

2008

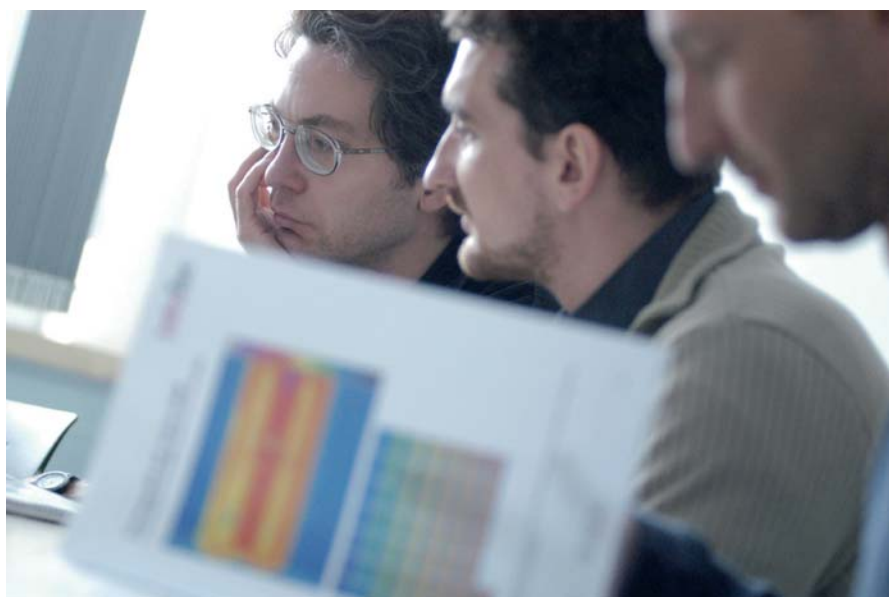
**JAHRESBERICHT
ANNUAL REPORT**

Das Institut.....	4
Vorwort	5
Strategisches Konzept	8
Partnerschaften und Netzwerke	11
IMMS-Strategie - Produkten Zukunft geben.....	13
Institut in Zahlen	15
Integrierte Schaltungstechnik	17
Optoelektronischer Sensorschaltkreis zur Bestimmung von Leuchtdichtevertellungen	18
Entwurf und Charakterisierung von integrierten Schaltungen in Kleinserien	21
Modellierung von System-in-Package-Komponenten mittels 3D-Feldsimulation	23
Präzisionsantriebstechnik	27
Planarmotorkonzept für die Positionierung mit Nanometerpräzision.....	28
FEM-Analysen von Komponenten und Gesamt- systemen beim Entwurf von Präzisionsmaschinen	33
Charakterisierung und Waferlevel-Test von MEMS - Parameteridentifikation mittels dynamischer Messungen.....	36
Modellbasierte Entwurfstechnik / Steuerungs- und Kommunikationstechnik	40
Sensor-Aktor-Netzwerke in der Gebäudeautomation	42
Mobiles Diagnosekit zur simultanen Erfassung von Sensordaten an verteilten Messstellen	47
Einsatz modellbasierter Verfahren für die Steuerung von Präzisionsantrieben	51
Testmethodik / Testplattformen	54
Transfer der Testmethodik von Fotodioden auf Waferebene	55
Einsatz von PXI-Testsystemen zur Charakterisierung von opto-elektronischen Schaltungen	58
Einsatz eines modularen Testsystems für Mixed Signal Anwendungen	60
Aktivitäten, Daten, Publikationen	63
X th Internationaler Workshop: "Symbolic and Numerical Methods, Modeling and Applications to Circuit Design (SM ² ACD'08)"	64
IMMS - Aktivitäten 2007	66
Nachruf	67
Publikationen / Vorträge / Posterpräsentationen	68
Impressum.....	75
Anfahrtswege	76

The Institut.....	4
Preamble	5
Strategic Concept.....	8
Partnerships and Networks	11
IMMS-Strategy - Give products a future.....	13
Facts & figures	15
Integrated Circuits engineering	17
Optoelectronic Sensor Circuit for Determining Luminance Distribution.....	18
Design and Characterization of Integrated Circuits in Small Production Runs	21
Modeling of System-in-Package Components Using 3D Field Simulation	23
Precision drive technology	27
Planar Motor Concept for Positioning with Nanometer Precision.....	28
FEM Analysis of Components / Entire Systems for Designing Precision Machines	33
Characterization and Wafer Level Test of MEMS - Parameter Identification using Dynamic Measurements.....	36
Model-based design technology / Control and communication technology.....	40
Sensor/Actuator Networks in Building Automation	42
Mobile Diagnostics Kit for Simultaneous Capture of Sensor Data at Distributed Locations	47
Use of model-based procedures for controlling precision drives	51
Test Methodology / Test Platforms	54
Transfer of photo diode test methodology to wafer level.....	55
Use of a PXI Test Systems for Characterization of Optoelectronic Circuits.....	58
Use of a Modular Test System for Mixed Signal Applications	60
Activities, Facts, Publications	63
X th Internationaler Workshop: "Symbolic and Numerical Methods, Modeling and Applications to Circuit Design (SM ² ACD'08)"	64
IMMS Activities 2007	66
Obituary.....	67
Publications / Lectures / Posters.....	68
Imprint	75
How to find us.....	76

Das Institut

The Institute



In guter Tradition gibt das Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH mit seinem all-jährlichen Geschäftsbericht einen regelmäßigen Überblick über seine Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des vergangenen Jahres. Die Zusammenstellung unserer Aktivitäten soll das spezifische Kompetenzprofil der Arbeiten am Institut für unsere Projekt- und Geschäftspartner in seiner Vielfältigkeit transparent darstellen.

Angesichts der ausgesprochen komplexen und sich ständig ändernden Anforderungen an Neuentwicklungen und Lösungsansätze gilt es immer mehr, Ergebnisse multidisziplinär arbeitender Forschungsbereiche sowie unterschiedlichste Technologien und Wissenschaften miteinander zu verbinden. Dabei stehen Anwendungsorientierung und das stiften eines Nutzen im Vordergrund. Auf diese Anforderungen stellte sich das Institut 2008 besonders gut ein und leistete u. a. einen wichtigen Beitrag für die Entwicklung eines „3D-Messkopfes für ein inkrementales Flächenmesssystem mit EtherCAT-Anbindung“. Hierfür arbeiteten interdisziplinäre Forscherteams des IMMS aus den Bereichen System Design - Entwurf eingebetteter Systeme und Mechatronik zusammen. Ein weiteres Beispiel ist die Beteiligung des IMMS an der Entwicklung eines „Personalisierten Miniaturisierten Dosimeters - PMD“. Das PMD ist ein Forschungsprojekt der TU Ilmenau und hat zum Ziel, einen Prototypen für die gehörrichtige Dosimetrie von Lärmbelastungen zu entwickeln. Mittels dieses Messgerätes können extreme Lärmbelastungen für den Menschen bei unterschiedlichsten Arbeiten im Ohr gemessen und analysiert werden. Dies ist u. a. für die Begutachtung berufsbedingter Versicherungsfälle und für entsprechende Leistungen der Berufsgenossenschaften von großer Bedeutung. Die Zusammenarbeit zwischen der TU Ilmenau und der IMMS gGmbH betraf die Entwicklung von eingebetteten Systemen unter Linux.

Die bereits in 2007 verstärkte internationale Ausrichtung des IMMS wurde auch in 2008 aktiv weiter vorangetrieben. Das wird deutlich in der Teilnahme an zwei EU-Projekten - SMARTIEHS und S-Pulse. Im EU-Projekt SMARTIEHS ist das Institut mit zwei Themenbereichen vertreten und leistet einen wichtigen Beitrag für die Entwicklung eines hochpräzisen Scan-Systems für ein flexibles, paralleles, high-speed Inspektionssystem für die Produktion von MEMS. Außerdem richtet das IMMS die mehrtägige internationale Konferenz „Xth International Workshop on Symbolic and Numerical Methods, Modeling and Applications to Circuit Design (SM²ACD)“ und den 1. Cadence Academic Network Workshop im Herbst 2008 in Erfurt aus.

Der effiziente Entwurf und die Optimierung von integrierten Analog-/Mixed-Signal-/HF-Schaltungen sind ein wichtiger Wirtschaftsfaktor für die moderne IC-Fertigung – sie gelten nach wie vor als ein Flaschenhals (Bottleneck) im Entwurfsprozess. Die Beherrschung dieser Entwurfsdomänen

Once again, the Institute for Microelectronic and Mechatronic Systems (IMMS gGmbH) is releasing its annual report offering a summary of the past year's research and development work. In retracing our activities over the past year, our intent is to provide our project and business partners with a clear overview of our broad range of expertise and competencies.

In consideration of the highly complex and constantly changing requirements placed on new developments and solutions, it is becoming increasingly important to merge the results from multidisciplinary research areas as well as from highly diverse technological and scientific sectors. We use an application-oriented approach with the ultimate goal of achieving value. Throughout 2008, the institute made every effort to meet these demands and, amongst other things, contributed immensely to the development of a "3D Sensing Head for an Incremental Surface Measurement System with EtherCAT Link". Interdisciplinary research teams from the IMMS System Design and Mechatronic divisions have collaborated on projects involving embedded systems and mechatronics. IMMS also participated in the development of a "Personalized Miniature Dosimeter (PMD)". The PMD is a research project at TU Ilmenau with the objective of developing a dosimeter prototype that aurally compensates for noise. These sound level meters can be used to measure and analyze extreme levels of noise exposure for persons in a range of working environments. This is required when appraising occupational insurance cases and is also an important requirement for various liability insurance associations. Cooperation between TU Ilmenau and IMMS gGmbH has concentrated on developing embedded systems in Linux.

After strengthening our international position in 2007, we continued to actively pursue this strategy throughout 2008. These efforts are reflected in our participation in two EU projects: SMARTIEHS and S-Pulse. Our institute is participating in two areas of the SMARTIEHS EU project and we have made an important contribution in developing a flexible, parallel, high-speed inspection system for MEMS production. Furthermore, IMMS also hosted the multi-day international conference "Xth International Workshop on Symbolic and Numerical Methods, Modeling and Applications to Circuit Design (SM²ACD)" and the 1st Cadence Academic Network Workshop in Fall 2008 in Erfurt, Germany. Efficient design and optimization of integrated analog/mixed signal/RF circuits are RF economic factors in state-of-the-art IC manufacturing processes. Now as before, these still represent a bottleneck in the design process. Mastering these areas of design it is also still an art form, since in contrast to digital circuit design, neither generic synthesis techniques nor systematic top-down flow design approaches exist, be it



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

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

ist nach wie vor eine Kunst, weil es - anders als im digitalen Schaltungsentwurf - noch keine echte Synthese und noch keinen systematisch geschlossenen Top-Down-Designflow gibt, weder als Methode noch als Tool. Das IMMS nutzt diese Möglichkeiten, sein Know-how für die Erhöhung der Design-Effizienz im Schaltungsentwurf auf internationaler Ebene in einer Vielzahl von Vorträgen zu präsentieren. Das IMMS betätigt sich auch als Trainingspartner in diesem Bereich, eine Rolle, die das Institut in Zukunft noch ausbauen wird. Erste Schritte in diese Richtung waren die durch das IMMS durchgeführten zwei großen Trainings-Workshops für Cadence Analog/Mixed-Signal- und RF-Kits mit jeweils 30 Teilnehmern.

Durch das wachsende Interesse der Industrie an Innovationen und an strategischen Partnerschaften mit Forschungseinrichtungen ist es notwendig, Nachwuchswissenschaftler zielgerichtet und erfolgsorientiert zu fördern und frühzeitig an entsprechende Aufgaben heranzuführen. Das IMMS engagierte sich hierfür auch 2008 erfolgreich und ebnete Studierenden, Absolventen sowie Graduierten den Weg in die Praxis. Die Mitarbeiter des Instituts betreuten 2008 u. a. 11 Diplom-/Masterarbeiten, 22 Fachpraktika und 12 Studienjahresarbeiten. Zusätzlich konnte das Institut seinem ersten Mechatronik-Lehrling zum erfolgreichen Abschluss der Ausbildung gratulieren.

Dem weiteren Ausbau der Forschungsinfrastruktur des IMMS diene die Modernisierung der Messtechnik für die Charakterisierung und den Test von IC-Technologien/-design, um für die Industriepartner auch zukünftig auf höchstem Niveau effiziente und anwendungsorientierte Testlösungen bereitstellen zu können. Außerdem wurde ein „Hardware in the Loop“-Prüfstand (HiL) zum Test komplexer Antriebssteuerungen in Betrieb genommen.

as methods or as tools. At IMMS, we use these opportunities to present our expertise in optimizing circuit design processes at various lectures to the international audience. IMMS is active as a training partner in this area and this is a role that we shall continue to develop in the future. Our first steps in this direction commenced with two IMMS-hosted training workshops for “Cadence Analog/Mixed Signal and RF Kits”, with 30 participants each.

As a result of growing industrial interest in innovations and strategic partnerships with research institutes, it is now necessary to cultivate goal- and success-oriented research by up-and-coming scientists, and to introduce new scientists to these aspects at an early phase in their careers. IMMS was actively involved in work of this nature throughout 2008 and helped to pave the career paths for many students and graduates. Our institute's staff supervised 11 degree dissertations, 22 internships and 12 semester end projects for students. In addition, we would like to congratulate our first mechatronic apprentice for successfully completing an apprenticeship at our institute.

In continuing to expand our research at IMMS, we have updated our measurement technology for characterizing and testing IC technologies/designs. Thus, we will still be able to provide efficient and application-oriented test solutions for our industrial partners in years to come. Furthermore, we also commissioned a “Hardware-in-the-Loop (HiL)” test rig for testing complex drive control systems.

We continued to increase our involvement with regional growth cores, networks and research initiatives throughout 2008. By dynamically sharing information and activating resources, IMMS has assisted many industrial enterprises - many of whom do not have research staff of their own - with research and development work. For technology transferring, IMMS exploits networking opportunities at national and international events in addition to communicating with our direct contacts. Throughout the years, employees from our institute have presented our range of services at events held on our own premises as well as at various international trade fairs and economic congresses (e.g., “Innovation Forum for Technology Transfer” at CERN, Switzerland; “20th Workshop for Test Methods and Reliability of Circuits and Systems” in Vienna, Austria; International Conference - EUROFLUX in Naples, Italy).

Die Mitarbeit an regionalen Wachstumskernen, Netzwerken und Forschungsverbünden wurde 2008 weiter ausgebaut. Der aktive Informationsaustausch und die Nutzbarmachung von Ressourcen des IMMS fördert die Forschung und Entwicklung in den Industrieunternehmen, welche häufig keine eigenen Mitarbeiter in der Forschung beschäftigen. Für den Technologietransfer nutzt das IMMS neben seinen direkten Kontakten auch den Erfahrungsaustausch auf nationalen und internationalen Veranstaltungen. Hier stellten unsere Mitarbeiter im Laufe des Jahres das Leistungsportfolio des IMMS in hauseigenen Veranstaltungen, aber genauso auf verschiedenen internationalen Fach- und Wirtschaftskongressen vor (z.B. „Innovationsforum für Technologietransfer“ in Cern/Schweiz, „20. Workshop für Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen“ in Wien/Österreich, International Conference - EUROFLUX in Neapel/Italien).

Weitere Möglichkeiten boten 2008 die Teilnahmen an regionalen Thüringer Fach- und Firmenkontakt-Messen sowie an der fachspezifischen Entwicklerrmesse „embedded world“ in Nürnberg und der im Herbst stattfindenden internationalen Fachmesse für Mikrotechnik „MICRONORA“ in Besançon / Frankreich.

Das Institut hat sich zum Ziel gesetzt, dass Forschungsergebnisse schneller in neue Produkte, Verfahren oder Dienstleistungen umgesetzt werden können. Getreu diesem Motto brachten sich alle Mitarbeiter mit Kreativität, Engagement und hohem Einsatz in unsere Arbeiten ein. Im Mittelpunkt unserer Arbeiten stehen unsere Mitarbeiter sowohl mit Ihrer fachlichen Expertise, als auch mit Ihren persönlichen Kompetenzen. Durch die wachsende Anzahl von internationalen Mitarbeitern ist am Institut ein interessantes, interkulturelles Flair mit globalem Know-how entstanden, was maßgeblich zum unternehmerischen Aufschwung 2008 mit beitrug. Weiterhin förderte das IMMS seine Mitarbeiter mit ausgewählten Fortbildungsmaßnahmen, wie zum Beispiel mit Cadence- Toolschulungen, Sprachkursen für Englisch und Deutsch, Projektmanagement- und Kommunikationsseminare. Der Dank der Geschäftsleitung richtet sich an alle Mitarbeiter, ohne die die hochgesteckten Ziele nicht erreicht worden wären.

Throughout 2008 we also attended regional trade fairs and conventions in Thuringia, Germany, as well as the special "Embedded World" trade fair for developers in Nuremberg and "MICRONORA", an international trade fair for microtechnology held in Besançon, France.

The biggest goal of our institute is to realize the fruits of our research ever more quickly in the form of new products, procedures and services. In keeping with this objective, our employees have actively demonstrated their engagement throughout the past year with their many creative contributions and ceaseless dedication. Their special expertise and personal competencies are at the heart of our work. The growing number of international employees at our institute has created an engaging multi-cultural flair at our company and provided us with global know-how. This has been a key contributing factor in the boom our institute experienced during 2008. As before, IMMS continues to support its employees through special training programs offering instruction in Cadence, English and German language skills, project management, and communication skills. Our management would like to express its sincere gratitude to all our employees, without whom we could never achieve our ambitious goals.

Die Entwicklung von elektronischen und mechatronischen Systemen zur Lösung aktueller Herausforderungen aus den Bereichen Energie, Umwelt, Sicherheit, Mobilität und Kommunikation erfordert mehr als nur die Beherrschung einzelner Technologien. Vielmehr ist umfassende Systemkompetenz von der Technologieebene über den Entwurf von Komponenten und Baugruppen bis hinauf zur Anwendung beim Kunden gefragt. Dabei geht es nicht nur um ein tiefes Verständnis der verwendeten technischen Grundlagen, Materialien und Verfahren auf allen Hierarchieebenen, sondern auch um die Entwurfsmethodik und die Qualitätssicherung während des gesamten Entwicklungsprozesses. Die Entwurfsmethodik umfasst eine effiziente Systematik für die Lösung von Entwurfsaufgaben sowie Verfahren und Werkzeuge zur Modellierung, Simulation und Optimierung komplexer heterogener Systeme. Zur Qualitätssicherung gehören die Verifikation von Modellen für Bauelemente und Baugruppen sowie die messtechnische Überprüfung der entwickelten Systeme. Voraussetzung dafür ist eine genaue Charakterisierung der eingesetzten Bauelemente und Materialien und die Abbildung der Eigenschaften in simulierbare Beschreibungsformen (Komponenten/Device-Modellierung, Parameteridentifikation).

Um dieses breite Spektrum von Anforderungen abdecken zu können, bedarf es eines domänenübergreifenden Knowhows, das am IMMS in vier Themenbereiche gegliedert ist:

- System Design (SD)
- Mechatronik (MT)
- Mikroelektronik (ME)
- Industrielle Elektronik und Messtechnik (IEM)

Diese bilden die wissenschaftlich-technische Grundlage des IMMS. Abbildung 1 illustriert die Zusammenarbeit der Themenbereiche im Sinne einer Wertschöpfungskette.

As electronic and mechatronic systems are being developed in response to current energy, environment, security, mobility, and communication needs, it no longer suffices to be proficient in merely a single technology. Instead, comprehensive system expertise is called for—from the technology level to the design level for components and assemblies, and finally all the way to customer applications. It is not enough to possess deep knowledge of the core technology, materials, and procedures in use at all hierarchy levels. One should also have a broad understanding of the design methodology and quality assurance processes in use throughout the entire development process. Design methodology encompasses an efficient classification scheme on how to solve design problems as well as procedures and tools for modeling, simulating, and optimizing complex heterogeneous systems. The quality assurance processes include model verification for components and assemblies as well as measurements and tests of the systems that have been developed. As a prerequisite, the characteristics of the components and materials in use must be precisely quantified and their properties should be represented in forms that can be simulated (component/device modeling, parameter identification).

In order to address this wide spectrum of requirements, one must have access to the multi-domain expertise available at the four research groups in IMMS.

- System Design (SD)
- Mechatronics (MT)
- Microelectronics (ME)
- Industrial Electronics and Measuring Technology (IEM)

At IMMS, these groups form the core of our scientific and technological expertise. Figure 1 displays how these research groups cooperate synergistically for added value.



Abb. 1: Wertschöpfungskette des IMMS
Fig. 1: Value-added chain at IMMS

Die „Industrielle Elektronik und Messtechnik“ (IEM) nimmt eine verbindende Funktion ein. Am Anfang der Wertschöpfungskette befasst sie sich mit der genauen Charakterisierung von Bauelementen und Materialien, die innerhalb der Themenbereiche Mechatronik und Mikroelektronik zur Ent-

Our “Industrial Electronics and Measuring Technology” (IEM) research group is a connector between the various groups. At the front end of the value-added chain, this group works to precisely characterize the components and materials to be used by the Mechatronics and Mi-

wicklung von Systemkomponenten eingesetzt werden. Im weiteren Verlauf führt IEM die messtechnische Überprüfung der entwickelten Komponenten durch. Das System Design befasst sich am Ende der Wertschöpfungskette mit der Entwicklung komplexer Systemlösungen unter Verwendung mikroelektronischer und mechatronischer Komponenten.

Die fachlichen Kompetenzen der Themenbereiche konzentrieren sich dabei auf die folgenden übergeordneten Gebiete:

- Integrierte Schaltungstechnik und Mikromechanik
- Präzisionsantriebstechnik
- Modellbasierte Entwurfstechniken
- Steuerungs- und Kommunikationstechnik
- Testmethodik / Testplattformen

Dabei gliedern sich die Kompetenzen der 4 Themenbereiche in die einzelnen folgenden Arbeitsgebiete:

System Design (SD)

- Modellbasierter Entwurf
- Neue Kommunikationstechnologien (drahtgebunden, drahtlos)
- Busse und Vernetzung von Systemen (eingebettete Kommunikation, Sensorvernetzung)
- Sensornahe Signalverarbeitung
- Einsatz freier Betriebssysteme für eingebettete Anwendungen
- Softwarearchitekturen für eingebettete Systeme
- Echtzeitsteuerung von Aktoren

Mechatronik (MT)

- Antriebssystemen für höchste Präzision und Vakuumeinsatz
- Analysegeräte und -instrumente
- Modellierung, Simulation, Auslegung und Konstruktion produktspezifischer magnetischer Aktorsysteme und mechanischer Präzisionssysteme
- Modalanalyse und harmonische Analyse von Gerätestrukturen (messtechnisch und simulativ)
- Thermische Optimierung von Baugruppen
- Entwurf, Auswahl, Dimensionierung und Integration von Luftlager, Luftführungen, Magnetlager, Magnetführungen
- Entwurf und Simulation von Regelungen für komplexe, hochpräzise mechatronische Systeme
- Simulation, Test und Charakterisierung von MEMS

Mikroelektronik (ME)

- Analoge Präzisionsschaltungstechnik
- Sensor-Interfaces
- HF-Schaltungstechnik

Microelectronics groups in developing system components. Further along the chain, IEM tests the developed components using a range of measuring technology. System Design works at the back end of the value-added chain in developing complex system solutions that make use of microelectronic and mechatronic components.

Our special expertise in these research areas is concentrated on the following general areas:

- *Integrated circuit technology and design as well as micromechanics*
- *Precision drive technology*
- *Model-based design technologies*
- *Control and communication technology*
- *Test methodology / test platforms*

Our areas of expertise in these four general areas are concentrated on the following topics:

System Design (SD)

- *Model-based design*
- *New communications technologies (wire, wireless)*
- *Buses and networked systems (embedded communication, sensor networks)*
- *Direct sensor processing*
- *Use of open source operating systems for embedded applications*
- *Software architectures for embedded systems*
- *Real-time control of actuators*

Mechatronics (MT)

- *Drive systems for high-precision and vacuum applications*
- *Analysis equipment and instruments*
- *Modeling, simulation, design, and construction of product-specific magnetic actuator systems and mechanical precision systems*
- *Modal and harmonic analysis of device structures (both by measurement and simulation)*
- *Thermal optimization of subassemblies*
- *Design, selection, dimensioning, and integration of air bearings, air guides, magnetic bearings, magnetic guides*
- *Design and simulation of feedback control loops for complex and high-precision mechatronic systems*
- *Simulation, testing, and characterization of MEMS*

Microelectronics (ME)

- *Analog precision circuitry*
- *Sensor interfaces*

- Optoelektronik
- Hochtemperatur-Schaltungstechnik
- Modellierung und Simulation von elektronischen Bauelementen und Schaltungen
- Erstellung von Design-Kits
- Innovative Entwurfsmethodik für integrierte analoge und Mixed-Signal-Schaltungen

Industrielle Elektronik und Messtechnik (IEM)

- HF-Charakterisierung von Bauelementen und IP-Blöcken in neuen Halbleitertechnologien sowie Rauschmessung
- HF-Schaltungsentwicklung und HF-Boarddesign u.a. für Testerloadboards
- Charakterisierung von optoelektronischen Schaltungen mit Spezialisierung auf dynamische Kenngrößen
- Testmethodik für die Qualitätssicherung in der Halbleiterindustrie
- Testmethodik für den Hochtemperaturbereich bis 300°C
- On-Wafer-Hochvoltmesstechnik bis 1000 V
- Modulare Testerplattformen
- Analoge und getaktete Leistungsbaugruppen für mechatronische Antriebe
- Getaktete elektronische Vorschaltgeräte für Gasentladungslampen

- *RF circuit technology and design*
- *Optoelectronics*
- *High-temperature circuitry*
- *Modeling and simulation of electronic components and circuits*
- *Development of design kits*
- *Innovative design methodology for integrated analog and mixed-signal circuits*

Industrial Electronics and Measuring Technology (IEM)

- *RF characterization of components and IP blocks in new semiconductor technologies as well as noise measurements*
- *RF circuit design and RF board design for tester load boards e.g.*
- *Characterization of optoelectronic circuits with specialization in dynamic parameters*
- *Test methodology for quality assurance in semiconductor industry*
- *Test methodology for high-temperature applications up to 300 °C*
- *On-wafer high-voltage measurement technology up to 1000 V*
- *Modular test platforms*
- *Analog and clocked power components for mechatronic drives*
- *Clocked electronic units for gas discharge lamps*

IMMS und die Technische Universität Ilmenau werden Lead Institution im Cadence Academic Network

Die IMMS gGmbH hat gemeinsam mit der TU Ilmenau mit dem Aufbau eines „Zentrum für Designtechnologie und komplexe Systeme“ begonnen, das für Thüringen einen Schwerpunkt für Forschung und Ausbildung repräsentieren soll und hierfür alle notwendigen wissenschaftlichen und technischen Kompetenzen bündeln wird. Hierzu gehören Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Entwurfsmethodik, Schaltungstechnik und Werkzeuge. Die Ausrichtung ist dabei nicht nur auf die Analogschaltungsentwicklung beschränkt, sondern domänenübergreifend im Sinne einer multi-physikalischen Herangehensweise eines Gesamtsystementwurfs mit elektrischen und mechatronischen Komponenten.

Ziel ist ein Transfer der Forschungsergebnisse in eine breite industrielle Verwertung sowie die 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.

Hierbei spielt die Kooperation mit der ansässigen Industrie, wie der X-FAB Semiconductor Foundries AG und der Melexis GmbH (beide Erfurt) sowie mit EDA-Herstellern, eine entscheidende Rolle. Mit der Cadence Design Systems GmbH wurde eine enge Zusammenarbeit etabliert, durch die die Institute eine einzigartige Möglichkeit erhalten, modernste Software und Methoden für ihre Forschungen und besonders die Lehre zu benutzen. Gleichzeitig wurden sie Partner in internationalen Netzwerken aus führenden Hoch-Technologie-Unternehmen und Universitäten.

So ist die TU Ilmenau von Cadence als eine der „Lead Universities“ ausgewählt worden, die Spitze eines exzellenten europäischen Netzwerkes für akademische Ausbildung und Forschung (Cadence Academic Network) zu bilden. Die Kooperation wurde im Juni mit der Durchführung von Software-Training- und Methodik-Workshops praktisch umgesetzt.



IMMS and TU Ilmenau have been designated as “Lead Institutions” in the Cadence Academic Network

Together with TU Ilmenau, IMMS gGmbH has begun work to start a “Zentrum für Designtechnologie und komplexe Systeme” (“Center for Design Technology and Complex Systems”). This center will serve as a focal point for research and education in Thuringia and help to concentrate scientific and technical competencies. Activities will include R&D work in design methodology, circuit technology and tools. Our orientation is no longer restricted to analog circuit development and will focus instead on interdisciplinary efforts utilizing a multi-physical approach to holistic system design with electrical and mechatronical components.

The objective is to make research results available for large-scale industrial exploitation, and to establish a comprehensive educational program. This will combine extensive theoretical and practical knowledge and skills in the areas of micro and nano-electronics with in-depth expertise in



design methodology and use of state-of-the-art design and simulation tools.

Our cooperative efforts with local companies such as X-FAB Semiconductor Foundries AG and Melexis GmbH (both in Erfurt, Germany) and EDA manufacturers are vital to this. In our close collaboration with Cadence Design Systems GmbH, the institutes benefit immensely from the availability of state-of-the-art software and methods that can be used in education as well as research.

At the same time, IMMS is now a member of various international networks made up of market-leading high-tech companies and universities. Thus, Cadence has chosen TU Ilmenau as one of their “lead universities”, positioned at the peak of an excellent European network for academic education and research (Cadence Academic Network). Our software training and methodology workshop in June



Veranstaltet von Mitarbeitern von Cadence konnten sich Kollegen des IMMS, der TU Ilmenau sowie der X-FAB Foundries AG und Melexis GmbH in zwei Kursen an insgesamt fünf Tagen mit der neuesten Cadence Software und Analog/Mixed-Signal und Radio-Frequency-Methodology-Kits (A/MS & RF) vertraut machen. Auf internationaler Ebene hat das IMMS Mitte Oktober den „Xth International Workshop on Symbolic and Numerical Methods, Modeling and Applications to Circuit Design (SM²ACD'08)“ (s. S. 64) und als Pre-Konferenz den 1. Workshop des Cadence Academic Networks mit dem Schwerpunkt „Analog/Mixed-Signal und RF Methodik“ ausgerichtet.

Der Silicon Saxony e.V. ist der größte Industrieverband der Mikroelektronik Europas und versteht sich als ein Netzwerk der Halbleiter-, Elektronik- und Mikrosystemindustrie. Das IMMS arbeitet seit seiner Mitgliedschaft 2004 aktiv in folgenden Arbeitskreisen aktiv mit:

- F&E
- RFID
- TIS (Test Integrierter Systeme)
- SIS (Smart Integrated Systems)
- SatNav Saxony (in Gründung)

Desweiteren bringt das IMMS sein Know how in dem im Oktober 2008 gegründeten Cluster „Elektronische Mess- und Gerätetechnik Thüringen - ELMUG“ aktiv ein. Das Industrie-Cluster vereint z. Z. 64 Mitglieder und ist eine Plattform für engere Kooperation von Thüringer Technologieunternehmen im Bereich der elektronischen Mess- und Gerätetechnik in Thüringen.

supplied the practical underpinnings to our cooperation. With two courses held over a five-day period, the Cadence staff introduced participants from IMMS, TU Ilmenau as well as X-FAB Foundries AG and Melexis GmbH to the latest Cadence software and also provided instruction in how to use analog/mixed signal and radio frequency methodology kits (A/MS & RF). At the international level, IMMS held the “Xth International Workshop on Symbolic and Numerical Methods, Modeling and Applications to Circuit Design (SM²ACD'08)” in mid-October (see page 64) and, as a pre-conference, the 1st Workshop of the Cadence Academic Networks with a focus on “Analog/Mixed-Signals and RF Methodology”.

Silicon Saxony is Europe's largest and most successful branch association for the semiconductor, electronic and microsystems industry.

Since 2004 the IMMS has been an active member in this network and has been working in the following working team:

- R&D
- RFID
- TIS (Test Integrated Systems)
- SIS (Smart Integrated Systems)
- SatNav Saxony (in the course of formation)

Furthermore IMMS places its know how in a cluster which was founded in 2008. At the moment this cluster combines 64 members and is a platform for a close co-operation of Thuringian technology ventures in the field of measuring technology.

Internationale Technologie-„Roadmaps“ beschreiben zwei wesentliche Trends für die Zukunft, die Komplexität/Miniaturisierung und die Diversifikation (Ausweitung der Anwendungsbereiche) von Technologien. Die Verbindung der Kompetenzen beider Bereiche entlang der Wertschöpfungskette ist die Stärke der IMMS gGmbH.

Mit unserem Know-how sind wir beispielsweise in der kompletten Wertschöpfung der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie vertreten, vom Bauelement aus dem Hochtechnologiebereich der Chipproduktion über komplexe elektronische und opto-elektronische Komponenten bis zu deren Anwendungen in der Automatisierungstechnik, Mess- und Prüftechnik oder in Systemen der Steuer- und Regelungstechnik.

Bei der industrienahen Forschung müssen wir die Interessen der Menschen, ihre Wünsche und Bedürfnisse im Blick behalten. Wir haben Themenfelder definiert, in denen wir die wichtigsten Nutzeffekte künftiger Technologien und Produkte für den Menschen sehen: Menschen brauchen eine intakte Umwelt, Sicherheit, Energie, Kommunikation und Mobilität. Das sind die Bereiche, auf die sich unsere Forschungskapazitäten in den kommenden Jahren konzentrieren.

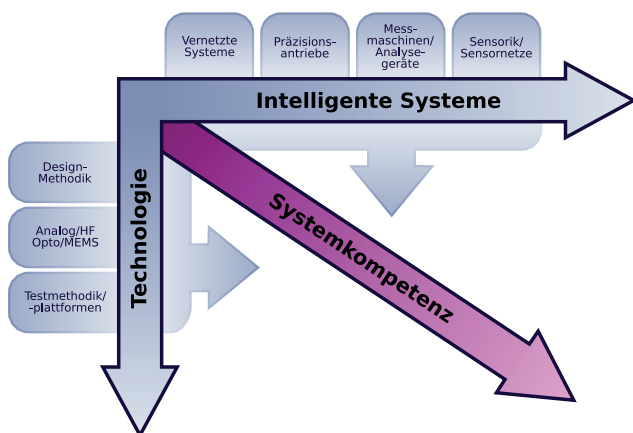


Abb. 1: Technologie-Strategie des IMMS

Energie / Umwelt

Etwa ein Drittel des Energieverbrauchs in Deutschland entfällt auf das Heizen von Gebäuden. Mit effizienter Haustechnik und Gebäudeautomatisierung lassen sich Energie und Kosten sparen.

Rechenleistungen, Speicherkapazitäten und Übertragungsraten von Computersystemen steigen alle fünf Jahre etwa um den Faktor 10. Der Betrieb dieser Systeme lassen den CO₂-Ausstoß und die Stromkosten immer weiter steigen. Die Anforderungen an der Mikro- und Nanoelektronik bestehen jetzt darin, die Energieeffizienz der Informations- und Kommunikationssysteme (IuK) nachhaltig zu verbessern.

Current roadmaps for international technology describe two main trends of the future: miniaturization and diversification (the expansion of application areas). One of the strengths of IMMS gGmbH is our competency in both of these links of the value chain.

With our wide-ranging expertise, we are able to add value throughout the entire electrical and electronics engineering sector - from high-tech chips to complex electronic and optoelectronic components through to applications in automation technology, measurement and testing technology or control systems.

Our industrial research always takes the interests, aspirations and needs of humans into consideration. We have defined the technological areas that we believe will offer the most benefits to humans in the future: Humans want an intact environment, security, energy, communication and mobility.

These are the areas where our research capacities shall be concentrated over the upcoming years. Based on these main areas, IMMS gGmbH has identified the research areas with the potential to quickly and effectively help us to conquer some of our current challenges, such as a lack of resources or climate change.

Energy/ Environment

Approximately one-third of the energy consumed in Germany is used to heat buildings. By improving the efficiency of the technology used in building services and automation, it is possible to save both energy and costs.

The computational power, memory capacity and transmission rates of computer systems are increasing by a factor of approximately 10 every five years. The operation of these systems contributes to constantly increasing CO₂ emissions and power costs. The future role of micro- and nanoelectronics will be to sustainably improve the energy efficiency of information and communications systems. By combining excellent scientific research and product-oriented development, the "Cool Silicon" business cluster stands a good chance of becoming a global leader for energy-efficient technology in information and communications systems. IMMS is contributing its know-how to this cluster.

In order to secure the future quality of foods and water as well as develop new surface properties for materials, we require novel analysis techniques and procedures. Experts for logistics, microsystems technology, information technology and analysis are working in these areas. These systems are subject to highly exacting specifications pertaining to position resolution, precision and robustness.

Mit dem Spitzencluster „Cool Silicon“ bestehen gute Chancen, sich durch Kombination von exzellenter wissenschaftlicher Forschung und produktnaher Entwicklung weltweit als Synonym für Energieeffizienz in der IuK zu etablieren. Das IMMS wird sein Know-how in dieses Cluster einbringen. Die Sicherung der Qualität von Lebensmitteln, und des Wasser oder die Schaffung neuer Oberflächeneigenschaften von Materialien verlangen neuartige Analysetechniken und -verfahren. Daran arbeiten Experten für Logistik, Mikrosystemtechnik, Informationstechnik und Analytik. Enorme Anforderungen an Positionsauflösung, -genauigkeit und Robustheit sind an diese Systeme gestellt. Mit einer weltweit einzigartigen Antriebstechnologie können Auflösungen bis in den Nanometer-Bereich erreicht werden, ein Spezialgebiet der IMMS-Experten.

Sicherheit

Klein, preiswert, robust und überall einsetzbar – so sehen die Sensoren der Zukunft aus. Ihre Energie beziehen sie aus dem Umfeld (Licht, Bewegung, Temperaturunterschied u.a.). Die Sensoren sind drahtlos miteinander vernetzt. Durch das Einsammeln von Informationen tragen sie zur Verbesserung von Reaktionsfähigkeit und Ausfallsicherheit bei. Solche Sensornetze können zum Beispiel für die Überwachung von Gebäuden und Fertigungsprozessen eingesetzt werden. Zur schnellen Parameterfassung mittels vernetzter Sensorknoten wurde ein „mobiler Einsatzkoffer-SiRaM“ entwickelt.

Mobilität / Kommunikation

Im Zusammenhang mit dem Einsatz intelligenter Systeme besteht ein weiterer technologischer Schwerpunkt in der Lokalisierung von Personen und Gütern für Industrie, Wirtschaft, Verkehr und Mobilität. Ein Ziel ist es, beim Warentransport oder bei der Gebäudeautomatisierung positionsbezogene Zustände, wie Temperatur, Feuchte und Gas-konzentration lückenlos zu erfassen.

Die drei Zukunftsthemen werden von den IMMS-Forschern in den kommenden Jahren zielstrebig mit den Industriepartnern weiterentwickelt und in Lösungen für die Praxis umgesetzt. Sie eröffnen neue Chancen für die Thüringer Wirtschaft, die nur durch ständige Innovationen ihre Wettbewerbsfähigkeit erhalten kann.

Ansprechpartner / contact:

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

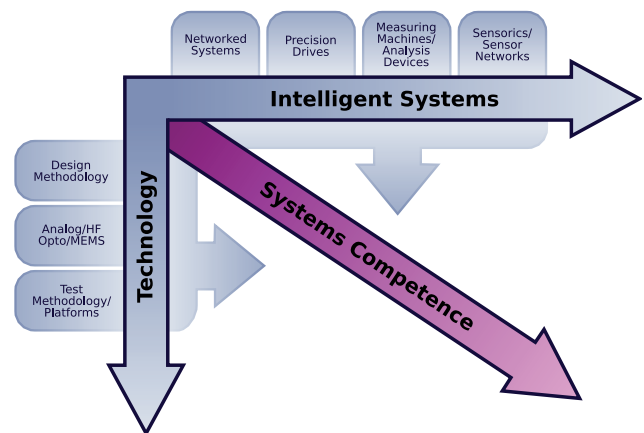


Fig. 1: IMMS technology strategy

Through the use of a drive technology unique in the world, it is now possible to achieve resolutions in the nanometer range - a special area of expertise at IMMS.

Safety

Small, affordable, robust and suitable for all types of applications - this is what is required of the sensors of the future. They will be able to extract energy from their surroundings (light, movement, temperature differences, etc.). The sensors are interconnected wirelessly and form intelligent networks. By gathering information, they can react quickly and provide additional protection against failures. Networks consisting of such sensors can be used to monitor buildings and manufacturing processes.

To quickly capture parameters in sensor networks, a mobile SiRaM application suitcase has been developed.

Mobility / Communication

Together with the use of intelligent systems, current technology research is also focusing on the localization of persons and goods for industrial, commerce, transportation and mobility. The goal is to continuously capture position-related statuses such as temperatures, humidities and gas concentrations while transporting goods or in building automation applications.

These three future technologies are being studied by researchers at IMMS with the goal of developing practical solutions together with industrial partners in the years to come. Since constant innovation is required in order to remain economically competitive in the future, these technologies offer exciting new opportunities for Thuringia.

2008 waren in der IMMS 85 Mitarbeiter beschäftigt. Hiervon waren 54 Wissenschaftler und als FTE 21 Studenten in der Forschung und Entwicklung tätig, das sind ca. 88%. Wie bereits in den letzten Jahren haben insgesamt eine große Zahl von Studenten (ca. 58) die Angebote des IMMS wahrgenommen, ihre Ausbildung in praxisorientierter Forschung zu vervollständigen. 26 Studenten absolvierten verschiedene Praktika, 12 Diplomarbeiten wurden betreut und 20 Studenten arbeiteten an anderen wissenschaftlichen Aufgaben mit.

In 2008, IMMS GmbH employed a staff of 85. Of these, 54 scientists and engineers as well as 21 students were active in research and development - approx. 88% of the staff. As in the past years, a large number of students (approx. 58) have taken advantage of the opportunity to round out their studies with practically oriented research work at IMMS. 26 students completed internships, 12 degree thesis projects were supervised and 20 students completed other scientific work.

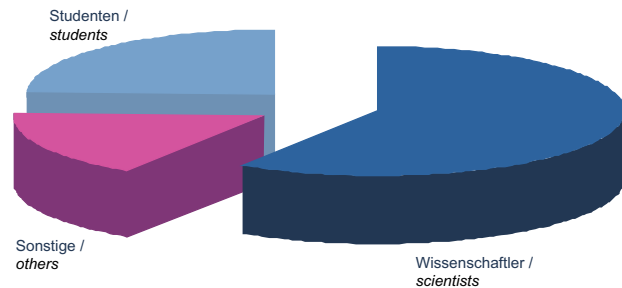


Abb. 1: Personalentwicklung
Fig. 1: Human Resources development

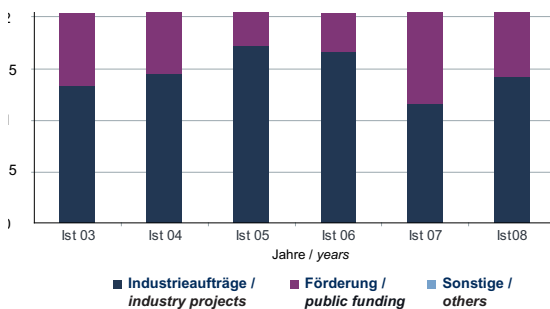


Abb. 2: Projekteinnahmen
Fig. 2: Project revenue

Die Einnahmen aus öffentlicher Projektförderung konnten weiter gesteigert werden. Dies ist Ausdruck der großen Anstrengung von Politik und Wirtschaft um Spitzenpositionen im globalen Wettbewerb und spiegelt gleichzeitig das Vertrauen wieder, das der IMMS GmbH als Forschungspartner in industriellen Netzwerken entgegengebracht wird. Insgesamt steht dies auch mit einer Änderung der Förderparadigmen in Verbindung: stärkere Konzentration auf anwendungsorientierte strategische Zukunftsthemen, größere Erwartungen an das Engagement des Mittelstandes und geringere Förderquoten.

The institute profited from a large increase in public subsidies being 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. The increased funding also reflects the high level of trust that IMMS GmbH receives from its many industry partners as a research institute. As a whole, these positive developments reflect the changing subsidy paradigm in Germany.

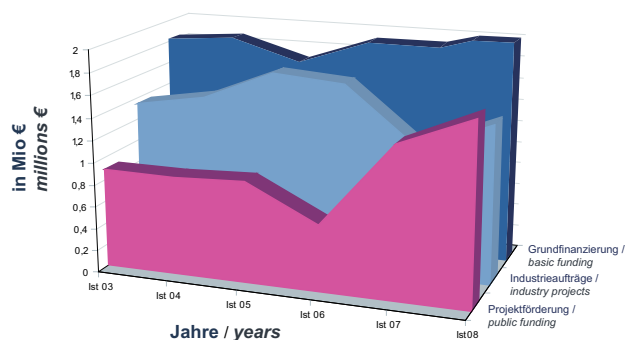


Abb. 3: Finanzierungssäulen
Fig. 3: Pillars of finance

Diese Veränderungen stellen das Institut vor große Herausforderungen. Die industrielle Auftragsforschung als eine wesentliche Säule der Gesamtfinanzierung des Instituts gewinnt weiter an Bedeutung. Öffentlich geförderte Forschung erfordert eine hohe Qualität verfügbarer Ressourcen und Spitzenkräften. Die Gewinnung geeigneten Personals erhält einen zentralen Stellenwert. 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.

At the same time, these kinds of changes 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 still very important. Hence, we at IMMS GmbH are cooperating with our industry partners to offer more training opportunities. Working together with 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.

Integrierte Schaltungstechnik

Integrated circuit engineering



Optoelectronic Sensor Circuit for Determining Luminance Distribution

Einführung

Für den Entwurf leistungsfähiger und genauer Lichtsensoren ist eine gleichmäßige Leuchtdichte von besonderer Bedeutung. Der dann entwickelte Sensorschaltkreis (Lichtfeldsensor) ermöglicht es optische Eingangssignale in ihrer Leuchtdichteverteilung zu analysieren. Hierfür sind eine

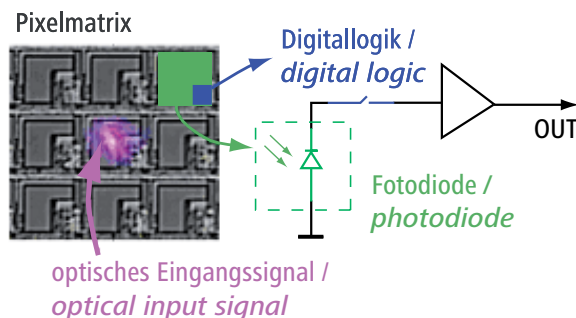


Abb. 1: Prinzipschaltbild des Lichtfeldsensors
Fig. 1: Schematic diagram of light field sensor

Vielzahl von separat auslesbaren Sensoren in einer Pixelmatrix angeordnet worden, wobei die Sensoren und die Digitallogik eine Pixelzelle bilden (s. Abb. 1). Die Sensoren sind in Form von Fotodioden implementiert, wodurch das optische Eingangssignal in ein elektrisches Signal umgewandelt werden kann. Um die Leuchtdichte zu messen, werden die Fotodioden zeilenweise abgefragt. Dieses selektive Auslesen der Fotodioden wird durch eine Digitallogik realisiert. Am Ausgang eines solchen Schaltkreises steht das elektrische Signal verstärkt zur Verfügung.

Der Lichtfeldsensor entstand in einer Diplomarbeit in Zusammenarbeit der IMMS gGmbH und der Fachhochschule Hannover. Auftraggeber und zugleich Mitentwickler war die Melexis GmbH (Erfurt).

Zielstellung

Ein optisch-monochromatisches Eingangssignal bei den Wellenlängen 405 nm (blau), 650 nm (rot) oder 780 nm (infrarot) soll durch den Lichtfeldsensor in seiner Leuchtdichteverteilung gemessen werden. Der Lichtspot ist hierbei auf die Fläche der Pixelmatrix von 3,7 mm² begrenzt, wobei dieser mit einer maximalen Pixelauflösung zu erfassen war.

Am Ausgang des Lichtfeldsensors sollte ein zur Lichtleistungsdichte äquivalentes elektrisches Signal als Strompegel wie auch als Spannungspegel zur Verfügung stehen. Die Kommunikation mit dem Lichtfeldsensor war über eine I²C-Schnittstelle zu realisieren. Zudem ist in jedem Chip eine Identnummer zu hinterlegen. Für die eingangsseitige erlaubte Lichtleistungsdichte und den Messbedingungen müssen folgende Kriterien eingehalten werden:

Introduction

A sensor circuit (light field sensor) makes it possible to analyze the luminance distribution of an optical input signal. As shown in figure 1, many separately readable sensors are organized in a pixel matrix. A pixel cell is composed of a sensor and digital logic. The sensors have been implemented as photodiodes, thus allowing the optical input signal to be converted into an electrical signal. Selective reading of the photodiodes is realized by the digital logic. The amplified electrical signal appears at the output of these circuits. This light field sensor is the result of a diploma thesis project, completed in collaboration between IMMS gGmbH and the University of Applied Sciences and Arts in Hanover. Our client and co-developer for this project is our industrial partner Melexis GmbH from Erfurt, Germany.

Objective

The purpose of the light field sensor is to measure the luminous density of a monochromatic optical input signal consisting of the wavelengths 405 nm (blue), 650 nm (red) or 780 nm (infrared). The light spot covers a pixel matrix area of 3.7 mm² is to be captured with the maximum possible pixel resolution. The output signal of the light field sensor is a voltage and a current proportional to the incident light power on a pixel. An I²C port is used to communicate with the light field sensor. Furthermore, an ID number has been assigned to each chip. The input light power density and measurement conditions must comply with the following criteria:

- Light power density at input:
0.16 μW – 3.5 μW per 100 μm^2
- Measurement tolerance: $\leq 2\%$
- Measurement time of pixel matrix: $< 1\text{ s}$
- Voltage amplitude: $> 1\text{ V}$
- Current amplitude:
300 μA $< I_{\text{OUT}} < 490\text{ }\mu\text{A}$

Realization

Figure 2 displays a schematic diagram of the light field sensor. Mode control (as indicated by the embedded switches S1 to S4), pixel cell addressing, reading ID numbers from the ZAP logic unit and gain control for the optical input signal are all performed via the SDA and SCL pins (I²C port). VREF supplies an external reference voltage to the measuring amplifier and pixel cells.

The output signal can be tapped at the VOUT, COUT and TEST pins; whereby VOUT supplies amplified voltage, COUT provides amplified current, and TEST can be used bi-directionally. The TEST pin can be used to measure the unamplified photocurrent that has been generated, and

- Eingangsseitige Lichtleistungsdichte:
0,16 μW – 3,5 μW pro 100 μm^2
- Messtoleranz: $\leq 2\%$
- Messzeit der Pixelmatrix: $< 1\text{ s}$
- Spannungsaussteuerung: $> 1\text{ V}$
- Stromaussteuerung:
 $300\text{ }\mu\text{A} < I_{\text{OUT}} < 490\text{ }\mu\text{A}$

Realisierung

In der Abb. 2 ist der schematische Aufbau des Lichtfeldsensors zu sehen. Die Steuerung der Modi, angedeutet durch die eingebetteten Schalter (S1,...,S4), die Adressierung der Pixelzelle, das Auslesen der Identnummer aus der ZAP-Logik sowie die Anpassung der Verstärkung an das optische Eingangssignal erfolgen über die Pins SDA und SCL (I²C-Schnittstelle). Über VREF wird eine externe Referenzspannung für die Messverstärker und die Pixelzellen zugeführt. Das Ausgangssignal kann an den Pins VOUT, COUT und TEST abgegriffen werden, wobei VOUT ein spannungsverstärkender, COUT ein stromverstärkender Kanal ist und TEST für eine bidirektionale Nutzung zur Verfügung steht. Einerseits kann am Pin TEST der generierte Fotostrom unverstärkt gemessen, andererseits ein Referenzstrom zur Kalibrierung der Messverstärker eingespeist werden. Die Herausführung eines unverstärkten Fotostroms bietet die Möglichkeit, eine externe Verstärkungs-Applikation zu nutzen.

Die Messgenauigkeit von maximal zwei Prozent wird durch die in den Modi vorhandenen Kalibrierverfahren gewährleistet. Hierbei werden nicht benötigte Komponenten vom Signalpfad getrennt sowie der zu kalibrierende Ausgangskanal über die Schalter S2 und S3 in Abb. 2 mit dem Pin TEST niederohmig verbunden. Eine Kalibrierung der Sensoren in der Pixelzelle erfolgt durch die Referenz-Fotodiode. Insgesamt enthält der Lichtfeldsensor in seiner Pixelmatrix 2365 Fotodioden.

Für das Auslesen der Pixelmatrix stehen drei Modi zur Verfügung, die bei kombinierter Anwendung eine Messdauer von unter einer Sekunde ermöglichen. Während bei einem Mode die beiden Register für die Zeilen- und Spaltenzuordnung der Pixelzellen direkt mit einem 2-Byte Datenwort geladen werden und somit ein Startpunkt in der Pixelmatrix definiert ist, werden bei den anderen beiden Modi die Register während der eigentlichen Übertragung der Datenbits mit den Clocks am SCL inkrementiert. Um die Spannungsaussteuerung (TIA, VA) und Stromaussteuerung (CA) über die spezifizierte Bandbreite der eingangsseitigen Lichtleistungsdichte in Abhängigkeit der Wellenlängen zu erreichen, sind im Transimpedanzverstärker (TIA) fünfzehn und Stromverstärker (CA) dreizehn verschiedene Verstärkungen einstellbar.

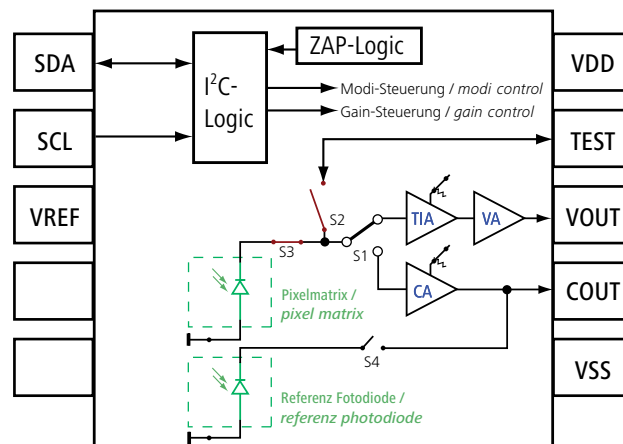


Abb. 2: Schematischer Aufbau des Lichtfeldsensors

Fig. 2: Schematic setup diagram for light field sensor

can also be used as a reference current for calibrating the measuring amplifier. Since the unamplified photocurrent can also be tapped, it can be used for an external amplifier application.

A measurement precision of two percent (max.) can be achieved using the calibration procedure available in the various operating modes. In this case, any unused components are disconnected from the signal path, and the output channel to be calibrated is connected through a low impedance path to the TEST pin using the S2 and S3 switches (as shown in figure 2). The sensors in the pixel cell can be calibrated using the reference photodiode. In total, the light field sensor contains 2365 photodiodes within its pixel matrix.

Three modes are available for reading the pixel matrix. When a combination of these modes is used, it is possible to achieve measurement durations of less than one second. In one mode, the two registers containing the row and column address of the pixel cells can be loaded directly with a 2 byte data word, hence defining a starting point in the pixel matrix. In the other two modes, the registers are incremented by the clocks connected to SCL while the data bits are being transmitted. In order to set the required voltage (TIA, VA) and current amplitudes (CA) across the specified range of the input light power density for the given wavelengths, the transimpedance (TIA) and current amplifiers (CA) provide 15 and 13 different gain settings respectively.

The die has an area of 2.38 x 3.17 mm. Figure 3 displays the layout of the light field sensor. The pixel matrix is located in the center of the die. The measurement amplifiers, digital logic and bonding pads are placed at the surrounding area.

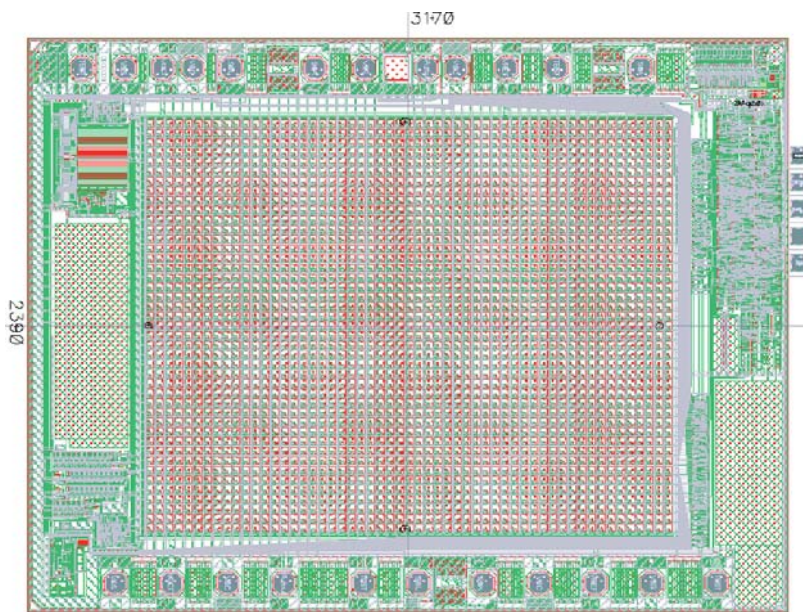


Abb. 3: Layout des Lichtfeldsensors
Fig. 3: Layout of light field sensor

Die Die-Fläche hat einen Bedarf von 2,38 x 3,17 mm. In Abbildung 3 ist das Layout des Lichtfeldsensors dargestellt. Im Zentrum des Layouts befindet sich die Pixelmatrix. Am Rand des Die sind die Messverstärker, Digitallogik und Bonding-Pads implementiert.

Ausblick

Zurzeit wird der Lichtfeldsensor am IMMS opto-elektronisch charakterisiert. Diese Untersuchungen sollen zeigen, inwieweit der Schaltkreis die spezifizierten Merkmale erfüllen kann. Im Anschluss daran sind verschiedene Anwendungen geplant.

Die erzielten Ergebnisse sollen in einem internen Projekt unseres Industriepartners Melexis GmbH (Erfurt) weiter spezifiziert werden. Weiterhin wird ein Demonstrator für die opto-elektronische Messtechnik des IMMS entwickelt werden.

Perspective

The optoelectronic properties of the light field sensor are currently being characterized at IMMS. The purpose of this research is to determine how well this circuit can fulfill the specified criteria. Once this stage is completed, several follow-up applications are planned.

The results gained by IMMS are to be refined in a project by our industrial partner Melexis GmbH (Erfurt). Furthermore a demonstrator for opto-electronical measurement and test engineering will be developed by IMMS.

Ansprechpartner / contact:

Dipl.-Ing. (FH) Glenn Völkel
 Tel: +49 (361) 663-2542
 E-Mail: glenn.voelkel@imms.de



Zielstellung

In der Vergangenheit wurden in den Forschungs- und Industrieprojekten des IMMS im Bereich Schaltungstechnik hauptsächlich Prototypen integrierter Schaltungen spezifiziert, entworfen und in ein Layout umgesetzt. Nach der Wafer-Fertigung konnten jeweils nur etwa 10 bis 20 Testmuster einer Schaltung untersucht werden, so dass statistische Untersuchungen zur Parameterstreuung und Aussagen zur Ausbeute nur in eingeschränktem Maße möglich waren.

Zielsetzung des Projektes war es, einen durchgängigen, systematischen Entwurfs- und Testablauf für in Kleinserie hergestellte IC-Produkte bereitzustellen. Bei dem für die Entwicklung der Methodik verwendeten Referenzprodukt handelt es sich um eine hochtemperaturtaugliche integrierte Analogschaltung, die aus drei voneinander isolierten Elementen besteht:

- einem Instrumentationsverstärker,
- einer Präzisions-Referenzspannungsquelle und
- einem Vorregler.

Zur Charakterisierung der Schaltung waren eine Reihe von Software- und Hardwarekomponenten aufeinander abzustimmen. Im Folgenden wird die Vorgehensweise am Beispiel der Charakterisierung der Referenzspannungsquelle vorgestellt.

Forschungsverlauf und -stand

In Abbildung 1 ist die verwendete LDO-Präzisionsspannungsquelle (Low-Drop-Out-Regler) schematisch dargestellt. Diese Schaltung hat eine Ausgangsspannung von 5 V bei einem typischen Laststrom von 5 mA und einer Eingangsspannung im Bereich von 5,2 V bis 16 V. Sie wird als Spannungsreferenz für eine Wheatstone-Messbrücke in einem Drucksensor verwendet. Die Spannungsreferenz sollte hochtemperaturtauglich bis 225 °C sein. Durch Messungen konnte nachgewiesen werden, dass die Schaltung bis 300 °C funktionsfähig bleibt. Für diese Referenz wurde eine Testspezifikation erarbeitet und in einem Messprogramm umgesetzt. Weiterhin wurde die benötigte Hardware, wie z. B. die Nadelkarte, die analogen Multiplexer und die Interface-Schaltungen für die Kommunikation mit einem PC, auf einer Leiterkarte realisiert. Das Messprogramm steuert einerseits die Messgeräte bzw. die Leiterkarte und andererseits die Schrittsteuerung des halbautomatischen Waferprobers sowie das Inkern (s. Abb. 2). Auf diese Weise ist es nun möglich, alle Bauelemente auf einem Wafer zu vermessen, zu charakterisieren, zu selektieren und statistisch auszuwerten.

Beispielhaft ist in Abbildung 3 die Verteilung der Ausgangsspannungswerte aller 2520 Spannungsreferenzschaltungen eines Wafers als Histogramm dargestellt. Das dazugehörige

Objective

In the past, IMMS research and industrial projects involving circuit technology mainly consisted of specifying and designing prototypes of integrated circuits and producing the corresponding layouts. After manufacturing the wafers, it was only possible to test approximately 10 to 20 prototypes of any given circuit. Hence, statistical analyses with respect to parameter deviation were limited, and it was difficult to reach clear conclusions on the circuit yield. The goal of the project at hand was to develop a continuous, systematic design and test procedure for integrated circuits manufactured in small production runs. The methodology developed for this project was based on a reference product. This reference product is a high temperature-compatible integrated analog circuit consisting of three elements, each insulated from each other: instrumentation amplifier, precision reference voltage source, and pre-regulator. To characterize the circuit, it was necessary to match a range of software and hardware components. In the following, the characterization procedure is described for a reference voltage source.

Research Progress and Status

Figure 1 contains a schematic diagram of the LDO precision voltage source (low drop-out regulator) that was used. This circuit provides an output voltage of 5 V for a typical current load of 5 mA and an input voltage in the range of 5.2-16 V. It is used as a voltage reference for a Wheatstone bridge in a pressure sensor. The voltage reference should be compatible with high temperatures up to 225°C. Through measurements, it was possible to prove that the circuit remained functional up to 300°C. For this reference, a test specification was developed and then implemented as a measurement program. Furthermore, the required hardware such as the probe card, analog

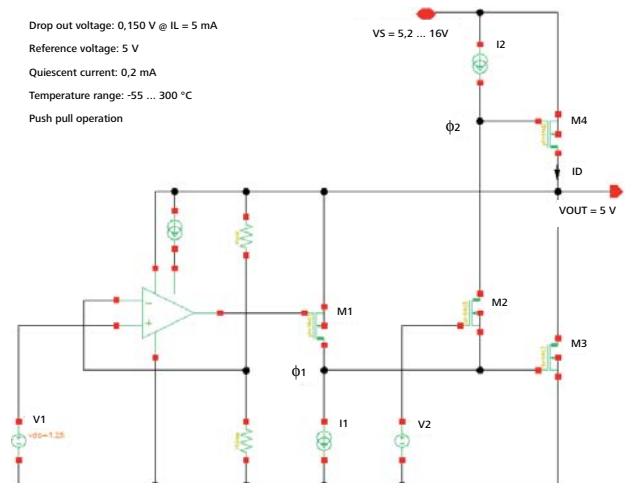


Abb. 1: Low-Drop-Out-Spannungsreferenz
Fig. 1: Low drop-out voltage reference



Abb. 2: Vorbereitungen der Messungen am halbautomatischen Waferprober
Fig. 2: Preparations for measurements of semi-automatic wafer tester

Wafer-Map findet sich in Abbildung 4. Die Werte folgen einer Gaußschen Normalverteilung mit einem Mittelwert von 5,006 V und einer Standardabweichung von 0,143 V. Die Ausbeute für die gesamte Schaltung beläuft sich für diesen Wafer auf 91%. Wie auf dem Wafer-Map zu erkennen ist, gibt es keine Bereiche, in denen ein Spannungswert gehäuft auftritt.

Durch Abgleich der Schaltung über Fuses oder Zener-Zaps könnte der Streubereich noch deutlich abgesenkt werden. Hierbei ist nun von Vorteil, dass der Trimbereich vorab sehr genau bekannt ist und damit die entsprechenden Schaltungsteile zum Trimmen gut abgestimmt werden können. Mit der hier kurz vorgestellten Methodik sind On-Wafer-Messungen von Mixed-Signal-Schaltungen mit bis zu 64 Pins möglich.

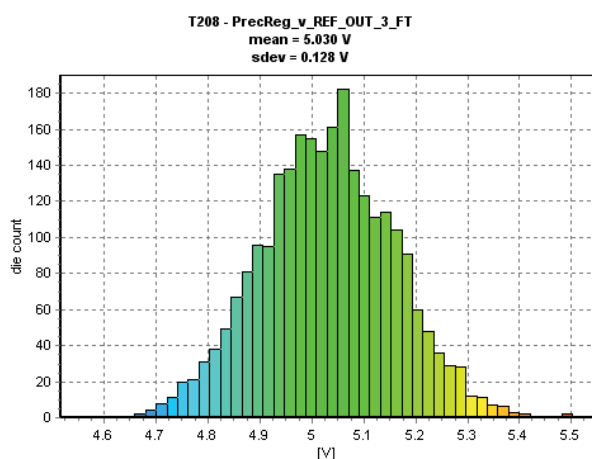


Abb. 3: Statistische Auswertung der Ausgangsspannung der Spannungsreferenz
Fig. 3: Statistical analyses of output voltage of voltage reference

multiplexer and interface circuits for PC communications were all realized on a PCB. The measurement program controls the measuring instruments and/or PCBs, the step controller of the semi-automatic wafer prober and also the inking process it was (see fig. 2). Thus possible to measure all of the components on a wafer, to characterize them, to select them and evaluate them statistically.

For example, the histogram in figure 3 displays the output voltage distribution from all 2520 voltage reference circuits of a single wafer. The corresponding wafer map is displayed in figure 4. The values correspond to a Gaussian distribution with a mean at 5.006 V and a standard deviation of 0.143 V. The yield for the entire circuit is 91% for this wafer. As is readily apparent on the wafer map, there are no areas where any single voltage value predominates. By balancing the circuit using fuses or Zener zaps, the standard deviation can be lowered considerably. An advantage here is that since the trimming range is well known in advance, the circuit components to be trimmed can be accurately matched to each other. The method briefly described here allows on-wafer measurements of mixed signal circuits with up to 64 pins.

Perspective

With the achieved results, IMMS can now offer the following customer-specific solutions:

- Development of circuit specifications in cooperation with customer
- Consulting on choice of technology
- Design and optimization of smaller mixed-signal ICs

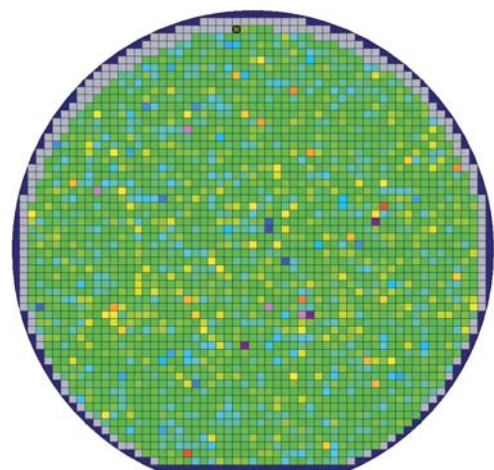


Abb. 4: Wafer-Map
Fig. 4: Wafer map

Ausblick

Durch die erzielten Ergebnisse ist das IMMS in der Lage, folgende kundenspezifische Lösungen anbieten zu können:

- Erarbeitung einer Schaltungsspezifikation in Zusammenarbeit mit dem Kunden
- Beratung zur Technologieauswahl
- Entwurf und Optimierung von kleineren Mixed-Signal-ICs
- Layout-Entwurf, Design-Rule-Check und Layout-versus-Schematic-Check
- Unterstützung bei der Zusammenarbeit mit dem Wafer-Hersteller
- Erarbeitung einer Testspezifikation
- Erstellung von Testprogrammen zum On-Wafer-Test
- Probecard-Entwicklung
- On-Wafer-Messungen mit halbautomatischem Prober
- Elementare statistische Auswertung der Daten
- Inken und Sortierung der vermessenen Bauelemente in verschiedene Güteklassen

- *Layout designing, design rule checks and layout vs. schematic checks*
- *Support during collaboration with wafer manufacturers*
- *Development of test specifications*
- *Creating test programs for on-wafer tests*
- *Development of test cards*
- *On-wafer measurements with semi-automatic prober*
- *Elementary statistical data analyses*
- *Inking and sorting of measured components in various quality classes*

Using this procedure, it is possible to develop comprehensive solutions including everything from integrated circuit design to the testing of small production runs. The relationships between IMMS clients, wafer manufacturers and the research activities into "microelectronic circuit technology" and "industrial measurement technology" at IMMS are displayed in figure 5.

Mit diesem Ablauf sind durchgängige Lösungen vom Entwurf von integrierten Schaltungen bis hin zum Test von Kleinserien möglich. Die hierzu notwendigen Wechselbeziehungen zwischen dem Kunden des IMMS, dem Wafer-Hersteller und den Themenbereichen „Mikroelektronische Schaltungstechnik“ sowie „Industrielle Elektronik und Messtechnik“ des IMMS sind in Abbildung 5 gezeigt.

Ansprechpartner / contact:

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

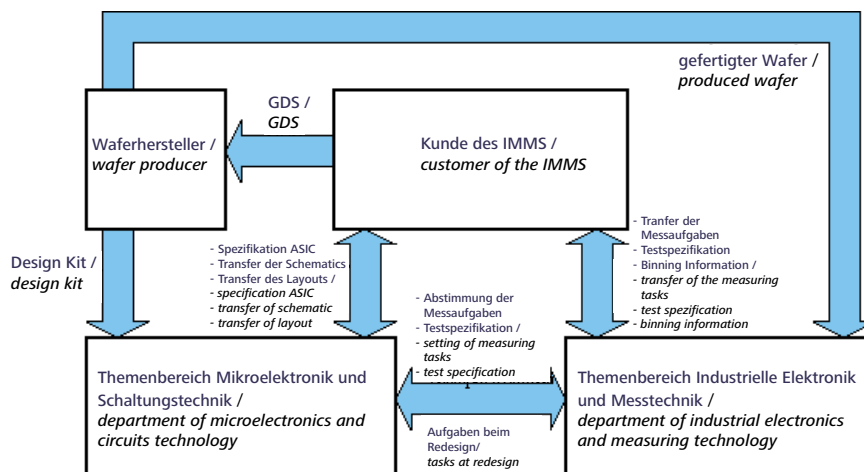


Abb. 5: Wechselbeziehungen zwischen dem Kunden, den Themenbereichen des IMMS und dem Wafer-Hersteller

Fig. 5: Relationships between customers, research areas of IMMS and wafer manufacturers

Zielstellung

Im Vergleich zu einem herkömmlichen auf einem Chip integrierten Hochfrequenz-System-on-Chip (HF-SoC) bietet ein System in Package (SiP) prinzipiell die Möglichkeit an, mehrere Bauelemente, Baublöcke bzw. Dice in unterschiedlichen Technologien in einem Gehäuse zu integrieren. Dadurch können nicht nur Kosten, Fläche und Energieverbrauch reduziert werden, sondern auch bessere Ausbeuten erreicht werden. Ein Schlüssel dazu ist die Simulation mit genauen Modellen von Gehäuse bzw. Modulsubstrat einschließlich der passiven Bauelemente.

Zur Generierung von den Simulationsmodellen soll die 3D-Feldsimulation eingesetzt werden, um die Bearbeitungszeit und Kosten zu reduzieren. Das Problem dabei sind die vielen Einstellmöglichkeiten. Im Förderprojekt „Dionysys“ besteht daher die Aufgabe, das Verhältnis von Simulationszeit und Genauigkeit in Abhängigkeit von den Einstellungskombinationen zu untersuchen. Diese Ergebnisse werden zur weitestgehenden Automatisierung der Feldsimulatoreinstellung benötigt.

Forschungsverlauf und -stand

Für die oben genannte Untersuchungen wurden für den Anfang vorhandene Messdaten einer integrierten Halbleiterspule genutzt. Die Geometriedaten der Spule lagen als 2-dimensionale Layout-Daten vor und mussten entsprechend für die 3D-Feldsimulation aufbereitet werden (s. Abb. 1). Um den Feldsimulator zu entlasten, wurden zusätzlich unnötig komplexe Strukturen (z.B. Kontakt- und Via-Arrays sowie der Substrataufbau) vereinfacht. Das elektrische Verhalten der Spule durfte dabei nicht verändert werden.

Im verwendeten Feldsimulator „CST Microwave Studio“ (MWS) mussten nach dem Import der angepassten Layoutdaten nur noch die Höhen- und Positionswerte zugeordnet werden. Etwas aufwendiger waren nichtplanare Strukturen, die in MWS direkt eingegeben werden mussten. Weitere Einstellungen von MWS sind:

Objective

Compared to a conventional radio-frequency system-on-chip (RF-SoC), a System-in-Package (SiP) essentially offers in principle the possibility of integrating various components, modules and/or dice based on different technologies in a single package. This not only reduces costs, size and energy consumption, it also allows for higher yields. To a partial degree, this is achieved using exact models to simulate packages or substrate modules including any passive components.

Simulation models are to be generated using 3D field simulation, thus reducing processing time and costs. One issue with this approach is the large number of possible simulator settings. In the “Dionysys” project, the task is to investigate the relationship between the simulation time and precision as a function of the available combinations of settings. Based on the results, it will be possible to adjust the field simulator almost entirely automatically.

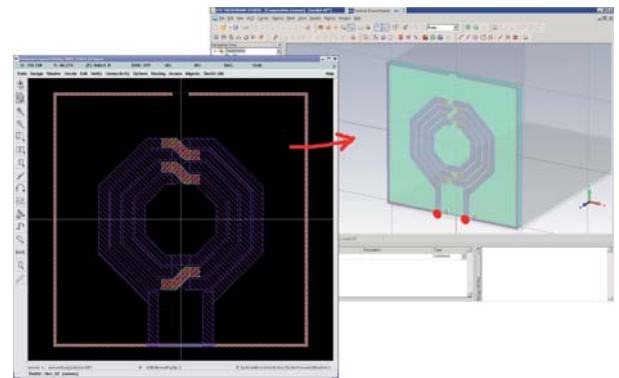


Abb. 1: Vom 2D-Layout zur 3D-Modellierung
Fig. 1: from the 2D layout to the 3D modeling

Research Progress and Status

Previously existing measurement data from an integrated semiconductor inductor was initially used for investigation purposes as described above. The geometrical data of the inductor was available as 2D layout data and had to be adapted for the 3D field simulation (see fig. 1). To

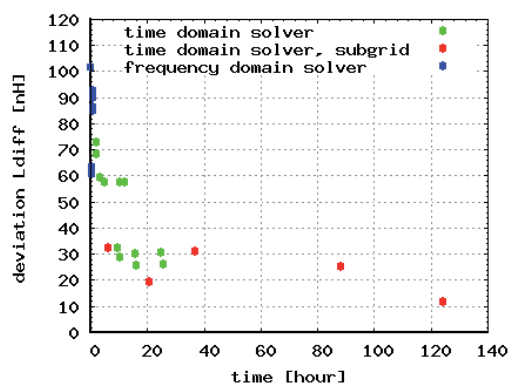


Abb. 2: Abweichung der Simulationswerte von den Messwerten
Fig. 2: Deviation between simulation and measurement

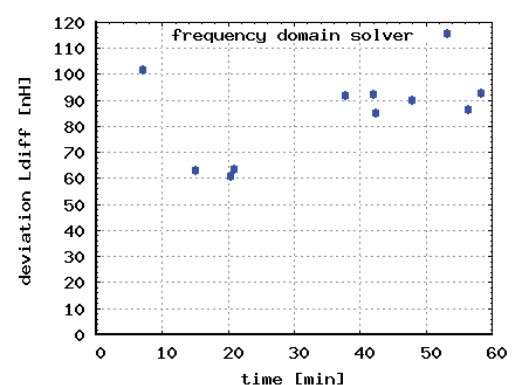


Abb. 3: Abweichung (Ausschnitt: bis 60 min)
Fig. 3: Deviation (detail until 60 min)

- Einheiten von Geometrie, Frequenz und Zeit
- Materialeigenschaften von Umgebung und Struktur
- Frequenzbereich(e)
- Porteeigenschaften.
- Randbedingungen
- Solver-Typ bzw. entsprechende Einstellungen
- Mesh-Typ bzw. entsprechende Einstellungen (Global und Lokal)

Durch viele systematische Simulationen mit unterschiedlichen Einstellungen, konnte gezeigt werden, dass Solver- bzw. Mesh-Einstellungen die Genauigkeit und Simulationszeit entscheidend beeinflussen. Die Einstellungen wurden gründlich evaluiert, um die besten Kombinationen herauszufinden. In den Abbildungen 2 und 3 wird die Betragssumme der Differenzen zwischen Simulations- und Messwerten dargestellt. Für beide Achsen gilt, dass kleinere Werte besser sind, d.h. geringere Simulationszeit und höhere Genauigkeit in Bezug auf die Messwerte. Wie zu erkennen ist, wurde bei den bisherigen Ergebnissen mit dem Frequenzbereichs-Solver weniger Zeit benötigt und andererseits mit dem Zeitbereichs-Solver genauere Ergebnisse erzielt. Somit ist die Solver-Auswahl von der benötigten Genauigkeit abhängig. In Abbildung 3 ist gut zu erkennen, dass bestimmte Einstellungskombinationen ausgeschlossen werden können, da sie keinen Vorteil bieten (Simulationszeit > 30 min.).

Auf Basis der erworbenen Kenntnisse und Erfahrungen mit der 3D-Feldsimulation wurde eine Modulschubstratsspule mit der Güte von über 40 für die Eingangsanpassung eines GPS-LNA im gleichen Förderprojekt entworfen. Dieser LNA ist Teil eines Modulschubstrattestfeldes (siehe Abbildung 4) zur weiteren Verbesserung der SiP-Entwurfsumgebung.

reduce the computational effort of field simulation on the field simulator, unnecessarily complex structures (e.g., contact and via arrays as well as substrate structures) were simplified without changing the electrical behavior of the inductor.

After importing the adapted layout data into the field simulator - CST Microwave Studio (MWS) - it was only necessary to assign the height and position values. It was somewhat more difficult to model non-planar structures, whose data had to be entered directly into MWS. Other settings for MWS included:

- Units for geometry, frequency and time
- Material properties for background and structure
- Frequency range(s)
- Port properties
- Boundary conditions
- Solver type and corresponding settings
- Mesh type and corresponding settings (global and local)

By running many systematic simulations with different settings, it was possible to demonstrate that the solver and mesh settings have a decisive effect on the precision of the results as well as on the simulation time. The settings were thoroughly evaluated in order to determine the best combinations. Figures 2 and 3 display the total sums of the differences between the simulation and measurement values. Smaller values are better for both axes, i.e. less simulation time and higher accuracy in relation to measurement.

Evidently based on current results, the frequency domain solver required less time compared to the time domain solver, and in return the results of the time domain solver were more precise. Thus, the choice of a solver depends

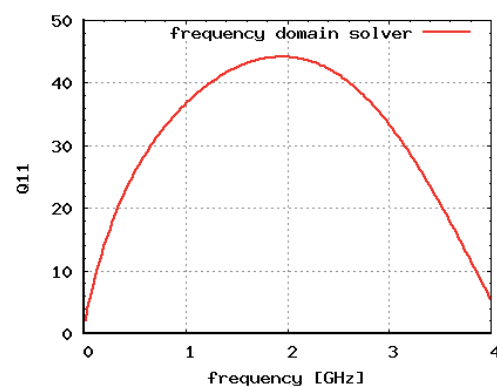
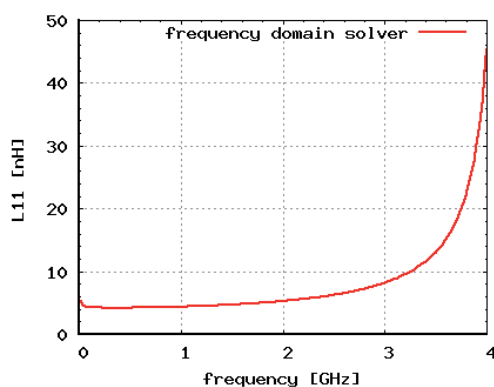


Abb. 4: Induktivität und Güte einer Modulschubstratsspule

Fig. 4: Inductance and quality factor of an module substrate inductor

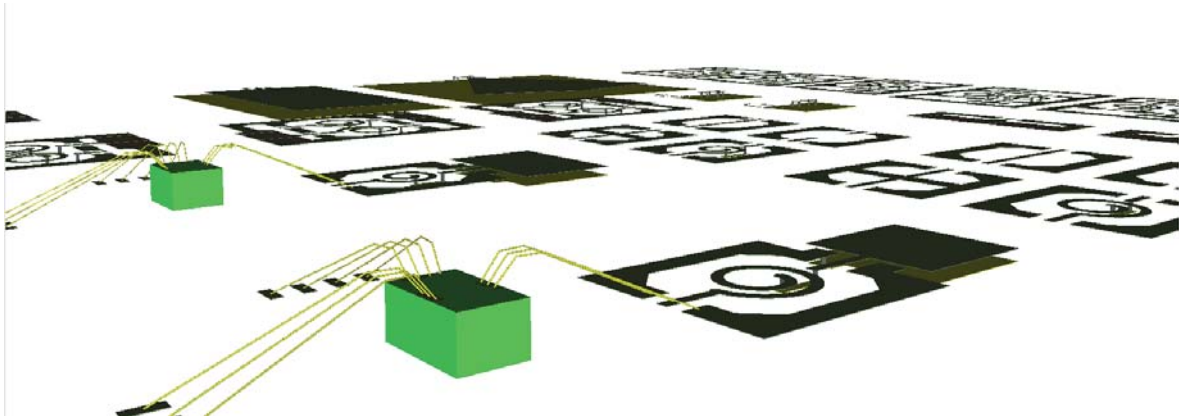


Abb. 5: Modulsubstrat-Testfeld
Fig. 5: Test field for module substrate

Ausblick

Im weiteren Verlauf des Projektes werden folgende Punkte bearbeitet:

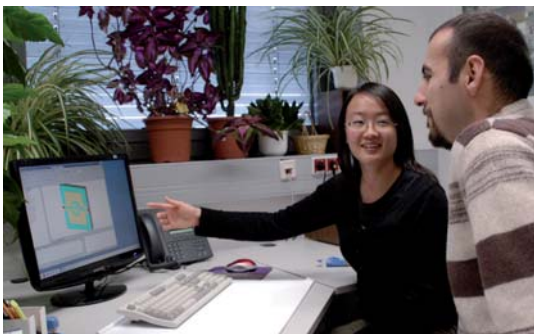
- Charakterisierung des Modulsubstrat-Testfeldes
- Untersuchung von parasitären Effekten der passiven SiP-Komponenten z.B. Bonddrähte → Induktivitäten, Widerstände und Gegeninduktivitäten
- Generierung effizienter Modelle von Gehäusen und anderen Komponenten für eine SiP-Gesamtsimulation mittels Modellordnungsreduktion
- Evaluierung der neuen Schnittstelle zwischen Cadence (Unix/Linux) und CST (Windows)

Mit dem Projekt entsteht ein neuer effizienter Entwurfsablauf für SiP-Schaltkreise, mit dem bisher nicht realisierbare Konzepte umgesetzt werden können.

Bei der Bearbeitung der Teilaufgaben besteht eine enge Zusammenarbeit mit Cadence und CST.

Ansprechpartner / contact:

M. Sc. Wei Wu
Tel.: +49 (361) 663-2541
E-Mail: wei.wu@imms.de



on the precision. As is shown in figure 3, some combinations of settings can be excluded since they offer no advantages (simulation time > 30 min.).

On the basis of the knowledge and experiences gained with the 3D field simulation, an module substrate inductor

with a quality factor higher than 40 was developed for input matching in a GPS-LNA as a part of the same project. This LNA is a device in a module substrate test field (see figure 4) that further improves the SiP design environment.

Perspective

The following subjects will be investigated during the further progress of the project:

- Characterization of module substrate test field
- Investigation of parasitic effects of passive SiP components such as bond wire → inductances, resistances and mutual inductances
- Generation of efficient models for packages and other components for comprehensive SiP simulation using model order reduction
- Evaluation of Cadence the new interface between (Unix/Linux) and CST (Windows)

This project is developing a new, efficient design procedure for SiP circuits that will allow concepts to be implemented that have never been realized before.

Parts of this project are being performed in close cooperation with Cadence and CST.

Präzisionsantriebstechnik

Precision drive technology



Einleitung

Das Erreichen von Unsicherheiten im Bereich weniger Nanometer in Verbindung mit einem Verfahrbereich von einigen 100 mm - das ist eine Zielstellung, die Forschergruppen weltweit beschäftigt.

Im Rahmen des SFB 622 untersucht das IMMS die Grundlagen für die Gestaltung von "Nanopositionier- und Nanomessmaschinen"^[1]. Der Grundgedanke hierbei ist die hochpräzise Positionierung eines Zerodur-Reflektors und die Messung der Bewegung in allen sechs Achsen mit Hilfe von Laserinterferometern, die auf einen thermisch stabilen Metrologierahmen montiert sind^[2,3]. Eine große Herausforderung besteht in der lateralen Positionierung der Spiegelecke innerhalb eines großen Verfahrbereiches mit Reproduzierbarkeiten und sogar Unsicherheiten im Nanometerbereich. Lange kinematische Ketten, mechanische Resonanzen, Reibung, thermische Störungen wie auch positionsabhängige Änderungen des Übertragungsverhaltens sind hier die kritischen Faktoren und begrenzen die Einsatzfähigkeit konventionell strukturierter Systeme.

Planarmotorkonzept

Vor diesem Hintergrund wurde ein Planarmotorkonzept für die laterale Positionierung des Reflektors in x , y und φ_z entwickelt. Die Grundidee dabei ist, die Vorteile des Prinzips der integrierten Mehrkoordinatendirektantriebe für die Realisierung von Nanopositioniermaschinen (NPM) zu nutzen. Die einfache kinematische Struktur mit dem direkt angetriebenen Läufer als einzigem bewegten Teil ermöglicht die Verbindung von hoher Dynamik und hoher Präzision.

Für den Einsatz als NPM bestimmt jedoch nicht die Dynamik sondern die Maschinenmetrologie die Randbedingungen für die Konzeptentwicklung und die Dimensionierung der Komponenten. Hohe Positioniergeschwindigkeiten und hohe Beschleunigungen spielen eine untergeordnete Rolle, während die Reduzierung externer und interner Störungen gemeinsam mit der Optimierung des Systemübertragungsverhaltens in den Vordergrund rücken^[4].

Abb. 1 zeigt das Motorkonzept, bei dem durch die Kombination einer planaren aerostatischen Führung mit einem planaren Direktantrieb ein 3D-Positioniersystem (x , y , φ_z) entsteht. Innerhalb eines Verfahrbereiches von $\varnothing$ 250 mm ist eine Positioniergeschwindigkeit von 5 mm/s, eine Beschleunigung von 1 m/s^2 und eine Regelabweichung von 0,5 nm angestrebt. Die Weg- und Winkelmessung erfolgt mit Hilfe eines 3D-Laserinterferometersystems. Die beiden Messköpfe werden an einem metrologischen Rahmen montiert und ermöglichen eine Messauflösung von 0,1 nm. Der Tragrahmen für die Führungselemente, der Kraftrahmen für die Antriebsspulen und der metrologische Rahmen für die

Introduction

Positioning systems with uncertainties of just a few nanometers and travel ranges of 100 mm and higher - this is the ambition of many R&D institutes throughout the world. As a part of SFB 622, IMMS is researching the scientific foundations for "Nanopositioning- and Nanomeasuring Machines"^[1]. The basic idea is to allow high-precision positioning of a Zerodur reflector and measure movement along all six axes using laser interferometers, which are mounted to a thermally stable metrology frame^[2,3]. A major hurdle is to achieve lateral positioning of the reflector throughout a large traversing range with reproducibility and uncertainty values in the nanometer range. The critical factors are long kinematic chains, mechanical resonances, friction, thermal perturbations and position-dependent changes to the system transfer behaviour. These limit the utilizability of conventionally structured systems.

Planar Motor Concept

With this background in mind, a planar motor concept was developed for lateral positioning of the reflector along the x , y and φ_z axes. The basic idea is to utilize the advantages of integrated multi-coordinate direct drives to realize a Nanopositioning Machine (NPM). Since the directly driven slider is the sole moving part, the kinematic structure is simple. Thus, these drives allow for both high dynamics and high precision. However when used as an NPM, the general concept and dimensions are constrained by the machine metrology and not the dynamics. High positioning speeds and high accelerations are less important than reducing external and internal disturbances and optimizing the system transfer behaviour^[4].

Fig. 1 displays the motor concept wherein a planar aerostatic guide is combined with a planar direct drive to create a 3D positioning system (x , y , φ_z). The objective is to achieve positioning speeds of 5 mm/s, accelerations

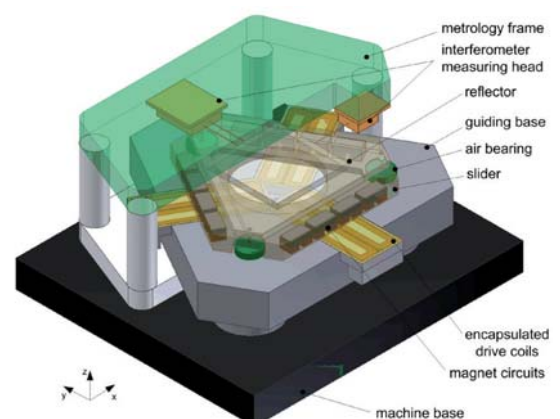


Abb. 1: Planarmotorkonzept

Fig. 1: Planar motor concept

Laserinterferometer sind voneinander getrennt, um die gegenseitige Beeinflussung und vor allem thermische Störungen zu minimieren. Mit dem gleichen Ziel wird eine Einkapselung und Temperierung der Motorspulen vorgesehen.

Der integrierte 3D-Antrieb entsteht durch drei lineare Antriebseinheiten, die jeweils aus einem gestellfesten Flachspulenpaar und bewegten Dauermagnetkreisen am Läufer bestehen. Die drei Antriebskräfte wirken somit simultan und berührungsfrei auf den Läufer. Diese äußerst einfache Kinematik führt zu einem exzellenten Kraftübertragungsverhalten. Da die Vorteile dieses Antriebsprinzips erst mit einer reibungsfreien planaren Führung des bewegten Läufers voll zum Tragen kommen, wird der Läufer durch drei vakuumvorgespannte Luftlager gegenüber einer hochebenen Basisplatte abgestützt.

Grundsätzlich ist eine dreieckige oder eine viereckige Umsetzung des Planarmotorprinzips denkbar. Abb. 2 zeigt diese beiden Ausführungsvarianten im Grundriss. Die Konzeptentwicklung zeigte, dass für die beschriebenen Randbedingungen die Dreieckvariante deutliche Vorteile aufweist, da sie eine statisch bestimmte Läuferabstützung, einen kleineren Grundfläche, kleinere Läuferabmessungen und Massen und damit auch einen kleineren metrologischen Rahmen ermöglicht.

of 1 m/s^2 and servo errors of 0.5 nm within a circular traversing range with a diameter of 250 mm . The path and angle measurements are performed using a 3D laser interferometer system. The two measuring probes are fastened to the metrology frame and offer a measurement resolution of 0.1 nm . The support frame for the guides, the force frame for the drive coils and the metrology frame for the laser interferometers are separated from each other to minimize reciprocal interference and, more importantly, thermal effects. With this same goal in mind, the motor coils are to be encapsulated and cooled.

The integrated 3D drive consists of three linear drive units, each containing one pair of flat coils affixed to the frame and moving permanent magnets on the slider. The three drive forces act simultaneously and without contacting the slider. This extremely simple kinematic design allows for excellent force transfer behaviour. Since the advantages of this drive principle are not fully realized until the moveable part is guided with frictionless planar bearings, the slider is supported above the highly planar base plate by three vacuum-pre-loaded air bearings.

In theory, both triangular and quadrangular implementations of the planar motor principle are conceivable. Fig. 2 displays an outline of these two possible variants. During

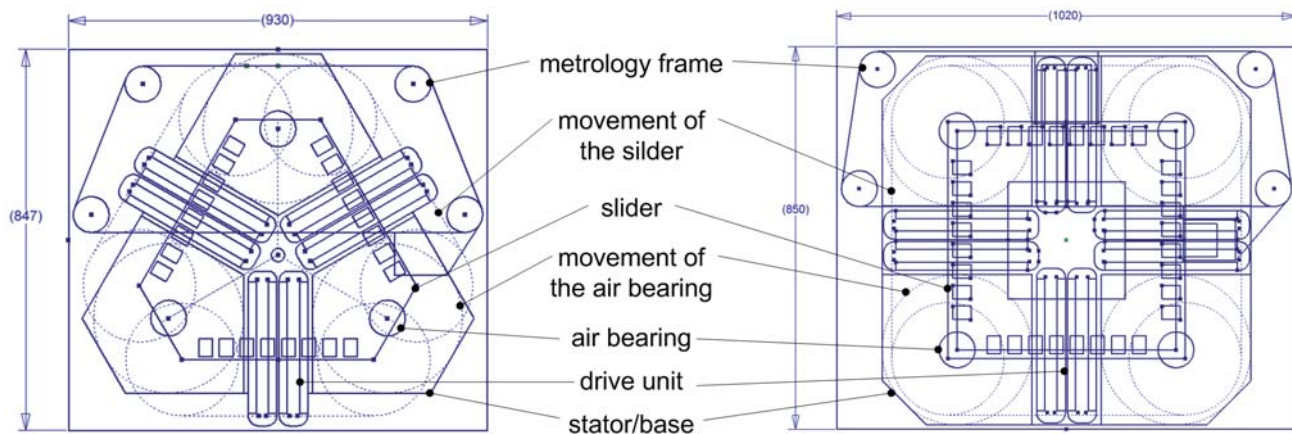


Abb. 2: Skizze der Dreieck- (links) und der Viereck-Konfiguration (rechts)
Fig. 2: Sketch of triangular (left) and quadrangular configurations (right)

Dimensionierung und Anordnung der Antriebseinheiten

Die Antriebseinheiten stellen das kritische Funktionselement dar, da ihre Auslegung und Anordnung auf der einen Seite die Antriebskräfte bestimmt, auf der anderen Seite aber auch die Abmessungen und Massen anderer Komponenten, z.B. des Läufers beeinflusst. Die Antriebskraft entsteht als Lorentzkraft bei einem Stromfluss durch die Spulenstränge, während eine Kommutierung der Spulenströme für eine positionsunabhängige Antriebskraft sorgt. Um Ummagnetisierungsverluste, Hysterese und eine vertikale Anziehung

the conceptualization phase, it was shown that with the boundary conditions as described above, the triangular version offers significant advantages, since it allows for a statically determined slider support as well as it offers smaller surface areas, smaller slider dimensions and masses. It is thus possible to use a smaller metrology frame.

Dimensioning and Arrangement of Drive Units

The drive units are a key functional component of the system. This is due to the fact that their design and arrangement determine the drive forces as well as dimen-

zwischen Läufer und Stator zu verhindern, wird auf einen ferromagnetischen Rückschluss unterhalb der Spulen verzichtet. Für die optimale Auslegung der Antriebseinheiten stehen die Abmessungen (Höhe, Breite, Länge, Teilungsperiode) von Spulen und Magneten als Designparameter zur Verfügung, während eine Reihe zum Teil gegensätzlicher Designziele definiert wird:

- benötigte Beschleunigung 1 m/s^2 ,
- Verfahrbereich $\varnothing 250 \text{ mm}$
- Minimierung der Verlustleistung der Antriebsspulen
- Minimierung der Erwärmung der Antriebsspulen
- Minimierung der Läuferabmessungen und der bewegten Masse
- Einhaltung des verfügbaren Bauraumes.

Um das optimale Design zu finden, wird jeweils ein Designparameter durchgespielt und für jede Konfiguration die Antriebskraft mit Hilfe eines FEM-Modells berechnet. Weiterhin werden mit Hilfe physikalischer Modelle, die bewegte Masse, die benötigte Stromdichte, die Verlustleistung und die Spulenerwärmung für die jeweilige Konfiguration ermittelt. In einem iterativen Prozess werden so die optimalen Abmessungen für die Antriebseinheiten bestimmt. Abb. 3 zeigt die berechnete Verlustleistung in Abhängigkeit der Parameter Spulenhöhe und Magnetlänge. Es ist erkennbar, dass für eine bestimmte Magnetlänge eine optimale Spulenhöhe existiert, die die Verlustleistung minimiert. Außerdem wird deutlich, dass größere Magnetlängen zu geringeren Verlustleistungen führen, obwohl sie gleichzeitig auch die Läuferdimensionen und vor allem die bewegte Masse erhöhen. Im Ergebnis der Optimierung wurde ein Design ausgewählt, welches zu einer bewegten Masse von ca. 30 kg und einer Verlustleistung von ca. 125 W bei einer Nennbeschleunigung von 1 m/s^2 führt.

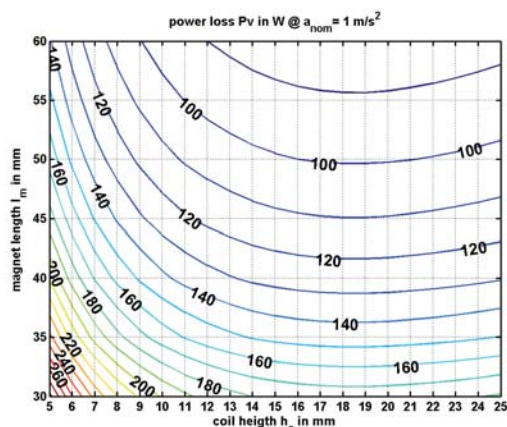


Abb. 3: Verlustleistung vs. Spulenhöhe, Magnetlänge
Fig. 3: Power dissipation vs. coil height, magnet length

In der ausgewählten Dreieckskonfiguration des Planarmotors werden die drei Antriebseinheiten um 120° versetzt angeordnet, so dass sich die Einzelfahrbereiche der drei linearen

antriebsmassen und Massen anderer Komponenten wie der Welle. Die Antriebskraft wird durch eine Lorentzkraft erzeugt, die durch den Stromfluss in der Spule entsteht. Diese Kraft bleibt unabhängig von der Position, indem die Spulenströme kommutiert werden. Um Re-Magnetisierungsverluste, Hysterese und vertikale Anziehung zwischen der Welle und dem Stator zu vermeiden, wird kein Rückblech unter den Spulen installiert. Die Antriebseinheiten können durch Modifizieren der Abmessungen (Höhe, Breite, Länge, Teilungsperiode) der Spulen und Magneten optimiert werden. Außerdem haben sich manchmal widersprüchliche Designziele ergeben:

- Required acceleration 1 m/s^2 ,
- traversing range 250 mm diameter
- Minimization of power dissipation in drive coils
- Minimization of heating in drive coils
- Minimization of slider dimensions and moving mass
- Compliance with available installation space

To find the optimum design, one design parameter is varied at a time. The drive force is calculated on the basis of an FEM model for each configuration. Next, physical models are used to calculate the moving mass, required current density, power dissipation and coil heating for each configuration. An iterative process is used to calculate the optimum dimensions for the drive units. Fig. 3 displays the calculated power dissipation as a function of the coil height and magnet length. As one can see, there is an optimum coil height for each specific magnet length that results in a minimum of power dissipation. It is also apparent that increasingly long magnets lead to a decrease in power dissipation, despite making the armature larger in size and, in particular, increasing the moving mass. On completion of the optimization phase, we chose a design with a moving mass of approx. 30 kg and power dissipation of approx. 125 W for a nominal acceleration of 1 m/s^2 .

In the chosen triangular configuration for the planar motor, the three drive units are rotated by 120° relative to each other. The overlapping traversing ranges of the three linear drive units result in a circular traversing range with a diameter of 250 mm (see figure 4 left). With this configuration, the three drive forces can combine to produce a resultant horizontal drive force in any given direction and can also create a torque for controlling the z-rotation of the slider. Fig. 4 (right) displays how the maximum achievable drive force is a function of the drive direction. As one can see, 1.5 times the nominal force is available for each drive unit regardless of the direction.

Cooling the Drive Coils

To reduce the thermal effects of the drive coils on the guides and, even more importantly, on the metrology

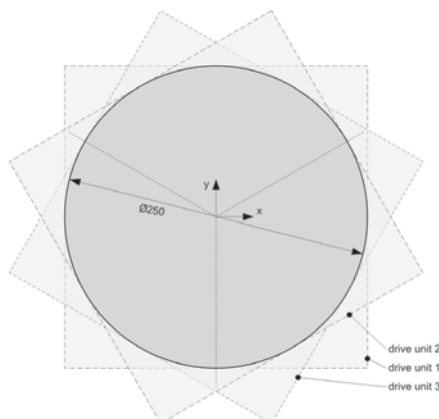
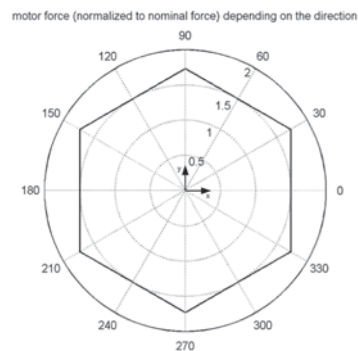


Abb. 4: Resultierender Verfahrbereich (links)
Fig. 2: Resulting traversing range (left)

Antriebseinheiten zu einem resultierenden Verfahrbereich von $\varnothing 250$ mm überlappen (s. Abb. 4, links). In dieser Anordnung ermöglicht die Kombination der drei Antriebskräfte eine resultierende horizontale Antriebskraft in beliebiger Richtung, wie auch die Erzeugung eines Drehmomentes zur Kontrolle der z-Rotation des Läufers. Abb. 4 (rechts) zeigt, wie die dabei maximal erzielbare Antriebskraft von der Antriebsrichtung abhängt. Es ist ersichtlich, dass unabhängig von der Richtung das 1,5-fache der Nennkraft einer einzelnen Antriebseinheit zur Verfügung steht.

Temperierung der Antriebsspulen

Um den thermischen Einfluss der Antriebsspulen auf die Führungsbasis und - noch wichtiger - auf den Metrologierahmen zu reduzieren, ist eine hochgenaue Temperierung der Spulenbaugruppe nötig. Hierzu werden die Spulen eingekapselt und über Kanäle mit einem Wasserkreislauf temperiert. Da die erwarteten Verlustleistungen relativ gering sind, steht bei der Auslegung des Temperiersystems nicht die Kühlung der Spulen sondern die sichere und direkte Temperierung der gesamten Baugruppe im Fokus. Deshalb sieht das Konzept Kühlkanäle auf der Spulenober- und Unterseite vor. Auf der Oberseite erhöht sich durch die Temperierung der Arbeitsluftspalt, was den Wirkungsgrad verschlechtert, dennoch ist auf diese Weise eine geringere Übertemperatur der Baugruppe zu erzielen. Die Geometrie



Richtungsabhängigkeit der Motorkraft (rechts)
directional dependency of motor force (right)

frame, the temperature of the coil assembly must be precisely controlled. To do this, the coils are encapsulated and cooled by water flowing through channels on the coils. Since the expected power dissipation is relatively small, it is more important for the cooling system to safely and reliably control the temperature of the entire assembly and not just cool the coils. Therefore, this concept includes cooling channels along the top and bottom sides of the coils. On the top side, controlling the temperature increases the operating air gap. Although this lowers the efficiency, it also causes a slightly higher temperature in the assembly. Together with the flow rate of the heat transfer medium, the geometry of the coils and channels determines the heat transmission resistance to the heat transfer medium. The coil dimensions must be taken into consideration during the design and optimization phase.

Air Bearing and Laser Interferometer

The air flow from conventional air bearings affects the temperatures throughout the entire system and also directly disturbs the homogeneity (i.e., varying pressures, temperature) along the light path of the interferometer. The resulting measuring errors are not systematic. To minimize the effects of the air bearing on length and angle measurements, a seal was installed as an additional element on the air bearing (see figure 5). This seal consists

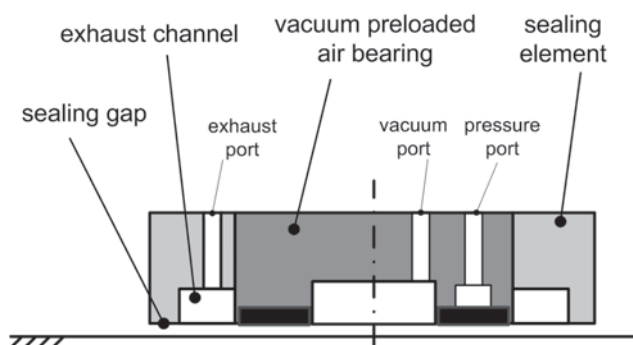
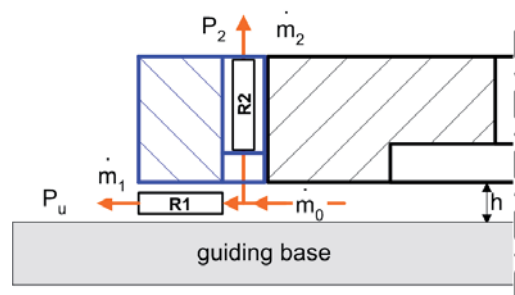


Abb. 4: Abdichtungskonzept für vakuum-vorgespannte Luftlager (links)
Fig. 2: Sealing concept for vacuum-pre-stressed air bearing (left)



Strömungsmechanisches Widerstandsmodell (rechts)
mechanical flow resistance model (right)

der Spulen und der Kanäle bestimmen zusammen mit dem Volumenstrom des Temperiermediums den Wärmeübergangswiderstand zum Temperiermedium. Dies ist bei der Auslegung- und Optimierung der Spulenabmessungen zu berücksichtigen.

Luftlager und Laserinterferometer

Konventionelle Luftlager verursachen einen Luftstrom in ihrer Umgebung, der einerseits als thermische Störung auf das gesamte System wirkt und andererseits auch direkt im Messstrahlengang der Interferometer zu Inhomogenitäten (Druck, Temperatur) führt. Die dadurch entstehenden Messfehler sind nicht systematisch. Um die Beeinflussung der Weg- und Winkelmessung durch die Luftlager zu minimieren, kommt eine Abdichtung zum Einsatz, die als zusätzliches Element am Luftlager montiert wird (s. Abb. 5). Sie besteht aus einem Auslasskanal und dem eigentlichen Dichtspalt. Beides wurde mit Hilfe eines strömungsmechanischen Widerstandsmodells dimensioniert. Experimentelle Untersuchungen an ersten Prototypen bestätigen, dass sich auf diese Weise der Einfluss der Luftlager auf die laserinterferometrische Wegmessung bis auf ein nicht mehr nachweisbares Maß reduzieren lässt.

Ansprechpartner / contact:

Dipl.-Ing. Steffen Hesse
Tel. +49 (3677) 69-5567
E-Mail: steffen.hesse@imms.de

of an outlet channel and the actual sealing gap. Both of these have been dimensioned using a mechanical flow resistance model. Experimental investigations of the first prototypes have revealed that the air bearing no longer has a detectable effect on the laser interferometer in length measurements.

- [1] SFB 622, Nanopositionier- und Nanomessmaschinen
<http://www.maschinenbau.tu-ilmenau.de/mb/sfb622/index.htm>
- [2] T. Hausotte: „Nanopositionier – und Nanomessmaschine“
Dissertation, TU Ilmenau 2002
- [3] T. Ruijl: „Ultra Precision Coordinate Measuring Machine; Design, Calibration and error Compensation“, 2nd edition, 2002, ISBN: 90-6464287-7
- [4] S. Hesse, C. Schäffel: „Reducing the positioning uncertainty of a linear direct drive system with 200 mm travel range“, Proceedings of the 7th euspen International conference 2007, Bremen, Vol 1, p.204-207

FEM Analysis of Components / Entire Systems for Designing Precision Machines

Einleitung

Das IMMS entwickelt planare Direktantriebe, unter anderem für Laser-Präzisionsschneidmaschinen. Mit diesen Maschinen sollen Positionier- und Bahngenauigkeiten von weniger als 1 µm bis hin zu 100 nm erreicht werden. Diese Genauigkeiten stellen hohe Anforderungen an Temperaturstabilität, Staubschutz, Langzeitstabilität der Werkstoffe, Schutz vor selbst- oder fremderregten Schwingungen und andere Kennwerte.

Ausgehend von Kundenforderungen an translatorische und rotatorische Geschwindigkeiten und Beschleunigungen sowie Nutzlasten und andere Parameter werden Regler-Software- und -Hardware, elektromagnetisch wirkende Antriebskomponenten und die mechanischen Komponenten der planaren Direktantriebe entworfen.

Im ersten Schritt des Läufer-Entwurfes werden offensichtliche geometrische Anforderungen wie Mindestgrößen der Lasten, Antriebe und Führungen usw. berücksichtigt. Anschließend wird dieser Entwurf rechnerisch auf seine physikalische Funktionsfähigkeit hin überprüft. Ein Schritt dieser Überprüfung ist die Modalanalyse, mit der festgestellt wird, welche Eigenfrequenzen der Läufer hat. Der hier im konkreten Fall betrachtete Läufer ist in Sandwich-Bauweise erstellt. Er besteht im Kern aus Aluminium-Schaum, auf den Aluminium-Platten laminiert sind. An diesem Aufbau sind alle weiteren Elemente wie Antriebsmagneten, Führungselemente, Lastaufnahme usw. befestigt.

Während des Entwurfs-Prozesses wird der Aufbau des Läufers auch unter verschiedenen Gesichtspunkten optimiert, einer davon ist die Frequenz-Empfindlichkeit. Mit Hilfe der Modalanalyse können kritische Frequenzen erkannt und durch konstruktive Maßnahmen in ein unkritisches Frequenzband verschoben werden.

Forschungsverlauf und -stand

Während des Betriebes einer Anlage treten typisch interne und externe Schwingungsanregungen auf, die, wenn sie die Eigenfrequenzen des Läufers treffen, zu Problemen bei der Einhaltung der o. g. Genauigkeit führen können.

Im hier gezeigten Fall führt dies dazu, dass die für die geforderten Genauigkeiten notwendige hohe Reglerbandbreite zu einer größeren Empfindlichkeit der Läuferposition gegenüber Frequenzen im mittleren Frequenzbereich führt (für das hier untersuchte System bei ca. 50 Hz – 300 Hz). Die Ursache dieser erhöhten Empfindlichkeit liegt darin, dass störende Schwingungen dieser Frequenzen einerseits von der Regelung nicht mehr vollständig kompensiert werden können und andererseits im System noch zu wenig gedämpft werden.

Introduction

IMMS develops planar direct drives for applications such as laser precision cutting machines. These machines require positioning and tracking precisions of less than 1 µm to as low as 100 nm. In order to achieve this level of precision, drives must fulfill highly demanding specifications with respect to temperature stability, dust protection, long-term material stability, protection against self- or separately induced vibrations and other characteristics.

Starting with customer specifications for translational and rotational speeds and accelerations as well as load capacity and other parameters, designs are developed for software and hardware-based controllers, electromagnetic drive components and mechanical direct drive components.

The first step of designing an armature deals with obvious geometrical requirements such as minimum load capacities, drives, guides and so on. Finally, a calculation is performed to check the physical functionality of the design. In one step of this check, a modal analysis is performed in order to determine the natural frequency of the armature. In this case, the armature under study was manufactured in a sandwich design. It consists of an aluminum foam core laminated with aluminum plates. All of the other components such as the drive magnets, guide and load bearing elements are fastened to this structure.

During the design process, the armature design was optimized according to various parameters, one of which is the frequency sensitivity. Using modal analysis, it is possible to determine the critical frequencies and then change the design to shift these to non-critical frequency bands.

Research progress and current status

Under typical operating conditions, vibrations are excited both internally and externally. If any of these match the natural frequencies of the armature, this can make it difficult to comply with the precision specification.

In the case shown here, the large controller bandwidth required for the stipulated precision requirement makes the armature position more sensitive to frequencies in the mid-frequency range (for the systems investigated here, approx. 50 Hz–300 Hz). The causes for this increased sensitivity are two-fold: the troublesome vibration frequencies can no longer be compensated by the controller and are not sufficiently damped by the system.

To avoid this problem, the armature's first natural frequency should lie above 300 Hz for all operating states. To determine whether this was the case, a modal analysis

Um dieses Problem zu vermeiden, soll im gezeigten Beispiel fall die erste relevante Eigenfrequenz des gesamten Läufers in allen Betriebszuständen oberhalb von 300 Hz liegen. Dafür wird für 3 Simulationsmodelle eine Modalanalyse durchgeführt. Diese Modelle sind:

- Modell 1: Läufer ohne Last
- Modell 2: Läufer mit maximaler Last
- Modell 3: Läufer mit einem häufig genutzten Aufbau, in diesem Fall ein Schneidkasten mit eingehängten Blechen. (s. Abb 1)

Randbedingungen

Die Qualität und Aussagekraft der Berechnungsergebnisse hängt wesentlich von den gewählten Randbedingungen ab, die den Anforderungen entsprechend gewählt werden müssen. Hier sind dies insbesondere die Luftlager, mit denen der Läufer des Motors auf dem Stator geführt wird, und die elektromagnetischen Antriebe, die für die Beschleunigungskräfte in den beiden Antriebsrichtungen sorgen. Im betrachteten Beispiel wird mit einer Luftlager-Steifigkeit von 50 N/μm und mit einer geeigneten Lagerung der beiden elektromagnetischen Antriebe gerechnet.

Ergebnisse

Für die in den Abb. 2, 3 und 4 dargestellte erste Biegeform kann man beobachten, wie die Frequenz mit zunehmender Last von anfänglich 762,5 Hz über 673 Hz bis auf 393,3 Hz bei maximaler Last abnimmt.

Durch den Schneidkasten mit seiner verhältnismäßig geringen Masse wird die Eigenfrequenz im Modell 2, verglichen mit dem Modell 1, erwartungsgemäß nur geringfügig reduziert. Bei maximaler Last sinkt die Frequenz der ersten Eigenform dagegen auf einen minimalen Wert von 393 Hz ab. Dieser liegt jedoch noch oberhalb der geforderten 300 Hz. Die für den Schneidkasten ermittelten Eigenfrequenzen der Biegeformen liegen alle ebenfalls oberhalb von 300 Hz.

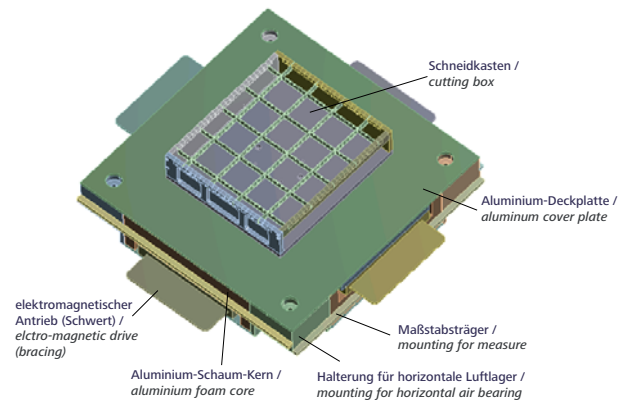


Abb. 1: Geometrie / Modell 3 / Läufer mit Schneidkasten

Fig. 1: Geometry / Model 3 / Armature with cutting boxes

sis was performed for three different simulation models. These models were:

- Model 1: Armature without load
- Model 2: Armature with maximum load
- Model 3: Armature with frequently used configuration (In this instance, cutting box with mounted blades (see fig. 1).

Boundary conditions

The quality and significance of the calculated results is largely dependent on the chosen boundary conditions, and these must be properly selected according to the given requirements. In particular, this applies to the air bearing used to support the motor armature above the stator and also to the electromagnetic drives, which provide accelerating forces in both directions of movement. In the example under consideration, the calculation was performed for an air bearing with a stiffness of 50 N/μm and assuming adequate bearing support for the two electromagnetic drives.

Results

As shown in figures 2, 3 and 4, the first bending mold indicates that as the load increases, the frequency de-

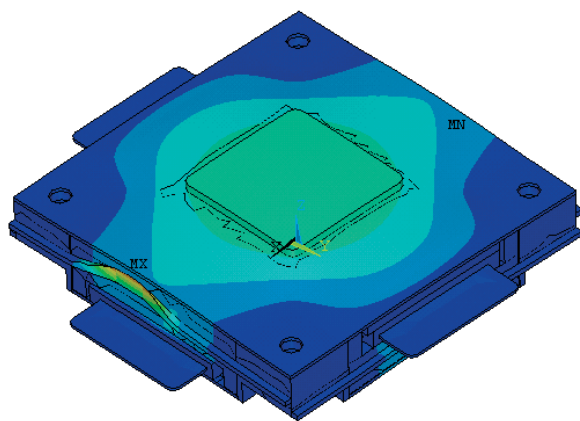


Abb. 2: Modell 1 / 1. Biegeform bei 762 Hz

Fig. 2: Model 1 / 1st bending mold at 762 Hz

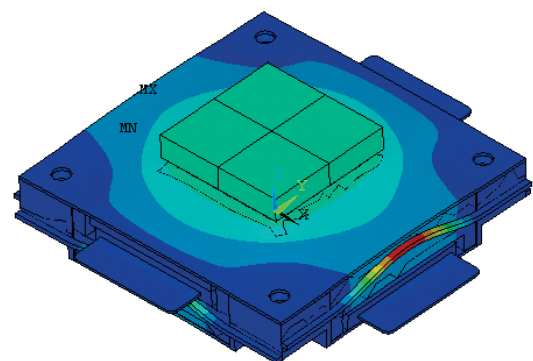


Abb. 3: Modell 2 / 1. Biegeform bei 393 Hz

Fig. 3: Model 2 / 1st bending mold at 393 Hz

Biegeform / bending mold	f _{Modell 1}	f _{Modell 2}	f _{Modell 3}
[Nr.]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
1	762	393	673

Tab. 1: Eigenfrequenzen der ersten Biegeform für die drei Modelle

Tab. 1: Natural frequencies of first bending mold for all three models

Schlussfolgerungen

Aus den Ergebnissen der Modalanalyse ist ersichtlich, dass

- keine der Biegeformen eine Eigenfrequenz hat, die kleiner als die geforderten 300 Hz ist, so dass aus dieser Sicht keine konstruktiven Änderungen notwendig sind,
- die im Schneidkasten auftretenden Eigenfrequenzen ebenfalls größer als 300 Hz sind, so dass auch hier keine kritischen Anregungen zu befürchten sind.

Zur Verifizierung der Simulationsmodelle sollten mindestens die erste Eigenform und Eigenfrequenz des Läufers per Messung überprüft werden. Die für den Schneidkasten oder einen beliebigen anderen Aufbau ermittelten Eigenformen und Eigenfrequenzen sind in Abhängigkeit des konkreten Anwendungsfalles zu überprüfen. Mit Hilfe der Modalanalyse kann so ein Beitrag zu einer effektiven Produktentwicklung geleistet werden, weil mögliche Probleme im Vorfeld erkannt und ausgeräumt werden können.

Neben der hier beispielhaft beschriebenen Modalanalyse einer Antriebsanordnung besteht am IMMS die Möglichkeit, die Systemmodellierung auch auf Basis einer statischen, harmonischen, thermischen und elektromagnetischen Berechnung zu unterstützen. Mit diesen umfangreichen Möglichkeiten zur Analyse und Optimierung mechatronischer Baugruppen bieten wir unseren Kunden eine höher Entwurfssicherheit sowie eine effektivere Entwicklung ihrer Produkte.

Ansprechpartner / contact:

Dipl.-Ing. Ekkehard Müller
Tel. +49 (3677) 69-5589
E-Mail: ekkehard.mueller@imms.de

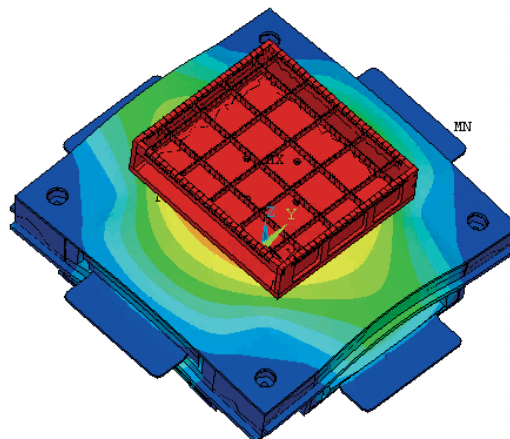


Abb. 4: Modell 3 / 1. Biegeform bei 673 Hz

Fig. 4: Model 3 / 1st bending mold at 673 Hz

creases from its initial value of 762.5 Hz to 673 Hz to 393.3 Hz at maximum loading.

Since the mass of the cutting box is relatively small, the natural frequency of model 2 is only slightly lower than model 1, as was to be expected. At maximum loading, the frequency of the first natural mold is reduced to a minimum value of 393.3 Hz. However, this is still above the required frequency of 300 Hz. The natural frequencies of the bending molds calculated for the cutting box are also all above 300 Hz.

Conclusions

The results of the modal analysis indicate the following:

- Since none of the natural frequencies in the cutting box are smaller than 300 Hz, no design changes are necessary.
- Since none of the natural frequencies in the cutting box are larger than 300 Hz, there are no critical excitations to anticipate.

At the very least, the simulation models should be verified for the first natural mold and natural frequency of the armature per measurement. The natural molds and frequencies determined for the cutting box or any other structure must be checked as a function of the specific application. Modal analyses contribute effectively to product development since they allow potential problems to be detected and eliminated at an early stage.

In addition to the modal analysis described here using the example of a drive system, IMMS also offers system modeling services using static, harmonic, thermal and electromagnetic calculation methods. With such numerous means of analyzing and optimizing mechatronic components, our clients profit from exceptional design reliability and thus more effective product development.

Einleitung

Ein Schwerpunkt des Themengebietes MEMS am IMMS ist die Identifikation von Geometrie- und Materialparametern dieser Sensoren. In Förderprojekten wie dem EU-Projekt SMARTIEHS (Smart inspection system for high speed and multifunctional testing of MEMS and MOEMS) sowie mehreren Industrieprojekten wird dabei vorrangig das im Rahmen des BMBF-Projektes PARTEST realisierte Verfahren der dynamischen Parameteridentifikation weiterentwickelt, das sich sowohl für die entwurfsbegleitende Charakterisierung als auch den Wafertest in der Produktion eignet.

Bei der dynamischen Parameteridentifikation werden Geometrie- und Materialparameter über die optische Messung ihrer out-of-plane Eigenfrequenzen bestimmt. 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 von Sensorparametern, wie Stress in Membranschichten oder Dicken von Balkenstrukturen aus den gemessenen Frequenzgängen in einem inversen Identifikationsalgorithmus.

Aufbau des Messsystems

Der in Abb. 1 dargestellte Aufbau des Messsystems besteht aus einem halbautomatischen Suss-Prober, einer elektrostatischen Anregungseinheit und dem Micro System Analyzer MSA400 von Polytec. In das MSA ist neben einem Topographie- und einem Inplane-Schwingungsmesssystem ein scannendes konfokales Laser-Doppler-Vibrometer für die Messung der out-of-plane Schwingungen bis 20 MHz integriert. Vermittels des Vibrometers lassen sich über das Scannen eines nutzerseitig definierten Grids die Eigenformen der entsprechenden Eigenfrequenzen bestimmen. Die Kenntnis der Eigenformen ist hilfreich bei der Charakterisierung von MEMS. Mit Hinblick auf die Anwendung als Waferlevel-Test basiert der Identifikationsalgorithmus jedoch nicht auf der Auswertung von Eigenformen - der Algorithmus wertet nur die Frequenzen aus, für die bei geeigneter Wahl des Messpunktes ein Messpunkt ausreichend ist. Die für die Messung erforderlichen Schwingungen werden bei passiven Sensoren, wie z.B. Membranen von Drucksensoren, mittels einer elektrostatischen Anregungseinheit generiert. Eine direkt über dem Resonator positionierte Elektrode verbunden mit einer Hochspannungsquelle (bis 300 V) ermöglicht die berührungslose Anregung bzw. Messung von Eigenfrequenzen bis 4 MHz.

Das optische Messsystem und der Prober sind softwareseitig gekoppelt und erlauben so die automatische Messung eines kompletten Wafers.

Introduction

One of the focal points of MEMS R&D at IMMS is the identification of geometrical and material parameters of MEMS sensors. EU-funded projects such as SMARTIEHS (Smart inspection system for high speed and multifunctional testing of MEMS and MOEMS) as well as many other industrial projects are chiefly occupied with continuing to develop the methods for dynamically identifying parameters as first realized in the PARTEST project from BMBF. This method is suitable for characterization during the design phase as well as for wafer tests in production.

Dynamic parameter identification is a method for determining geometrical and material parameters of components by optically measuring their out-of-plane natural frequencies. This identification method is based on an FE modal analysis that can be used to derive the functional dependency between the natural frequencies and the sensor parameters of interest. Knowledge of these functional interdependencies makes it possible to identify various sensor parameters such as membrane layer stresses or beam structure thicknesses from the measured frequency responses using an inverse identification algorithm.



Abb. 1: Messsystem-Aufbau
Fig. 1: Measuring system setup

Measuring System Setup

The measuring system shown in figure 1 consists of a semi-automatic Suss prober, an electrostatic excitation unit and the Micro System Analyzer MSA400 from Polytec. In addition to a topography and in-plane vibration measuring system, the MSA integrates a laser-scanning confocal Doppler vibrometer for measuring out-of-plane vibrations up to 20 MHz. The vibrometer makes it possible to employ user-defined grids to scan the natural modes of the corresponding natural frequencies. Knowledge of the natural modes is helpful when characterizing MEMS. With a view towards its application for wafer level tests, the identification algorithm is not based on evaluating natural modes.

Struktur der Parameteridentifikation

Die Identifikation von Parametern aus den optisch gemessenen Frequenzgängen in einem inversen Identifikationsalgorithmus basiert auf der Kenntnis der funktionalen Abhängigkeit der Eigenfrequenzen von den interessierenden Sensorparametern. Von der Art der funktionalen Abhängigkeit hängt ab, wie viele Parameter sich mit hinreichender Genauigkeit identifizieren lassen - als Maximum haben sich abhängig vom Sensortyp 3 Parameter herauskristallisiert.

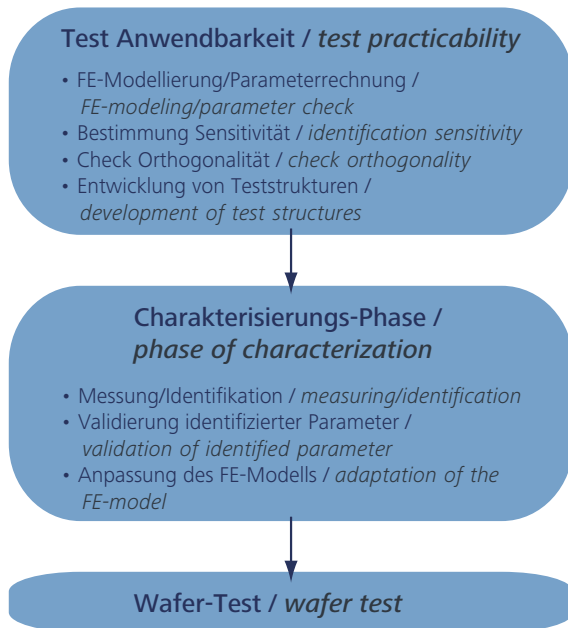


Abb. 2: Phasen der Parameteridentifikation

Fig. 2: Parameter identification phases

Voraussetzung für die Identifikation von Parametern ist deren Sensitivität gegenüber den Eigenfrequenzen. Bei der Bestimmung mehrerer Parameter müssen diese darüber hinaus ein orthogonales Verhalten aufweisen. Dementsprechend ist für die Identifikation von Sensorparametern zuerst ein FE-Modell zu implementieren, um Aussagen bezüglich Sensitivität und Orthogonalität zu erhalten. Die mit Ansys durchgeführten Modalanalysen erfordern im Regelfall die Berücksichtigung von intrinsischem und thermischem Stress und sind daher nichtlineare vorgespannten Typs. Abb. 3 zeigt beispielhaft das FE-Halbmodell eines Relativdrucksensors.

Auf dem FE-Modell basierend werden Parametersimulationen zur Bestimmung der funktionalen Beziehung Eigenfrequenzen versus Parameter durchgeführt. Gegebenenfalls werden dabei wie bei der Entwicklung von Teststrukturen Abmaße oder Strukturen des FE-Modells mit Hinblick auf eine maximale Sensitivität variiert und optimiert.

Bei vorhandener Sensitivität bzw. Orthogonalität beginnt entsprechend Abb. 2 mit der Charakterisierungsphase die

Instead, the algorithm only evaluates those frequencies for which a single measurement can be selected.

For passive sensors such as the membranes or pressure sensors, the vibrations required for the measurement are generated using an electrostatic excitation unit. An electrode positioned directly above the resonator is connected to a high-voltage source and allows contact-free excitation and/or measurement of natural frequencies up to 4 MHz. The optical measuring system and probe are connected on the software side and can be used to automatically measure entire wafers.

Parameter Identification Structure

The identification of parameters from optically measured frequency responses using an inverse identification algorithm is informed by the functional dependency between the natural frequencies and the relevant sensor parameters. The type of functional dependency determines how many parameters can be identified to a sufficient degree of precision. It appears that a maximum of three parameters can be identified, depending on the sensor type.

As a prerequisite for identifying a given parameter, it must be sensitive to the natural frequencies. In order to determine multiple parameters, all parameters must be orthogonally related to each other. Thus, it is first necessary to implement an FE model and determine the sensitivity and orthogonality before one can begin to identify the sensor parameters. Modal analyses performed using Ansys generally require consideration of the intrinsic and thermal stresses. For this reason, the non-linear, pre-stressed case is usually chosen for analysis. Fig. 3 displays an example of an FE half model for a relative pressure sensor.

An FE model is used to run parameter simulations and thus determine the functional relationship between the natural frequencies and the various parameters. As when developing test structures, the dimensions or structures of the FE model may be varied and optimized with a view towards maximum sensitivity.

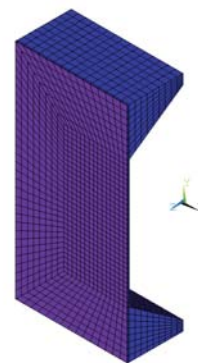


Abb. 3: FE-Modell eines Relativdrucksensors

Fig. 3: FE model of relative pressure sensor

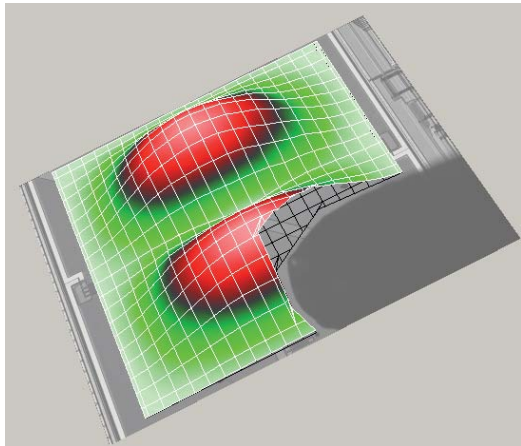


Abb. 4: Gemessene zweite Eigenform eines Relativdrucksensors
Fig. 4: Second natural mode measured for a relative pressure sensor

zweite Phase der Identifikation. Mit einem engmaschigen Netz an Messpunkten analog Abb. 4 werden gemessene Frequenzmodi den simulierten zugeordnet.

Die Struktur der sich anschließenden Parameteridentifikation zeigt Abb. 5. Aus den Mess- und Simulationsdaten werden die Sensorparameter im entwickelten Identifikations-Tool, das in C++ implementiert ist, bestimmt. Das Messsystem liefert die Frequenzantwort (FRF) des Sensors, aus der im Peakpicking-Submodul die Frequenzpeaks detektiert werden. Die mittels Ansys generierten Parametermatrizen werden polynomial approximiert, um im Optimierungs-Submodul die Optimierung mit nichtlinearen Least-Square-Verfahren effizient durchführen zu können.

Nach einer Validierung der identifizierten Parameter ist das FE-Modell ggf. in einem iterativen Prozess zu modifizieren. Bei einer Anwendung des Verfahrens als Waferlevel-Test wird die Anzahl der Messpunkte basierend auf den Ergebnissen der Charakterisierung auf einen Messpunkt minimiert. Das beschriebene Messsystem-Setup ermöglicht die Messung eines Dies in 2-3 Sekunden; durch die Optimierung der Kommunikation zwischen Prober und Messsystem lässt sich die Messzeit noch auf kleiner als 1 Sekunde reduzieren.

Applikationen

Das beschriebene Verfahren eignet sich, wie beschrieben, für die Identifikation von MEMS mit charakteristischen out-of-plane Eigenschwingungen und wurde bei der Bestimmung der Membrandicke von Relativ- oder Absolutdrucksensoren angewandt. Die Genauigkeit der identifizierten Parameter wie der Membrandicke, hängt vom Sensortyp und der verwendeten Technologie ab und variiert zwischen 1% und 3% (validiert mit zerstörenden optischen Verfahren).

Eine genaue Identifikation des Stresses abhängig vom Sensortyp ist eine der Stärken des Verfahrens. Eine Stressidentifikation erfolgte u.a. bei piezoelektrischen balkenförmigen Resonatoren der TU Ilmenau, FG Nanotechnik.

Once the conditions of sensitivity and/or orthogonality are given, the second identification phase, or characterization phase, can begin (see figure 2). Using a tightly meshed grid of measuring points analogous to figure 4, the measured frequency modes are assigned to the simulated nodes.

The structure of the subsequent parameter identification is shown in figure 5. The measurement and simulation data can be used to determine the sensor parameters using a specially developed identification tool (implemented in C++). The measuring system captures the frequency response function (FRF) of the sensor, and the peak-picking sub-module can be used to detect the frequency peaks. The parameter matrices generated using Ansys are approximated using least-squares polynomials to complete the optimization process in the optimization sub-module as efficiently as possible.

After validating the identified parameters, the FE model has to be modified using an iterative process if necessary. For the wafer level test application, the number of measured points is minimized to a single point based on the results of the characterization. Using the measurement setup described, dies can be measured in two to three seconds. By further optimizing the communication between the probers and measuring system, it is possible to reduce the measuring time to below one second.

Applications

The method described here can be used to identify MEMS with characteristic out-of-plane natural frequencies. It has been applied to determine the membrane thicknesses of relative or absolute pressure sensors. The precision of the parameters identified (such as membrane thickness) depends on the type of sensor and technology in use.

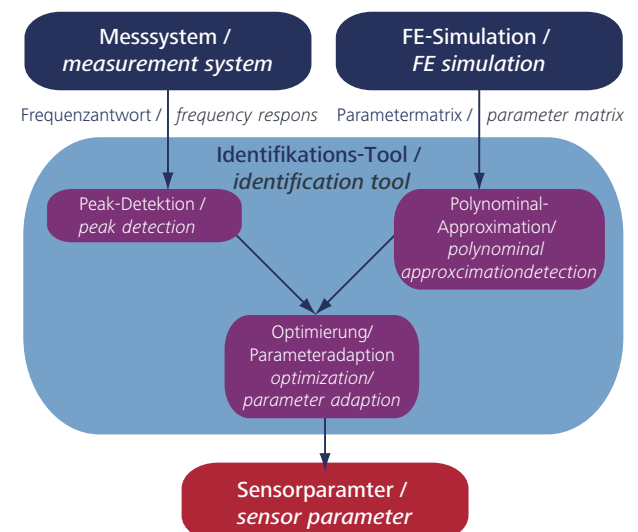


Abb. 5: Struktur der Parameteridentifikation
Fig. 5: Structure of parameter identification

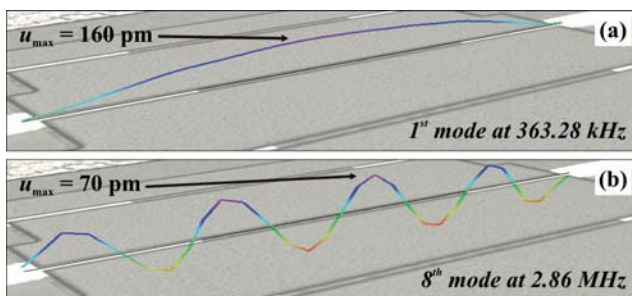


Abb. 6: Gemessene Frequenzmodi piezoelektrischer Resonatoren
Fig. 6: Frequency modes measured for piezoelectric resonators

Charakterisieren lassen sich nicht nur MEMS mit typischen out-of-plane Frequenzen wie Membranen und Beams. Jede inplane Frequenz hat eine geringe out-of-plane Auslenkung - die hohe Auflösung des Messsystems von 0.1 pm erlaubt auch die Detektion von inplane Frequenzen von z.B. Gyroskopen und somit die Identifikation der interessierenden Parameter.

Neben der Parameteridentifikation eignet sich das vorgestellte Messverfahren weiterhin zur Gut/Schlecht-Klassifikation von Dies. Im Gegensatz zur Parameteridentifikation ist hier keine vorherige FE-Modellierung notwendig. Die Klassifikation basiert auf der Auswertung von Frequenzverhältnissen - nach einer Anlernphase, bei der Fehlergrenzen an als gut klassifizierten Dies bestimmt werden, lassen sich defekte Dies wie z.B. stressensitive Membranen schnell und effizient detektieren.

Ausblick

Das vorgestellte Verfahren eignet sich für die schnelle und genaue Identifikation von Geometrie- und Material-Parametern von MEMS, wenn deren Eigenfrequenzen ein sensitives Verhalten gegenüber den interessierenden Parametern aufweisen wie z.B. Drucksensoren.

Der Fokus zukünftiger Arbeiten liegt auf der Weiterführung begonnener Arbeiten zur Identifikation von Stress insbesondere in dünnen Schichten. Weiterhin ist die Anwendung des Verfahrens auf neue Sensortypen wie z.B. RF-MEMS vorgesehen. Hier wird auch eine enge Kooperation mit der Technischen Universität Ilmenau sowie Industriepartnern angestrebt.

Ansprechpartner / contact:

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

Typically, the precision varies between 1% and 3% as validated using destructive optical measuring techniques. One of the strengths of the method is that the stress can be precisely identified depending on the type of sensor. Stress identification was performed for piezoelectric beam resonators and other systems at TU Ilmenau, FG Nanotechnik.

Not only MEMS can be characterized using typical out-of-plane frequencies for membranes and beams. Each in-plane frequency is associated with a slight out-of-plane deflection. Since the measuring system has a high resolution of 0.1 pm, in-plane frequencies can be detected for components such as gyroscopes and thus used to identify other parameters of interest.

In addition to parameter identification, the measuring technique presented here can still be used for good/bad classifications of dies. In contrast to parameter identification, previous FE modeling is not required in this case. The classification is made by simply evaluating the frequency relationships. After a learning phase during which the error limits of a "good" die are determined, defective dies can be detected quickly and easily using stress-sensitive membranes, for instance.

Perspective

Given that the natural frequencies are sensitive to the parameters of interest - as is the case with pressure sensors - the methods presented here are suitable for quickly and precisely identifying geometrical and material parameters in MEMS.

Our future activities will concentrate on continuing to develop previously devised methods for identifying mechanical stress, particularly in thin layers. Furthermore, we plan to apply this procedure to new types of sensors such as RF-MEMS.

Modellbasierte Entwurfstechniken /
Steuerungs- und
Kommunikationstechnik

Model-based design technology /
Control and
communication technology



Sensor/Actuator Networks in Building Automation

Durch den Einsatz drahtloser Netzwerktechnik in eingebetteten Systemen entsteht im Rahmen des Projektes CBS - Customer Baurtronic System^[1] ein drahtloses Sensor-Aktor-Netzwerk, das es über die Aufzeichnung von Sensordaten und Steuerung der Aktorik hinaus ermöglicht, nutzer- und szenariospezifische Einstellungen der Umgebungsparameter vorzunehmen.

Anforderungen

Charakteristisch für drahtlose Sensornetzwerke sind die von Anwendung zu Anwendung sehr verschiedenen spezifischen Anforderungen an die Netzwerk- und Betriebssystemschichten wie auch an die Applikation^[2]. So kann es beispielsweise wichtig sein, Datenpakete mit einer hohen Zuverlässigkeit zu transportieren, um die Signalisierung eines bestimmten Ereignisses sicherzustellen. In einem anderen Anwendungskontext hingegen können Datenverluste eine untergeordnete Rolle spielen^[3]. Ein verlorener Sensorwert kann durch Interpolation aus der bereits bekannten Folge von Werten und neuen Werten ausgeglichen werden. Neben der Sicherheit der Übertragung existieren weitere Kriterien, die direkten Einfluss auf die Funktion und die Parameter der beteiligten Protokollschichten haben. Dabei sind die verschiedenen Parameter nicht beliebig veränderbar, sondern stehen häufig in direktem Zusammenhang zueinander (s. Abb. 1). Zum Beispiel wirkt sich eine Erhöhung der Zuverlässigkeit oder Sicherheit direkt auf den Energieverbrauch und damit auf die Batterielebensdauer des Moduls aus.

Drahtlose Sensoren in der Gebäudeautomation haben hohe Anforderungen in Bezug auf die Lebensdauer. Außerdem kann sich beim Einsatz mehrerer hundert Module innerhalb eines Gebäudes der Wechsel aller Batterien über mehrere Tage erstrecken. Die gemessenen Daten ändern sich relativ langsam, Sprünge im Verlauf eines Messwertes treten eher selten auf. Der Großteil der gemessenen Sensordaten ist unkritisch, d.h. der Verlust einzelner Werte kann durch Interpolation ausgeglichen werden. Nachrichten werden im Vergleich zu anderen Anwendungen eher selten oder beim Auftreten der Unter- oder Überschreitung eines Schwell-

As a part of the CBS - Customer Baurtronic Systems^[1] project, wireless network technology is being combined with embedded systems to create sensor/actuator networks that can not only record sensor data and control actuators, but also adjust user and application-specific settings according to ambient conditions.

Requirements

A typical characteristic of wireless sensor networks is that the specific requirements defined for the network and operating system layers and the actual application can vary significantly from case to case^[2]. For example, it is sometimes important that data packets are reliably transmitted to ensure that a specific event is properly signaled. In other application contexts, data loss may be of lesser importance^[3]. A lost sensor value, for example, can be interpolated from an existing series of data and compensated for using new values. In addition to transmission reliability, there are other criteria that directly affect the functionality and parameters of the relevant protocol layers. However, it is not possible to modify the various parameters arbitrarily, because they are often directly related to each other (see fig. 1). For example, increasing the reliability directly affects the energy consumption and thus the reserve battery power of the module.

Wireless sensors for building automation applications must provide a long service life. If several hundred modules are used in a building, replacing the batteries can last several days. The variables being measured change relatively slowly and sudden changes occur quite rarely. Since the majority of the sensor data being measured is not critical, the loss of isolated values can usually be compensated through interpolation. In comparison to other applications, messages are sent rarely or only when a threshold is breached. Since the nodes are permanently installed, the resulting network is permanent with one or more base stations forwarding the incoming data through gateways.

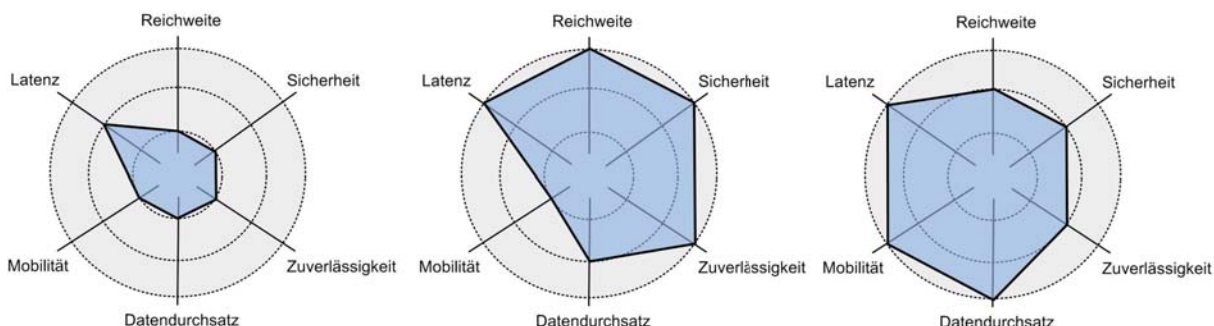


Abb. 1: Vergleich von Anforderungen an Hand konkreter, vom IMMS realisierter Anwendungen drahtloser Sensor-Aktor-Netzwerke (v.l.n.r.): Aufzeichnung von Umweltdaten, Ereignisüberwachung, Tracking. Je größer die Fläche des Polygons, desto höher die Anforderungen.

Fig. 1: Comparison of requirements for specific wireless sensor/actuator networks realized by IMMS (from left to right): environmental data recording, event monitoring, tracking. The larger the area of the polygon, the higher the requirements.

wertes versendet. Durch die Festinstallation der Teilnehmer entsteht ein statisches Netzwerk mit einer oder mehreren Basisstationen, die Daten über einen Gateway weiterleiten.

Entwurf und Implementierung

TinyOS Plattform-Portierung

Im Rahmen des CBS-Projektes wurde vom IMMS eine Hardware-Plattform bestehend aus einem Mikrocontroller und einem extern angeschlossenen Transceiver-Schaltkreis entworfen. Auf Basis bereits existierender TinyOS Portierungen wurden für die eingesetzte Hardware eine Abstraktionsschicht und Treiber entwickelt, implementiert und getestet. Die durchgeführten Arbeiten umfassen folgende Komponenten:

- Low-Power Betrieb des Mikrocontrollers sowohl mit internem RC-Oszillator als auch externem Quarz,
- Anbindung des Transceivers-Schaltkreises,
- Ansteuerung des Flash-Speichers,
- Betriebssystemtreiber für Temperatur-, Feuchte und CO₂-Sensoren.

Die Reduzierung des Energieverbrauchs, vor allem des Ruhestroms, ist das Ziel weiterer Entwicklungsarbeiten.

MAC-Protokolle

Betrachtet man die einzelnen Komponenten eines Sensor-Aktor-Moduls, so ist der Transceiver-Schaltkreis, gefolgt vom Mikrocontroller, dem größten Energieverbraucher. Angestrebt wird daher, den Transceiver-Schaltkreis nur dann zu aktivieren, wenn er auch benötigt wird. Dies kann zum Beispiel durch ein geschicktes Sampling des Radiokanals oder durch eine Synchronisation der Knoten erreicht werden^[4]. In beiden Fällen wird versucht, die verbrachte Zeit im Send- und Empfangsmodus auf ein Minimum zu reduzieren.

Die einfachsten Topologien stellen flache Strukturen in Form von Meshnetzwerken oder Punkt-zu-Punkt-Verbindungen dar. Im Gegensatz dazu sind Cluster-Tree-Netzwerke^[5] kom-

Design and Implementation

TinyOS Platform Porting

As a part of the CBS project, the IMMS developed a hardware platform combining a microcontroller and an externally connected transceiver circuit. Existing TinyOS portings were used to develop, implement and test an abstraction layer and driver for the hardware in use. This work involved the following components:

- Low-power mode of microcontroller with an internal RC-oscillator as well as an external quartz clock
- Connection to transceiver circuit
- Controller for flash memory
- Operating system driver for temperature, humidity and CO₂ sensors

The reduction of energy consumption (chiefly standby current) was the main goal of our further development work.

MAC Protocol

Of the various components in a sensor/actuator module, the transceiver circuit, followed by the microcontroller, is the largest consumer of energy. Hence, the transceiver circuit should only be activated when it is actually needed. This can be accomplished, for example, by using intelligent sampling of the radio channel or by synchronizing the nodes^[4]. In both cases, an attempt is made to minimize the activity durations of the transmission and receive modes.

The simplest topologies utilize flat structures in the form of mesh networks or point-to-point connections. In contrast to these, cluster-tree networks^[5] are more complex but also more scalable. These subdivide the network into partial networks with a coordinator or "cluster head". The cluster head synchronizes the various nodes in the cluster and connects to other clusters. Here, the synchronization

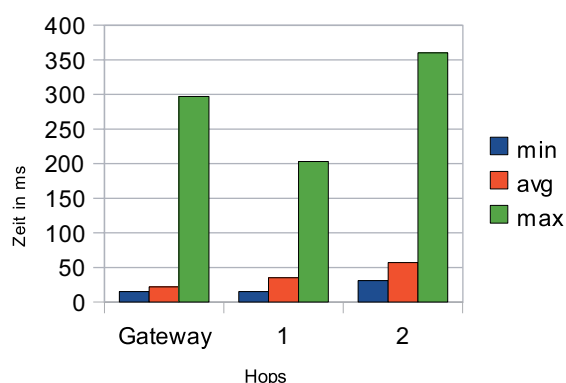


Abb. 2: Round-Trip-Time (Ping). TinyOS 1.x BMAC und reaktives Routing Protokoll (AODV)

Fig. 2: Round-trip time (ping). TinyOS 1.x BMAC and reactive routing protocol (AODV)

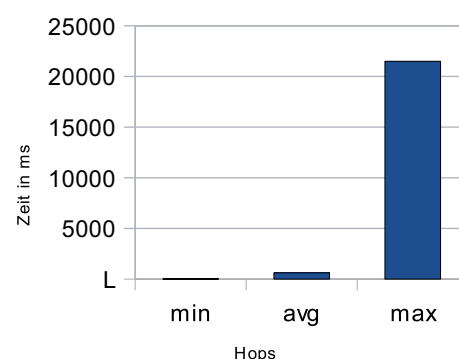


Abb. 3: Round-Trip-Time (Ping). Ein Hop, TinyOS 2.x IEEE 802.15.4 MAC und b6LowPAN

Fig. 3: Round-trip time (ping). One hop, TinyOS 2.x IEEE 802.15.4 MAC and b6LowPAN

plexer, aber auch besser skalierbar. Sie unterteilen das Netzwerk in Teilnetze mit einem Koordinator oder „Cluster head“. Dieser sorgt für die Synchronisation der Mitglieder des Clusters und die Verbindung mit anderen Clustern. Die Synchronisation muss in diesem Fall nur für das Teilnetz und nicht für das Gesamtnetz erfolgen.

Die Wahl des Protokolls und dessen Parameter wirken sich direkt auf den Energieverbrauch^[9], den Datendurchsatz und die Latenz des Nachrichtenversandes aus (Vergleich der Round-Trip-Time, s. Abb. 2 und 3).

Routing

Sollen größere Entfernungen als der Abstand zwischen zwei Knoten überbrückt werden, so ist es zwangsläufig notwendig, die generierten Daten über Zwischenstationen weiterzuleiten. Ähnlich wie in traditionellen Netzwerken übernimmt die Wahl des Weges über diese Zwischenstationen ein Routing-Protokoll. Ihm zu Grunde liegt eine Metrik, die den nächsten Sprung in Richtung des Endziels bestimmt. Gebräuchliche Metriken sind die kürzeste Distanz oder die beste Verbindungsqualität zum gewünschten Ziel^[7]. Energieeffiziente Routing-Protokolle beziehen die zum Senden und Empfangen notwendige Leistung und die in der Zwischenstation momentan verfügbare Energie mit in die Entscheidung über die optimale Route ein. Eine Alternative zu herkömmlichen Routing-Protokollen stellt das „Data-centric“ Routing da. Bei diesem Verfahren steht nicht die Adresse eines Teilnehmers sondern die Anfrage nach einem bestimmten Attribut-Werte Paar in einem Bereich des Netzwerkes im Vordergrund.

Anwendungsebene

Auch auf der Anwendungsebene kann durch Aggregation der gemessenen Sensorwerte das generierte Datenaufkommen reduziert und Redundanz verringert werden. Dabei ist die Wahl des richtigen bzw. geeigneten Ortes der Datenaggregation von entscheidender Bedeutung. An dieser Stelle sind sowohl das Wissen der Anwendungsebene über die transportierten Daten als auch die Informationen des Routings über den besten Weg durch das Netz von Bedeutung. Eine der offenen Fragen ist hier, ob eine Verschmelzung oder Interaktion beider Ebenen möglich ist.

Neben den im IMMS entwickelten Sensorplattformen existieren eine Reihe unterschiedlicher Module verschiedener Hersteller. Internationale Standards (IEEE 802.15.4) ermöglichen den gemeinsamen Einsatz dieser Module in einem Netzwerk. Die eindeutige Identifikation der Module, ihrer Sensorik und Aktorik stellt eine Herausforderung an die Anwendungsebene dar. Im Rahmen des CBS-Projektes wurde ein System geschaffen, das die Identifikation unterschiedlicher Module ermöglicht und die Konfiguration des Systems,

must be performed for the partial network but not for the entire network.

The choice of a protocol and its parameters directly impacts on the energy consumption^[9], data throughput and message transmission latency (comparison of round-trip times, see fig. 2 and 3).

Routing

If distances larger than the spacing between two nodes have to be bridged, the generated data has to be transmitted through intermediate stations. As in conventional networks, the routing protocol is responsible for determining the path through the intermediate stations. A

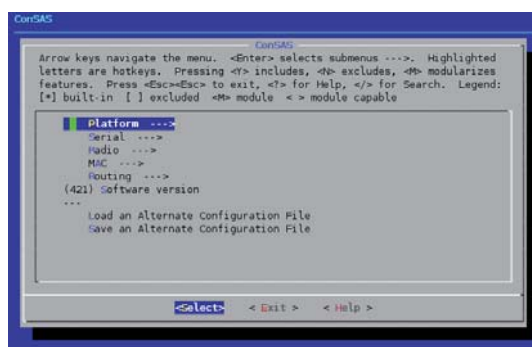


Abb. 4: Konfiguration des Sensor-Aktor-Moduls über das aus der Linux-Kernelkonfiguration bekannte Mconf-Tool

Fig. 4: Configuration of sensor/actuator module using Mconf tool (as known from Linux kernel configuration)

router uses metrics to determine each step towards the final target. Some common metrics include the shortest possible distance or the best connection quality to the required target^[7]. Energy-efficient routing protocols consider how much energy is required for transmitting and receiving, and how much energy is currently available at the intermediate stations when determining the optimum route. „Data-centric“ routing is an alternative to conventional routing protocols. In this procedure, the search for

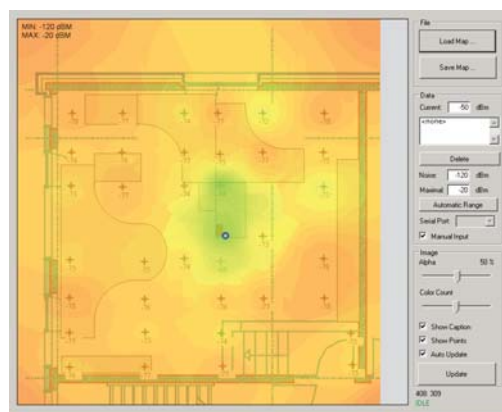


Abb. 5: Visualisierung der Empfangsfeldstärken von Funkmodulen innerhalb eines Gebäudeteils

Fig. 5: Visualization of received signal strengths from wireless modules inside a part of a building

der Aktoren und Sensoren sowie der Parameter des MAC und Routings wesentlich vereinfacht (s. Abb. 4).

Messdatenvisualisierung

Bei Messungen mit drahtlosen Sensor-Aktor-Modulen fallen häufig eine Vielzahl von Daten von einer Reihe unterschiedlicher Quellen an. Die generierte Datenmenge wird schnell unübersichtlich und ohne ausreichende Dokumentation schwer nachvollziehbar. Um vor allem bei der Messung der Empfangsfeldstärke einen besseren Eindruck der Feldstärkeverteilungen zu bekommen, wurde ein Tool geschaffen, das die gemessenen Werte aufzeichnet, speichert und außerdem durch eine Näherung versucht, dem Anwender einen besseren Eindruck über die Funkausbreitungsverhältnisse zu geben (s. Abb. 5).

Lokalisierung

Drahtlose Sensornetzwerke zeichnen sich durch extrem limitierte Ressourcen aus. Grenzbedingungen, wie geringer Energiebedarf, schlechte Funkausbreitungseigenschaften und vor allem die spezifischen Einsatzgebiete, führen zu harten Anforderungen an die Hard- und Software. In einem breiten Spektrum von Anwendungen ist die Lokalisierung der Teilnehmer notwendig oder sogar unumgänglich. Dies stellt jedoch eine erhebliche Herausforderung an die beteiligten Algorithmen und die eingesetzte Schaltungstechnik dar^[8]. Eine Vielzahl von Anwendungen erfordert für unterschiedliche Zwecke die Positionsbestimmung eines Teilnehmers. Zum einen, um einem erfassten Messwert einen bestimmten Ort zuordnen zu können. Zum anderen können die Positionsdaten der Knoten als Metrik für die Optimierung eines Routing-Protokolls eingesetzt werden. Zu guter Letzt stellt das Tracking eines mobilen Objekts eine der anschaulichsten aber auch schwierigsten Anwendungen für drahtlose Sensornetzwerke dar^[9].

Die Verteilung einzelner Module ist häufig zufällig und deren Ausgangsposition im Vorfeld nicht bekannt. Außerdem soll ein Sensornetzwerk fähig sein, möglichst schnell auf Konnektivitäts- und Positionsänderungen zu reagieren. Jedoch dürfen Lokalisierungslösungen für Sensornetzwerken auch typische WSN-Anforderungen wie Energieeffizienz und Skalierbarkeit nicht außer Acht lassen. Es existiert ein breites Spektrum von Lokalisierungsverfahren für Sensornetzwerke, die sich durch die zugrunde liegende Hardware, das eingesetzte Messverfahren und die anwendungsspezifischen Anforderungen unterscheiden.

Im Rahmen des CBS-Projektes wurden die Lokalisierungssysteme nanoLOC^[10] (s. Abb. 6), Ubisense^[11] und RIPS^[12] vom IMMS evaluiert. Die nanoLOC TRX Transceiver ist ein Mixed-Signal-Chip und nutzt als Modulationsverfahren die CSS (Chirp Spread Spectrum) Technologie. Dieses Verfahren

a specific attribute-value pair in a section of the network takes precedence over the address of a network node.

Application Level

At the application level, aggregation of the measured sensor values can reduce the amount of data generated and help minimize redundancy. The choice of a correct or suitable location for data aggregation is crucial. It is important to have knowledge of the application level above the data being transported as well as routing information concerning the best path through the network. One issue yet to be resolved is whether both layers should be merged or instead allowed to interact with each other.

In addition to the sensor platforms developed by IMMS, a range of other modules are available from various other manufacturers. International standards (IEEE 802.15.4) exist that allow these modules to be used together in a network. One of the challenges on the application layer is to be able to uniquely identify modules together with their sensors and actuators.

As a part of the CBS project, a system has been developed that allows various types of modules to be identified. This greatly simplifies the configuration process for the system, actuators, sensors, MAC parameters and routings (see fig. 4).

Visualization of measurement data

Measurements performed using sensor/actuator modules often collect a range of data from different sources. The volume of data quickly becomes overwhelming and, if not documented sufficiently, difficult to manage. In order to analyze the field strength distribution when measuring the received field strength, a tool has been developed that records the measured value, stores it and then uses an approximation technique to provide the user with a better impression of the degree of wireless propagation (see fig. 5).

Localization

Wireless sensor networks have an extremely limited amount of resources. Limiting conditions such as low energy consumption, poor propagation of radio waves and, most of all, the specific application areas all place extreme requirements on hardware and software. In a wide spectrum of applications, it may be helpful or even necessary to localize the nodes. This places considerable constraints on both the algorithms and circuitry to be used^[8]. Many applications require determining the node position for many different purposes. On the one hand, this is required in order to allocate a measurement value to a specific location. On the other hand, the position



Abb. 6: Versuchsaufbau zur Evaluierung des nanoLOC Lokalisierungssystems in Gebäudeumgebungen

Fig. 6: Test installation for evaluating the nanoLOC localization system inside building environments

bietet die Möglichkeit, die Entfernung zwischen dem Sender und dem Empfänger mittels Laufzeitmessung zu bestimmen. Ein entscheidender Vorteil dieses Systems ist es, dass keine Referenzmessungen im Vorfeld notwendig sind. Eine Vielzahl von Tests im IMMS-Gebäude haben Genauigkeit von ein bis zwei Metern ergeben.

Das Lokalisierungssystem MoteTrack^[13] hingegen ist eine für das Betriebssystem TinyOS geschriebene Anwendung. Mit Hilfe von statischen Knoten, so genannten Beacons und der Messung von deren Empfangsfeldstärke wird die Position eines Teilnehmers berechnet. Dieses System wurde am IMMS in Betrieb genommen und umfangreichen Tests unterworfen. Auf Grund der komplexen Funkausbreitung im Gebäude wird die Empfangsfeldstärke der mobilen Knoten nicht direkt in eine Position umgerechnet, sondern mit vorher ausgemessenen Punkten verglichen. Diese Technik nennt man auch Fingerprinting. Je nach Anzahl von bereits ausgemessenen Punkte erreicht man dabei eine Genauigkeit von 0,5 bis 1 Meter.

Perspektive

Der Einsatz des bekannten und etablierten Internet Protokolls (IP) in drahtlosen Sensornetzwerken eröffnet die Möglichkeit, die Vision des „Internet der Dinge“ zu verwirklichen (s. Abb. 7). Auf Basis von IPv6 wurde der IETF Standard 6LoWPAN (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks) entwickelt und veröffentlicht (s. Abb. 7).

Die Einführung von IPv6 stand u. a. unter dem Gesichtspunkt, dass der Adressraum von IPv4 in absehbarer Zeit erschöpft schien. Dies tratt jedoch nicht ein. IPv6 in Kombination mit eingebetteten Systemen, wie drahtlosen Sensor-Aktor-Netzwerken und sich daraus ergebenden massenhaften neuen Kommunikationsendpunkten, stellt eine mögliche „Killerapplikation“ für IPv6 dar, da hierdurch eine nahtlose Integration dieser Systeme in bestehende Infra-

data of the nodes can be used as metrics for optimizing the routing protocol. Last but not least, tracking a mobile object is one of the most graphically appealing yet also most difficult applications for a wireless sensor network to perform^[9].

The various modules are often distributed in a random manner and their initial positions may not be known in advance. Furthermore, a sensor network must be able to quickly react to connectivity and position changes. However, localization solutions for sensor networks should not lose sight of typical WSN requirements such as energy efficiency and scalability. There are currently a great number of localization methods available for sensor networks that differ in terms of hardware, measurement procedure and application-specific requirements.

As a part of the CBS project, the localization systems nanoLOC^[10] (see fig. 6), Ubisense^[11] and RIPS^[12] have been evaluated and tested by IMMS. The nanoLOC TRX transceiver is a mixed-signal chip and uses CSS (Chirp Spread Spectrum) technology for modulation purposes. This procedure allows the distance between the transmitter and receiver to be determined by measuring the interval transit time. A major advantage of this system is that reference measurements are not required in advance. Several tests at the IMMS building have resulted in an accuracy of one to two meters.

The MoteTrack^[13] localization application, on the other hand, has been written specifically for the TinyOS operating system. By using both static and beacon nodes and

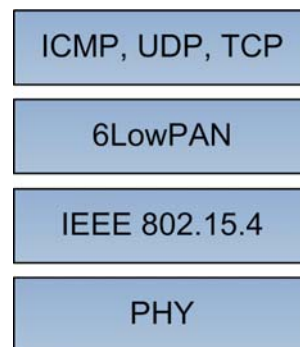


Abb. 7: Einordnung der Protokollstandards IEEE 802.15.4 und 6LoWPAN im TCP/IP-Schichtenmodell

Fig. 7: Classification of protocol standards IEEE 802.15.4 and 6LoWPAN inside the TCP/IP layer model

measuring their receive field strengths, it is possible to calculate the position of a node. This system was also installed at the IMMS and subjected to numerous tests. Due to the complex propagation of radio waves in the institute building, the receive field strength of the mobile nodes was not directly converted to a position but instead compared with previously measured points. This technique is referred to as "fingerprinting". Depending on

strukturen (allem voran in das Internet) ermöglicht wird. Um den Anforderungen an die Paketgrößen in drahtlosen Sensornetzwerken gerecht zu werden, findet eine Kompression der sehr langen IPv6-Header um bis zu 80% statt.

Weitere Vorteile, wie die Paketfragmentierung, Autokonfiguration und natürlich der Einsatz von ICMP, UDP und TCP sprechen für 6LowPAN. Im Moment stehen erste Implementierungen zur Verfügung, jedoch besteht in Hinsicht auf das Routing und das Energiemanagement weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

- [1] Regionaler Wachstumskern „CBS Customer Bautronic System“, BMBF-Förderkennzeichen 03WKBD3C, <http://www.customerbautronic.de/>
- [2] A. Schreiber, M. Götze, E. Ulicna, W. Kattaneck: „System design issues in advanced applications of wireless sensor networks“, Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, TU Ilmenau, Ilmenau, 2006
- [3] T. Rossbach, M. Götze et al.: „Design and implementation of wireless sensor networks facing range limitations and varying environmental conditions“, Proceedings of the 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC'07), Athens, 2007
- [4] J. Polastre, J. Hill, D. Culler: „Versatile low power media access for wireless sensor networks“, Proceedings of the Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), Baltimore, MD, 2004
- [5] W. R. Heinzelmann et al.: „Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks“, Massachusetts Institute of Technology, 2002
- [6] A. Warrior et al.: „How much energy saving does topology control offer for wireless sensor networks? - A practical study“, Computer Communications, Volume 30, Issue 14-15, 2007
- [7] I.D. Chakeres, E.M. Royer, C.E. Perkins: „Dynamic MANET on-demand routing protocol“, IETF Internet Draft, 2005
- [8] N. Bulusu, S. Jha, Eds., „Wireless Sensor Networks: A Systems Perspective, Artech House,“ Norwood, Mass, USA, 2005
- [9] E. Chervakova, T. Rossbach: „Lokalisierungsalgorithmen in drahtlosen Sensornetzwerken“, Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Mittweida, 2008
- [10] Nanotron Technologies GmbH, <http://www.nanotron.com>
- [11] Ubisense Limited, Echtzeit-Ortungssystem (RTLS), <http://www.ubisense.de>
- [12] M. Maroti, et. al., „Radio Interferometric Geolocation“, ACM SenSys, 2005
- [13] Lorincz K, Welsh M, „MoteTrack: a robust, decentralized approach to RF-based location tracking.“ In Proceedings of the International Workshop on Location- and Context-Awareness at Pervasive 2005

how many points have already been measured, the precision is between 0.5 and 1 meter.

Perspectives

By using a well-known and established Internet protocol (IP) in wireless networks, it is now becoming possible to realize an "Internet of Things" (figure 7). The IETF standard "6LowPAN" (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks) has been developed and published on the basis of IPv6 (see fig. 7).

IPv6 was initially introduced out of fear that the addressing space available in IPv4 could be exhausted in the foreseeable future. However, this did not happen. Interestingly though, IPv6 together with embedded systems such as wireless sensor/actuator networks and millions of new communications endpoints may just represent a "killer application" for IPv6. In order to comply with the small packet sizes in wireless sensor networks, the very large IPv6 header is compressed by up to 80%. Other advantages such as packet fragmentation, auto-configuration and, naturally, the use of ICMP, UDP and TCP, speak in favor of 6LowPAN. Initial implementations are currently available but still require additional research and development work with respect to routing and energy management.



Ansprechpartner / contact:

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

Einleitung

Die konsequente Nutzerorientierung bei gleichzeitiger Kosten- und Energieeffizienz erweist sich als Grundproblem von Gebäudeautomationssystemen. Aktuelle Lösungen sind u.a. durch mangelnde Erfassung relevanter Messgrößen sowie durch intransparente Arbeitsweisen gekennzeichnet.

Die technologischen Fortschritte in der Sensor-, Nachrichten- und Informationstechnik ermöglichen zunehmend den breiten Einsatz von drahtlosen Sensornetzwerken in der Gebäudeautomation^[1], wodurch sich neue Perspektiven für die Nutzerintegration eröffnen. Die Erfassung der individuellen Behaglichkeit und kontextsensitive Nutzerinteraktionen seien dafür beispielhaft genannt. Die resultierenden Anforderungen an optimierte drahtlose Sensornetzwerke sind Gegenstand eines aktuellen F&E-Projektes mit Beteiligung des IMMS^[2]. Im Ergebnis der bisherigen Forschungsarbeiten ist mit dem SiRaM-Kit (Simple Rapid Measurement - Kit) ein mobiles Diagnosesystem auf Basis drahtloser Sensornetzwerke entstanden (s. Abb. 1). Hauptziel dieser Lösung ist die schnelle und kostengünstige Erfassung physikalischer

Introduction

In building automation systems, it is difficult to maintain a consistent user orientation while also saving costs and energy. Flaws in current solutions include insufficient capture of relevant measurement variables as well as non-intuitive user operation. Technological advances in sensor, communications and IT technology allow wireless sensor networks to be used increasingly in building automation systems^[1], which is opening up new perspectives for user integration. Some prime examples include determining personal well-being and capturing context-sensitive user interaction data. The resulting demands placed on optimized wireless sensor networks are currently being studied as part of an R&D project involving IMMS^[2]. The SiRaM (Simple Rapid Measurement) kit - a result of previous research - is a mobile diagnostics system that utilizes wireless sensor networks (see fig. 1). The main goal of this solution is to be able to quickly and cost-effectively capture both physical quantities as well as user activities in buildings and industrial plants. The wireless properties of buildings and specific application conditions were also investigated.

Research Progress and Status

The SiRaM kit consists mainly of a wireless network and a portable PC with software for monitoring networks, visualizing data and exporting data (see fig. 2). By optionally using remote devices, the sensor network can be operated without a PC and data can be accessed via conventional networks (LAN, Internet) whenever necessary. The sensor network has been implemented as a self-organizing short-range wireless network. It typically consists of 10 to 15 nodes, but it is highly scalable and thus suitable for much larger installations. The network nodes can communicate wirelessly through walls and other obstacles in buildings across distances of up to 30 meters. They make use of the radio frequencies in the freely accessible 2.4 GHz band, which means that the radio channels can be assigned very flexibly.

The sensor network consists of a variable number of sensor nodes, whereby different variants exist depending on the type of sensors required. Wireless sensor nodes from other manufacturers can be integrated into heterogeneous networks. In keeping with current findings on the factors that most affect the subjective sense of well-being (indoors), the following types of sensors are supported:

- Temperature
- Humidity
- Ambient light
- CO₂
- CO



Abb. 1: Zusammensetzung des SiRaM-Kits: mobiler Einsatz-PC mit Software zur Sensordatenerfassung und Nahbereichsfunkknoten mit Sensoren zur Zustandsüberwachung.

Fig. 1: Each SiRaM kit consists of a mobile application PC with software for capturing sensor data and short-range wireless nodes with sensors for monitoring equipment.

Zustandsgrößen und von Nutzeraktivitäten in Gebäuden und Industrieanlagen. Gleichzeitig lassen sich Gebäude und spezifische Einsatzumgebungen auf deren funktechnische Eigenschaften untersuchen.

Entwicklungsstand

Das SiRaM-Kit besteht im Wesentlichen aus einem drahtlosen Sensornetzwerk und einem portablen PC mit Software zur Netzwerküberwachung, Datenvisualisierung und für den Datenexport (s. Abb. 2). Optional kann ein sog. Remote Device zum Einsatz kommen, so dass das Sensornetzwerk ohne PC betrieben werden kann und der Datenzugriff bei Bedarf über herkömmliche Netzwerke (LAN, Internet) erfolgen kann. Das Sensornetzwerk ist als selbstorganisierendes vermaschtes Nahbereichsfunknetzwerk realisiert.

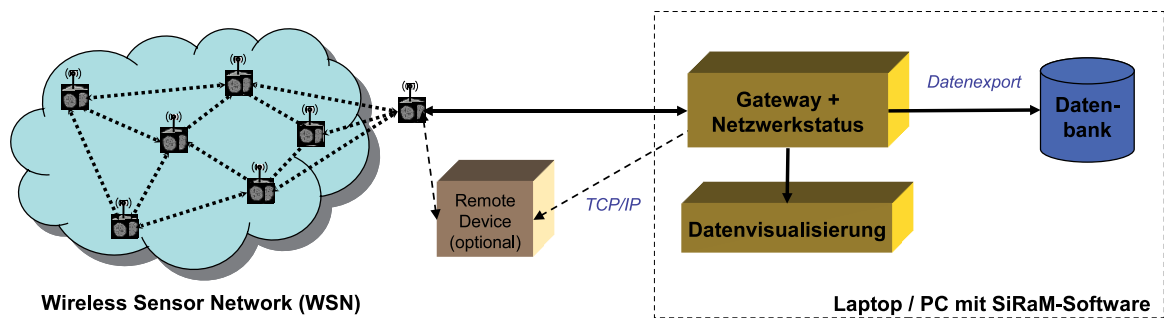


Abb. 2: Struktur und Hauptkomponenten des SiRaM-Kits: im Sensornetzwerk (WSN) erhobene Daten werden im Laptop / PC gesammelt, aufbereitet und visualisiert. Im Bedarfsfall kann eine Integration in übergeordnete IT-Infrastrukturen erfolgen.

Fig. 2: Structure and main components of the SiRaM kit: data collected in the sensor network (WSN) are stored, processed and visualized on the PC. Whenever required, the data can be integrated with higher level IT infrastructures.

Es umfasst typischerweise 10 bis 15 Knoten, ist jedoch in großem Umfang skalierbar und kann daher auch wesentlich größer ausgeführt werden. Die Netzwerkknoten können in Gebäuden trotz Wänden und anderen Hindernissen Entfernungen von bis zu 30 Metern drahtlos überwinden. Dafür werden Funkfrequenzen im frei verfügbaren 2,4 GHz Band genutzt, wobei die Auswahl des Funkkanals flexibel erfolgen kann.

Das Sensornetzwerk besteht aus einer variablen Anzahl von Sensorknoten, wobei es je nach benötigter Sensorik unterschiedliche Varianten gibt. Funksensorknoten von Drittanbietern lassen sich zum Aufbau heterogener Netzwerke einbinden. Derzeit wird folgende Sensorik unterstützt, wobei der Auswahl u. a. aktuelle Forschungsergebnisse zu Einflussgrößen auf das Nutzerwohlbefinden in Gebäuden zu Grunde liegen:

- Temperatur,
- Luftfeuchte,
- Umgebungslicht,
- CO₂,
- CO,
- Bewegung (Infrarot, Accelerometer),
- Ausrichtung (Magnetometer, Accelerometer)

Zusätzlich lassen sich externe Sensoren wie z. B. Wetterstationen per Internet in das System integrieren. Neben den sensorischen Größen wird der Netzwerkstatus erfasst, was die Batteriespannung der Knoten sowie die Qualität der Funkverbindungen im Netzwerk umfasst. Somit lässt sich jederzeit der Zustand eines Netzwerkknotens ermitteln und der Anwender erhält detaillierte Informationen zum Funkausbreitungsverhalten an den jeweiligen Messorten.

Die Flexibilität und Leistungsfähigkeit der zugrunde liegenden Hardware- und Softwareplattform der Sensorknoten ermöglicht neben dem Auslesen der Sensoren und dem drahtlosen Übertragen der Sensordaten (inkl. Routing im vermaschten Netzwerk) eine Vorverarbeitung der Sensordaten^[3]. Neben Plausibilitätstests, Schwellwertüberwachungen

- Movement (infrared, accelerometer)
- Orientation (magnetometer, accelerometer)

External sensors such as weather stations can also be integrated with the system through the Internet. The network status is captured along with the sensor data. This includes information on the battery voltages in the various nodes, as well as the wireless connection quality throughout the network. Thus, the status of each network node can be determined at any time, and users receive detailed information about the radio wave propagation at the various sensor locations.

The flexibility and performance of the hardware and software platform used for the sensor nodes allows the sensor data^[3] to be preprocessed in addition to capture and wireless transmission (including routing throughout the network). Next to plausibility tests, threshold monitoring and averaging, this preprocessing can also involve much more complex calculations such as those required to support virtual sensors (see fig. 3). This approach allows the ambient conditions (e.g., indoor climate) to be captured at locations that would be impossible or very difficult to access using conventional sensors.

Application

A typical application for the SiRaM kit is capturing ambient conditions in public, industrial or residential buildings. One of the main challenges [4] facing future building automation systems is the planning and optimization of the types, numbers and locations of wireless sensor nodes. These choices affect the costs, operational reliability and user benefit of the entire system. The SiRaM kit is a powerful tool for handling this task. Current research projects concentrate on integrating individual users with building automation systems. These are based on studies of user behavior as affected by personal sense of well-being and ambient conditions. To determine user behavior, specific quantities can be measured directly; user activities can also be captured directly or even indirectly by detecting

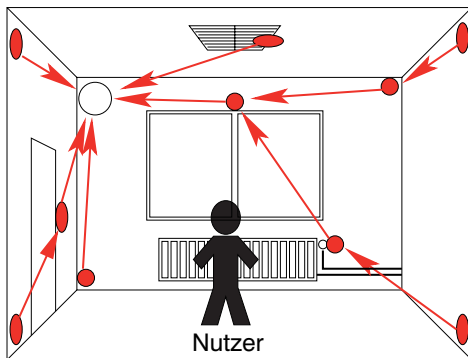


Abb. 3: Erfassung realer Sensordaten und Berechnung eines virtuellen Sensors
Fig. 3: Capturing real sensor data and calculating a virtual sensor

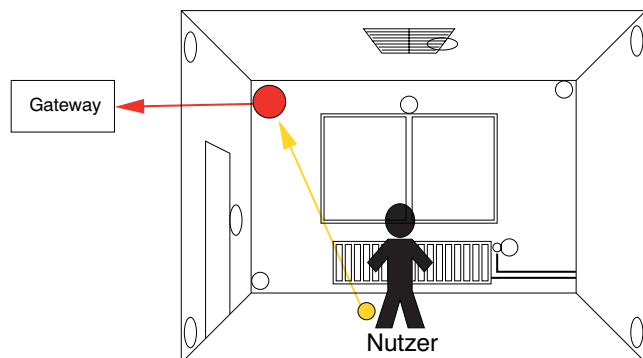
und Mittelwertbildungen kann dies auch wesentlich komplexere Berechnungen umfassen, wie z. B. die Unterstützung virtueller Sensoren (s. Abb. 3). Mit diesem Ansatz lassen sich die Umgebungsbedingungen (z.B. Raumklima) an Orten erfassen, welche mit herkömmlicher Sensorik nicht oder nur mit hohem Aufwand erfassbar wären.

Anwendung

Ein typisches Einsatzgebiet für das SiRaM-Kit ist die Erfassung des Raumklimas in Nutz- und Wohngebäuden. Für zukünftige Gebäudeautomationssysteme ist die Planung und Optimierung von Art, Anzahl und Installationsorten drahtloser Sensorknoten eine besondere Herausforderung^[4], da Kosten, Funktionssicherheit und Anwendernutzen derartiger Systeme davon abhängen. Das SiRaM-Kit stellt hierfür ein leistungsfähiges Werkzeug dar. Aktuelle Forschungsprojekte befassen sich mit der individuellen Nutzerintegration in Gebäudeautomationssysteme.

Grundlagen dafür liefern u. a. Untersuchungen zum Nutzerverhalten in Abhängigkeit vom persönlichen Wohlbefinden und von den raumklimatischen Umgebungsbedingungen. Dies kann durch direkte Messungen bestimmter Größen und durch Erfassung von Nutzeraktivitäten erfolgen, aber auch indirekt durch Erkennung des jeweiligen Nutzungskontextes. Auch dafür bietet das SiRaM-Kit vielfältige Einsatzmöglichkeiten (s. Abb. 4).

Mit dem SiRaM-Kit verfügt das IMMS über eine robuste und flexible Lösung zur schnellen und unkomplizierten Erfassung verschiedenster Sensordaten an verteilten Messstellen. Durch vielfältige praktische Tests konnte das breite Anwendungsspektrum dieser Lösung gezeigt werden^[5]. Für die dargestellte Lösung sind zahlreiche weitere Einsatzgebiete denkbar.



the given context of use. The SiRaM kit can also be used for these types of applications (see fig. 4)

The SiRaM kit provides IMMS with a robust and flexible solution for capturing sensor data quickly and easily at multiple locations in a measurement network. By performing a wide variety of practical tests, it was possible to demonstrate the wide range of applications for this solution^[5]. There are many conceivable applications for this solution.



Abb. 4: Raumklimamessungen in einem Besprechungsraum. Dargestellt sind mehrere Raumklimaparameter über einem mehrtägigen Nutzungsintervall.
Fig. 4: Measurements of ambient conditions in seminar room. Several ambient parameters are displayed for a multi-day usage interval.

Ansprechpartner / *contact*:

Dipl.-Ing. Wolfram Kattaneke
Tel. +49 (3677) 69-5544
E-Mail: wolfram.kattaneke@imms.de

- [1] W. Kattaneke, „Einsatz drahtloser Sensornetzwerke zur Gebäudeautomatisierung“, 7th Leibniz Conference of Advanced Science, Sensorsysteme 2008
- [2] Regionaler Wachstumskern „CBS Customer Bautronic System“, BMBF-Förderkennzeichen 03WKBD3C, <http://www.customerbautronic.de/>
- [3] E. Chervakova, T. Rossbach, „Wireless Sensor Networks for Building Automation“, 3rd IEEE European Conference on Smart Sensing and Context (EuroSSC), Zurich, Switzerland, 2008
- [4] T. Rossbach, M. Götze, M. Eifart, W. Kattaneke, „Design and Implementation of Wireless Sensor Networks Facing Range Limitations and Varying Environmental Conditions“, 18th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication (PIMRC), Athens, Greece, 2007
- [5] T. Rossbach, M. Götze, E. Chervakova, „Architekturasspekte beim praktischen Einsatz drahtloser Sensornetzwerke“, Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Mittweida, 2008



Einleitung

Der modellbasierte Entwurf von Regelungen mit MATLAB/Simulink spielt am Institut seit jeher eine große Rolle. Bereits seit vielen Jahren werden mit entsprechenden, durchgängigen Workflows Antriebslösungen entwickelt, die sich durch eine hohe Dynamik und Präzision auszeichnen. Im Rahmen des Wachstumsplans VERDIAN (Regionaler Wachstumsplan „VERDIAN: VERNetzte Integrierte Magnetische DirektANtriebe“, BMBF-Förderkennzeichen 03WKY01, <http://www.verdian.eu/>), in dem die IMMS gGmbH in verschiedenen Bereichen als Forschungspartner mit elf weiteren Unternehmen aus Industrie und Forschung zusammenarbeitet, wird auf gegenseitige Wiederverwendung durch eine stärkere Modularisierung gesetzt. Im Zuge dessen werden Komponenten eines vormals monolithischen Antriebs durch in verschiedenen Kontexten verwendbare, busvernetzte Komponenten ersetzt, z.B. einzelne Master- und Reglermodule sowie Endstufen mit Busanbindung.

Seit einigen Jahren zeichnet sich der Industrieautomatisierung ein Trend dahingehend ab, dass zunehmend „klassische“ Feldbusse und proprietäre Komponentenverbindungen durch Industrial Ethernet abgelöst werden. Industrial Ethernet ist ein Sammelbegriff für auf den Basistechnologien von Ethernet (IEEE 802.3) basierende Netzwerklösungen. Entsprechend finden verschiedene Implementierungen, oftmals als Weiterentwicklung etablierter Feldbusse wachsende Verbreitung.

Neben der einheitlichen technologischen Plattform in Form eines gemeinsam genutzten Busstandards erfolgte innerhalb des VERDIAN-Verbunds nach anfänglichen Evaluierungen eine Festlegung auf EtherCAT als Industrial-Ethernet-Kommunikationsstandard für zukünftige Entwicklungen. Diese gemeinsame Basis stellt die wechselseitige Interoperabilität von Antriebskomponenten sicher. EtherCAT^[1], ursprünglich von der Firma Beckhoff entwickelt, ist mittlerweile als IEC-Standard (IEC 61158 u. a.) spezifiziert. EtherCAT-Systeme umfassen einen Master und eine potenziell sehr große Anzahl von Slaves. Der Standard zeichnet sich durch besonders geringe Latenzen und die effiziente Adressierbarkeit von Datenobjekten bis hin zur Bitebene aus.

Die Nutzung eines Echtzeitbusses wie auch die zunehmende Modularisierung ziehen die Notwendigkeit neuer Algorithmen^[2,3] und angepasster Entwurfsprozesse nach sich.

Heterogene Modellierung mit UML und MATLAB/Simulink

Bei der Entwicklung verteilter Systeme, d.h. aus mehreren vernetzten Einzelmodulen bestehender Systeme, ist es viel versprechend, das komplexe Gesamtsystem im Rahmen eines Gesamtsystemmodells modellieren und auf dieser Basis simulieren und validieren zu können.

Introduction

Model-based design of controllers using MATLAB/Simulink has been an important focus at IMMS for some time now. For many years, well-integrated workflows have been used to develop drive solutions that are both highly dynamic and highly precise.

One of the tasks of the VERDIAN growth core (regional growth core "VERDIAN: network integrated magnetic direct drives, BMBF support code 03WKY01, <http://www.verdian.eu/>) - where IMMS gGmbH is working together with 11 other companies and institutes on various research projects - is to encourage mutual reutilization through increased modularization. In view of this, drives that were previously monolithic in design are now being replaced by modular systems consisting of bus network-based components that can be reused in a variety of different contexts. Typical components include separate master and controller modules as well as output stages equipped with bus ports.

Over the past years, a growing trend in industrial automation has been towards replacing "classic" field bus systems and proprietary component connectors with Industrial Ethernet solutions. Industrial Ethernet is a collective term describing the core technology of Ethernet-based network solutions (IEEE 802.3). As a result, different implementations have proliferated, many of which represent further developments of established field bus systems.

With the goal of finding a uniform technological platform based on a common bus standard, the VERDIAN partners evaluated the available systems and chose EtherCAT as the most suitable Industrial Ethernet communication standard for future development work. This common basis ensures that all drive components will be mutually interoperable.

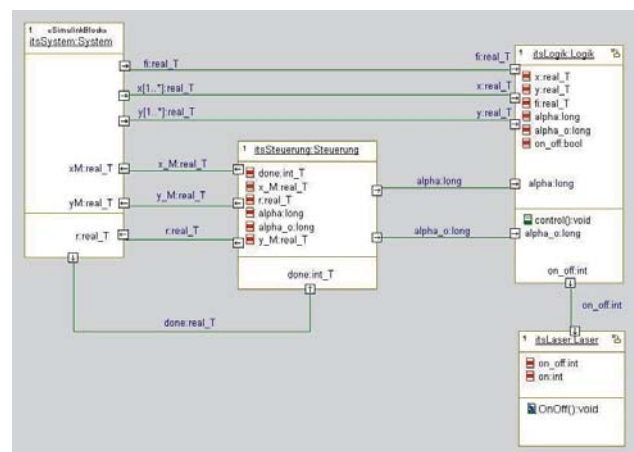


Abb. 1: Vereinfachtes Top-Level-UML-Diagramm eines heterogenen Systemmodells einer Planarantriebs-Steuerung

Fig. 1: Simplified top level UML diagram for a heterogeneous system model of a planar drive controller.

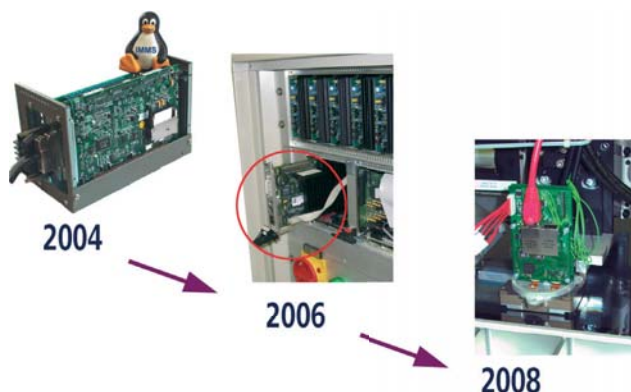


Abb. 2: Schrittweise Modularisierung bei der Entwicklung von eingebetteten Steuerungen für Planarantriebe

Fig. 2: Incremental modularization during development of embedded control units for planar drives

Für die Systemmodellierung bietet sich die UML als in der Softwaretechnik etablierte Modellierungssprache bzw. die auf Systemmodellierung optimierte SysML an. Während sich UML/SysML gut für den Entwurf diskreter und zustandsorientierter Systeme eignen, ist im Bereich des Entwurfs kontinuierlicher Antriebsregelungen am Institut MATLAB/Simulink^[4] etabliert.

Mit dem Ziel der Nutzung der durch eine Gesamtsystemmodellierung gebotenen Vorteile erfolgten erste Arbeiten zur heterogenen Modellierung, konkret zur Werkzeugkopplung zwischen UML und MATLAB/Simulink. Als UML-Werkzeug kam dabei Telelogic Rhapsody in C++^[5] zum Einsatz.

Die Untersuchungen konzentrierten sich auf Fragen der grundsätzlichen Praktikabilität eines Systementwurfs in UML unter Einbeziehung von Simulink-Modellen. Diese wurde grundsätzlich bestätigt (s. Abb. 1); jedoch stellen Einschränkungen der Gestaltungsfreiheit der Simulink-Modelle eine Erschwernis dar, der nur durch entsprechende Modellierungsrichtlinien begegnet werden kann.

Regler-Modul auf DSP-Basis

Die Modularisierung zukünftiger Antriebslösungen impliziert auch den Übergang von Industrie-PCs als zentrale Steuerungs- und Regelungskomponente hin zu modularisierten Steuer- und Regelungseinheiten (s. Abb. 2). Zwei Beispiele für derartige Komponenten sind ein eingebettetes EtherCAT-Master-Modul auf Basis einer ARM9-Hardware^[6] und ein Regler-Modul auf DSP-Basis.

Aus vorausgegangenen Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit verschiedener Prozessorarchitekturen bezüglich Gleitkommaberechnungen, die in Regler-Code intensiv genutzt werden, folgte die Wahl eines DSPs als Reglerplattform (s. Abb. 3). Diese hatten Prozessoren ohne Gleitkommaunterstützung in Hardware von vornherein disqualifiziert.

EtherCAT^[1] was originally developed by the Beckhoff company but has now been specified as an IEC standard (IEC 61158 etc.). EtherCAT systems include a master and a large number of possible slaves. This standard offers particularly low latencies and efficient addressing of data objects all the way down to bit level.

With the growing popularity of real-time busses and increasing modularization, new algorithms^[2,3] and adapted design processes are becoming ever more important.

Heterogeneous Modeling with UML and MATLAB/Simulink

For developing distributed systems (i.e., systems consisting of multiple networked modules), a promising new approach is to model the entire system in all of its complexity so that a simulation can be run and the system can be validated.

UML is an established system modeling language for software engineering applications, and SysML is specifically optimized for system modeling tasks. While UML and SysML are suitable for designing discrete and state-oriented systems, MATLAB/Simulink^[4] is being used at IMMS for developing continuous position drive controllers.

With the goal of capitalizing on the advantages offered by modeling an entire system, approaches towards heterogeneous modeling have been evaluated, specifically regarding tool coupling between UML and MATLAB/Simulink. In this, Telelogic Rhapsody in C++ was used as the UML tool.

The research work concentrated on fundamental issues such as the practicability of designing a system in UML and integrating Simulink models. The results demonstrated that although this is theoretically possible (see fig. 1), the restrictions on design freedom posed by the Simulink model represent a handicap that can only be counteracted with tight modeling rules.

Controller Module with DSP Core

The increasing modularization of future drive solutions also suggests a transition from control systems based on centralized industrial PCs to modularized controller components (see fig. 2). Two examples of such components include an embedded EtherCAT master module based on ARM9 hardware [6] and a controller module with a DSP core.

Based on previous benchmarks of the floating-point performance of various processor architectures (an important requirement for continuous control applications), the

In den zurückliegenden Generationen der eingebetteten Steuerung wurde deren Entwurf modellbasiert für Echtzeit-Linux als Zielplattform durchgeführt^[7,8]. Der Wechsel auf einen DSP als Hardware für Regelungsanwendungen bedeutet auch den Verzicht auf ein Betriebssystem, d.h. der aus MATLAB/Simulink-Modellen heraus erzeugte Regler-Code muss direkt und ohne Betriebssystem auf der Zielplattform lauffähig sein. Um den Anforderungen des verwendeten Compilers gerecht zu werden, waren hierzu Anpassungen am generierten Code notwendig, die sich im Hinblick auf einen möglichst reibungslosen Workflow automatisieren ließen. Damit steht im Ergebnis der aktuellen Forschungsarbeiten ein durchgängiger Entwurfsablauf für eine weitere tief eingebettete Hardwareplattform zur Verfügung. Die gegenwärtigen Arbeiten befassen sich damit, die in MATLAB/Simulink entwickelten Reglermodelle automatisiert mit der EtherCAT-Schnittstelle der Zielplattform zu integrieren, d.h. möglichst ohne manuelle Intervention Code zu generieren, der den Regler-Code in die EtherCAT-Buskommunikation einbindet.

Ansprechpartner / contact:

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

Referenzen

- [1] EtherCAT Technology Group, <<http://www.ethercat.org/>>
- [2] S. Köth: Verteilte Echtzeitsteuerung von mehrachsigen Präzisionsantrieben, Diplomarbeit, TU Ilmenau, 2007
- [3] B. Lauterlein: Umsetzung einer verteilten Echtzeitsteuerung von mehrachsigen Präzisionsantrieben, Diplomarbeit, TU Ilmenau, 2008
- [4] The MathWorks: Simulink -- Simulation und Model-Based Design, <<http://www.mathworks.de/products/simulink/>>
- [5] IBM/Telelogic Rhapsody: Model-Driven Development for SE/SD, <<http://www.telelogic.com/products/rhapsody/>>
- [6] Th. Elste: Eingebettetes Linux-System auf ARM-Basis als echtzeitfähiger EtherCAT-Master, Intern. Wissenschaftliche Konferenz Mittweida, 2008, S. 13-16
- [7] H. Töpfer, Ch. Schröder: Dynamische, mechatronische Motorsteuerung, Elektronik 9/2004, S. 86-89
- [8] H. Töpfer, M. Katzschnmann, T. Maaß, J. Pietrusky, M. Braczek: Entwurfsablauf für mechatronische Direktantriebe mit embedded-Linux-Steuerung unter Aspekten effizienter Rekonfigurierbarkeit, 5. GMM/ITG/GI-Workshop: Multi Nature Systems, 2005, S. 7-12

choice was made to use a DSP as the controller platform (fig. 3). Hardware-based processors that did not support floating-point operations were disqualified at the outset.

Previous generations of embedded controllers were developed as models using real-time Linux as the target platform^[7,8]. However, the switch to using a DSP-based hardware controller meant foregoing the use of an operating system. Therefore, any controller code generated using MATLAB/Simulink models had to be directly executable on the target platform without requiring an operating system. Requirements imposed by the compiler used necessitated changes to the generated code. These have been automated, aiming for as seamless a workflow as possible. Consequently, the results of current research activities add to the portfolio of platforms for which seamless design flows are available.

Current work is underway on developing a means of automatically integrating controller models developed in MATLAB/Simulink that can be embedded into EtherCAT with the EtherCAT interface of the target platform. Here, the goal is to generate controller code that can be embedded into EtherCAT without the need for manual intervention.

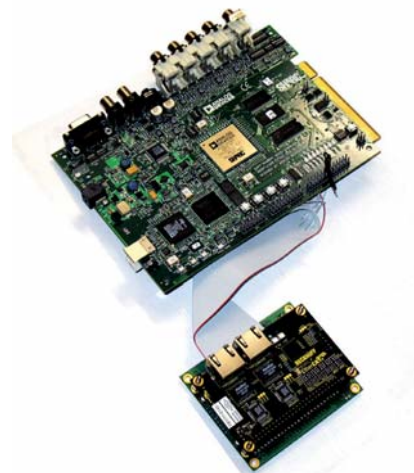


Abb. 3: Regler-Plattform auf DSP-Basis (Analog Devices ADSP21369) mit EtherCAT-Anbindung (Beckhoff ET1100)

Fig. 3: Controller platform based on DSP (Analog Devices ADSP21369) with EtherCAT connection (Beckhoff ET1100)



Problemstellung

Beim Einsatz von Fotodioden in multimedialen Anwendungen, wie Lese- und Schreibgeräte für CD, herkömmlichen DVDs und neuartigen Blu-Ray-DVDs werden die Anforderungen an die Geschwindigkeit der integrierten optoelektronischen Schaltkreise, insbesondere an die darin eingebetteten Fotodioden, immer größer. Daher stellt die dynamische Charakterisierung einen Schwerpunkt der Entwicklung solcher Systeme dar. Das IMMS ist auf diesem Gebiet seit mehreren Jahren tätig. Der aktuelle Stand ist die Messung auf Bauelementeebene. Ein Transfer dieser Methoden auf Waferebene bringt viele Vorteile mit sich, birgt aber auch messtechnische Probleme. Im vorliegenden Beitrag wird der Transfer und die damit verbundene Problemlösung vorgestellt.

Das bisherige Standardmessverfahren basierte auf einem Aufbau an der optischen Bank. Hier wurde die Übertragungsbandbreite bisher an gehäuteten Fotodioden gemessen. Dazu dienten ein Testboard und der Aufbau eines optischen Systems zur Einspeisung des anregenden optischen Signals.

Das optische System besteht aus einem Laser, einem Strahlteiler, einem O/E-Wandler und verschiedenen Linsen. Prinzipiell wird zur Messung der Übertragungsbandbreite eine modulierbare Quelle und ein durchstimmbarer Empfänger benötigt, die einen synchronen Frequenzsweep durchlaufen können. Der Empfänger misst dabei die Änderung der Signalamplitude über der Frequenz. Zum Aufbau einer solchen Anordnung kann ein Spektrumanalysator als Trackinggenerator verwendet werden. Dabei wird der Laser, der über einen Lasermulator vom Ausgangssignal des Spektrumanalysators gesteuert wird, zur Modulation angeregt. Das so entstandene optische Erregersignal wird zum Messobjekt, z.B. einer Fotodiode, geleitet. Die Fotodiode treibt dann mit dem generierten Fotostrom eine bestimmte Last z.B. 50 Ω . Der Spannungsabfall darüber wird schließlich im Spektrumanalysator ausgewertet. Aufgrund des unbekannten Frequenzgangs von Laser und Modulator ist eine Normalisierung auf das optische Signal mit einem O/E-Wandler erforderlich. Aus diesem Grund musste der optische Aufbau neben dem Pfad zum DUT auch einen Referenzpfad zum O/E-Wandler aufweisen. Durch Verrechnung der gemessenen Frequenzantwort des DUT und des Referenzpfades ergibt sich der reale Frequenzgang des DUT.

Dabei auftretende Probleme waren u.a. die nicht sichtbare Positionierung des Laserspots auf der Diode und die Empfindlichkeit des Aufbaus gegenüber Erschütterungen. Da diese Probleme am Waferprober mit Mikroskop vernachlässigbar sind, entstand die Forderung nach einem Transfer der Messung auf Waferebene.

Problem

In multimedia applications using photodiodes such as read/write heads for CDs, DVDs and the new Blu-Ray DVDs, specifications with respect to speed, integrated optoelectronic circuits and particularly embedded photodiodes are becoming increasingly stringent. For this reason, dynamic characterization plays a key role in the development of such systems. IMMS has been active in this area for many years. Currently, research is underway on how to perform measurements at the component level. These methods will be very advantageous once transferred to the wafer level but specific measurement problems still must be addressed. This article discusses the technological transfer process and solutions for the related problems.

Until now, the standard measurement procedure has used an optical table. Here, the transmission bandwidth was measured for photodiode packages. This procedure uses a test board and an optical system to supply the incoming optical signal.

The optical system consists of a laser, beam splitter, O/E converter and various lenses. In order to measure the transmission bandwidth, a modulatable source and tunable receiver are required, which are able to perform a synchronous frequency sweep. The receiver then measures changes in the signal amplitude as a function of frequency. In a measurement setup such as this, a spectrum analyzer can be used as a tracking generator. Here, the laser is set into modulation by a laser modulator that uses the output signal of the spectrum analyzer. The resulting optical exciter signal is transmitted to a DUT such as a photodiode. The photodiode drives a specific load (e.g., 50 Ω) with the photo current thus generated. The voltage drop can then be evaluated in the spectrum analyzer. Since the frequency responses of the laser and modulator are not known, this value must be normalized to the optical signal using an O/E converter. Therefore, the optical system must be equipped with a reference path to the O/E converter in addition to the path to the DUT. By offsetting the measured frequency response of the DUT against the reference path, one can calculate the frequency response of the DUT.

Some of problems encountered included the lack of visibility in positioning the laser spot on the diode and the poor sensitivity of the test rig against vibrations. Since these problems are negligible when using the wafer tester together with a microscope, it was deemed fit to consider transferring this measurement procedure to the wafer level.

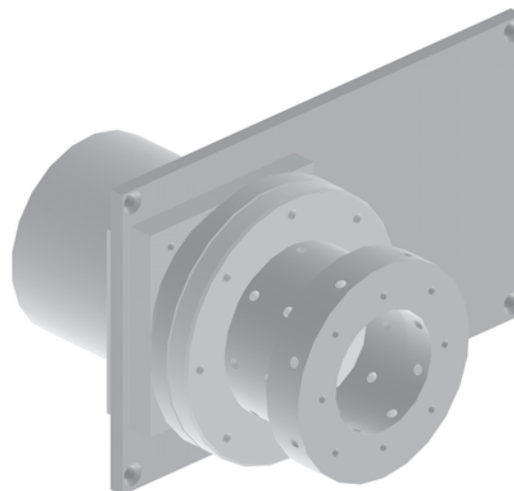
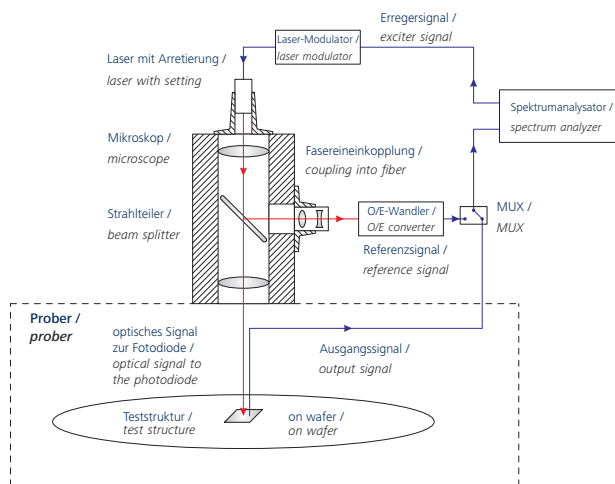


Abb. 1: Aufbau zur Messung der Übertragungsbandbreite (links) und Fasereinkopplung (rechts)
Fig. 1: Measurement setup of transmission bandwidth (left) and coupling into fiber (right)

Forschungsverlauf

Die Übertragung der Messung auf den Waferprober setzte sich aus mehreren Teilaufgaben zusammen. Die erste Aufgabe war die Einkopplung des Lasersignals in das Mikroskop mit Führung zum Wafer. Dazu wird eine optische Faser in einem festen Abstand über dem Mikroskop, auf der Bildebene, arretiert. Das divergente optische Signal aus der Faser wird dann durch das Mikroskop auf der Objektebene, dem Wafer, fokussiert.

Da die optische Signalübertragung mit der Faser stark verlustbehaftet und zeitlich instabil ist, wurde die Faser durch eine direkte Montage des Lasers über dem Mikroskop ersetzt (s. Abb. 1). Mit dieser Konstruktion kann mehr optische Leistung zum Wafer geführt werden, und die zeitliche Stabilität des optischen Signals verbessert sich erheblich.

Im zweiten Teil musste zur Kompensation des unbekannten Frequenzgangs von Laser und Modulator analog zur optischen Bank auch am Prober ein Referenzpfad zum O/E-Wandler aufgebaut werden.

Als Ausgangspunkt dafür diente ein im Mikroskop fest eingebauter Strahlteiler, der einen Teil des Lichtes auf dem Weg vom Laser zum Wafer aus dem Mikroskop lenkt (Bild 1). Dieser parallele Strahlengang mit dem Durchmesser 25mm wird durch Anordnung von Sammel- und Streulinse auf wenige Millimeter reduziert. Damit kann das optische Signal mit einer üblichen Fasereinkopplung in eine Faser zum O/E-Wandler und weiter zum Spektrumanalysator geführt werden. Durch diese Erweiterung besteht die Möglichkeit, ständig die Normierung des Messsignals auf das optische Referenzsignal auszuführen. Resultierend ist ein Abbau des Lasers nicht mehr erforderlich und die Position und Einspeisung in das Mikroskop bleibt nach einer Referenzierung unverändert.

Research Progress

The process for transferring the measurement to the wafer level consists of many steps. The first task was to couple the laser signal with the microscope along the wafer guide. To do this, an optical fiber is clamped into place at a fixed distance above the microscope along the image plane. The divergent optical signal emitting from the fiber is then focused by the microscope onto the object plane on the wafer.

Since the optical signal transmission with the fiber is very lossy and instable over time, the fiber was replaced by directly fastening the laser above the microscope (figure 1). Through this construction, it was possible to increase the optical power transmission to the wafer and drastically increase the temporal stability of the optical signal. In the second part, the unknown frequency responses of the laser and modulator had to be compensated for the tester in an analogous manner to the optical table by setting up a reference path to the O/E converter.

As a starting point, a permanently installed beam splitter in the microscope was used. This split a portion of the light traveling from the laser to the wafer out and away from the microscope (see fig. 1). These parallel beams with a diameter of 25 mm were reduced to a diameter of just a few millimeters using a system of converging and diverging lenses. This ensures that the optical signal can be transmitted to a fiber leading to the O/E converter and on to the spectrum analyzer using a conventional fiber optic coupler. By expanding the system in this manner, it is possible to continuously normalize the measurement signal with respect to the optical reference signal. Since it was no longer necessary to remove the laser, the position and supply to the microscope can remain unchanged after referencing.

Die letzte Aufgabe war die Entwicklung einer geeigneten Teststruktur auf dem Wafer. Damit wird der DC-Arbeitspunkt der Diode durch eine von außen angelegte Sperrspannung eingestellt. Resultierend aus der optischen Bestrahlung der Diode wird dann der generierte Fotostrom durch eine vorgegebene Last z.B. $500\ \Omega$ getrieben. Zur Vermeidung einer Fehlanpassung wird die Last z.B. $500\ \Omega$ durch ein Widerstandsnetzwerk an die $50\ \Omega$ Eingangsimpedanz des Spektrumanalysators angepasst. Um letztlich das Signal reflexionsarm abzugreifen, wurde eine GSG-Sonde mit einem Wellenwiderstand von ca. $50\ \Omega$ eingesetzt.

Ausblick

Um ihre Eigenschaften von Fotodioden besser zu verstehen und zielgerichtet in der Praxis einzusetzen, bedarf es auch einer Erweiterung der Messmethoden in Abstimmung mit der Simulation von Fotodioden.

Weiterhin werden die Eigenschaften des optischen Signals, speziell das Strahlenprofil in Ausbreitungsrichtung des Lasers genauer untersucht. Mit eigens entwickelten Teststrukturen wird durch Scans die Intensitätsverteilung vermessen und nach Strukturen gesucht, die im späteren Einsatz eine schnelle und genaue Charakterisierung des Lasersignals zulassen.

Einen dritten Schwerpunkt bildet die Untersuchung der Frequenz- und Zeitabhängigkeit von Fotodioden. Eine wichtige Kenngröße dabei stellt die Sperrschichtkapazität der Fotodiode dar. Auch dafür werden Teststrukturen aufgebaut, um äußere Streukapazitäten gezielt abzuschirmen und durch Kalibrierung zu kompensieren.

Ansprechpartner / contact:

Dipl.-Ing. Marco Reinhard
Tel: +49 (361) 663-2543
E-Mail: marco.reinhard@imms.de

The final task was to develop a suitable test structure on the wafer. To do this, the DC bias point on the diode was set using an externally applied reverse voltage. The photo current generated by the incident light on the diode was driven through a prescribed load (e.g., $500\ \Omega$). To prevent mismatching, a resistor network was used to match the load (e.g., $500\ \Omega$) to the $50\ \Omega$ input impedance of the spectrum analyzer. In order to tap the optical signal with a minimum of reflections, a GSG probe with a characteristic impedance of approx. $50\ \Omega$ was used.

Perspective

In order to better understand the properties of photo diodes with a view towards practical implementations, the measurement methods must be expanded in coordination with photodiode simulations.

Furthermore, properties of optical signals should be investigated in more detail. In particular, this pertains to beam profiles along the propagation direction of the laser. Using custom-developed test structures, the intensity distribution can be scanned with the goal of finding structures that can later be exploited for quick and accurate characterization of laser signals.

A third area of focus will be to investigate the frequency and time dependencies of photodiodes. A key quantity here is the junction capacity of photodiodes. To do this, test structures can be set up with the specific goal of shielding against external stray capacitances and to compensate for them using calibration methods.

Zielstellung

Der zunehmende Einsatz opto-elektronischer Komponenten zur Datenübertragung bzw. zum Auslesen von Speichermedien erfordert die Anpassung der Labor- und Produktionsmesstechnik an diese Anforderungen. In diesem Beitrag soll beispielhaft die Adaptierung einer industriell verwendeten Probecard unter Verwendung eines PXI-Testsystems beschrieben werden.

Innerhalb des Projektes sollte ein Messaufbau entstehen, der zum Test von Kleinserien geeignet ist. Dabei standen die Adaptierung der Industrieprobecard und die Bereitstellung einer geeigneten Optik zur Einspeisung des Lasersignals im Vordergrund. Nach der Lösung dieser Probleme wurde der Messaufbau mit dem PXI-Testsystem verbunden, das die Steuerung der Messaufgaben übernimmt.

Forschungsverlauf und -stand

Beim Test opto-elektronischer Schaltkreise wird ein optisches Eingangssignal verwendet, dessen Eigenschaften an den jeweiligen Einsatzfall des DUT angepasst sein müssen. Aus diesem Grund ist der Einsatz eines zusätzlichen optischen Systems notwendig, das durch die Verwendung von Linsen und Positioniersystemen eine hinreichende Beleuchtung des DUT sicherstellt.

In Zusammenarbeit mit unserem Forschungspartner Melexis GmbH (Erfurt) wurde am IMMS ein Lichtfeldsensor entwickelt (s. S. 18), der die Charakterisierung der Verteilung der optischen Leistung über einer Fläche erlaubt. Zum Test dieses Schaltkreises sollte ein Testaufbau entwickelt werden, der die Vorteile des modularen PXI-Testsystems ausnutzt. Weitere Eckpunkte der Aufgabenstellung wurden durch die Verwendung einer industriell verwendbaren Probecard und den Einsatz einer applikativen Optik festgelegt. Der Lichtfeldsensor verfügt über eine relativ große optisch empfindliche Fläche. Zur Durchführung eines applikationsnahen Tests ist somit die Verwendung eines optischen Eingangssignals, dessen räumliche Ausdehnung der optisch empfindlichen Fläche



Abb. 1: Adaptierungsplatine mit Federkontakten

Fig. 1: Adapter board with spring contacts

Objective

With the increasing use of optoelectronic components for transmitting data and reading storage media, it is essential to adapt the measuring instruments used in laboratory and production environments to meet the changing requirements. This article describes how an industrial test card has been adapted for use with a PXI test system.

During this project, a measuring rig was to be developed suitable for testing applications in short production runs. This mainly involved adapting an industrial test card and finding a suitable optical system for supplying the laser signal. Once these problems had been solved, the measuring rig could be connected to the PXI test system, which then assumed control of the testing duties.

Research Progress and Status

During the optoelectronic circuit test, an optical input signal was used that was specially adapted to the given application involving the DUT. Hence, it was necessary to use an additional optical system consisting of lenses and positioning systems that could ensure sufficient lighting of the DUT.

In collaboration with our research partner Melexis GmbH (Erfurt), the team at IMMS has developed a light field sensor (s. page 18) that can be used to characterize the distribution of optical power across a surface. A testing system for this circuit was to be developed that exploited the advantages of the modular PXI testing system. Some of the other main aspects of the project were defined through the use of an industrial test card and practicable optics. The light field sensor is equipped with a relatively large optically sensitive surface. To ensure that the test conditions would be close as possible to the real-world application, it was necessary to use an optical input signal with a spatial distribution similar to the optically sensitive area of the DUT. Another requirement was to ensure that the optical input signal could be positioned relative to the DUT so that only the sensor surface is illuminated. Both of these requirements were fulfilled by using an XY table and a specially developed beam shaper.

In addition to providing an optical input signal, it was also necessary to connect the circuit. The existing interfaces of the PXI test system were not compatible with the contacting options available on the testing card. To solve this conflict, it was necessary to develop an interface adapter so that the test card could be connected reliably, reproducibly and free of interference. The resulting adapter is connected to the test card via spring contacts and provides compatible interfaces for connecting to the PXI test system.

des DUT angelehnt ist, erforderlich. Daneben besteht auch die Forderung zur Positionierung des optischen Eingangssignals relativ zum DUT, so dass ausschließlich die Sensorfläche beleuchtet wird. Beide Bedingungen wurden durch den Einsatz eines XY-Tisches und eines speziell entwickelten Strahlformers erfüllt.

Neben der Bereitstellung des optischen Eingangssignals muss der Schaltkreis auch elektrisch angeschlossen werden. Die vorhandenen Schnittstellen des PXI-Testsystems waren nicht kompatibel mit den Kontaktierungsmöglichkeiten der Probekarte. Zur Lösung dieses Konflikts war die Entwicklung eines Schnittstellenadapters notwendig, der eine sichere, reproduzierbare und störungsfreie Verbindung herstellt. Der dadurch entstandene Adapter kontaktiert die Probekarte unter Verwendung von Federkontakten und stellt kompatible Schnittstellen zur Verbindung mit dem PXI-Testsystem zur Verfügung.

Der Testaufbau war nun soweit abgeschlossen, dass er mit dem PXI-Testsystem verbunden werden konnte. Der modulare Aufbau dieser Systeme erlaubt die Anpassung der Messgerätekonfiguration an die Messaufgabe. Das Hauptmerkmal von PXI-Testsystemen besteht in der Verwendung des gleichnamigen Busses, der neben der Funktionalität eines herkömmlichen PCI-Busses über zusätzliche Triggerleitungen zur Synchronisation von Messabläufen verfügt. Darüber hinaus enthält jedes System einen Controller, der die Messungen koordiniert.

Im Fall des Lichtfeldsensors musste das Testsysteme sowohl Module mit digitaler als auch analoger Funktionalität enthalten. Zur Versorgung des DUT mit einer Betriebs- und Referenzspannung wurde das PMU-Modul verwendet. Die Bestimmung des Betriebsstroms kann ebenfalls durch dieses Modul realisiert werden. Das Modul HSDIO dient zur Kommunikation des Testsystems mit der digitalen I²C-Schnittstelle des Schaltkreises. Hierüber können einzelne Sensorelemente ausgewählt oder Funktionsmodi verändert werden. Die resultierenden Ausgangsspannungen wurden mit Hilfe des Digitizers gemessen.

Ausblick

Unter Verwendung des vorgestellten Kontaktierungskonzeptes soll die dynamische Charakterisierung von opto-elektronischen Bauelementen und Schaltungen weiterentwickelt werden. Im Vordergrund stehen dabei Untersuchungen zur Bestimmung der Übertragungsbandbreite.

Ansprechpartner / contact:

Dipl.-Ing. Michael Meister
Tel: +49 (3677) 69-5525
E-Mail: michael.meister@imms.de

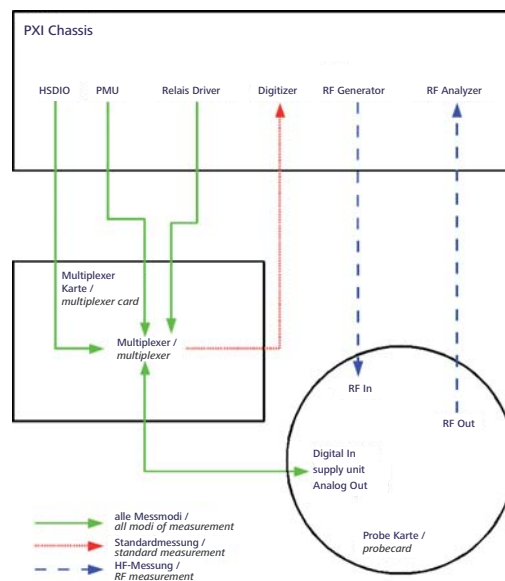


Abb. 2: Schematischer Aufbau des Messaufbaus

Fig. 2: Schematic diagram of measurement setup

The test rig was now completed and could be connected to the PXI test system. The modular design of these systems allows the measuring instruments to be specially configured for the task at hand. The main feature of a PXI test system is the PXI bus that, next to offering the functionality of conventional PCI busses, provides additional trigger lines that allow measurement processes to be synchronized. Furthermore, each PXI test system contains a controller that coordinates the measurements.

In the case of the light field sensor, it was necessary to have a test system containing modules offering both digital and analog functionality. The PMU module was used to supply the DUT with operating and reference voltages. This module can also be used to determine the operating current. The HSDIO module was used to communicate between the test system and the digital I²C interface of the circuit. Thus, it was possible to select individual sensor elements or change operating modes. The resulting output voltages were measured using the digitizer.

Perspective

Using the contacting concept presented here, it is now planned to continue developing methods for dynamically characterizing optoelectronic components and circuits. First and foremost, methods for determining the transmission bandwidth should be investigated.

Zielstellung

Ein modulares und aufgrund seiner Größe mobiles Testsystem auf PXI-Basis ist eine Alternative zu fest installierten Testern oder einem computergestützten Messplatz mit externen Messgeräten. Beim Einsatz des modularen Testsystems ist die mechanische und elektrische Adaptierung des DUT im Rahmen vorhandener Loadboards oder Probecards zu gewährleisten. Bei der Auswahl der PXI-Module kann auf eine Vielzahl von verschiedenen Herstellern zurückgegriffen werden. Eigene Zusatzschaltungen oder externe Messgeräte können mit in das System integriert werden. Die Programmierung mit LabView beziehungsweise mit den IVI Treibern bietet standardisierte Gerätebeschreibungen und Klassen, ermöglicht einen einfachen Zugriff auf die Funktionen der Module, eine zuverlässige und reproduzierbare Konfiguration der Testsoftware und aller eingebundenen Module und den Zugriff auf externe Geräte. Die Performance des PXI-Testsystems wird an einer typischen Mixed-Signal-Schaltung untersucht. Als Beispielanwendung dient dabei der Servo-Loop für die Messung von INL und DNL von Analog-Digital-Umsetzern verschiedener Typen und Technologien. Konzeption und erreichte Ergebnisse werden dargestellt und bewertet.

Je nach Konfiguration des PXI-Chassis stehen Stromversorgung, Multimeter, digitale Ein- und Ausgänge, Taktgeneratoren usw. als steckbare Testerinstrumente zur Verfügung. Erforderliche externe Messgeräte werden über ein passendes Bussystem wie GPIB oder LAN angesteuert. Die Bedienung und Steuerung des Gesamtsystems erfolgt nicht über Bedieneinheiten an den einzelnen Geräten, sondern über Softwaresteuerelemente auf dem Embedded Controller des PXI-Chassis. In der Regel ist die Software in LabView realisiert. Es besteht aber auch die Möglichkeit, Software in C++ oder einer anderen Programmiersprache einzubinden. Zur Ablaufsteuerung des Tests kann NI Test Stand genutzt werden. Wenn Echtzeitfähigkeiten benötigt werden, kann auf dem Embedded Controller mit dem Echtzeitbetriebssystem LabView Realtime gearbeitet werden.

Umsetzung

Das modulare Testsystem besteht aus dem PXI-Chassis mit Steuerung und den Testerinstrumenten, aus einer Adaptierung dieser Instrumente auf die Testpins und einer standardisierten Schnittstelle zum DUT. Die Adaptierung der Instrumente auf die Testpins wird im Instrument Extension Frame vorgenommen. Die Schnittstelle zum DUT ist flexibel und für verschiedene Formate von Loadboards und Probecards geeignet.

Die Grundanforderungen für jeden Mixed-Signal-Test sind Testerkanäle, die sowohl analoge als auch digitale Ressourcen in sich vereinen. Die momentan erhältlichen Digital IO -

Objective

Modular, compact and mobile PXI-based test systems are an alternative to permanently installed testers or computer-aided measuring stations with external measuring equipment. With modular test systems, mechanical and electrical adapters must be provided for the DUT using existing load boards or test cards. PXI modules can be chosen from a variety of different manufacturers. Additional circuits or external measuring instruments can also be integrated into the system. By using LabView and/or IVI drivers for programming, one can take advantage of standardized device descriptions and classes, easy access to module functions, reliable and reproducible configuration of test software and all integrated modules, as well as access to external devices. In this project, the performance of a PXI test system was investigated using a typical mixed signal circuit. As an application example, the servo loop was used to measure the INL and DNL values for analog-digital converters of various types and technologies. We are presenting the design of our experiment and its results in this paper.

Depending on how a PXI chassis is configured, components such as the power supply, multimeter, digital inputs and outputs, clocks and more are all available as plug-gable tester instruments. Any other external measuring instruments required can be controlled using a suitable bus system such as GPIB or LAN. Instead of using the separate operating panels on the various devices to operate and control the entire system, the software-based operating elements of the embedded controller on the PXI chassis were used. For the most part, the software is implemented using LabView. However, it is also possible to use software written using C++ or other programming languages. The NI test stand could be used to control the test procedure. If real-time performance is required, work can be performed on the embedded controller using the LabView Realtime operating system.

Implementation

The modular test system consists of a PXI chassis with the controller and tester instruments, a test instrument adapter for the test pins and a standard interface for the DUT. The test instrument adapter for the test pins was implemented using the instrument extension frame. The DUT interface is flexible and suitable for many different formats of load boards and test cards.

As a prerequisite for each mixed signal test, it is necessary to have tester channels that can be used with both analog and digital resources. The digital I/O cards currently available only offer digital functionality. To measure and generate analog DC signals, it was convenient to use a

Karten haben nur rein digitale Funktionen. Zur Messung und Erzeugung von analogen DC-Signalen bietet sich aber der Einsatz einer mehrkanaligen PMU Karte an, die am IMMS entwickelt wurde und sich gegenwärtig in der Erprobungsphase befindet. Jeweils 20 Mixed-Signal-Testpins werden mithilfe des Relaismultiplexers aus 20 HSDIO Kanälen, 20 PMU Kanälen und einem frei belegbaren Kanal erzeugt. Da das Testsystem für jeden Kanal über eine PMU verfügt, lassen sich analoge Messungen, die pro Pin voneinander unabhängig sind, zeitlich parallel durchführen. Das betrifft Strom- und Spannungsmessungen oder Anschlusstests. Zudem kann die komplette Energieversorgung des DUT und des Loadboards über die Testpins realisiert werden. Jede angeschlossene Testerressource kann mit jedem Pin des DUT verbunden werden. Diese Flexibilität ermöglicht den Test unterschiedlichster DUTs, ohne die Testerhardware ändern zu müssen.

In der Beispielanwendung AD-Wandlermessung sollen die statischen Kennwerte differentielle und integrale Nichtlinearität sowie die dynamischen Kennwerte Signal-Rausch-Abstand SNR bzw. die effektive Bitanzahl ENOB ermittelt werden. Die dafür erforderlichen Komponenten wurden - neben dem Multiplexer - auf einer Zusatzkarte realisiert. Die Karte unterstützt drei verschiedene Messmodi (s. Abb. 1):

- Bei der Standardmessmethode eines ADU wird die Eingangsspannung schrittweise mit einer SMU bereitgestellt und die digitalen Ausgangsdaten aufgezeichnet. Daraus lassen sich die statischen Kennwerte des ADU bestimmen.
- Mit der statistischen Messmethode wird am Eingang des ADU eine Niederfrequenz ab 2Hz bereitgestellt. Aus der Häufigkeitsverteilung der digitalen Codes und der idealen Häufigkeitsverteilung des Sinussignals lässt sich die DNL und damit die INL bestimmen.
- Die als Servo-Loop bezeichnete Messmethode geht von einem digitalen Zielwert aus und regelt die Eingangsspannung solange, bis der digitale Ausgangswert des ADU um diesen Zielwert pendelt

Die Referenzquellen sind auf der Karte realisiert. Wichtig sind hierbei vor allem die Rauscharmut, eine geringe zeitliche und thermische Drift und eine Genauigkeit, die deutlich über dem zu messenden DUT liegt. Um die Wiederverwendbarkeit und Flexibilität zu sichern, sind die sie als programmierbare DAU ausgeführt.

Zur Durchführung des Servo-Loop werden ein digitaler 16 Bit Komparator und ein analoger Integrierer benötigt. Der Komparator vergleicht den Zielwert mit dem digitalen Ausgangswert des ADU und erzeugt über den Integrierer die passende analoge Eingangsspannung für den ADU. Neben den digitalen Ausgangspins, den Referenz- und Eingangsspannungspins benötigt der ADU Stromversorgungspins und

multichannel PMU card developed by IMMS that is currently in the testing phase. In each case, 20 mixed signal test pins were implemented using 20 HSDIO channels, 20 PMU channels and one freely assignable channel.

Since the test system contains one PMU for each channel, independent analog measurements could be performed in parallel on each test pin. This pertains to current and voltage measurements or connection tests. Furthermore, all of the power required by the DUT and load board could be supplied through the test pins. Any connected test resource can be connected to any pin of the DUT. This flexibility makes it possible to test a wide range of DUTs without having to change the tester hardware.

The application example for AD converter measurements involved determining the static characteristics of differential and integral nonlinearity (DNL and INL, respectively) as well as the dynamic characteristics of signal-to-noise ratio (SNR) and effective number of bits (ENOB). The components required for this were implemented using an additional card besides the multiplexer. The card supports three different measurement modes (see fig. 1):

- *In the standard measurement method for ADCs, the input voltage was increased in steps using an SMU and the digital output data was recorded. It was thus possible to determine the static characteristics of the ADC.*
- *Using the statistical measuring method, low frequency signals starting at 2 Hz were applied to the input of the ADC. Using the frequency distribution of the digital codes and the ideal frequency distribution of the sinusoidal signal, it was possible to determine the DNL and thus the INL.*
- *The "servo loop" measurement method uses a digital setpoint and regulates the input voltage until the digital output value of the ADC begins to fluctuate around the setpoint.*

The reference sources have been implemented on the card. Here it was important to have very little noise, low temporal and thermal drift as well as significantly better precision than the DUT being measured. To ensure that these cards could be reused and remain flexible for other applications, they have been implemented as programmable DACs.

The servo loop was realized using a 16-bit digital comparator and an analog integrator. The comparator compares the target value with the digital output value of the ADC and, using the integrator, generates the analog input voltage required for the ADC. In addition to the digital output, reference and input voltage pins, the ADC also requires power supply pins and digital inputs to set the various

digitale Eingänge zur Einstellung diverser Betriebsmodi. Diese Anschlüsse können alle durch die normalen Mixed Signal Pins realisiert werden.

Ausblick

Die PXI-Testplattform ermöglicht die Durchführung vieler im Institut anfallenden Testaufgaben. Die Modularität des Systems erlaubt es, eine der Aufgabe angepasste effiziente und wirtschaftliche Konfiguration zu verwenden. Gleichzeitig existiert durch ein gemeinsames Treibergerüst und eine standardisierte Geräteklassifizierung eine sehr gut nutzbare Programmierschnittstelle, mit der schnell und praxisnah auf die Eigenschaften und Funktionen der Geräte zugegriffen werden kann.

Im praktischen Einsatz wurde bisher neben der ADU Charakterisierung auch der Test von digitalen Schaltkreisen implementiert. Es zeigte sich, dass die Restriktionen des modularen Testers beherrschbar und korrigierbar sind. Durch die Flexibilität und Skalierbarkeit der vorgestellten Testplattform ist die Portierung weiterer Schaltkreise wirtschaftlich möglich und zeitlich effizient machbar.

Vorteilhaft an dem Testsystem ist auch die Mobilität, die es aufgrund der geringen Größe möglich macht, auch vor Ort beim Kunden die Messungen durchzuführen.

In der Zukunft liegen die weiteren Herausforderungen auf der Softwareseite. Zur standardisierten und flexibel skalierbaren Hardware muss auch die Standardisierung der Software kommen. Gerade im Bereich der Testgeschwindigkeit und der Ressourcenausnutzung ergeben sich daraus große Potenziale.

Ansprechpartner / contact:

Dipl.-Ing. Ingo Gryl
Tel: +49 (3677) 663-5537
E-Mail: ingo.gryl@imms.de

Dr.-Ing. Volker Schulze
Tel: +49 (3677) 69-5521
E-Mail: volker.schulze@imms.de

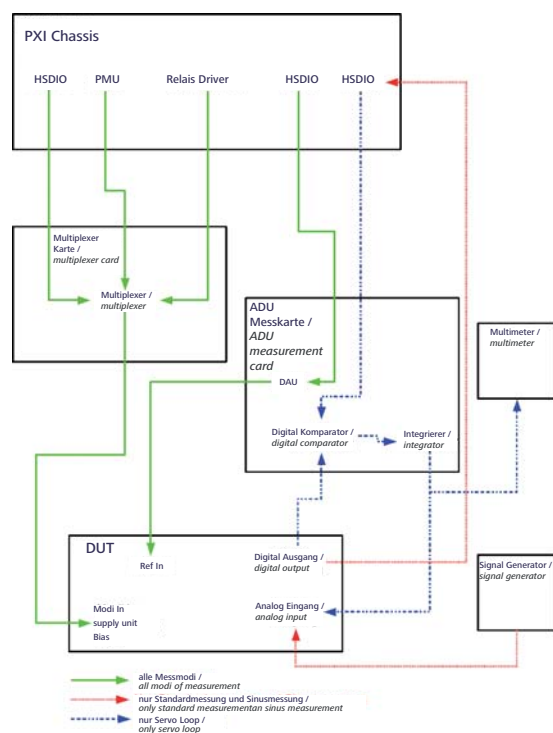


Abb. 1: Testmodi ADU

Fig. 1: Testmodi ADU

operating modes. These connectors can all be realized using normal mixed signal pins.

Perspective

The PXI test platform can be used to perform many of the testing duties performed at the institute. Since the system is modular, it can be optimally configured for the task at hand making it efficient and cost-effective. Furthermore, the shared drivers and standardized device classifications allow for a very user-friendly programming interface that can be used to quickly access the device properties in actual testing scenarios.

Practical applications until now have included digital circuit tests in addition to determining ADC characteristics. It has become apparent that the restrictions of the modular tester are controllable and correctable. In view of the flexibility and scalability of the test platform presented here, it should be possible to port this system for testing other circuits in a cost- and time-effective manner. An advantage of this test system is that it is small and mobile enough to be used for on-site measurements at customer locations.

The future challenges lie on the software side. This standardized and highly scaleable hardware now requires standardized software. There is much room for improvement here, especially with respect to testing speed and resource utilization.

Aktivitäten, Daten, Publikationen

Activities, Facts, Publications



Xth Internationaler Workshop: "Symbolic and Numerical Methods, Modeling and Applications to Circuit Design (SM²ACD'08)"

Xth Internationaler Workshop: "Symbolic and Numerical Methods, Modeling and Applications to Circuit Design (SM²ACD'08)"

Im Oktober richtete das IMMS den „10. Internationalen Workshop Symbolische und numerische Methoden, Modellierung und Anwendungen für den integrierten Analog/Mixed-Signal-Schaltungsentwurf“ in Erfurt aus.



Abb. 1: Die Organisatoren Prof. Ralf Sommer und Dr. Eckhard Hennig
Fig. 1: The organizers Prof. Ralf Sommer and Dr. Eckhard Hennig

Es war ein besonderer Anlass, denn der Workshop blickt auf eine 17jährige Geschichte zurück – angefangen 1991 in Bagneux, Frankreich, und in der Folge Florenz, Italien (1992), Sevilla, Spain (1994), Leuven, Belgien (1996), Kaiserslautern (1998), Lissabon, Portugal (2000), Sinaia, Rumänien (2002), Wroclaw, Polen (2004) und Florenz, Italien im Jahr 2006.

Ausgerichtet wird der Workshop von der „Symbolic Group“, einer internationalen Gemeinschaft von Wissenschaftlern, die gemeinsam an symbolischen Schaltungsanalyseverfahren und Werkzeugen arbeiten. Durch Veränderungen des industriellen Entwurfsprozesses in den letzten Jahren wird der Analog/Mixed-Signal Entwurfsmethodik eine immer wichtigere Rolle zugeordnet. Dabei liegt der Schlüssel zum Lösen und Beherrschen umfangreicher IC-Entwicklungsprobleme heutzutage in der Simulation auf verschiedenen Hierarchie-Ebenen mit Einbeziehung unterschiedlicher Abstraktionsebenen und - hochaktuell – die Behandlung multi-physikalischer Systeme mit ganzheitlichen Methoden, d.h. über die unterschiedlichen Domänen hinweg. Das kann nur über die Anwendung eines weiten Spektrums von Modellierungstechniken, welche sowohl symbolische als auch numerische Herangehensweisen umfassen, erreicht werden.

Als logische Konsequenz auf diese Entwicklung wurde 2008 dem Workshop vom IMMS eine qualitativ höhere Ausrichtung gegeben. Diese zielte in das Gebiet der Modellierung einschließlich numerischer Analysetechniken für Analog/Mixed-Signal-Systeme und deren Anwendung, jedoch ohne die traditionelle technische Linie des Workshops zu vernachlässigen. Somit wurde aus dem bisherigen SMACD der SM²ACD, der "International Workshop on Symbolic and Numerical Methods, Modeling and Applications to Circuit Design".

In October, IMMS held the "10th International Workshop for Symbolic and Numerical Methods, Modeling and Applications for Integrated Analog/Mixed-Signal Circuit Design" in Erfurt, Germany.

It was a special occasion since the workshop looked back at a 17-year history that began in Bagneux, France in 1991 and has since traveled to Florence, Italy (1992), Sevilla, Spain (1994), Leuven, Belgium (1996), Kaiserslautern, Germany (1998), Lisbon, Portugal (2000), Sinaia, Rumania (2002), Wroclaw, Poland (2004), and returning to Florence in 2006.

The workshop is held by the "Symbolic Group" - an international group of scientists who jointly work on symbolic circuit analysis procedures and tools. As a result of changes to industrial design processes over the past years, analog/mixed-signal design methods are becoming increasingly important. Here, the key to solving and mastering today's complex IC development problems lies in simulating multiple hierarchical levels including various abstraction levels. One of the current top issues is how to solve multi-physical systems using holistic methods, i.e., at a level above the various domains. This can only be achieved through the use of a wide spectrum of modeling techniques including both symbolic and numerical approaches.

As a logical consequence of this development, the IMMS workshop was oriented towards a higher quality segment this year. It focused on modeling tasks including numerical analysis techniques for analog/mixed-signal systems and their application. However, attention was paid not to neglect the traditional technical aspects of the workshop. Thus, the workshop previously known as SMACD became SM²ACD or "International Workshop on Symbolic and Numerical Methods, Modeling and Applications to Circuit Design".



Abb. 2: Während der Konferenz
Fig. 2: During the conference

Durch diese Erweiterung des Spektrums konnte die Attraktivität des Workshops erhöht und die Teilnehmerzahl gegenüber früheren Workshops auf über 50 gesteigert werden, wobei das technische Programm 38 Beiträge aus 12 Ländern (Europa, Australien, Indien, Mexiko) beinhaltete. Ein weiterer hervorzuhebender Aspekt war die Pre-Konferenz zum SM²ACD. Als Cadence Lead Institutionen im „Cadence Academic Network“, welches vor Kurzem von Cadence Design Systems gegründet wurde, organisierte das IMMS gemeinsam mit der TU Ilmenau, FG Elektronische Schaltungen und Systeme, sowie der Universität Freiburg das erste Zusammentreffen der Analog/Mixed-Signal- und RF-Community.

Ziel des Netzwerks ist es, gemeinsam mit Cadence einen Wissens-Pool ausgesuchter Europäischer Universitäten, Forschungsinstitute und Wissensträgern aus der Industrie aufzubauen und so gemeinsam von den technologischen



Abb. 4: Während der Exkursion beim Industriepartner Melexis GmbH (Erfurt)
Fig. 4: During the excursion at our industry partner Melexis GmbH (Erfurt)

Erfahrungen auf dem Gebiet der Entwurfsautomatisierung und der Implementierung von mikroelektronischen Schaltungen und Systeme zu profitieren. Das Programm der Pre-Konferenz beinhaltete Tutorials zum A/MS und RF-Design, basierend auf Cadence-Technologie, sowie Präsentationen der Mitglieder des Netzwerkes.



Abb. 3: Diskussionen während der Posterausstellung
Fig. 3: Discussions during the poster session

By expanding the spectrum of techniques on offer, the workshop became more attractive and the number of participants grew to more than 50 persons compared to previous workshops. The technical program consisted of 38 lecturers from 12 countries (Europe, Australia, India, Mexico).

Another outstanding aspect was the pre-conference to the SM²ACD. As one of the Cadence Lead Institutions in the "Cadence Academic Network" recently founded by Cadence Design Systems, IMMS worked with TU Ilmenau, FG Elektronische Schaltungen und Systeme and Freiburg University to organize the first meeting of the Analog/Mixed Signal and RF community. The goal of this network is, together with Cadence, to establish a knowledge pool of select European universities, research institutes and other industrial experts and then jointly profit from the technological experiences gathered in the areas of design automation and implementation of micro-electronic circuits and systems. The pre-conference program contained tutorials on A/MS and RF Design using Cadence Technology, as well as presentations from various network members.

2008 gab es eine Neubesetzung der Leitungsstelle des Instituts Erfurt der IMMS gGmbH. Unser langjähriger Erfurter Institutsleiter Prof. Dr.-Ing. Dr. sc. techn. Franz Rößler wurde in den wohlverdienten Ruhestand verabschiedet und übergab die Amtsgeschäfte an Herrn Dr. Eckhard Hennig. Dr. Hennig studierte an der TU Braunschweig und promovierte am FhG ITWM zum Thema: „Symbolische Approximations- und Modellierungsverfahren für die Analyse und den Entwurf analoger Schaltungen“. Sein erklärtes Ziel für die Arbeit am Institut formulierte Dr. Hennig folgendermaßen: Durch den Aufbau und Einsatz von Spezial-Know-How im Bereich moderner EDA-Methoden wird die Kompetenz des Instituts auf dem Gebiet des Entwurfs integrierter Schaltungen noch weiter gestärkt. Damit versetzt sich das IMMS in die Lage, Industriepartnern und Unternehmen attraktive Gesamtlösungen bestehend aus IC-Design und Designmethodik komplett anbieten zu können.

Neben den fachlichen Aktivitäten gab es 2008 am IMMS weitere eindrucksvolle Veranstaltungen, die das Leben am Institut abwechslungsreich und interessant gestalteten. Beispielhaft seien hier unser erstes Kinderfest mit dem Highlight „Pflanzen des IMMS-Baumes“ im Sommer und die Vernissage „Florenz_Siena_2003“ im Herbst 2008 genannt.

Der „IMMS-Baum“ wurde von unserem langjährigen, Ilmenauer Projektpartner TETRA GmbH anlässlich unseres 10-



jährigen Bestehens geschenkt. Gemeinsam mit Herrn Mollenhauer (TETRA GmbH) und unserer Geschäftsleitung, Herrn Kelm und Prof. Sommer gingen unsere Instituts-Kinder vol-

ler Elan an diese Aufgabe. Jeder hatte seine Budelschippe von zu Hause mitgebracht und half beim Schließen des Pflanzloches.



Die Bilder zur Ausstellung „Florenz_Siena_2003“, welche Herr Pfau, studierter Fotodesigner zur Verfügung stellte, entführt die Besucher in die hügelige Landschaft der Toskana mit ihrem mediterranen Klima und lädt zu einem anmutigen Spaziergang durch die idyllischen Städte Florenz und Siena ein. Eindrucksvoll werden in den Bildern deren architektonischen Schönheiten eingefangen.



IMMS - selective Activities 2008



In 2008, a new institute director was named at IMMS gGmbH in Erfurt. Long-standing director Prof. Dr.-Ing. Dr. sc. techn. Franz Rößler entered his well-deserved retirement and Dr. Eckhard Hennig assumed his position as institute director. Dr. Hennig studied at TU Braunschweig and received his doctor's degree at FhG ITWM on "Symbolic Approximation and Modeling Method for Analysis and Design of Analog Circuits". Dr. Hennig explained the goal of his work at the institute as follows: "By nurturing and applying our special expertise in cutting edge EDA methods, we will continue to strengthen our institute's competency in the area of integrated circuit design. Thus, IMMS will be able to provide our industrial partners and companies with attractive turnkey solutions utilizing IC design and design methodology."

In addition to our professional activities, many other events throughout 2008 contributed to a very dynamic and interesting year at IMMS. For example, we held our first-ever children's festival with the highlight event "IMMS Tree Planting Day" and an exhibition "Florenz-Siena-2003" held in fall of 2008.

The "IMMS Tree" was sponsored by our long-standing project partner TETRA GmbH (Ilmenau) on the occasion of our institute's 10th anniversary. Together with the business manager Mr. Mollenhauer and our institute directors Mr. Kelm and Prof. Sommer, the children of our institute eagerly helped us with the tree planting. The children brought little sandbox shovels and helped us to fill the hole around the tree.

The photographs for the "Florenz_Siena_2003" exhibition were taken by Mr. Pfau-a studied photographic designer-and offered breathtaking views of hilly Toscana landscapes with its Mediterranean climate, and enchanted us with pleasant excursions through the idyllic cities of Florence and Siena. The photographs captured the glory and splendor of the cities' many architectural wonders.

Wir trauern um unsere junge Kollegin Eva Ulicná, die im Mai 2008 ganz unerwartet und für uns alle unfassbar aus dem Leben gerissen wurde.

Eva Ulicná war im Themenbereich System Design seit mehr als fünf Jahren als wissenschaftliche Mitarbeiterin tätig. Sie arbeitete mit Kreativität und Erfolg daran, die Effizienz des Entwurfs integrierter elektronischer Schaltungen und Systeme durch moderne Modellierungsansätze zu erhöhen.

In ihrer Freizeit war sie ein sportlich engagierter und lebensbejahender Mensch. Dies spiegelte sich u. a. in ihrem größten sportlichen Erfolg, dem Gewinn der Bronzemedaille im Kickboxen bei den Titelkämpfen der Amateure in Spanien 2006 wieder.

Eva Ulicná hinterlässt eine große persönliche Lücke am Institut.

We mourn the loss of our young colleague Eva Ulicná who passed away unexpectedly in May 2008 and who was so suddenly removed from our lives.

Eva Ulicná had worked in System Design for more than five years as a research assistant. She was highly creative and successful in her ventures to improve the efficiency of the design process for integrated electronic circuits and systems through the use of state-of-the-art modeling methods.

In her leisure time, she was an avid sports enthusiast and a very positive human being. This was reflected in her finest sports achievement, where she won the bronze medal for kick boxing at an amateur championship in Spain 2006.

Eva Ulicná's presence will be sorely missed at our institute.



Publikationen / Publications

- [1] B. Dimov¹, D. Balashov², M. Khabipov², Th. Ortlepp³, F.-Im. Buchholz², A. B. Zorin², J. Niemeyer², F. H. Uhlmann³
¹ Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme GmbH, Erfurt, Germany, ² Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Division Quantum Electronics, Braunschweig, Germany, ³ Technische Universität Ilmenau, Germany, Institute for Information Technology, RSFQ Design Group, Ilmenau, Germany
Implementation of superconductive passive phase shifters in high-speed integrated RSFQ digital circuits
 IOP Superconductor Science and Technology, Volume 21 (045007), Number 4, April 2008
- [2] B. Bieske (IMMS gGmbH), M. Lange, S. Beyer (Atmel GmbH)
Test of differential 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee ICs: Limits and Challenges
 Semiconductor Conference Dresden 2008, 23.-24. April 2008, Dresden, Germany
- [3] S. Hesse
Nanopositioniersysteme großer Bewegungsbereiche
 Industriekolloquium des Sonderforschungsbereiches „Nanopositionier- und Nanomessmaschinen“, Proceedings S. 150-154, 08. Mai 2008, Ilmenau, Germany
- [4] S. Hesse, C. Schäffel, M. Katzschnmann, T. Maass, H.-U. Mohr
Planar motor concept for positioning with nanometer position uncertainty
 8th International Conference Euspen 2008, 18.-22. Mai 2008, Zurich, Switzerland
- [5] H. Töpfer
Design of Rapid Single Flux Quantum Circuits
 Proceedings of the 8th International Workshop on Low Temperature Electronics-Wolte, S. 97–98, 22.-25. Juni 2008, Jena/Gabelbach, Germany
- [6] R. Sommer¹, T. Halfmann², J. Broz²
¹ Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme GmbH, Ilmenau, Germany, ² Fraunhofer ITWM, Kaiserslautern, Germany
Automated behavioral modeling and analytical model-order reduction by application of symbolic circuit analysis for multi-physical systems
 Elsevier B.V.: Journal on Simulation Modelling Practice and Theory, Volume 16, pp 1024-1039, Issue 08. September 2008
- [7] T. Maaß, S. Reinhold
Hardware-in-the-Loop zum Test von Steuerungen für Mehrkoordinatenantriebe
 53rd International Scientific Colloquium (IWK 2008), pp 189-190, 08.-12. September 2008, Ilmenau, Germany

- [8] B. Dimov, V. Boos, T. Reich, C. Lang, E. Hennig, R. Sommer
Optimization of Analog Circuits with Automatic Device Type Selection
 Xth International Workshop on Symbolic and Numerical Methods, Modeling and Applications to Circuit Design (SM²ACD'08), pp 44-48, 07.-08. Oktober 2008, Erfurt, Germany
- [9] D. Krauß¹, J. Nowak², E. Schäfer¹, R. Sommer^{1,2}
¹ Technische Universität Ilmenau, Germany, ² Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme GmbH, Erfurt, Germany
Frequency Compensation by Automated Topology Modification Using Mixed Analytical and Numerical Methods for Design of Fast TIA for HDTV Applications
 Xth International Workshop on Symbolic and Numerical Methods, Modeling and Applications to Circuit Design (SM²ACD'08), pp 118-126, 07.-08. Oktober 2008, Erfurt, Germany
- [10] B. Dimov, V. Boos, T. Reich, C. Lang, E. Hennig, R. Sommer
Direct Performance Evaluation of Bipolar Transistor Devices for Analog Circuit Design
 Xth International Workshop on Symbolic and Numerical Methods, Modeling and Applications to Circuit Design (SM²ACD'08), pp 49-55, 07.-08. Oktober 2008, Erfurt, Germany
- [11] V. Boos
Graphical User Interface for Analog Insydes
 Xth International Workshop on Symbolic and Numerical Methods, Modeling and Applications to Circuit Design (SM²ACD'08), pp 193-196, 07.-08. Oktober 2008, Erfurt, Germany
- [12] B. Dimov^{1,2}, Th. Ortlepp², V. Mladenov³, S. Terzieva³, F.H. Uhlmann²
¹ Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik Systeme gGmbH, Ilmenau, Germany, ² RSFQ design group, Technische Universität Ilmenau, Germany, ³ Dept. Theoretical Electrical Engineering, Technical University of Sofia, Bulgaria
The asynchronous rapid single-flux quantum electronics - a promising alternative for the development of high-performance digital circuits
 Advances in Radio Science, Kleinheubacher Berichte, vol. 6, pp. 165-173, 1–9, 2008
- [13] T. Rossbach, M. Götze
Architekturaspekte beim praktischen Einsatz drahtloser Sensornetzwerke
 Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida: Embedded Systems, Band 10, S. 3-8, Hochschule Mittweida, 2008

[14] T. Elste
Eingebettetes Linux-System auf ARM-Basis als echtzeitfähiger EtherCATMaster

Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida: Embedded Systems, Band 10, S. 13–16, Hochschule Mittweida, 2008

[15] E. Chervakova, T. Rossbach
Lokalisierungsalgorithmen in drahtlosen Sensornetzwerken
Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida: Embedded Systems, Band 10, S. 36–38, Hochschule Mittweida, 2008

[16] K. Brueckner¹, F. Niebelschuetz¹, K. Tonisch¹, S. Michael², A. Dadgar³, A. Krost³, V. Cimalla⁴, O. Ambacher⁴, R. Stephan¹, M. A. Hein¹

¹ Technische Universität Ilmenau, Germany, ² Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme GmbH, Erfurt, Germany, ³ Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Germany, ⁴ Fraunhofer Institute for Applied Solid-State Physics, Freiburg, Germany

Two-dimensional electron gas based actuation of piezoelectric AlGaIn/GaN microelectromechanical resonators
Applied Physics - Letters 93, 173504 _2008

Vorträge / Lectures

[1] W. Sinn
Intelligente Sensoren und Aktoren in Fahrzeugen
Technologietag Mitteldeutschland, 17.-18. Februar 2008, Jena, Germany

[2] St. Michael
Pressure Sensor Parameter Identification by Dynamic Measurements
Memunity Workshop 13. März 2008, Ilmenau, Germany

[3] D. Krausse¹, E. Schäfer¹, R. Sommer^{1/2}
¹ Technische Universität Ilmenau, Germany, ² Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme GmbH, Erfurt, Germany
Kompensation schneller Transimpedanzverstärker durch automatische Schaltungsstrukturmodifikation basierend auf symbolischer Schaltungsanalyse
Analog '08, 10. GMM/ITG-Fachtagung, 02.-04. April 2008, Siegen, Germany

[4] W. Sinn
Schnittstelle Mensch- eine Herausforderung an die Mikrosystemtechnik
Workshop - RFID in Medizintechnik und Gesundheitswesen, 08. April 2008, Erfurt, Germany

[5] B. Bieske¹, M. Lange², S. Beyer²
¹ Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme GmbH, Ilmenau, Germany, ² Atmel GmbH, Heilbronn, Germany,

Test of differential 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee ICs: Limits and Challenges
Semiconductor Conference Dresden 2008, 23.-24. April 2008, Dresden, Germany

[6] St. Hesse
Nanopositioniersysteme großer Bewegungsbereiche
Industriekolloquium des Sonderforschungsbereiches „Nanopositionier- und Nanomessmaschinen“ 08. Mai 2008, Ilmenau, Germany

[7] St. Hesse, C. Schäffel, M. Katzschnmann, T. Maass, H.-U. Mohr
Planar motor concept for positioning with nanometer position uncertainty
8th International Conference euspen 2008, 18.-22. Mai 2008, Zurich, Switzerland

[8] R. Sommer
Problemstellung und neue Ansätze zur Entwurfsmethodik für nanoelektronische Analog- und Mixed-Signal-Schaltungen
Workshop Entwurf integrierter Schaltungen -DASS'08 und WEIS'08, 15.-16. Mai 2008, Dresden, Germany

[9] D. Kirsten, T. Crocoll, D. Nürnberg
Speicherung von analogen Spannungswerten unter Nutzung von Floating-Gates
Workshop Entwurf integrierter Schaltungen -DASS'08 und WEIS'08, 15.-16. Mai 2008, Dresden, Germany

[10] H. Töpfer - *eingeladener Vortrag*
Design of Rapid Single Flux Quantum Circuits
8th International Workshop on Low Temperature Electronics-Wolte, 22.-25. Juni 200, Jena/Gabelbach, Germany

[11] H. Töpfer
Roadmap considerations and assessment of RSFQ technology in the context of contemporary microelectronics
5. RSFQ Design Workshop, 30. Juni 2008, Ilmenau, Germany

[12] E. Chervakova, T. Rossbach
Wireless Sensor/Actor Networks for Building Automation - A System for Distributed Computing and Unique Sensor Identification
SenZations'08, 01. September 2008, Ljubljana, Slowenien

[13] T. Maaß, S. Reinhold
Hardware-in-the-Loop zum Test von Steuerungen für Mehrkoordinatenantriebe
53rd International Scientific Colloquium (IWK 2008), 08.-12. September 2008, Ilmenau, Germany

- [14] M. Stubenrauch ¹, A. Albrecht ¹, W. Hild ², O. Mollenhauer ³, B. Guddei ³, S. Spiller ³, C. Schäffel ⁴, M. Katzschmann ⁴, F. Spiller ⁴

¹ Technische Universität Ilmenau, Germany, ² Carl Zeiss SMT AG, Jena, Germany, ³ TETRA GmbH, Ilmenau, Germany, ⁴ Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme GmbH, Ilmenau, Germany

Novel Precision Positioning System with Integrated Planar Guides

53rd International Scientific Colloquium (IWK 2008), Proceedings S. 251-252, 08.-12. September 2008, Ilmenau, Germany

- [15] M. Isikhan, A. Richter
CMOS Low Noise Amplifiers for 1.575 GHz GPS Applications
Kleinheubacher Tagung, 22.-25. September 2008, Miltenberg, Germany

- [16] B. Dimov, V. Boos, T. Reich, Ch. Lang, E. Hennig, R. Sommer
A Novel Technique for CAD-Optimization of Analog Circuits with Bipolar Transistors
Kleinheubacher Tagung, 22.-25. September 2008, Miltenberg, Germany

- [17] Pascal Febvre ¹, Torsten Reich ^{1,2}, Michel Auguste ³, Daniel Boyer ³, Alain Cavaillou ³, Georges Waysand ³, Rémi Blancon ⁴, Thomas Ortlepp ⁵, F. Hermann Uhlmann ⁵, Juergen Kunert ⁶, Ronny Stolz ⁶, Hans-Georg Meyer ⁶

¹ IMEP-LAHC, UMR CNRS, University of Savoie, Le Bourget du Lac Cedex, France, ² Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme GmbH, Erfurt, Germany, ³ LSBB, La Grande Combe, Rustrel, France, ⁴ Département de Physique, Université d'Avignon, France, ⁵ Technische Universität Ilmenau, Germany, ⁶ Institute of Photonic Technology, Quantum Detection Department, Jena, Germany

Digital Squids for Applications in Geophysics

International Conference - EUROFLUX 2008, 29. September - 01. Oktober 2008, Naples, Italy

- [18] D. Krauß ¹, J. Nowak ², E. Schäfer ¹, R. Sommer ^{1,2}
¹ Technische Universität Ilmenau, Germany, ² Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme GmbH, Erfurt, Germany

Challenges in Frequency Compensation by Automated Topology Modification Using Mixed Analytical and Numerical Methods for Design of Fast TIA for HDTV Applications

Xth International Workshop on Symbolic and Numerical Methods, Modeling and Applications to Circuit Design (SM²ACD'08), 07.-08. Oktober 2008, Erfurt, Germany

- [19] T. Rossbach
Topologie und Routing in Sensornetzwerken und Auswirkungen auf die Energieeffizienz
7th Conference of Advanced Science „Sensorsysteme 2008“, 16. - 18. Oktober 2008, Lichtenwalde, Germany

- [20] T. Rossbach, M. Götze
Architekturaspekte beim praktischen Einsatz drahtloser Sensornetze
Internationales Wissenschaftliches Kolloquium IWKM 2008, 06. November 2008, Mittweida, Germany

- [21] T. Elste
Eingebettetes Linux-System auf ARM-Basis als echtzeitfähiger EtherCATMaster
Internationales Wissenschaftliches Kolloquium IWKM 2008, 06. November 2008, Mittweida, Germany

- [22] H. Töpfer
Entwurf heterogener Systeme der Informations- und Kommunikationstechnik
eingeladener Vortrag am Fraunhofer Institut IIS / EAS Dresden, 10. November 2008, Dresden, Germany

- [23] St. Michael
Dynamic Parameter Identification of Pressure Sensors & Beam Structures
MEMS Workshop- FEMTO-ST, 20. November 2008, Besançon, France

- [24] W. Sinn
Von der drahtlosen Sensorvernetzung zur intelligenten Funkstation
2. Dresdner RFID-Symposium Sensorik und RFID, 4.-5. Dezember 2008, Dresden, Germany

Posterpräsentationen / Posters

- [1] B. Bieske ¹, M. Lange ², S. Beyer ²
¹ Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme GmbH, Ilmenau, Germany, ² Atmel GmbH, Heilbronn, Germany,

Test von differentiellen 2,4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee™ ICs: Grenzen und Möglichkeiten
TuZ 2008, 20. Workshop für Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen, 24.-26. Februar 2008, Wien, Austria

- [2] A. Rolapp
Konzeption, Aufbau und Einsatzuntersuchungen einer PMU-Einsteckkarte für ein modulares Testsystem
TuZ 2008, 20. Workshop für Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen, 24.-26. Februar 2008, Wien, Austria

- [3] V. Boos
Strategien zur Initialdimensionierung von analogen Schaltungen
Analog'08, 10. GMM/ITG-Fachtagung, 02.-04. April 2008, Siegen, Germany

- [4] M. Isikhan, A. Richter
CMOS Low Noise Amplifiers for 1.575 GHz GPS Applications
Kooperationsmarkt '08 - edaWorkshop '08, 06. - 07. Mai
2008, Hanover, Germany
- [5] V. Boos, E. Ulicna
IMMS Beiträge in RapidMPSoC
Kooperationsmarkt '08 - edaWorkshop '08, 06. - 07. Mai
2008, Hanover, Germany
- [6] B. Dimov, V. Boos, T. Reich, C. Lang, E. Hennig,
R. Sommer
**Direct Performance Evaluation of Bipolar Transistor Devices for
Analog Circuit Design**
Xth International Workshop on Symbolic and Numerical
Methods, Modeling and Applications to Circuit Design
(SM²ACD'08), 07.-08. Oktober 2008, Erfurt, Germany
- [7] V. Boos
Graphical User Interface for Analog Insydes
Xth International Workshop on Symbolic and Numerical
Methods, Modeling and Applications to Circuit Design
(SM²ACD'08), 07.-08. Oktober 2008, Erfurt, Germany
- [8] B. Dimov, V. Boos, T. Reich, C. Lang, E. Hennig,
R. Sommer
**Optimization of Analog Circuits with Automatic Device Type
Selection**
Xth International Workshop on Symbolic and Numerical
Methods, Modeling and Applications to Circuit Design
(SM²ACD'08), 7.-8. Oktober 2008, Erfurt, Germany
- [9] H. Töpfer
**Entwicklung eines mechanischen Energiewandlers zur autarken
Energieversorgung von Sensornetzwerkknoten**
7th Leibniz Conference of Advanced Science „Sensorsysteme
2008“, 16. - 18. Oktober 2008, Lichtenwalde, Germany
- [10] W. Kattanek
**Einsatz drahtloser Sensornetze zur Gebäude-
automatisierung**
7th Leibniz Conference of Advanced Science „Sensorsysteme
2008“, 16. - 18. Oktober 2008, Lichtenwalde, Germany
- [11] E. Chervakova
Wireless Sensor Networks for Building Automation
Smart Sensing and Context – Adjunct Proceedings of the
Third European Conference EUROSSC 2008, S. 11–12, 29.-
31. Oktober 2008, Zurich, Switzerland
- [12] E. Chervakova, T. Rossbach
Lokalisierungsalgorithmen in drahtlosen Sensornetzwerken
Internationales Wissenschaftliches Kolloquium IWKM 2008,
06. November 2008, Mittweida, Germany

Impressum / Imprint:

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

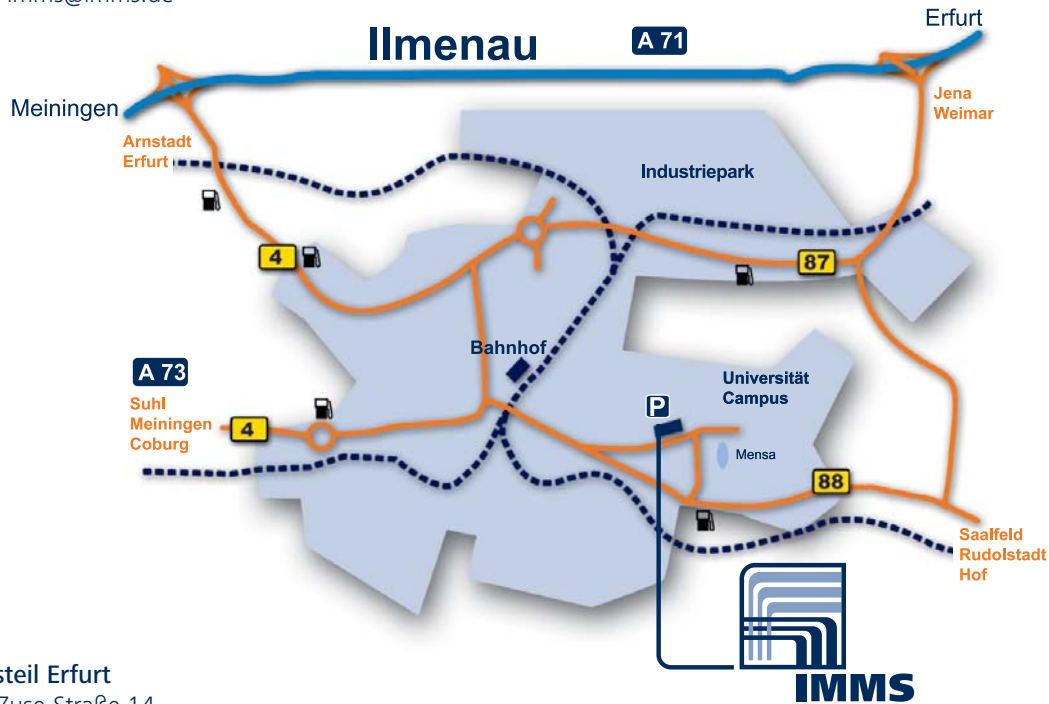
Fon: +49 (3677) 69 55 00
Fax: +49 (3677) 69 55 15
URL: www.imms.de
E-Mail: imms@imms.de

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

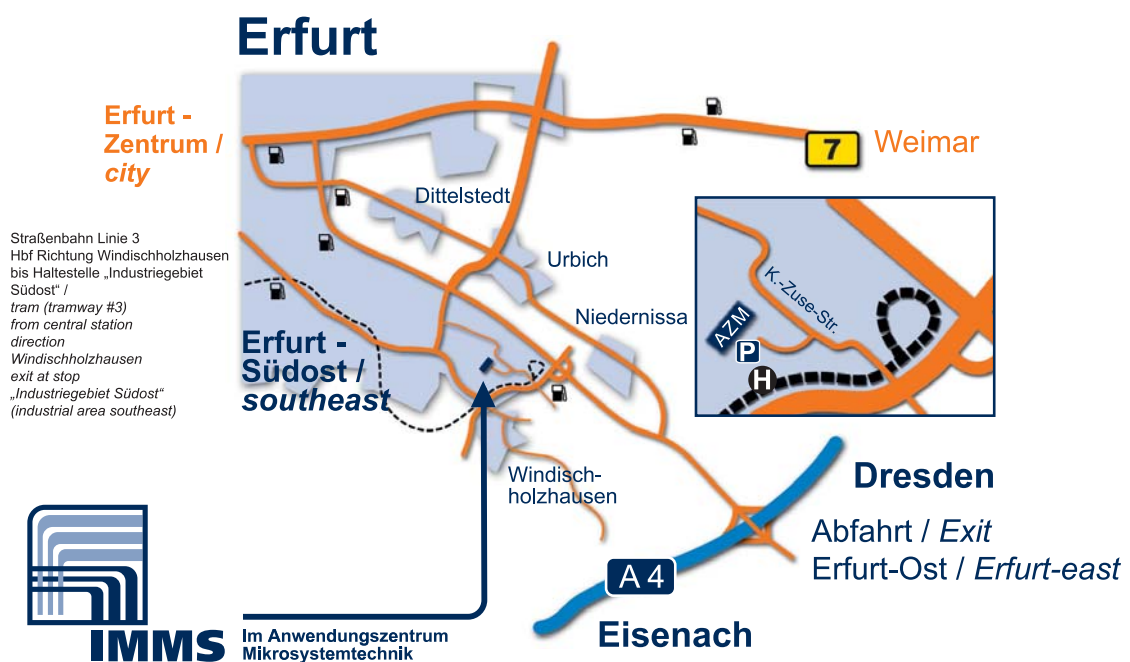
Übersetzung:
Translation:
think global GmbH
Schwedter Str. 9a
D-10119 Berlin
URL: www.think-global.com
E-Mail: contact@think-global.com

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





**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