some further measurement results are listed in the following table:

Ergebnisse

In Abbildung 2 sind zwei Bodediagramme des realisierten Verstärkers dargestellt. Die Lastbedingungen waren $C_L = 100 \text{ pF}$, $R_L = 10 \text{ k}\Omega$. Der Verstärker wurde mit zwei Schleifenverstärkungen von 100 (40 dB) und 10000 (80 dB) betrieben. Der Betrieb mit einer Verstärkung von 10000 ist nur mit abgeglichenem Offset möglich. Das Diagramm zeigt, dass der Verstärker auch bei einer relativ hohen Lastkapazität gute Stabilitätswerte erzielt.

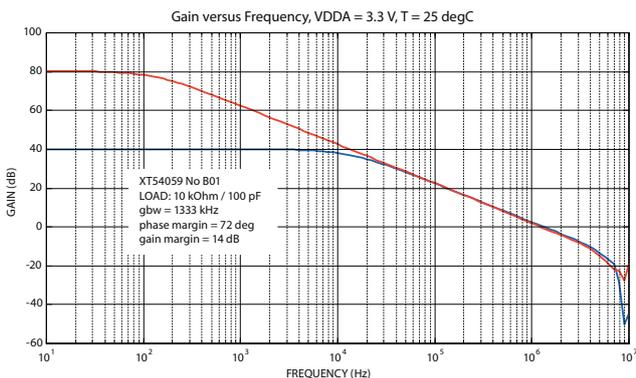


Abb. 2: Gemessener Frequenzgang des Verstärkers
Fig. 2: Measured frequency response of the amplifier

Abbildung 3 stellt den Offsetverlauf vor und nach der Programmierung dar. Man erkennt, dass sich der Offset im Eingangsspannungsbereich von Null bis 2 V stark verringert hat ($< 50 \text{ }\mu\text{V}$). Ab einer Eingangsspannung $> 2 \text{ V}$ steigt der Wert stark an. Dies liegt daran, dass eine umschaltbare komplementäre Eingangsstufe verwendet wurde, die ab einer Spannung von ungefähr 2 V von einer PMOS Eingangsstufe auf eine NMOS- Eingangsstufe umschaltet. Dies führt auch zu einer Veränderung im Offset. Diese Tatsache ist aber nicht kritisch, da man als Anwender den DC-Arbeitspunkt der Schaltung immer zwischen 0 und 2 V legen wird. Die Rail-to-Rail Tauglichkeit ist nur notwendig, um den Operationsverstärker auch bei nichtlinearer Arbeitsweise betriebsfähig zu halten. Weitere messtechnisch ermittelte Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst:

Die Wirksamkeit des neuen Abgleichkonzeptes konnte erfolgreich vorgeführt werden. Zudem wurden sehr gute Parameter in Bezug auf Rauschen, Stabilität und unabgeglichene Offset für den realisierten Operationsverstärker ermittelt. Dies ist das Resultat völlig neuer Schaltungskonzepte, die sich unter dem Begriff Strukturelle Designmethoden zusammenfassen lassen.

Ansprechpartner / contact:

Dr.-Ing. Dirk M. Nuernbergk
Tel. +49 (361) 663-2520
Email: dirk.nuernbergk@imms.de

Parameter / parameter	Simulationswert / simulation value	Messwert / test result	Einheit / unit
GBW	1.4	1,2 ... 2	MHz
A_{OL}	156	120 (Nachweisgrenze)	dB
A_{CL}	-	1 ... 10.000	1
C_L	1 ... 500	1 ... 380	pF
R_L	> 1	1 ... 1.000	k Ω
V_{DD}	2.5... 3.9	2.5... 3.9	V
V_{OS}	-	-1.5 ... 2 (ohne Abgleich)	mV
V_{OS}	< 50	60 (mit Abgleich)	μV
I_{DD}	80	60 ... 110	μV
E_{noise}	18	24	nV/sqrt Hz

Tab. 1: messtechnische Ergebnisse
Tab. 1: measurement results

As the results show, the new trimming concept is quite effective. Furthermore, the noise, stability, and untrimmed offset values calculated for the op-amp were always very good. This is the result of entirely new circuit concepts that can be encapsulated as "structural design methods".

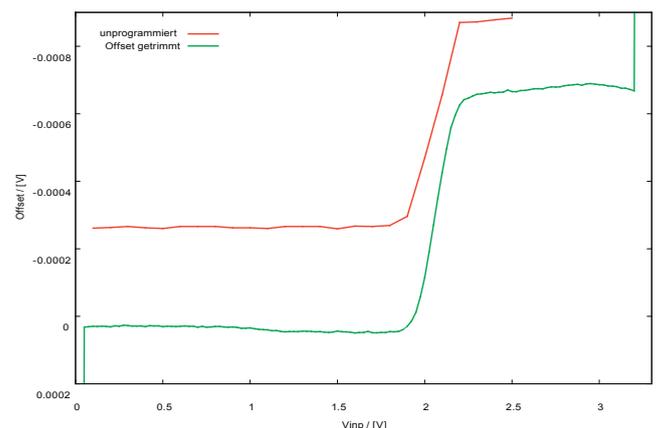


Abb. 3: Offsetspannung über dem Eingangsspannungsbereich vor und nach der Programmierung
Fig. 3: Offset voltage versus input voltage range, before and after programming

Zielstellung

Zur Datenübertragung über kurze Entfernungen ist das 2,4 GHz Band gut geeignet. Neben proprietären Lösungen existieren verschiedene Standards: WLAN, Bluetooth® und ZigBee™. Zur Verbesserung des EMV-Verhaltens der Funkmodule werden symmetrische Schaltungstopologien mit differentieller Signalführung genutzt. Da die Messtechnik in der Regel koaxial und damit single-ended arbeitet, ergibt sich daraus eine Diskrepanz zwischen Testequipment und Applikation.

Lösungsmöglichkeiten für diesen Konflikt sollen am Beispiel einer Loadboardentwicklung in Zusammenarbeit mit der Firma Atmel® für einen ZigBee-Transceiver aufgezeigt und diskutiert werden. Speziell auf die Probleme der HF-Kontaktierung, HF-Leitungsführung und HF-Kalibrierung wird der Schwerpunkt gelegt. Die erreichten HF-Parameter des Loadboards werden in Form von entsprechenden Messergebnissen dargestellt.

Einleitung

HF-Transceiver-ICs gemäß IEEE 802.15.4™ Standard (Netzwerklayer für ZigBee) sind für den Einsatz in low cost / low power Anwendungen zur Datenübertragung per Funk konzipiert. Bei dem IC AT86RF230 handelt es sich um ein echtes „SPI-zu-Antenne“ System, welches über ein digitales Interface bereitgestellte Daten transparent überträgt. Dazu sind komplexe digitale Schaltungen (digitale Signalverarbeitung, Register, SRAM, Hardware-MAC) kombiniert mit dem 2.4 GHz HF-Frontend im IC implementiert. Obwohl damit schon umfangreiche „Built-in-self-Tests“ möglich sind und Konzepte für den on-chip HF-Test existieren, kann bisher auf einen finalen HF-Test der Bauelemente in der Produktion nicht verzichtet werden. Die Frage des Produktionsvolumens pro Jahr spielt außerdem eine zentrale Rolle, da gerade bei „hochvolumigen“ ICs die Testzeit ein entscheidender Kostenfaktor ist. Dasselbe gilt für den Wafertest, wobei die Kontaktierung und Kalibrierung ebenfalls ein spezielles Problemfeld bilden.

Der Frequenzbereich von 2.4 GHz und die differentiellen HF-Signale stellen besondere Anforderungen an das Tester-Loadboard, die schaltungstechnisch umzusetzen sind. Auf einschlägige Erfahrungen bei Loadboardentwicklung und der Evaluierung von ICs konnte dabei zurückgegriffen werden.

HF-Interface

Das Device-under-Test (DUT), welches hier im QFN32 Gehäuse (5 x 5 mm) vorliegt, wird mit einer HF-tauglichen Fassung auf dem Loadboard kontaktiert. Derartige Fassungen verwenden entweder federnde S-Kontakte [17] oder Pogo-

Objective

The 2.4 GHz band is well-suited for transferring data across short distances. In addition to proprietary solutions, there are also various standards: WLAN, Bluetooth® and ZigBee™. Using balanced circuit topologies with differential signal paths improves the EMC properties of the wireless modules. Since the measurement technology is largely coaxial and single ended, there is a discrepancy between the test equipment and applications.

As a potential solution to this problem, a load board developed together with Atmel® for a ZigBee transceiver is shown and discussed. Special emphasis is given to the discussion of problems in RF contacts, RF signal paths, and RF calibration. The achievable RF parameters of the load board are displayed using relevant measurement results.

Introduction

RF-transceiver ICs complying with the IEEE 802.15.4™ standard (network layer for ZigBee) are conceived for low-cost/low-power wireless data transfer applications. The IC AT86RF230 is a genuine “SPI to Antenna” system for transmitting data made available via a digital interface. This system combines complex digital circuits (digital signal processing, register, SRAM, hardware MAC) with the 2.4 GHz front end in an IC.

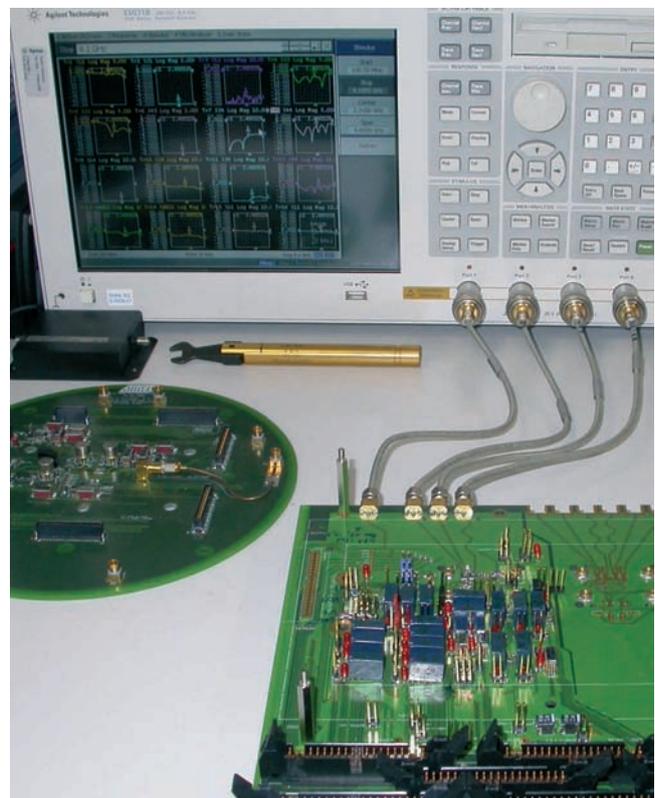


Abb. 1: Messaufbau für symmetrische HF-Messungen mit 4 Port Netzwerkanalysator
Fig. 1: Test setup for symmetrical HF measurements with 4 port network analyzer

Pins ^[2]. Die Footprints für das PCB sind ähnlich, so dass beide Fassungen für vergleichende Messungen auf dasselbe PCB montiert werden können. Ebenso könnte ein Device anstelle der Fassung direkt auf die Platine gelötet werden, um den Einfluss der Fassungen charakterisieren zu können. Die Verbindungen vom Loadboard zu den HF-Ports des Testers werden über steckbare BMA/OSP-Verbinder oder über HF-Kabel und SMA-Buchsen realisiert (s. Abb. 1). Bei Verwendung von SMA-Buchsen kann das Loadboard bis zu dieser Ebene ohne zusätzliche Adapter im Labor charakterisiert werden und ist so auch für Labormessungen gut einsetzbar.

HF-Leitungsführung

Die Art der Realisierung der HF-Verbindungen ist der wesentlichste Einflussfaktor auf die HF-Eigenschaften des Loadboards. Verschiedene Varianten sind möglich:

- Microstripleitungen
- Striplines
- Coplanarleitungen
- Coplanarleitungen mit Groundplane
- Koaxiale Leitungen (semi-rigid Kabel)
- Kombinationen (z.B. Microstrip und Koax)

Die Auswahl des Leitungstyps hängt oft von den räumlichen Gegebenheiten (Lage der Steckverbinder, Länge der Leitungen, Dichte der Komponenten auf dem PCB) ab. Insbesondere stellen die Übergänge von einem Leitungstyp zu einem anderen und die Anbindung von Steckverbindern einen großen Unsicherheitsfaktor dar. Speziell bei hohen Frequenzen oder breitbandigen Anwendungen treten sehr leicht ungewollte Impedanztransformationen auf, die eine sinnvolle Messung stark beeinträchtigen können. Dies gilt gleichermaßen für HF-Leitungen und digitale Signale mit hohen Datenraten.

HF-Kalibrierung

Eine vektorielle Fehlerkorrektur ist unerlässlich, wenn die S-Parameter eines DUTs bestimmt werden sollen. Dazu können etablierte Verfahren genutzt werden, die in Netzwerkanalysatoren implementiert sind (SOLT, TRL, etc.).

Auf den realisierten Loadboards wurde eine Normalisierung vorgenommen. Dazu wurden die HF-Leitungen zum DUT exakt dupliziert und gespiegelt angeordnet. Auf eine durchgängige impedanzkontrollierte Leitungsführung und ein HF-Layout, das für den Frequenzbereich von 2.4 GHz tauglich ist, wurde geachtet.

So konnte die Dämpfung der Strukturen bestimmt werden, deren Frequenzgang sehr gut linear ist. Im schmalen Frequenzband von 2.4 bis 2.48 GHz könnte generell mit nur

Even though this makes extensive “built-in self-tests” possible and concepts already exist for an on-chip RF test, it is still not possible to eliminate the need for a final RF test of components in production scenarios. The issue of annual production volume plays a central role, since the testing time required for high-volume ICs is a critical cost driver. The same applies to the wafer test, whereby contacting and calibration have their own set of problems.

Implementation of the frequency band range of 2.4 GHz and the differential RF signals places high demands on the tester load board, and these issues must be addressed in the design of the circuit. It was possible to exploit past experience in developing load boards and evaluating ICs.

RF Interface

The device under test (DUT) – installed in this instance in a QFN32 enclosure (5 x 5 mm) – was contacted using an RF-compliant socket on the load board. These types of sockets use either spring-loaded S-contacts ^[1] or Pogo pins ^[2]. The PCB footprints of these two sockets are similar, thus making it possible to use either type for comparative measurements on the same PCB. Furthermore, it was also possible to directly solder a device to the board without the socket and thus make it possible to characterize the socket.

The load board was connected to the HF port of the tester using pluggable BMA/OSP connectors or using RF cable and SMA sockets (s. Fig. 1). For the tests using SMA sockets, it was possible to characterize the load board in the lab up to this point without the need for additional adapters. Thus, this test is also highly suitable for lab measurements.

RF Signal Path

The type of RF lines realized is a main factor affecting the RF properties of the load board. Many different variants are possible:

- Microstrip lines
- Strip lines
- Coplanar lines
- Coplanar lines with ground plane
- Coaxial lines (semi-rigid cable)
- Combinations (e.g., microstrip and coaxial)

The choice of line type is often dependent on the spatial conditions (connector positions, line length, and component density on PCB). In particular, the transitions from one line type to another and the connections to the various types of connectors are both significant uncertainty factors. With high frequency and broad-band applications,

einem Dämpfungswert gerechnet werden, wobei der Fehler unter 0.3 dB bleibt (s. Abb. 2). Hierbei spielt die Genauigkeit des gesamten Messplatzes und dessen Toleranzen eine entscheidende Rolle.

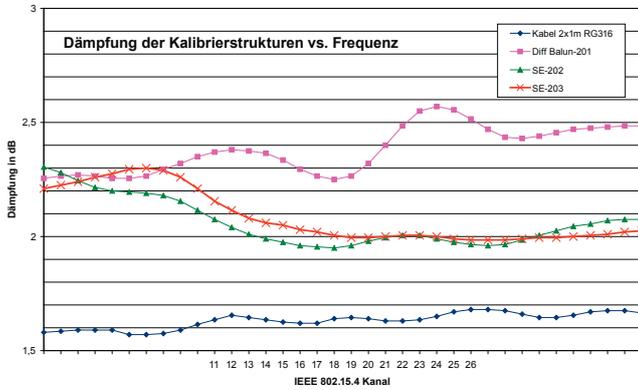


Abb. 2: Dämpfung der Kalibrierstrukturen im „erweiterten“ Frequenzbereich
Fig. 2: Attenuation of calibration structures in “extended” frequency range

Im Produktionstest werden feste Korrekturwerte für einen Loadboardtyp eingesetzt, womit zusätzlicher Messaufwand und damit Messzeit während der Produktion entfallen kann. Außerdem werden Testerressourcen eingespart, die die Kalibrierstrukturen kontaktieren. Eine komplette Charakterisierung der S-Parameter hat sich im Produktionstest als nicht notwendig erwiesen.

Symmetrische HF-Messungen: differentiell vs. single-ended

Symmetrische Schaltungstopologien werden in vielen HF-ICs angewendet. In der Messtechnik fehlt es an symmetrischen Kabeln und Steckverbindern. Verschiedene Netzwerkanalysatoren bieten aber die Messoption an, aus zwei single-ended gemessenen S-Parametern die entsprechenden symmetrischen, auch als „Mixed-Mode“ S-Parameter bezeichnet, zu errechnen. Statt einer symmetrischen Leitung werden zwei einzelne, nicht verkoppelte, unsymmetrische single-ended Leitungen verwendet, die exakt die gleiche Länge aufweisen müssen.

Was die Spektralanalyse betrifft, so sind bisher keine Messgeräte für symmetrische Messungen bekannt. Was bedeutet dies für den Produktionstest? Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten:

- Verwendung von Baluns und single-ended Messungen durchführen
- Messungen der Einzelsignale direkt single-ended und rechnerische Umwandlung in symmetrische/differentielle Messwerte

Beide Verfahren wurden auf einem Loadboard kombiniert. Einerseits wurden die differentiellen IC-Anschlüsse single-ended mit zwei Leitungen herausgeführt, andererseits wurde ein Balun, der die Transformation in die unsymmetrische

troublesome impedance transformations can occur quite easily and these can be very detrimental to the measurement results. This applies to RF lines as well as to digital signals with high data rates.

RF Calibration

It is essential to use vector-based error correction in order to determine the S-parameters of a DUT. The established methods (SOLT, TRL, etc.) implemented in the network analyzers can be used for this purpose.

The manufactured load boards were normalized. To do this, the RF lines to the DUT were precisely duplicated in a mirror configuration. Special care was given to test the continuous impedance throughout the signal path and to ensure that the RF layout was suitable for the frequency range of 2.4 GHz.

It was thus possible to determine the attenuation of the structure with its very linear frequency response. Within the narrow frequency band of 2.4 to 2.48 GHz, it was only possible to make the calculations using an attenuation value, whereby the error remained below 0.3 dB (s. Fig. 2). Here, the measurement precision and tolerances of the entire test setup played a decisive role.

During the production test, fixed correction values were used for one load board type, thus reducing the effort and time required for measurements during production. Furthermore, the test resources required for contacting the calibration structures were eliminated. A complete characterization of the S-parameters was determined to be unnecessary during the production test.

Balanced RF Measurements: Differential vs. Single Ended

Balanced circuit topologies are used in many RF ICs. There are not enough balanced cables and pluggable connectors available for lab measurement applications.

However, various network analyzers offer the measurement option of calculating the relevant balanced parameters (also referred to as “mixed-mode” S-parameters) from just two single-ended S-parameters. Instead of using a balanced line, two separate, uncoupled, unsymmetrical single-ended lines are used that must have the exact same length. There are currently no known spectral analysis units available for balanced measurements.

What does this imply for production tests? There are basically two different possibilities:

- Use of baluns and performing single-ended measurements

Ebene realisiert, in unmittelbarer Nähe zum DUT platziert und die unsymmetrischen Signale wurden auf bekannte Weise herausgeführt und gemessen.

HF-Messungen

Zur initialen HF-Charakterisierung des Loadboards wurden folgende Messungen durchgeführt:

- S-Parameter der differentiellen Kalibrierstruktur
- S-Parameter der single-ended Kalibrierstruktur
- Anpassung und Isolation der HF-Schalter
- Differentielle und single-ended Abschlusswiderstände auf DUT-Fassungsebene
- Ausgangsleistung des ICs über Balun
- Ausgangsleistung des ICs 2x single-ended

Die Ausgangsleistung des DUT-ICs wurde über alle 16 IEEE 802.15.4 Kanäle, die sich von 2.405 bis 2.480 GHz im 5 MHz Kanalraster erstrecken, gemessen. Zusätzlich wurde die Leistung mit einem Offset von ± 50 MHz bzw. ± 100 MHz gemessen. Mit diesen Messergebnissen konnte bewertet werden, welche Differenzen zwischen einem Evaluierungsboard mit sehr kurzen HF-Leitungen und dem Loadboard mit 6 cm HF-Leitung und HF-Schalter auftreten. Die Zielstellung bestand darin, einen Frequenzgang geringer als 1 dB zu erreichen, was auch im erweiterten Frequenzbereich gelungen ist. Dabei bleibt zunächst unberücksichtigt, wie weit die Ausgangsleistung des ICs selbst an den Bandgrenzen zurückgeht, in diesem 1 dB Toleranzband sind alle Effekte mit eingeflossen.

Messergebnisse

Beschränkt man sich auf die IEEE 802.15.4 Kanäle, so ist ein Frequenzgang unter 0.25 dB erreicht worden (s. Abb. 3), was schon an die Genauigkeitsgrenze der verwendeten Messgeräte (FSP7 / FSU26 von Rohde & Schwarz) herankommt. Dieses Ergebnis stimmt mit den Dämpfungswerten, die an der Kalibrierstruktur skalar gemessen wurden, sehr gut überein. Damit ist gegenüber vorangegangenen Lösungen, eine entscheidende Verbesserung der HF-Parameter des Loadboards erreicht worden.

Bei der Ausgangsleistung der ICs ist nicht die Leitungsdämpfung sondern die unerwünschte Impedanztransformation über der Frequenz ein entscheidendes Problem. Auf dem vorliegenden Loadboard konnte in allen Fällen eine Anpassung von besser als 10 dB gemessen werden, typische Werte liegen bei 15 dB (über HF-Leitungen und HF-Schalter).

Die Messungen über einen größeren Frequenzbereich zeigen, dass auch in den Leitungsstrukturen keine größeren Impedanztransformationen oder Resonanzen auftreten. Damit ist dieses HF-Layout auch für Frequenzbereiche bis 4 GHz einsetzbar. Da als Substrat FR-4 verwendet wird, ist

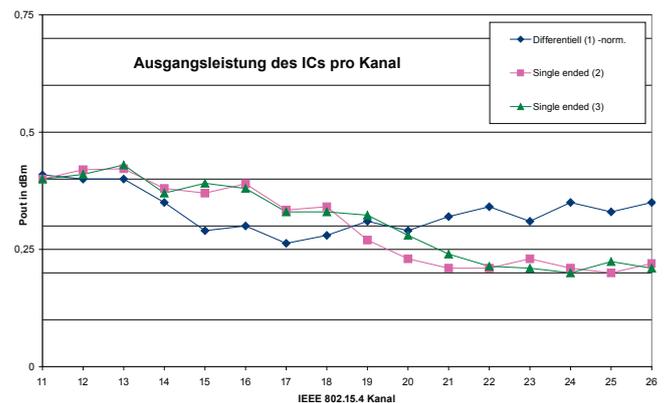


Abb. 3: Ausgangsleistung des ZigBee ICs (normiert)

Fig. 3: Output capacity of ZigBee IC (standardized)

- Direct single-ended measurements of the various signals and converting these values to balanced/differential values

Both methods were combined on one load board. On one side, single-ended differential IC connectors were used. A balun was used on the other side, situated immediately next to the DUT, to convert the signals to unbalanced domain. The unbalanced signals were then led through the circuit and measured in the conventional manner.

RF Measurements

To complete the initial RF characterization of the load board, the following measurements were performed:

- S-parameters of the differential calibration structure
- S-parameters of the single-ended calibration structure
- Adaptation of insulation of RF switches
- Differential and single-ended terminating resistors at the DUT socket level
- Output capacity of ICs via balun
- Output capacity of ICs 2x single ended

The output capacity of the DUT ICs was measured across all 16 IEEE 802.15.4 channels, ranging from 2.405 to 2.480 GHz with 5 MHz increments. Furthermore, the capacity was measured with an offset of ± 50 MHz and/or ± 100 MHz. With these measurement results, it was possible to evaluate the difference between an evaluation board with very short RF lines and a load board with a 6 cm RF line and an RF switch. The main objective was to achieve a frequency response smaller than 1 dB, and this goal was achieved in the extended frequency range. This test ignores how far the IC itself was at its band limits, but all effects have been included in this 1 dB tolerance band.

es unbedingt nötig, die vom PCB-Hersteller verwendeten und charakterisierten Chargen exakt einzuhalten. Durch veränderten Harzgehalt der Glasfaserlamine könnten sich die Leitungsimpedanzen verändern und müssten durch geänderte Layoutparameter nachgestimmt werden.

Zusammenfassung

Mit einem durchdachten HF-Layout kann man auf einem Loadboard für symmetrische, differentielle HF-Signale im 2.4 GHz Band eine vergleichbare Performance erzielen, wie sie auf einem Evaluierungsboard erreicht wurde.

Als HF-Kalibrierung genügt in den meisten Anwendungsfällen eine Normalisierung, welche die Leitungsdämpfungen berücksichtigt. Voraussetzung dafür ist, dass die Leitungen und Bauelemente eine gute Anpassung sicherstellen.

Durch feste Kalibrierungswerte für die Testhardware können Testerressourcen eingespart werden. Der Testablauf wird vereinfacht und die Testzeit wird verkürzt.

Für eine vollständige Kalibrierung werden HF-Standards in DUT-Bauform benötigt, die aber meist nicht verfügbar sind. Umfangreiche fundierte Labormessungen sind eine gute Basis für die erfolgreiche Realisierung eines Produktionstests. Eine Designunterstützung ist für den Test ein sehr wesentlicher Aspekt. Damit wird die Realisierung von Built-In-Self-Test Funktionen möglich und der Produktionstest wird effektiver.

Ansprechpartner / contact:

Dipl.-Ing. Björn Bieske
Tel: +49 (3677) 69-5527
Email: bjoern.bieske@imms.de

[1] (www.Johnstech.com)

[2] (www.Rasco.de)

Measurement Results

By limiting the test to the IEEE 802.15.4 channels, it was possible to achieve a frequency response within 0.25 dB (s. Fig. 3), which approaches the maximum degree of precision possible for the test equipment in use (FSP7 / FSU26 from Rohde & Schwarz). This result corresponds very well to the scalar attenuation values measured on the calibration structure.

In comparison with previous solutions, this represents a significant improvement in the RF parameters of the load board. The line attenuation is not a significant problem affecting the output capacity of the ICs. Instead, the impedance transformation as a function of frequency is a more serious issue. On the given load board, some of the measured matching results were better than 10 dB, and the typical values were around 15 dB (across all RF lines and RF switches).

The measurements made across a larger frequency range indicate that the line structures do not contain any significant impedance transformations or resonances. Thus, this RF layout can be used for frequency ranges of up to 4 GHz. Since FR-4 was used as the substrate material, it is absolutely necessary to maintain strict compliance with the batch sizes used and characterized by the PCB manufacturer. The change in resin content of the glass fiber laminates could change the line impedances and thus require retuning after making changes to the layout parameters.

Summary

By using a well-considered RF layout for balanced, differential RF signals in the 2.4 GHz band range, it was possible to attain comparable results from a production load board as from the evaluation board.

In most application scenarios, normalization that takes line attenuation into consideration is sufficient as an RF calibration method. As a prerequisite, the lines and components must be well matched. By fixing the calibration values for the test hardware, it is possible to save test resources. The test procedure was simplified and the test time was shortened.

Complete calibration requires RF standards in the DUT configuration, which are not available for the most part. Extensively well-founded lab measurements serve as a good basis for successfully realizing the production test. Design support is a very important aspect of the test. This makes it possible to implement built-in self-test functions and thus increase the effectiveness of the production test.

Einleitung

Herkömmliche Empfängerschaltkreise für ISM-Anwendungen benötigen eine beträchtliche Anzahl externer Bauteile. Wenn diese integriert werden könnten, wäre das Systemdesign stark vereinfacht und die Gesamtkosten wären geringer. Das Erreichen dieses Ziels ist jedoch nicht einfach, da integrierte passive Bauteile starken Parameterschwankungen unterliegen. In Abb. 1 ist beispielhaft die erwartete Ausbeute eines RC-Filters dargestellt. Nur der grüne Teil würde eine Spezifikation von $\pm 1\%$ für die Mittenfrequenz erfüllen.

Für moderne Kommunikations-Standards ist der Direct-Conversion Receiver die Lösung dieses Problems. Er erlaubt in Deep-Submicron CMOS-Technologien den Transfer der analogen Signalverarbeitung in die digitale Domäne. Dadurch wird das Problem der Prozessparameterschwankungen umgangen. Diese Lösung hat jedoch bei universellen HF-ICs für die ISM-Bänder unter 1 GHz einige Nachteile:

- Die Abdeckung eines weiten Betriebsspannungsbereichs von 2 V bis 5.5 V ist nicht so einfach.
- Für Automobil-Anwendungen geeigneter ESD-Schutz ist schwieriger.
- Schon existierende ICs haben einen Stromverbrauch von ca. 20 mA. Das ist 2-3 mal so viel wie bei analogen ICs.
- Höhere Maskenkosten machen die Entwicklung teurer.

Aus diesen Gründen ist ein normaler BiCMOS-Prozess immer noch eine gute Wahl. Digitale Funktionen können jedoch nur in begrenztem Umfang realisiert werden. Für die Integration von bisher externen Komponenten ist also nur eine analoge Realisierung möglich, und das Problem der Prozesstoleranzen muss gelöst werden. Hierfür wurden Schaltungskonzepte genutzt, die robust gegenüber Prozesstoleranzen sind, sowie Selbstkalibrierung (built-in self-calibration, BISC) von kritischen Baublöcken.

Baublöcke

Ein Blockschaltbild eines ISM-Band Empfänger-ICs ist in Abb. 2 dargestellt. Bisher war das ZF-Filter ein externes Bauteil, und für den FSK-Demodulator wurde ein externer Frequenzdiskriminator benötigt. Beide Bauteile werden in Zukunft vollständig integriert sein. Die PLL ist schon vollständig integriert, ihre Eigenschaften werden jedoch durch eine

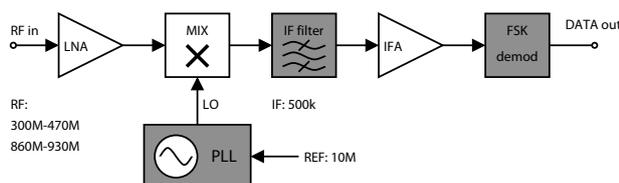


Abb. 2: vereinfachtes Blockschaltbild des ISM-Empfänger-ICs
Fig. 2: simplified block diagram of the ISM band receiver IC

Introduction

Traditional ISM-band receiver ICs require a considerable number of external components. If they could be integrated, system design would be simplified and overall costs could be reduced. This goal can not be easily achieved, due to the wide parameter spread of integrated components. As an example, the expected yield of a simple RC filter is shown in Fig. 1. Only the green part would pass a specification of $\pm 1\%$ for the center frequency.

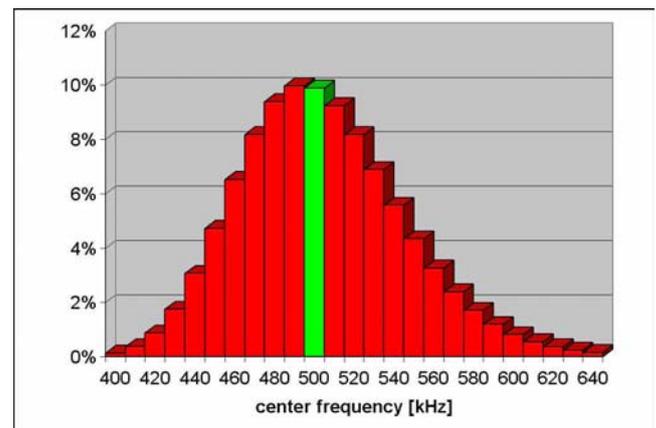


Abb. 1: Ausbeute eines integrierten RC-Filters ohne Kalibrierung
Fig. 1: yield of an integrated RC filter without calibration

For modern communication standards, the solution is the direct conversion receiver architecture. Thanks to deep-submicron CMOS process technology, it permits the transfer of most analog signal processing to the digital domain. This avoids process parameter variations nearly completely. For general-purpose RFICs targeted at the ISM bands below 1 GHz, this solution is not always optimal:

- Covering a wide supply voltage range from 2 V up to 5.5 V is not straightforward.
- ESD protection suitable for automotive applications becomes more difficult.
- already existing ICs have a current consumption of ca. 20 mA, which is 2-3 times as much as analog ICs.
- mask costs for development runs are too high.

For these reasons, a standard sub-micron BiCMOS process is still a good choice, but the amount of digital functions that can be realized economically is small. If previously external components shall be integrated, they have to be implemented in an analog way, and the problem of process tolerances has to be solved. This has been done by use of circuit concepts which are insensitive to process parameter variations, and by built-in self-calibration of critical building blocks (BISC).

sehr hohe VCO-Steilheit negativ beeinflusst. Diese war notwendig, um den großen LO-Frequenzbereich sowie die Prozesstoleranzen abzudecken.

FSK-Demodulator

Der integrierte FSK-Demodulator nutzt das Prinzip des Phasenkokinzidenzdemodulators und nutzt einen Injection-Locked Oszillator (ILO) als Frequenzdiskriminator. Seine Mittenfrequenz wird nach dem Einschalten digital auf 500 kHz kalibriert, sie kann bei Bedarf neu kalibriert werden. Für die Kalibrierung wird die Übereinstimmung von Mittenfrequenz und Freilauffrequenz des ILO ausgenutzt. Dadurch reduziert sich die Kalibrierung des Demodulators auf die Kalibrierung eines Oszillators. Ein Bruchteil der Quarzfrequenz wird als Referenzfrequenz verwendet. Alle anderen Parameter sind relativ zur Mittenfrequenz und durch Bauteilverhältnisse bestimmt und benötigen keine Kalibrierung. Der verbleibende Frequenzfehler wird durch eine AFC ausgeglichen, welche einen Totbereich enthält. Dadurch besitzt der Demodulator keine untere Grenzfrequenz.

ZF-Filter

Das integrierte ZF-Filter arbeitet nach dem Switched-Capacitor-Prinzip. Dieses Schaltungskonzept ist unempfindlich gegenüber Prozesstoleranzen und benötigt keine Kalibrierung. Das Filter besteht aus zwei Biquad-Stufen. Es arbeitet mit einer Abtastfrequenz von 10 MHz, bei einer Mittenfrequenz von 500 kHz. Dadurch sind die Anforderungen an Antialiasing- und Rekonstruktionsfilter relativ moderat. Die 6 dB-Bandbreite kann zwischen 200 kHz und 60 kHz umgeschaltet werden. Das Filter hat einen Dynamikbereich von mehr als 60 dB, einschließlich Antialiasing- und Rekonstruktionsfilter beträgt die Stromaufnahme 1.6 mA.

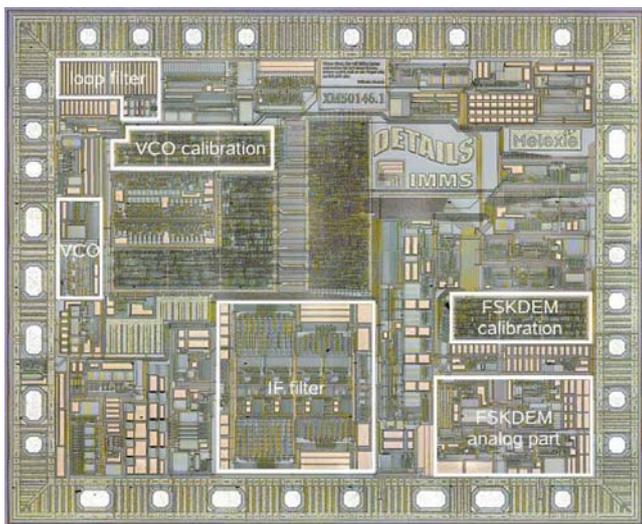


Abb. 3: Chipfoto des Empfänger-Testchips
Fig. 3: chip foto of the receiver testchip

Building blocks

A block diagram of an ISM-band receiver IC is shown in Fig. 2. Previously, the IF filter was an external component, and the FSK demodulator used an external frequency discriminator. Both will be integrated completely. The PLL is already fully integrated, but suffers from a high VCO gain, which is caused by the large tuning range required to cover a large LO frequency range and process parameter deviations.

FSK Demodulator

The integrated FSK demodulator is based on the phase-coincidence demodulator and uses an injection-locked oscillator (ILO) as frequency discriminator. The center frequency of the demodulator is calibrated digitally to 500 kHz at power-on, and can be recalibrated later if required. Calibration exploits the correlation between center frequency and free-running frequency of the ILO. Calibration of the FSK demodulator is reduced to calibration of an oscillator. A fraction of the quartz frequency is used as reference. All other properties of the demodulator can be obtained by component ratios and do not require calibration. The remaining frequency error is removed by an AFC circuit which contains a dead-band, so that no lower cut-off frequency is introduced.

IF filter

The integrated IF filter is implemented as a switched-capacitor filter. This circuit concept is insensitive to process parameter variations and thus does not require calibration. The filter consists of two biquad stages. The sample rate is 10 MHz, at a center frequency of 500 kHz. This relaxes the requirements for anti-aliasing and reconstruction filters. The 6 dB-bandwidth can be switched between 200 kHz and 60 kHz. A dynamic range of more than 60 dB is achieved at a current consumption of 1.6 mA including anti-aliasing and reconstruction filters.

PLL

Digital pre-tuning is used to reduce the VCO gain, without reducing the achievable output frequency range. During calibration, the tuning voltage of the VCO is set to the desired value, and the same algorithms that were investigated for the FSK demodulator can also be applied here. However, it has to be ensured by the calibration algorithm, that the prescaler can handle all VCO frequencies that are generated during the calibration process.

Experimental results

An experimental receiver test-chip that contains all pre-

PLL

Digitales Pre-Tuning wird eingesetzt, um die VCO-Steilheit zu reduzieren, ohne den möglichen Ausgangsfrequenzbereich zu reduzieren. Während der Kalibrierung wird die Tuningspannung auf den optimalen Wert gesetzt. Dadurch können die gleichen Algorithmen, die für den FSK-Demodulator untersucht wurden, auch für den VCO genutzt werden. Der Kalibrieralgorithmus muss jedoch sicherstellen, dass der Prescaler für alle während der Kalibrierung auftretenden Frequenzen korrekt arbeitet.

Experimentelle Ergebnisse

Die entwickelten Baublöcke wurden in einem Empfänger-Testchip evaluiert. Ein Chipfoto und das Testboard werden in Abb. 3 und Abb. 4 gezeigt. Der Empfänger war voll funktionsfähig für Betriebsspannungen zwischen 2.2 V und 5.5 V und verbraucht etwa 11 mA. Die erreichten Empfindlichkeiten für FSK-Empfang bei 433.92 MHz und verschiedene Datenraten werden in Abb. 5 gezeigt. Sie sind vergleichbar zu den Vorgängerschaltkreisen, teilweise sogar besser. Die gemessenen Werte zeigen das Potential der entwickelten Baublöcke.

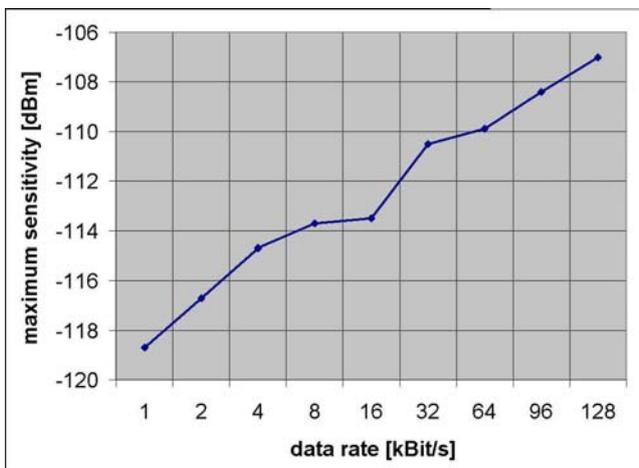


Abb. 5: FSK-Empfindlichkeit bei 433.92 MHz für verschiedene Datenraten und optimalen FSK-Hub

Fig. 5: FSK sensitivity at 433.92 MHz for different data rates and optimum FSK deviation

Diese Arbeit ist im Unterauftrag von Melexis innerhalb des Forschungsprojekts DETAILS entstanden. DETAILS wurde unter dem Förderkennzeichen 01M3071 teilweise vom BMBF gefördert.

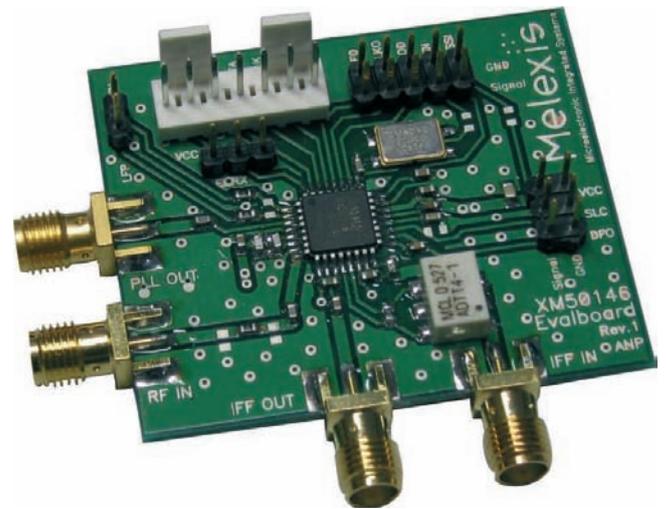


Abb. 4: Evaluierungs-Board

Fig. 4: evaluation board

sented building blocks was fabricated. A chip photo and the evaluation board are shown in Fig. 3 and Fig. 4. The receiver testchip was found to be fully functional for supply voltages between 2.2 V and 5.5 V and consumes 11 mA. The achieved sensitivity values for FSK reception at 433.92 MHz and different data rates are shown in Fig. 5. They are comparable to the values achieved with previous receiver ICs, sometimes even better. This shows the potential of the developed building blocks.

This work has been developed as a subcontractor of Melexis in the research project DETAILS (project label 01M3071), which is partly funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF).

Ansprechpartner / contact:

Dipl.-Ing. Peter Teichmann
Tel.: +49 (361) 663-2510
Email: peter.teichmann@imms.de



Namen, Daten, Publikationen



Names, Facts, Publications

Trainingskurs für Studenten

2007 wurden mehrere Tageskurse zur symbolischen Analyse von Analogschaltungen an der IMMS GmbH durchgeführt. Zielgruppe waren in erster Linie die Studenten der TU Ilmenau, die diese Chance zur Weiterbildung neben ihren obligatorischen Studieninhalten nutzten. Neben der theoretischen Einführung in die Methoden der symbolischen Schaltungsanalyse sowie in die Programme „Mathematica“ und „Analog Insydes“ wurden die erlernten Kenntnisse sofort mit Rechnerübungen und praktischen Beispielen unteretzt.



Der rege Zuspruch bestärkt das Institut dieses Konzept weiter zu verfolgen. Die Kurse, an denen neben den Studenten auch schon ersten Industrie- und Projektpartner teilgenommen haben, werden im regelmäßigen Abständen 2008 fortgeführt. Weitere Kurse, wie z.B. zur automatisierten Schaltungsdimensionierung sowie zur statistischen Analyse und Ausbeuteoptimierung sind in Vorbereitung.

Exkursion zu Industriepartnern

Studenten der TU Ilmenau nutzten die Möglichkeit, das durch Hightech-Unternehmen und Forschungseinrichtungen geprägte Gewerbegebiet Erfurt-Süd-Ost kennenzulernen. Einerseits besuchten die Studenten den Institutsteil der IMMS GmbH und andererseits den Halbleiterhersteller X-FAB Semiconductor Foundries AG.

Tutorial mit praktischem Bezug

Auf der vom 26.-28. März in München stattgefundenen ersten GMM/GI/ITG Fachkonferenz „ZuD 2007 - Zuverlässigkeit und Entwurf“ haben die IMMS GmbH und die MunEDA GmbH gemeinsam ein Embedded Tutorial zu der Thematik: „DFM-DFY Circuit Design for Manufacturability and Yield – Statistische Analyse und Ausbeute Optimierung von analogen Schaltungen“ durchgeführt. Das gut besuchte Seminar ist ein weiterer erfolgreicher Baustein in der seit 2003 gut funktionierende Zusammenarbeit der beiden Firmen. Neben Projektarbeiten spielt die Qualifizierung von Nachwuchskräften und Fachleuten eine bedeutende Rolle in der Kooperation.

Training Course for Students

In 2007, IMMS GmbH held many single-day training courses on the symbolic analysis of analog circuits. The main target audience consisted of students from Technical University Ilmenau who took part in this advanced training in addition to their obligatory program. In addition to a theoretical introduction to the methods of symbolic circuit design and the computer programs “Mathematica” and “Analog Insydes,” the acquired knowledge is applied immediately in computer exercises and practical examples. The keen interest in this course has convinced the institute to continue developing this concept. The courses in which industrial and project partners have already participated will be continued at regular intervals in 2008. Additional courses on Automated Circuit Dimensioning as well as Statistical Analysis and Yield Optimization are in planning.

Excursions to Industrial Partners

Students at the TU Ilmenau received an opportunity to visit the industrial park of Erfurt-Süd-Ost (South-East Erfurt) with its many high-technology and research institutes. Students visited both the institutional facilities at IMMS GmbH and the semi-conductor manufacturer X-FAB Semiconductor Foundries AG.



Practical Tutorial

At the first-ever GMM/GI/ITG symposium “ZuD 2007 - Zuverlässigkeit und Entwurf” (“Reliability and Design”) held from March 26 to 28 in Munich, IMMS GmbH and MunEDA GmbH held a joint embedded technology tutorial on “DFM-DFY Circuit Design for Manufacturability and Yield – Statistical Analysis and Yield Optimization of Analog Circuits.” The well-attended seminar was yet another successful milestone in the effective collaboration between the two companies that began in 2003. In addition to various projects, training of junior employees and technicians is becoming an increasingly important part of this cooperation.

Mechatroniker

Die Berufsausbildung zum Mechatroniker ist ein recht junger Ausbildungsberuf und wird aus diesem Grund erst seit drei Jahren an der IMMS GmbH angeboten. Unser erster Aspirant auf den Mechatronikfacharbeiterabschluss ist Eugen Rotter und er kommt von ganz weit her. Geboren wurde er in Zorile/Moldawien, bevor er 2003 mit seinen Eltern nach Deutschland umsiedelte. Eugen wurde in Deutschland ein „Hauptschulabschluss“ anerkannt, was heutzutage wahrlich keine optimale Voraussetzung für den Lehrberuf eines Mechatronikers darstellt. Bei dem Auszubildenden wird ein hohes Maß an Wissen und Fertigkeiten in Mechanik, Elektronik bis hin zu Fremdsprachenkenntnissen vorausgesetzt. Doch Eugen wollte arbeiten und lernen und überzeugte im Vorstellungsgespräch am Institut. Nach einem Deutschintensivkurs begann er seine praktische und schulische Ausbildung.

Über die Montage von pneumatischen, mechanischen und hydraulischen Komponenten sowie Installation und Verdrahtung von Sensoren, Aktoren und Wandlern werden dem Azubi mechatronische Gesamtsysteme mit Regeleinrichtungen und Steuerkreisen, Datenübertragungssystemen, Antrieben, Getrieben und Kupplungen näher gebracht. Die berufs-praktische Ausbildung von Eugen führte ihn nicht nur durch die Forschungslabors des Instituts. Im Rahmen von Firmenpraktikas des Forschungsverbundes „VERDIAN“ (s. S. 23) erwarb sich unser Azubi jene Fähigkeiten und Fertigkeiten, die dem Mechatroniker im harten Produktionsbetrieb abverlangt werden. Seine Ausbildung wird er im Februar 2008 mit guten Ergebnissen abschließen.

Seit August 2007 lernt bereits ein zweiter Mechatronik-Azubi an der IMMS GmbH. Max Meister kommt aus Kasachstan, lebt aber bereits seit mehrer Jahre in Deutschland.

Bürokauffrau

Nach der Berufsdefinition her erledigen Bürokauffleute alle kaufmännisch-verwaltenden und organisatorischen Tätigkeiten innerhalb eines Unternehmens. Da diese Tätigkeiten in einem F&E Institut genauso anfallen, bildet die IMMS GmbH seit zehn Jahren in diesem Bereich aus.

Zur Zeit erlernen Isabel Freytag (zweites Lehrjahr) und Franziska Schonert (erstes Lehrjahr) diesen Beruf am Institut. Genau wie beim Mechatroniker ist es eine duale Ausbildung (Schule/Lehrbetrieb). Beide Azubis brachten fachliche Vorbildungen mit, welche aber nicht grundsätzlich verlangt werden. Isabel bestand ein Wirtschaftsabitur, Franziska schloss die Schulausbildung mit einem Fachabitur ab.

Jetzt durchlaufen die Azubis mehrer Stationen im Institut und beschäftigen sich mit dem betrieblichen Rechnungswesen,

Mechatronician

The vocation of mechatronician is a relatively new trade and has been offered for just three years now at IMMS GmbH. Our first trainee for mechatronician is Eugen Rotter, a man who has traveled far to arrive at where he is now. He was born and raised in Zorile, Moldavia, before emigrating to Germany with his family in 2003. His previous education level was only officially recognized as a Hauptschulabschluss – the lowest level of secondary education diploma available in Germany and truly not an optimal start to a career as a mechatronician. Our trainees are required to have a high level of knowledge and proficiency in mechanics, electronics, as well as foreign language skills. Not to be deterred, Eugen wanted to work and study, and he was very convincing during his interview with us at our institute. After completing an intensive German course, he began his practical and academic education.

With tasks ranging from assembly of pneumatic, mechanical, and hydraulic components, installation and cabling of sensors, actuators, and converters, trainees at our institute learn all aspects of mechatronic systems such as controllers and control loops, data transmission systems, drives, gears, and couplings. The practical vocational training for Eugen introduced him to more than just the research labs at the institute. During his company internship as a part of the VERDIAN research initiative (see page 23), Eugen developed all of the skills and capabilities required of a mechatronician in industrial production. He will complete his training program in February 2008 with good results.

A second mechatronician has been training at IMMS GmbH since August 2007. Max Meister comes from the Ukraine and has lived in Germany for several years.

Office Administrator

By definition, office administration trainees learn about the various commercial, management, and organizational work within a company. Since these same tasks are required at an R&D institute, IMMS GmbH has trained persons in this field for the past ten years.

Currently, Isabel Freytag (second training year) and Franziska Schonert (first training year) are learning this trade at our institute. Just as with mechatronicians, this is a dual education program with academic and practical components. Both of these trainees arrived with special qualifications that were beyond the basic requirements. Isabel had completed a high school economics diploma (Wirtschaftsabitur) and Franziska completed secondary school with a vocational diploma (Fachabitur).

mit Buchhaltung, Lohn- und Gehaltsabrechnungen, Statistiken sowie mit allgemeinen Verwaltungsaufgaben. Der gute Umgang mit der Rechentechnik ist da genauso gefordert wie ein vielseitiges Organisationstalent und rasche Auffassungsgabe. Durch das parallele Durchlaufen unterschiedlicher Lehrjahre können sich die beiden Azubis hervorragend unterstützen. Isabel weis bereits wie der betriebliche Informations- und Kommunikationsfluss im Institut funktioniert und kann Franziska unkompliziert in die Handhabung der Abläufe einführen. Mit dieser Vorgehensweise unterstützen sich beide Azubis gegenseitig beim Erlernen der vielseitigen Aufgaben und Tätigkeiten und üben sich im selbständigen und effizienten Handeln.

Nach Abschluss ihrer Ausbildungen werden die zwei Bürokauffrauen über Kenntnisse des Rechts, kaufmännisches Denken, Kenntnisse über Strukturen und Aufgaben des Betriebes sowie Organisationstalent und Geschick zur Bewältigung von Planungsaufgaben verfügen.

Both trainees are working in different areas at our institute and work in operational accounting, bookkeeping, managing salaries, wages, and statistics, as well as general office administration tasks. Good computer skills are required, as are versatile organizational abilities and a rapid grasp of the tasks at hand. Since the two trainees have different levels of experience but complete the program together, they can help each other out with various tasks. For instance, Isabel already understands the information and communication workflows at the institute and can introduce Franziska to these processes in an uncomplicated manner. In this way, the two trainees provide mutual assistance while learning the various vocational aspects of their job and gain experience in running daily operations independently and efficiently.

After completing their training program, the two office administrators will have learned about the legal and commercial aspects of their work, the various company-internal structures and tasks, and the two will have gained key management and organizational skills.



Abb. 1: Eugen Rotter, Isabel Freytag, Franziska Schonert, Max Meister (v.l.n.r.)
tab. 2:

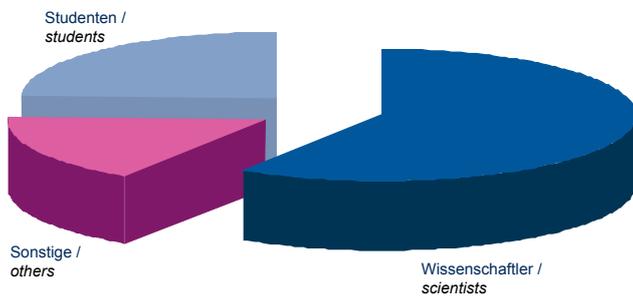


Abb. 1: Personalentwicklung
Fig. 1: Human Resources development

2007 waren in der IMMS GmbH 65 Mitarbeiter beschäftigt. Hiervon waren 49 Wissenschaftler in der Forschung und Entwicklung tätig, das sind ca. 75%. Wie bereits in den letzten Jahren haben darüber hinaus eine große Zahl von Studenten die Angebote der IMMS GmbH wahrgenommen, ihre Ausbildung in praxisorientierter Forschung zu vervollständigen. Durchschnittlich 20 Studenten absolvierten Praktikas, Diplomarbeiten und andere wissenschaftliche Tätigkeiten, was ca. 30% des wissenschaftlichen Personals in der Forschung entspricht. / In 2007, IMMS GmbH employed a staff of 65. Of these, 49 were active as scientists and engineers in research and development – approx. 75% of the staff. As in the past years, a large number of students have taken advantage of the opportunity to round out their studies with practically oriented research work. An average of 20 students completed their internships, diplomas, and other scientific activities, which corresponds to approx. 30% of the scientific and engineering staff in the research department.

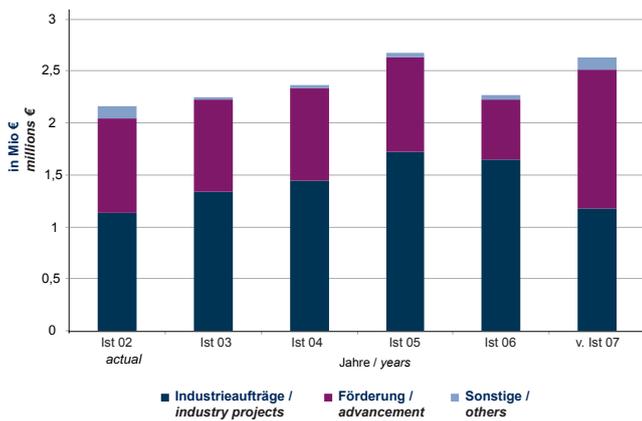


Abb. 2: Projekteinnahmen
Fig. 2: Project revenue

Die Einnahmen aus öffentlicher Projektförderung konnten kräftig gesteigert werden. Dies ist Ausdruck der großen Anstrengung von Politik und Wirtschaft um Spitzenpositionen im globalen Wettbewerb und spiegelt gleichzeitig das Vertrauen wieder, dass der IMMS GmbH als Forschungspartner in industriellen Netzwerken entgegengebracht wird. Insgesamt steht dies auch mit einer Änderung der Förderparadigmen in Verbindung. / The institute was able to increase the public subsidies awarded for project work. This is a result of the major efforts undertaken at the political and economic levels to encourage a world-leading technology in Germany, and it also reflects the level of trust in IMMS GmbH as a research institute with many industry partners. As a whole, this represents a change to the subsidy paradigm in Germany.

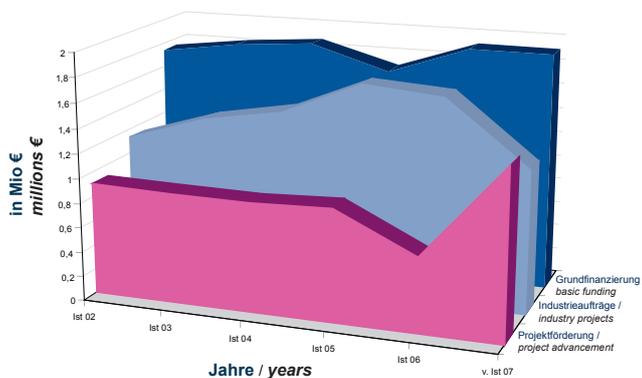


Abb. 3: Finanzierungssäulen
Fig. 3: pillars of finance

Gleichzeitig stellen diese Veränderungen das Institut vor große Herausforderungen. Die industrielle Auftragsforschung wird ihre Bedeutung als eine wesentliche Säule der Gesamtfinanzierung behalten. Öffentlich geförderte Forschung erfordert ein hohes Maß an Ressourcen und Spitzenkräften. Die Gewinnung geeigneten Personals gewinnt hierdurch rasch eine große Bedeutung. Die IMMS GmbH wird sich deshalb gemeinsam mit ihren industriellen Partnern verstärkt in der Ausbildung engagieren und in enger Kooperation als AN-Institut der TU Ilmenau einen wichtigen Beitrag für die Erhöhung der Qualität in der Lehre und für die Bindung der Absolventen an die Region Thüringen leisten. / But at the same time, these changes also present the institute with significant new challenges. Industrial research contracts will remain important as one of the main sources of our institute's funding. Publicly subsidized research requires a high degree of resources and highly skilled personnel. The acquisition of capable human resources is rapidly gaining in importance. Hence, we at IMMS GmbH are cooperating with our industry partners to offer more training opportunities. Working together with the TU Ilmenau as an associated institute, IMMS GmbH is contributing to the increased quality of teaching and helping to secure work for graduates in the Thuringia area.

Publikationen / *Publications*

[1] St. Hesse, T. Maass, Dr. Ch. Schäffel, M. Katzschmann
Reducing the positioning uncertainty of a linear direct drive system with 200 mm travel range
 Proceedings of the 7th Euspen - European Society for Precision Engineering - International Conference, S. 204-207, 20.-24. Mai 2007, Bremen

[2] P. Febvre, H. Töpfer (IMMS), Th. Ortlepp, B. Ebert, S. Badi, F. H. Uhlmann
Superconducting Photosensitive Interface for Triggering RSFQ Circuits
 IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 2, page 530-533, June 2007

[3] R. Sommer
Automated Behavioral Modeling and Analytical Model-order Reduction by Application of Symbolic Circuit Analysis for Multi-physical Systems
 Proceedings EUROSIM 2007, 6th Congress on Modelling and Simulation, 9.-13. September 2007, Ljubljana (Slowenien)

[4] T. Rossbach, M. Götze, M. Eifart, W. Kattaneq
Design and Implementation of Wireless Sensor Networks Facing Range Limitations and Varying Environmental Conditions
 Proceedings of 18th IEEE International Symposium on „Personal, Indoor and Mobile Radio Communication“ PIMRC 2007, 3.-7. September 2007, Athen (Griechenland)

[5] T. Rossbach, M. Götze, M. Eifart, W. Kattaneq
Wireless Sensor Networks at their Limits: Design Considerations and Prototype Experiments
 Proceedings of 52nd Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische Universität Ilmenau, S. 287–292, 10.-13. September 2007, Ilmenau

[6] G. Knoblinger¹, M. Fulde^{1,2}, D. Siprak³, U. Hodel³, K. Von Arnim³, Th. Schulz³, C. Pacha³, U. Baumann⁴, A. Marshall⁵, W. Xiong⁵, C. R. Cleavelin⁵, P. Patruno⁶, K. Schrufer³

¹ Infineon Technologies AG, Villach, Austria, ² Technical University Munich, Munich, Germany, ³ Infineon Technologies AG, Munich, Germany,

⁴ IMMS, Ilmenau, Germany, ⁵ Texas Instruments Inc., Dallas, TX, USA,

⁶ SOITEC S.A., Bernin, France

Evaluation of FinFET RF Building Blocks
 IEEE International SOI Conference, 1.-4. Oktober 2007, Indian Wells (USA)

Vorträge / *Lectures*

[1] R. Sommer
Symbolische Approximationsverfahren zur automatischen Modellgenerierung linearer und nichtlinearer Systeme
 6. ITG/GI/GMM-Workshop „Multi-Nature Systems: Entwicklung von Systemen mit elektronischen und nichtelektronischen Komponenten“, 13. Februar 2007, Erfurt

[2] E. Ulicna
Neue Programmiersprachen für Test und Verifikation in Mixed-Design
 6. ITG/GI/GMM-Workshop „Multi-Nature Systems: Entwicklung von Systemen mit elektronischen und nichtelektronischen Komponenten“, 13. Februar 2007, Erfurt

[3] S. Michael¹, R. Paris², S.Hering³
¹ Melexis GmbH, Erfurt, ² IMMS, Ilmenau, ³ X-FAB Semiconductor Foundries AG, Erfurt

Parameteridentifikation von MEMS auf Wafer-Level mittels dynamischer Messungen
 6. ITG/GI/GMM-Workshop „Multi-Nature Systems: Entwicklung von Systemen mit elektronischen und nichtelektronischen Komponenten“, 13. Februar 2007, Erfurt

[4] J. Broz, T. Halfmann, R. Sommer
¹ FhG ITWM, Kaiserslautern, ² IMMS, Ilmenau
Symbolische Analyse und Reduktion Multi-Physikalischer Systeme
 6. ITG/GI/GMM-Workshop „Multi-Nature Systems: Entwicklung von Systemen mit elektronischen und nichtelektronischen Komponenten“, 13. Februar 2007, Erfurt

[5] R. Sommer
Symbolische Approximationsverfahren zur automatischen Modellgenerierung linearer und nichtlinearer Systeme
 ASIM/GI-Fachgruppen-Treffen 2007, 26.-27. Februar 2007, Bremen

[6] W. Sinn
Navigation, Lokalisierung und Identifikationstrends von GPS, GSM, RFID und Sensorik zur Schaffung neuer Wertschöpfung
 Workshop „Identifikationstechnologien & Sensorik - Stand und Anwendungen“, 27. März 2007, Dresden

[7] R. Sommer
DfM/DfY – Design for Manufacturability und Design for Yield
 Tutorial auf der „Zuverlässigkeit und Entwurf 2007“, 1. GMM/GI/ITG-Fachtagung, März 2007, München

[8] R. Sommer
Designtechnologie und innovative EDA-Werkzeuge - Die Brücke zwischen Schaltungsentwurf und Technologie
 Silicon Saxony Tag, 17. April 2007, Dresden

[9] V. Boos
Graphentheoretischer Ansatz zur Initialdimensionierung analoger Schaltungen
Workshop DASS'07 „Schaltungs- und Systementwurf“, 8.-9. Mai 2007, Dresden

[10] P. Teichmann
Ein integrierter FSK-Demodulator mit Built-In Self-Calibration für ISM-Empfänger-ICs
Workshop „Entwurf von integrierten Analog- / Mixed-Signal- / HF-Schaltungen“, 10. Mai 2007, Dresden

[11] H. Töpfer
Charakterisierung, Optimierung und PEEC-Modellierung für einen Signalübertragungsabschnitt in Multi-Chip-Modulen
Workshop „Entwurf von integrierten Analog- / Mixed-Signal- / HF-Schaltungen“, 10. Mai 2007, Dresden

[12] R. Sommer
Symbolisches Approximationsverfahren zur automatisierten Modellgenerierung linearer und nichtlinearer Systeme
Workshop „Entwurf von integrierten Analog- / Mixed-Signal- / HF-Schaltungen“, 10. Mai 2007, Dresden

[13] C. Schäffel
Integrated planar precision drives
6. Deutsch-Polnischer Workshop, Juli 2007, Ilmenau

[14] R. Sommer
Symbolic Analysis of Multi-physical Systems
6. Deutsch-Polnischer Workshop, Juli 2007, Ilmenau

[15] B. Bieske
Differentielle Messungen von S-Parametern passiver HF - Komponenten
Workshop des FA 9.1 der ITG „Messverfahren der Informationstechnik: Differentielle Hochfrequenzmesstechnik“
28. Juli 2007, Rohde&Schwarz, München

[16] W. Kattaneq
Wireless Sensor Networks at their Limits – Design Considerations and Prototype Experiments
52nd Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische Universität Ilmenau, 10.-13. September 2007, Ilmenau

[17] B. Dimov¹, T. Ortlepp², H. F. Uhlmann²
¹ IMMS, Ilmenau, ² Technische Universität Ilmenau
The Rapid Single-Flux Quantum Technology – a Promising Alternative for the Development of High-Performance Digital Electronics
Kleinheubacher Tagung 2007, 24.-27. September 2007, Miltenberg

[18] R. Sommer
Challenges in Analog/Mixed-Signal EDA
MunEDA User Group Meeting Europe 2007, 25.-26. September 2007, München

[19] V. Boos
Technology Setup for WiCkeD in X-FAB CMOS and BiCMOS Process for Automotive and Sensor Applications
MunEDA User Group Meeting Europe 2007, 25.-26. September 2007, München

[20] M. Hahn
Erfahrungen bei der Verifikation eines Kontrollergesteuerten LIN-Knoten
Fach- und Kooperationsworkshop „Verifikation“, 16. Oktober 2007, Hannover

[21] W. Sinn
Konvergenz von Navigation, Lokalisierung, Identifikation und Mobilkommunikation - Quelle für neue Wertschöpfung
1. Dresdner RFID-Symposium, 6.-7. Dezember 2007, Dresden

Posterpräsentationen / Posters

[1] P. Teichmann
Using BISC to improve integration level and yield of ISM-band receiver ICs
DATE 2007 „Design , Automation and Test in Europe“, 16.-20. April 2007, Nizza (Italien)

[2] V. Boos
Graphentheoretischer Ansatz zur Initialdimensionierung analoger Schaltungen
Dresdner Arbeitstagung Schaltungs- und Systementwurf (DASS07), 8.-9. Mai 2007, Dresden

[3] P. Teichmann
Erhöhung von Integrationsgrad und Ausbeute für ISM-Band Empfänger-ICs durch BISC
1. EDA-Workshop07, 19.-20. Juni 2007, Hannover

[4] S. Hesse, T. Maass, C. Schäffel, M. Katzschmann
Reducing the positioning uncertainty of a linear direct drive system with 200 mm travel range
7th euspen International Conference, 20.-24. Mai 2007, Bremen

[5] T. Rossbach, M. Götze, M. Eifart, W. Kattaneq
Design and Implementation of Wireless Sensor Networks Facing Range Limitations and Varying Environmental Conditions
18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'07), 06. September 2007, Athen (Griechenland)

Patentanmeldungen / *Patent Applications*

- [1] N. Zeike, C. Schäffel
Verfahren und Anordnung zum Ladungsausgleich von in Serie geschalteten Energiespeicherzellen
- [2] C. Schäffel, N. Zeike
Anordnung und Verfahren zur Verhinderung der Wärmeleitung zwischen einer Wärmequelle und einer temperatursensiblen Baugruppe
- [3] N. Zeike, C. Schäffel, U. Mohr, F. Spiller, S. Hesse, V. Bornmann
Statorgeführt bewegte Spulenanordnung
- [4] N. Zeike, C. Schäffel, U. Mohr, F. Spiller, S. Hesse, V. Bornmann
Anordnung eines Präzisionsplanarsystems
- [5] P. Kornetzky, M. Katzschmann
Sensorloses Magnetlager
- [6] J. Klein
Elektronische Schaltung für saturation recovery

Diplomarbeiten / *Diploma Theses*

- [1] Glenn Völkel
Entwicklung eines optoelektronischen Sensorschaltkreises zur Bestimmung von Leuchtdichteverteilungen im Bauelementetest
- [2] Jan Küting
Entwurf eines Demonstrator-ICs für HF-Baublöcke
- [3] Wei Wu
Entwurf eines LC-VCOs für ein Lesegerät für RFID-Tags
- [4] Alexander Rolapp
Konzeption, Aufbau und Einsatzuntersuchungen einer PMU-Einsteckkarte für ein Kleintestsystem
- [5] Daniel Brzoska
Entwurf gedruckter Loop-Antennenstrukturen für Wireless-IC-Anwendungen
- [6] Steffen Herbst
Aufbau und Erprobung eines Messplatzes zur Bestimmung der Stabilität von MEMS
- [7] André Jäger
Entwurf eines vollständig integrierten spannungsgesteuerten LC-Oszillators für Anwendungen im 868 MHz-ISM-Band in einer 0.35µm CMOS Technologie

- [8] Iyead Mayya
Messung des Energieverbrauchs von Sensorknoten in drahtlosen Sensornetzwerken
- [9] Mario Eifart
Entwicklung einer Lokalisierungslösung für mobile Knoten innerhalb drahtloser Sensornetzwerke für Freifeldanwendungen
- [10] Tobias Rossbach
Aufbau eines Mesh-Netzwerkes und Optimierung in Bezug auf relevante Kennwerte
- [11] Marcus Krenzer
Untersuchungen zur Kommunikation eines verteilten Regler-Strecken-Modells über die freie Echtzeit-Ethernet Variante RTnet
- [12] Ingo Gryl
Konzept und Implementierung einer Test-Organisations-Plattform
- [13] Steffen Zange
Konzeption und Evaluierung eines hochpräzisen Widerstandsteilers
- [14] Mischell Rittmeier
Aufstellung eines dynamischen Fehlerbudgets für Direktantriebssysteme am Beispiel des Linearmotors LMS200
- [15] Benjamin Lauterlein
Umsetzung einer verteilten Echtzeitsteuerung von mehrachsigen Präzisionsantrieben
- [16] Sebastian Uziel
Signalvorverarbeitung für einen 3D-Messkopf
- [17] Bianca Liebisch
Luftlagerelement für ein Präzisionspositioniersystem im Grobvakuum
- [18] David Mooz
Entwicklung neuer Konzepte und Anordnungen für Mehrkoordinaten-Direktantriebssysteme
- [19] Christian Vater
Grundlegende Betrachtungen zu einem hochpräzisen 3D-Positioniersystem für Applikationen mit Ladungsträgerstrahl

Studienjahresarbeiten / *Study Project Papers*

- [1] Sebastian Reinhold
HIL-Echtzeit-Signalgenerierung zur Simulation eines 2D-Messsystems

Impressum / Imprint:

Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH
(IMMS)
Ehrenbergstr. 27
D-98693 Ilmenau

Fon: +49 (3677) 69 55 00
Fax: +49 (3677) 69 55 15
URL: www.imms.de
Email: imms@imms.de

Druck:

Print by:

NichtNur Werbe- & Handelsgesellschaft mbH
August-Bebel-Strasse 8
D-98693 Ilmenau
URL: www.nichtnur.de
Email: info@nichtnur.de

Übersetzung:

Translation:

think global GmbH
Schwedter Str. 9a
D-10119 Berlin
URL: www.think-global.com
Email: contact@think-global.com

Alle Rechte sind vorbehalten. Vervielfältigung und Veröffentlichung
nur mit Genehmigung der IMMS gGmbH.
*All rights reserved. Reproduction and publication only with express
IMMS gGmbH.*

Institut für Mikroelektronik- und

Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH

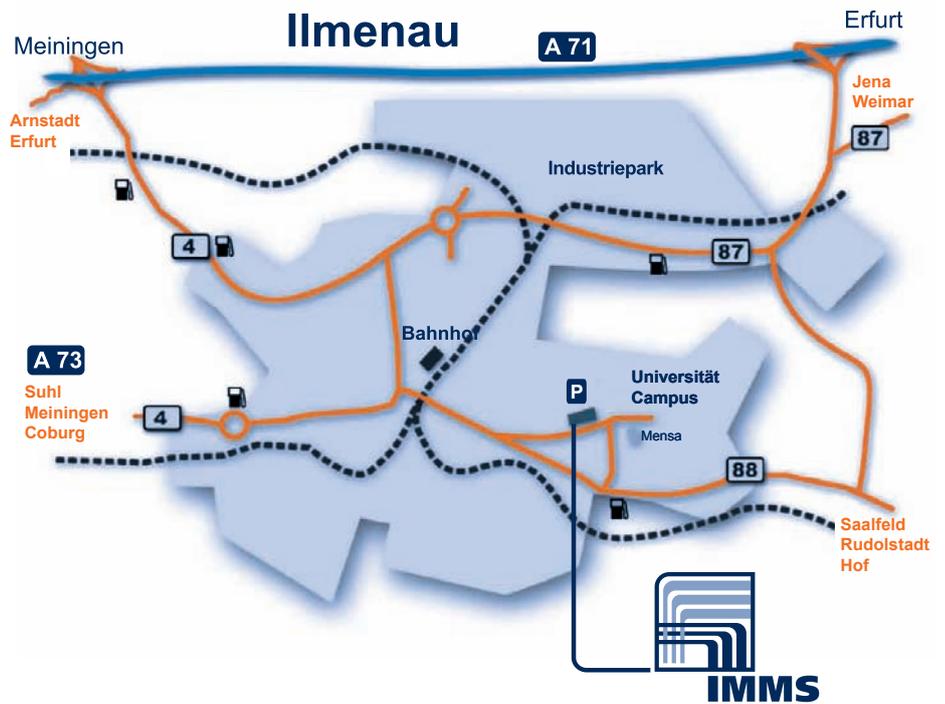
Ehrenbergstr. 27

D - 98693 Ilmenau / Thüringen

Telefon: +49 (3677) 69 55 00

Telefax: +49 (3677) 69 55 15

E-Mail: imms@imms.de



Institutsteil Erfurt

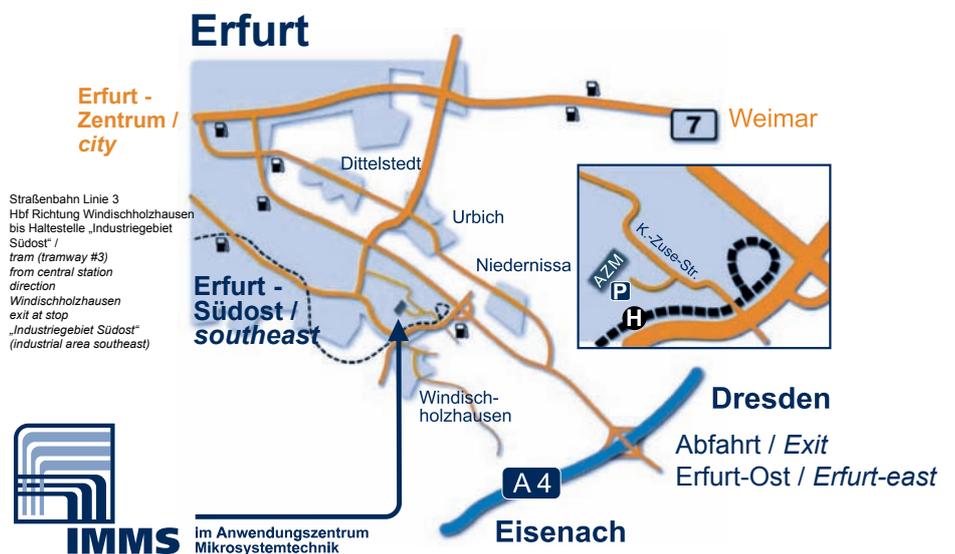
Konrad-Zuse-Straße 14

D - 99099 Erfurt / Thüringen

Telefon: +49 (361) 66 32 500

Telefax: +49 (361) 66 32 501

E-Mail: imms@imms.de



Impressum / Impressum:

Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH
(IMMS)
Ehrenbergstr. 27
D-98693 Ilmenau

Fon: +49 (3677) 69 55 00
Fax: +49 (3677) 69 55 15
URL: www.imms.de
E-Mail: imms@imms.de

Druck:

Print by:

NichtNur Werbe- & Handelsgesellschaft mbH
August-Bebel-Strasse 8
D-98693 Ilmenau
URL: www.nichtnur.de
E-Mail: info@nichtnur.de

Übersetzung:

Translation:

think global GmbH
Schwedter Str. 9a
D-10119 Berlin
URL: www.think-global.com
E-Mail: contact@think-global.com

Alle Rechte sind vorbehalten. Vervielfältigung und Veröffentlichung
nur mit Genehmigung der IMMS gGmbH.

*All rights reserved. Reproduction and publication only with express
IMMS gGmbH.*



Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH

Ehrenbergstr. 27
D - 98693 Ilmenau / Thüringen
Telefon: +49 (3677) 69 55 00
Telefax: +49 (3677) 69 55 15
E-Mail: imms@imms.de



Institutsteil Erfurt

Konrad-Zuse-Straße 14
D - 99099 Erfurt / Thüringen
Telefon: +49 (361) 66 32 500
Telefax: +49 (361) 66 32 501
E-Mail: imms@imms.de

WE KNOW HOW.

www.imms.de