

Institutsberichte EMK

Institut für Elektromechanische Konstruktionen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

**Institutsbericht
2009 / 2010**



2009
2010

Impressum

Geschäftsführender

Direktor: Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak

Fachgebiet: Mikrotechnik und Elektromechanische Systeme
Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak

Telefon / e-mail: (06151) 16-2696 / schlaak@emk.tu-darmstadt.de
Sekretariat: Frau Monika Brei

Fachgebiet: Mess- und Sensortechnik:

Prof. Dr.-Ing. habil. Roland Werthschützky
Telefon / e-mail: (06151) 16-2296 / werthschuetzky@emk.tu-darmstadt.de
Sekretariat: Frau Jutta Reuter

Postanschrift: Technische Universität Darmstadt
Institut für Elektromechanische Konstruktionen
Merckstraße 25
64283 Darmstadt

Telefax: (06151) 16-4096
Internet: <http://www.institut-emk.de>

Fachgebiet: Lichttechnik:

Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh
Telefon / e-mail: (06151) 16-2742 / khanh@lichttechnik.tu-darmstadt.de
Sekretariat: Frau Dorothe Drechsler
Frau Ingeborg Weber

Postanschrift: Technische Universität Darmstadt
Institut für Elektromechanische Konstruktionen
Fachgebiet Lichttechnik
Hochschulstraße 4a
64289 Darmstadt

Telefax: (06151) 16-5468



Vorwort

Der vorliegende Bericht des Instituts für *Elektromechanische Konstruktionen* am Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Darmstadt, der alle zwei Jahre erscheint, gibt einen Überblick zur geleisteten Arbeit in Lehre und Forschung im Zeitraum 2009 bis 2010.

Die Lehre und Forschung am Institut EMK wird durch die drei Fachgebiete:

- Lichttechnik (LT),
Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh
- Mikrotechnik und Elektromechanische Systeme (M+EMS),
Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak
- Mess- und Sensortechnik (MuST),
Prof. Dr.-Ing. habil. Roland Werthschützky

getragen.

Im Oktober 2007 erfolgte die Umstellung unseres Diplomstudienganges *Elektrotechnik und Informationstechnik* auf die gestuften Bachelor- und Master-Abschlüsse. Unser Institut ist als Vertiefung *Mikro- und Feinwerktechnik (MFT)* im 5. und 6. Semester des Bachelorstudiums *Elektrotechnik und Informationstechnik* vertreten. Im Masterprogramm bieten wir einen eigenständigen *MFT-Master* mit vier Semestern an. Damit ist es uns nahezu vollständig gelungen, im neuen Bachelor/Master-Kernstudiengang *Elektrotechnik und Informationstechnik* die bewährte Struktur und Inhalte der Studienrichtung MFT zu integrieren. Im neuen Studiengang *Mechatronik* sind wir zusätzlich im Bachelor und im Master mit der Vertiefung *Mikromechatronik* vertreten. Darüber hinaus übernahmen wir in der Lehre zusätzliche Lehrveranstaltungen. Hierzu zählen ab Sommersemester 2009 die Vorlesung *Elektrische Messtechnik* (Prof. Werthschützky) und ab Wintersemester 2010/11 die Startvorlesung *Grundlagen der Elektrotechnik I* (Prof. Khanh) (siehe Kapitel 2).

Im Berichtszeitraum erfolgte die Rekonstruktion der Laborräume des Fachgebietes Lichttechnik. Das Fachgebiet hat in den zurückliegenden beiden Jahren eine rasante Entwicklung vollzogen. Gegenwärtig sind hier 14 Wissenschaftliche Mitarbeiter an mehreren Forschungsprojekten tätig.

Aber auch die beiden anderen Fachgebiete; Mikrotechnik und Elektromechanische Systeme (M+EMS) sowie Mess- und Sensortechnik (MuST) setzten ihre erfolgreiche Entwicklung fort. So konnten mehrere Forschungsprojekte vom BMBF, der DFG und der Industrie eingeworben werden. Damit konnten wir unsere in den letzten Jahren gewachsene Zahl an Wissenschaftlichen Mitarbeitern sogar weiter ausbauen (siehe Kapitel 3).

Die Ergebnisse von Forschung und Lehre werden auch durch die erstmalige englischsprachige Herausgabe des Fachbuches „Electromechanical Systems in Microtechnology and Mechatronics“ im Springer Verlag unterstrichen.

Ein besonderes Ereignis im Institutsleben war das Festkolloquium für unsere beiden Jubilare, die Professoren Heinrich Buschmann und Bernhard Cramer, am 8. Oktober 2010. Beide vollendeten in diesem Jahr ihr 80. Lebensjahr. Sie prägten in den 1970er und 1980er Jahren die Entwicklung unseres Instituts. Den beiden „Urgesteinen“ von EMK gilt unser Dank für ihr tatkräftiges und erfolgreiches Wirken zum Gedeihen des Instituts.

Im Berichtszeitraum konnten die Herren Leidner, Lotz und Matysek, im Fachgebiet M+EMS und Freiding im Fachgebiet Lichttechnik erfolgreich ihre Dissertationen abschließen (siehe Kapitel 5). Unseren frisch gebackenen Doktoren wünschen wir einen erfolgreichen Start in Ihren neuen Tätigkeitsfeldern.

Am 27. 04. 2010 konnte Herr Ass.-Prof. P. Bodrogi im Fachgebiet Lichttechnik seine Habilitation vollenden. Wir gratulieren und wünschen ihm weiterhin viel Erfolg.

Ihre Tätigkeit als Wissenschaftliche Mitarbeiter nahmen die Damen Geßner, Krause und Müller sowie die Herren Carrasco, Haus, Karsten, Mößinger, Müller, Opitz, Polin, Dr. rer. nat. Pott, Quednau, Rossner, Söllner, Trin, Winterstein und Yapici am Institut auf. Als technische Mitarbeiterin für das Reinraumlabor Mikrotechnik haben wir 2010 Frau Riemer eingestellt. Wir wünschen allen „Neuzugängen“ ein erfolgreiches Wirken und hoffen, dass sie sich bei EMK möglichst gut geborgen fühlen.

Liebe Freunde des Instituts,

die weitere erfolgreiche Tätigkeit des Instituts für Elektromechanische Konstruktionen in den Jahren 2009 und 2010 war nur durch die außerordentlich engagierte Tätigkeit aller Institutsmitglieder möglich. Besonders wertvoll für uns war dabei die stete Unterstützung durch unsere ehemaligen Absolventen, unsere industriellen Forschungspartner, unsere Förderer innerhalb und außerhalb der Universität und vor allem durch unseren EMKlub sowie dem Verein der Freunde der Lichttechnik. Dafür gebührt Ihnen allen unser Dank, verbunden mit dem Wunsch nach anhaltend enger und erfolgreicher Zusammenarbeit.

Darmstadt, im Dezember 2010

Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak

Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh

Prof. Dr.-Ing. habil. Roland Werthschützky



Inhaltsverzeichnis

1	Das Institut Elektromechanische Konstruktionen - EMK	1
1.1	Mitarbeiter des Instituts	3
2	Lehrveranstaltungen	9
2.1	Vorlesungen, Übungen, Praktika im Studiengang etit	13
2.2	Vorlesungen, Übungen, Praktika der Studienrichtung MFT	13
2.2.1	Pflichtfächer	13
2.2.2	Wahlpflichtfächer	14
2.3	Fachexkursionen	15
2.4	Studien- und Bachelorarbeiten	15
2.5	Diplom- und Masterarbeiten	15
2.6	Lehrveranstaltungen für andere Studiengänge	16
3	Forschung	17
3.1	Fachgebiet Mikrotechnik und Elektromechanische Systeme M+EMS (Prof. Schlaak)	17
3.1.1	Übersicht Forschungsschwerpunkte	17
3.1.2	Mikroelektromechanische Systeme (MEMS)	21
3.1.3	Dielektrische Elastomeraktoren (DEA)	36
3.1.4	Robotik	46
3.2	Fachgebiet Mess- und Sensortechnik (MuST) (Prof. Werthschützky)	56
3.2.1	Übersicht der Forschungsschwerpunkte	56
3.2.2	MEMS-Sensorik	59
3.2.3	Haptik	72
3.2.4	Sensor-Signalverarbeitung	77
3.2.5	HapCath - Haptisches Assistenzsystem für Katheterisierungen	83
3.3	Gemeinsame Projekte	85
3.3.1	AdRIA - Adaptronics Research Innovation and Application	85
3.3.2	Adaptive Kniegelenk-Orthese mit Leistungsabgabe zur Mobilitätsunterstützung älterer Menschen	86
3.4	Fachgebiet Lichttechnik	89
3.4.1	Übersicht	89



3.4.2	Verkehrs- und Kfz-Lichttechnik	94
3.4.3	Energie - Energieeffizienz	98
3.4.4	Augenphysiologie - Farbwahrnehmung	100
3.4.5	Optoelektronik - Technische Optik	106
4	Laboratorien und Ausrüstung	111
4.1	Reinraumlabor Mikrotechnik (Klasse 1000 bis 10000)	111
4.2	Labor für dielektrische Polymeraktoren	114
4.3	Mikromontagelabor	115
4.4	Klimatisierte Präzisionsmesslabore (Klasse 100 000)	115
4.5	Weitere Präzisionsmessplätze	116
4.6	Haptik-Messplatz	116
4.7	Chemielabor	117
4.8	Feinmechanische Werkstatt	117
4.9	Erneuerung der Praktikumsausstattung durch Bereitstellung zusätzlicher Mittel	118
4.10	Lichttechnisches Labor	119
4.11	August-Euler-Flugplatz	122
5	Dissertationen	123
5.1	Entwurf und tiefenlithographische Realisierung mikrostrukturierter Schrittantriebe	123
5.2	Untersuchungen zur spektralen Empfindlichkeit des menschlichen Auges im mesopischen Bereich	126
5.3	Kontaktphysikalische Simulation von Schichtsystemen	127
5.4	Dielektrische Elastomerstapelaktoren für ein peristaltisches Fluidfördersystem	129
5.5	Dielektrische Elastomeraktoren in Multilayer-Technologie für taktile Displays	131
5.6	Optimierung moderner visueller Technologien (Habilitation)	134
6	Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten	137
6.1	Studien- und Diplomarbeiten	137
6.1.1	Studienarbeiten	137
6.1.2	Diplomarbeiten	141
6.2	Bachelor- und Masterarbeiten	145
6.2.1	Bachelorarbeiten	145
6.2.2	Masterarbeiten	145
7	Veröffentlichungen und Vorträge	147

8	Mitarbeit in Gremien	173
8.1	Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh	173
8.2	Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak	173
8.3	Prof. Dr.-Ing. habil. Roland Werthschützky	174
9	Wissenschaftlicher Austausch	175
9.1	Weiterbildungsseminar piezoresistive Silizium-Sensoren	175
9.2	Weiterbildungsseminare am Fachgebiet Lichttechnik	176
9.3	mst-Netzwerk Rhein-Main e. V.	177
9.4	GMM-Workshop „Technologien und Werkstoffe der Mikrosystem- und Nanotechnik“, 10.-11. Mai 2010, Darmstadt	181
10	Besondere Ereignisse	183
10.1	Festkolloquium aus Anlass der 80. Geburtstage der Professoren Buschmann und Cramer	183
10.2	DFB 2010 - Darmstädter Fachtagung für Beleuchtung	184
10.3	ISAL 2009	186
10.4	Blended Learning am Institut EMK: „Einführung in die Elektrotechnik“ unterstützt durch digitales Lehrangebot	186
10.5	Projektseminar PEM I 2008/2009: Es geht glatt!	190
10.6	Projektseminar PEM I 2009/2010: Trennung leicht gemacht!	191
10.7	Umbau des Lichttechnik-Labors	192
11	Fördervereine	195
11.1	EMKlub	195
11.2	Freunde des Fachgebiets Lichttechnik der TU Darmstadt e. V.	199
12	Statistik	201
12.1	Studentenzahlen	201
12.2	Studentische Arbeiten	202
12.3	Betreuung von Praktika und Vorlesungen	203
12.4	Publikationen des Instituts für EMK von 2000 bis 2010	204
13	Anhang	205
13.1	Vorlesungen, Übungen, Praktika im Studiengang etit	205
13.2	Vorlesungen, Übungen, Praktika der Studienrichtung MFT	206
13.2.1	Pflichtfächer	206
13.2.2	Wahlpflichtfächer	209
13.3	Lehrveranstaltungen für andere Studiengänge	215



1 Das Institut Elektromechanische Konstruktionen - EMK

Das Institut für Elektromechanische Konstruktionen wurde 1963 an der Fakultät Elektrotechnik der Technischen Hochschule Darmstadt gegründet. Wesentliches Ziel der Institutsgründung war es, den damaligen außergewöhnlichen Mangel der feinerwerktechnisch orientierten Industrie an qualifiziertem Nachwuchs zu mindern, eine Zielstellung, die auch heute hoch aktuell ist. Im Mittelpunkt der Lehre, die Herr Prof. Dr.-Ing. C. Brader als Inhaber des ersten Lehrstuhls vermittelte, standen die Grundlagen, Prinzipien und Methoden der Elektromechanik und des Konstruierens, erprobt an exemplarischen praktischen Beispielen.

Der engen Verbindung von Theorie und Praxis wird auch heute die Lehre und Forschung am Institut gerecht. Komplexe Systeme der Mikro- und Feinerwerktechnik bestimmen zunehmend unseren Alltag, wie die elektronische Fahrzeugstabilisierung, Drucker, Fax und Scanner im Büro, Sensoren und Messsysteme in der Medizin- und Automatisierungstechnik. Gerade das Zusammenwirken von Elektronik, Mechanik, Optik und Informationstechnik schafft Innovationen unter Einsatz neuer Technologien wie der Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie. Ein weiterer wichtiger Trend ist der immer stärkere Einzug von neuartigen LED-Leuchten im Alltag verbunden mit dem Vorteil der Energieeinsparung. Wir betrachten daher die Lehre und Forschung am Institut als Synergie aus verschiedenen Fachgebieten mit dem Schwerpunkt der methodisch orientierten Anwendung beim Entwurf, der Konstruktion und der Realisierung von Bauteilen, Geräten und Systemen der Mikro- und Feinerwerktechnik.

Studenten und Studentinnen haben im Bachelorstudium die Möglichkeit, die Vertiefung *Mikro- und Feinerwerktechnik (MFT)* zu wählen. Darauf aufbauend ist die Wahl des Masterstudiums *Mikro- und Feinerwerktechnik* möglich. Neben den bewährten Pflichtfächern Projektseminare I bis IV zur *Praktischen Entwicklungsmethodik PEM*, Vorlesung und Übung zum Entwurf *Elektromechanischer Systeme*, Vorlesung und Laborpraktikum zu *Technologien der Mikro- und Feinerwerktechnik* und Vorlesung und Übung zu *Grundlagen der Konstruktion* wurde die traditionell große Wahlmöglichkeit beibehalten.

Das Studium in der Studienrichtung *Mikro- und Feinerwerktechnik* ist fachübergreifend, anwendungsorientiert und vermittelt solide Grundlagen und Fachkenntnisse

der Mikro- und Feinwerktechnik, der Mess- und Sensortechnik, der angewandten Optik, der Nachrichten- und Kommunikationstechnik, der Elektronik sowie der Automatisierungstechnik. Typische Anwendungsfelder bilden die Entwicklung von Positioniersystemen, Mikroaktoren, Kleinmotoren, Sensoren und Sensorsystemen für mechanische Größen und direkt gekoppelte Sensor-Aktor-Systemen für industrielle und medizintechnische Anwendungen sowie neuartige LED-Beleuchtungselemente für den Einsatz im PKW und zur Straßenbeleuchtung.

Als Besonderheit werden in der Studienrichtung MFT Projektseminare zur *Praktischen Entwicklungsmethodik (PEM)* angeboten. Die Studierenden bearbeiten in einem kleinen Team mit Begleitung durch einen Wissenschaftlichen Mitarbeiter eine gemeinsame Aufgabenstellung. Sie erlernen hierbei methodisches Vorgehen sowie das Anwenden von Kreativitätstechniken bei der Entwicklung eines elektromechanischen Gerätes. Unterstützt wird das Seminar durch eine zu Beginn begleitende Vorlesung zur Entwicklungsmethodik (PEM I). Mit viel Eigeninitiative und mit Hilfe der feinmechanischen Werkstatt realisieren die Studenten ihren Geräteentwurf. Sie sammeln hierbei - quasi als Nebenprodukt - praktische Erfahrungen im Umgang mit CAD-Tools, in der Schaltungsentwicklung sowie der Messtechnik. In einem Zwischen- und Abschlussvortrag erläutern die Teams ihre Vorgehensweise und die Ergebnisse. So lernen sie, sich und ihre Arbeit zu präsentieren. Resultat der Teamarbeit ist in der Regel ein funktionsfähiges Gerät. Auf jeden Fall aber sind die Studenten um einiges an Praxiserfahrung reicher geworden.

Die Forschung am Institut ist auf Themen aus den Gebieten der Mikrosystemtechnik, der Mikroaktoren, der Mess- und Sensortechnik, der Mikrofertigungsverfahren sowie der Lichttechnik und Lichtwahrnehmung konzentriert. Dabei stellt die Medizintechnik einen besonderen Schwerpunkt dar.

Die Forschungsergebnisse finden Anwendung in unterschiedlichen industriellen Bereichen, vor allem aber in der Automatisierungs-, Kraftfahrzeug-, Medizin- und Fertigungstechnik.

Besonders erfolgreich waren die vergangenen beiden Jahre vor allem im Einwerben von Drittmitteln. So konnten mehrere neue Forschungsprojekte für die Grundlagenforschung und Medizintechnik eingeworben und gestartet werden (siehe Kapitel 3) Damit übersteigt die Zahl der Drittmittelbeschäftigten deutlich die Zahl der Landesstellen. Am Institut sind gegenwärtig mehr als 40 Wissenschaftliche Mitarbeiter tätig.

Bei etwa 50 Mitarbeitern und ca. 70 Studierenden im Hauptstudium ist das Institut von seiner Größe noch überschaubar. Ergebnisse unserer Forschungsarbeiten werden bei unseren regelmäßigen Institutsrundgängen und Institutskolloquien vorgestellt.

1.1 Mitarbeiter des Instituts

Professoren:

Schlaak, Helmut F.	Prof. Dr.-Ing. (Geschäftsführender Direktor)
Khanh, Tran Quoc	Prof. Dr.-Ing. habil.
Werthschützky, Roland	Prof. Dr.-Ing. habil.
Cramer, Bernhard	Prof. Dr.-Ing. (seit 01. 10. 1995 im Ruhestand)
Schmidt-Clausen, Hans-Joachim	Prof. Dr.-Ing. (seit 01. 04. 2001 im Ruhestand)
Weißmantel, Heinz	Prof. Dr.-Ing. (seit 01. 10. 1999 im Ruhestand)
Buschmann, Heinrich	Prof. Dr.-Ing. (seit 01. 02. 1989 im Ruhestand)

Sekretariate:

Brei, Monika	
Reuter, Jutta	
Weber, Ingeborg	1)
Drechsler, Dorothe	1)

Akademischer Rat:

Ilgen, Hans Joachim	Dr. phil. nat.
---------------------	----------------

Wissenschaftliche Mitarbeiter:

Böll, Marvin	Dipl.-Ing.	1)	
Brückner, Stefan	Dipl.-Ing.		
Flittner, Klaus	Dipl.-Ing.	1)	
Greiner, Felix	Dipl.-Ing.		
Geßner, Friederike	Dipl.-Ing.	1)	(ab 04. 10. 2010)
Groh, Andreas	Dipl.-Ing.	1)	
Haferkemper, Nils	Dipl.-Ing.		
Hatzfeld, Christian	Dipl.-Ing.	1)	
Haus, Henry	Dipl.-Ing.	1)	(ab 15. 04. 2010)
Heinickel, Patrick	Dipl.-Ing.	1)	
Karsten, Roman	Dipl.-Ing.	1)	(ab 17. 08. 2009)
Kassner, Sebastian	Dipl.-Ing.	1)	
Kober, Timo	Dipl.-Ing.	1)	
Kohlstedt, Mark	Dipl.-Phys.	1)	
Krause, Nathalie	Dipl.-Ing.	1)	(ab 01. 03. 2010)
Kuhn, Thomas	Dipl.-Ing.	1)	
Lotz, Peter	Dr.-Ing.		
Matysek, Marc	Dr.-Ing.	1)	(ab 01. 08. 2010 beurlaubt)
Meiß, Thorsten	Dipl.-Ing.	1)	
Mößinger, Holger	Dipl.-Ing.	1)	(ab 01. 11. 2010)
Müller, Nina	Dipl.-Phys.	1)	(ab 01. 07. 2010)
Müller, Roman	Dipl.-Ing.	1)	(ab 25. 10. 2010)
Opitz, Thomas	Dipl.-Ing.		(ab 18. 05. 2009)
Pepler, Wjatscheslaw	Dipl.-Ing.	1)	
Polin, Dmitrij	Dipl.-Ing.		(ab 01. 11. 2009)
Pott, Peter	Dr. rer. nat.	1)	(ab 01. 04. 2009)
Quednau, Sebastian	Dipl.-Ing.		(ab 01. 05. 2010)
Rafflenbeul, Lutz	Dipl.-Ing.	1)	
Rausch, Jacqueline	Dipl.-Ing.	1)	
Röse, Andreas	Dipl.-Ing.	1)	(bis 30. 06. 2010)
Rossner, Tim	Dipl.-Ing.		(ab 05. 05. 2009)
Schiller, Christoph	Dipl.-Wirtsch.-Ing.		
Schlosser, Michael	Dipl.-Ing.	1)	
Sindlinger, Stephanie	Dipl.-Ing.		(bis 31. 03. 2009)
Söllner, Stefan	Dipl.-Ing.		(ab 01. 06. 2009)

Sprute, Jan Holger	Dipl.-Wirtsch.-Ing.	1)	(bis 31. 01. 2010)
Staab, Matthias	Dipl.-Ing.		
Stöhr, Ingmar	Dipl.-Ing.	1)	
Weibel, Thomas	Dipl.-Ing.		(bis 14. 09. 2009)
Werner, Reinhard	Dipl.-Ing.		(bis 31. 12. 2010)
Winterstein, Thomas	Dipl.-Ing.		(ab 01. 02. 2010)
Wohlleber, Cédric	Dipl.-Ing.		(ab 01. 03. 2009 beurlaubt)
Yapici, Orcun	Dipl.-Ing.		(ab 15. 09. 2010)

Forschungsstipendiaten:

Bodrogi, Peter	Ass. Prof. Dr.		
Carrasco, Alvaro	Dipl.-Ing.	1)	(ab 15. 10. 2010)
Kohlstedt, Anika	Dipl. Phys.		
Trinh, Quang Vinh	M.Sc. Eng. Automation		(ab 01. 11. 2009)

Technischer Leiter:

Jochem, Bernhard	Dipl.-Ing.
------------------	------------

Elektronische Werkstatt und Bauelemente:

Spika, Reiner

Mikrotechnik-Labor:

Rudat, Thomas	
Riemer, Darina	(ab 17. 05. 2010)

Auszubildende Informationstechnik Berufsakademie Mannheim:

Lessmann, Christof

Mechanische Werkstatt im Hans-Busch-Institut:

(Institutszuordnung zu jeweils 50 %)

Heil, Helfried	Werkstattmeister	(bis 31.03.2009)
Brunner, Werner	Werkstattmeister	
Creter, Walter		
Horch, Helmut		
Fröse, Viktor		
Müller, Walter		

Lehrbeauftragte:

Blume, Jochen	Dr.-Ing. Continental Automotive GmbH, Babenhausen
Kern, Thorsten	Dr.-Ing. Continental Automotive GmbH, Babenhausen
Hoppach, Elmar	Dr.-Ing. Ixetic GmbH, Bad Homburg

¹ Drittmittelstelle

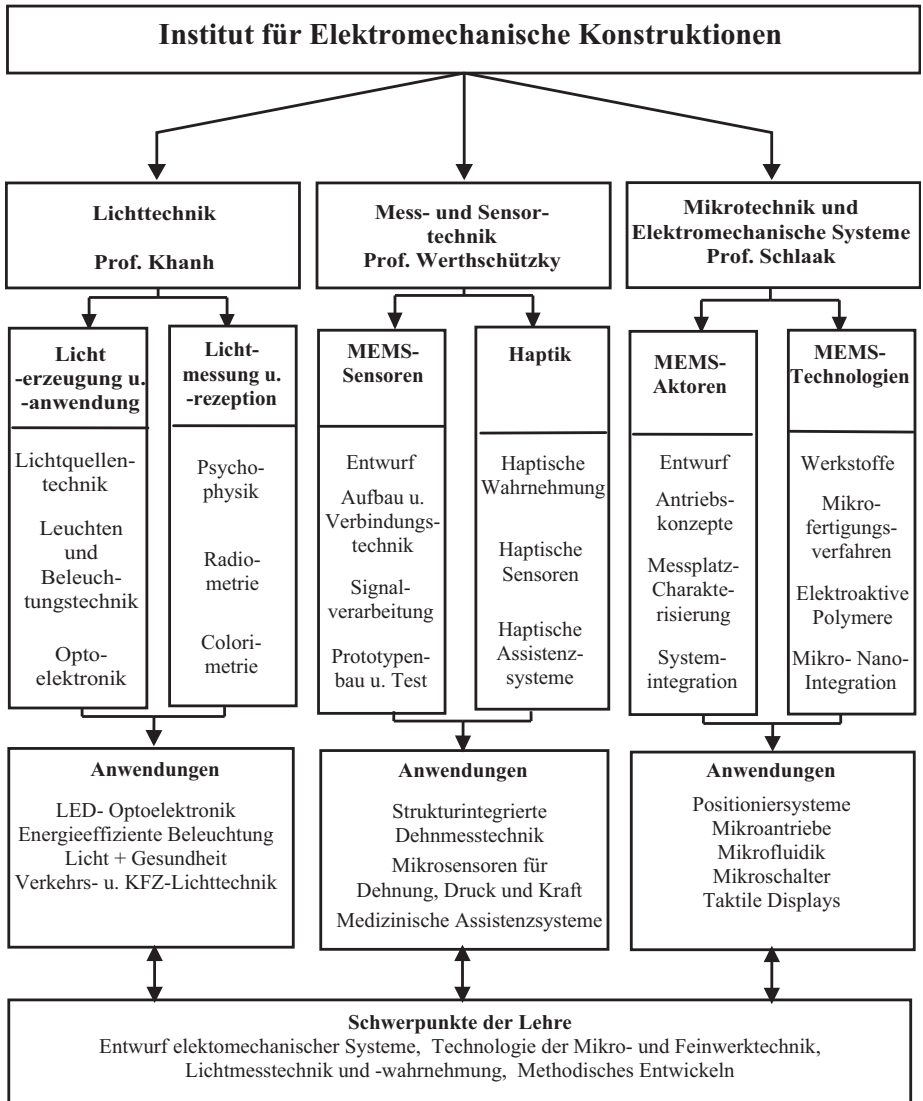


Abbildung 1.1: Forschungsschwerpunkte am Institut



Abbildung 1.2: Die Mitarbeiter/innen des Instituts während der Klausurtagung 2010 in Bodenrod/Taunus

2 Lehrveranstaltungen

Studienrichtung MFT im Bachelor- und Master-Studiengang etit

Die Studienrichtung Mikro- und Feinwerktechnik MFT ist im Bachelor-Studiengang Elektrotechnik und Informationstechnik (etit) als Vertiefung ab dem 5. Semester und als eigenständiger Master ab dem 7. Semester vertreten.

Ausgehend von den Grundlagen zum Entwurf elektromechanischer und lichtoptischer Systeme werden als „Werkzeuge“ die fachlichen Aspekte der Technologien der Mikro- und Feinwerktechnik sowie der Lichttechnik, der Mikrosystemtechnik und der Grundlagen der Konstruktion vermittelt. Darauf aufbauend werden Vertiefungsvorlesungen und Seminare zu den Anwendungen von elektromechanischen Systemen in Form von Geräten, Baugruppen und Bauelementen angeboten. Besondere Schwerpunkte bilden dabei Aktoren und Sensoren, Baugruppen der Lichttechnik, Messsysteme in der Medizintechnik.

Bachelor etit | Vertiefung MFT

Bachelor etit - Vertiefung MFT		Σ 180 CP
Pflichtveranstaltungen		Σ 136 CP
Allgemeine Pflichtfächer Bachelor etit		Σ 105 CP
Veranstaltungen der Vertiefung MFT		Σ 31 CP
	Elektrische Messtechnik	4 CP
	Elektromechanische Systeme I	4 CP
	Technologie der Mikro- und Feinwerktechnik I	4 CP
	Einführung in die Mechanik	6 CP
	Grundlagen der Konstruktion	4 CP
	Werkstoffe der Elektrotechnik	3 CP
	Proseminar etit der Vertiefung MFT	2 CP
	Praktische Entwicklungsmethodik I	2 CP
	Praktische Entwicklungsmethodik II	2 CP
Wahlveranstaltungen		Σ 32 CP
	Auswahl aus Katalog Elektrotechnische Grundlagen	Σ 10 CP
	Auswahl aus Katalog Technische Schlüsselkompetenzen	Σ 15 CP
	Pflicht für MFT: Systemdynamik und Regelungstechnik I	5 CP
	Auswahl aus Katalog Gesellschaft, Sprachen, Umwelt	Σ 7 CP
Abschlussarbeit		Σ 12 CP
	Bachelorarbeit	12 CP

MFT PEM erstreckt sich als integrierte Lehrveranstaltung über den Bachelor und den Master etit der Vertiefung MFT und schafft eine sinnvolle Verknüpfung der beiden Studienabschnitte. Dabei wird das erste Projektseminar (Praktische Entwicklungsmethodik I) durch eine begleitende Veranstaltung (Proseminar etit der Vertiefung MFT) ergänzt.

Master etit | Vertiefung MFT

Master etit - Vertiefung MFT		Σ 120 CP
Pflichtveranstaltungen		Σ 28 CP
	Mess- und Sensortechnik	3 CP
	Elektromechanische Systeme II	4 CP
	Praktikum Elektromechanische Systeme	3 CP
	Technologie der Mikro- und Feinwerktechnik II	4 CP
	Mikrosystemtechnik I	4 CP
	Optoelektronik	3 CP
	Fachexkursion MFT	1 CP
	Praktische Entwicklungsmethodik III	3 CP
	Praktische Entwicklungsmethodik IV	3 CP
Wahlveranstaltungen		Σ 62 CP
	Auswahl aus den Katalogen MFT I bis MFT III	Σ 32 CP
	Katalog MFT I: Mikrosystemtechnik	4 CP
	Katalog MFT II: Mess- und Sensortechnik	4 CP
	Katalog MFT III: Lichttechnik	4 CP
	darin enthalten: Praktikum Produktentwicklung I + II	5+5 CP
	Auswahl aus Katalog Ingenieur- und Naturwissenschaften	Σ 20 CP
	Auswahl aus Katalog Gesellschaft, Sprachen, Umwelt	Σ 10 CP
Abschlussarbeit		Σ 30 CP
	Masterarbeit	30 CP

Unsere Studienberatung hält folgende Modellstudienpläne bereit: Mikrosystemtechnik, Mess- und Sensortechnik, Lichttechnik, Produktentwicklung und Medizintechnik.

Weitere Informationen auf www.mft-studieren.de

Abbildung 2.1: MFT-Vertiefungsfächer im etit-Bachelor und Master

Im Bachelor werden im 5. und 6. Semester als Pflichtveranstaltungen die MFT-Grundvorlesungen und das erste und zweite Projektseminar angeboten.

Im MFT-Master-Studium sind die restlichen MFT-Grundfächer und das 3. und 4. PEM eingeordnet. Im Wahlbereich können die Studenten 32 Credit-Punkte aus den Vertiefungsblöcken „Mikrosystemtechnik“ „Mess- und Sensortechnik“ und „Lichttechnik“ wählen. Ergänzt werden diese Vertiefungen durch die Wahl weiterer Veranstaltungen aus den Gebieten der Ingenieur- und Naturwissenschaften sowie weiterer Fächer aus dem Katalog „Gesellschaft, Sprachen und Umwelt“. Zur Erleichterung der Auswahl bieten wir den Studierenden fünf Modellstudienpläne: „Mikrosystemtechnik“, „Mess- und Sensortechnik“, „Lichttechnik“, „Produktentwicklung“ und „Medizintechnik“ an. Die Anfertigung einer Bachelor-Arbeit im 6. Semester und der halbjährigen Master-Arbeit beenden das Bachelor- bzw. Master-Studium.

Die Projektseminare als Besonderheit der Lehre

Eine Darmstädter Besonderheit stellt die seit 40 Jahren am Institut EMK vermittelte spezielle Form von Projektseminaren dar. In diesen Seminaren zur *Praktischen Entwicklungsmethodik* (PEM) werden jeweils über ein Semester in Teams von 3 bis 5 Studenten gemeinsam mit dem betreuenden wissenschaftlichen Mitarbeiter konkrete praktische Entwicklungsaufgaben aus dem Bereich der Mikro- und Feinwerktechnik bearbeitet. Dabei stehen folgende Hauptzielstellungen im Vordergrund

- Trainieren von Teamarbeit an anspruchsvollen praktischen Aufgabenstellungen,
- Aneignung von methodisch-systematischen Vorgehen bei der Bearbeitung von Entwicklungsaufgaben,
- Entwickeln von methodischer Kompetenz, wie Kreativität, Gestaltungswillen und Entscheidungsfähigkeit,
- Entwickeln von sozialer Kompetenz, wie Kommunikationsfähigkeit, Kooperationsfähigkeit und Krisenfestigkeit.

Im Rahmen des ersten Projektseminars PEM I erfolgt parallel zur Bearbeitung einer für alle Gruppen gemeinsamen Aufgabenstellung die Vermittlung der theoretischen Grundlagen zur Entwicklungsmethodik als begleitende Vorlesung.

Die Vertiefungsrichtung Mikromechatronik im Master-Studiengang Mechatronik

Zusätzlich gestalten wir den Studienschwerpunkt „Micromechatronic Systems“ (Mikromechatronik) im Master-Studiengang des Mechatronik, dessen Veranstaltungen nachfolgend in Abbildung 2.2 aufgelistet sind.

Pflichtfächer	
<ul style="list-style-type: none"> • Technische Fluidsysteme • Modellbildung und Simulation • Elektromechanische Systeme I oder Mikrosystemtechnik I¹⁾ • Praktikum Echtzeitprogrammierung von Mikrocontrollern • Systemdynamik und Regelungstechnik II • Produktentwicklung • Digitale Regelungstechnik 	
Advanced Design Projects (ADP)	
<ul style="list-style-type: none"> • ADP-MFT (FB 18) Projektseminar MFT Laufzeit 2 Semester • ADP-MB (FB 16) Auswahl aus: Fluidsystemtechnik, Virtuelle Produktentwicklung, Maschinenakustik, Print-Technologien, Kunststofftechnik • ADP-INF (FB 20) Auswahl aus: Robotik-Projektpraktikum, Fahrzeugtechnik-Projekt, Formal fundierte Softwaretechnik 	
Wahlpflichtfächer im Vertiefungsbereich etit & MB	
<ul style="list-style-type: none"> • Elektromechanische Systeme II oder Mikrosystemtechnik II²⁾ (FB18) • Technologie der Mikro- und Feinwerktechnik I (FB18) • Technologie der Mikro- und Feinwerktechnik II (FB18) • Analog Integrated Circuit Design (FB18) • Optoelektronik (FB18) • Sensorprinzipien (FB18) • Sensorelektronik (FB18) • Elektronische Sensoren (FB18) • Computer Aided Design for Integrated Circuits (FB18) • HDI: Verilog und VHDL (FB18) 	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie hochintegrierter Schaltungen (FB18) • Nano- und Mikrofluidik (FB16) • Mikroverfahrenstechnik (FB16) • Printed Electronics (FB16) • Fluidenergiemaschinen (FB16) • Experimentelle Strukturdynamik (FB16) • Grundlagen der Adaptionik (FB16) • EMS-Praktikum (FB18) • Advanced Integrated Circuit Design Lab (FB18) • Werkstoffkunde und -prüfung - Praktikum (FB16)
Wahlfächer im Wahlbereich Inf. Ing. Nat.	
<ul style="list-style-type: none"> • Statistik I (FB4) • Einführung in die Numerische Mathematik (FB4) • Leistungselektronik I (FB18) • Biomedizintechnik (FB18) • Technik und Einsatz von Mikrorechnern (FB18) • Mikroprozessorsysteme (FB18) • Technische Optik (FB18) 	<ul style="list-style-type: none"> • Nanomaterialien für Katalyse und Sensorik (FB11) • Lecture on Thin Film Technology (FB11) • Bildverarbeitung (FB20) • Einführung in Computer Microsystems (FB20) • Eingebettete Systeme I (FB20) • Systementwurf mit Mikroprozessoren (FB20)
<i>Weitere Fächer nach Maßgabe der Ausführungsbestimmungen</i>	
Wahlfächer im Bereich Studium Generale	
<ul style="list-style-type: none"> • Management für Ingenieure (FB18) • Einführung in BWL (FB1) • Innovation Management (FB18) • Philosophische Aspekte des Maschinenbaus (FB2) 	<ul style="list-style-type: none"> • Computerphilosophie (FB2) • Einführung in das Recht (FB1) (für Hörer anderer FB) • Einführung in das Softwarerecht (FB1) (für Hörer anderer Fachbereiche)
<p>¹⁾ Wenn im Bachelorstudium schon belegt, ist die jeweils weiterführende Vorlesung (II) zu wählen.</p> <p>²⁾ Es ist das jeweils nicht im Pflichtbereich gewählte Fach zu belegen.</p>	

Abbildung 2.2: Vertiefung „Micromechatronic Systems“ im Master-Studiengang Mechatronik

Im Anhang sind alle durch das Institut getragenen Vorlesungen, Übungen und Praktika überblicksartig zusammengestellt. Außerdem sind hier in Kurzform auch die wesentlichen Inhalte der Lehrveranstaltungen angegeben.

Neue Lehrveranstaltungen:

Elektrische Messtechnik

Seit Sommersemester 2009 übernahm das Institut EMK (Prof. Werthschützky) die bisher von Prof. Pfeifer gehaltene Pflichtvorlesung „Elektrische Messtechnik“ (EMT). Die wöchentlich zwei Stunden Vorlesung werden durch eine einstündige Übung ergänzt. Ausgewählte Schwerpunkte; z. B. *Grundlagen des Messens, analoges Messen von Spannungen und Strömen, Messung von Impedanzen, Messverstärker und AD- und DA-Signalwandler*; wurden in überarbeiteter Form von der bisherigen Vorlesung von Prof. Pfeifer übernommen. In Anlehnung an das Lehrbuch „Elektrische Messtechnik“ von Prof. Lerch von der Universität Erlangen/Nürnberg wurde vor allem die digitale Messung und Signalverarbeitung; z. B. *digitales Multimeter, Digital-Speicheroszilloskop, Zeit- und Frequenzmessung, Filter, Satellitennavigation, rechnergestützte Messdatenerfassung*; neu gestaltet. Das Kapitel Messfehler/Messunsicherheit wurde auf Basis der eigenen praktischen messtechnischen Erfahrungen neu bearbeitet. Neben der wöchentlichen Übung wird die Vorlesung durch das Praktikum „Elektrische Messtechnik“ ergänzt, das bereits ab 2003 durch das Fachgebiet Mess- und Sensortechnik für den Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik als Pflichtfach neu aufgebaut und betreut wurde.

Medizinrobotik

Seit dem Wintersemester 2010/11 bietet das Institut EMK eine Vorlesung zum Thema Medizinrobotik an. Dr. Peter P. Pott schafft hier einen Überblick über die medizinischen Einsatzfelder sowie die im Operationssaal eingesetzten Technologien. Dabei ist es das Ziel, den Studierenden nicht nur einen Teil des relevanten medizintechnischen Vokabulars zu vermitteln, sondern auch ein Gefühl für die technischen Herausforderungen, die das Arbeitsfeld im Operationssaal mit sich bringt, zu schaffen. Hier geht es neben der Roboterkinematik, der Steuerung und der spezifischen Sensorik nicht zuletzt auch um Sicherheitsaspekte, die chirurgischen Arbeitsabläufe und die Hygiene. Als Teil der Prüfungsleistung erarbeiten die Studierenden aus technischer Sicht Vorträge zu einzelnen Medizinrobotern und präsentieren diese am Ende des Semesters.

2.1 Vorlesungen, Übungen, Praktika im Studiengang etit

- Elektrische Messtechnik (SS 2+1)
(Werthschützky, Hatzfeld)
- Praktikum Messtechnik (etit III) (SS 0+2)
(Werthschützky, Kassner)

2.2 Vorlesungen, Übungen, Praktika der Studienrichtung MFT

2.2.1 Pflichtfächer

Vorlesungen:

- Elektromechanische Systeme I (mit Übung) und II (WS 2+1)
(Werthschützky, Rausch, Meiß) (SS 2+0)
- Technologien der Mikro- und Feinwerktechnik I, II (mit Übung) (SS 2+1)
(Schlaak, Röse, Lotz, Haus) (WS 2+1)
- Mess- und Sensortechnik (MT I) (SS 2+0)
(auch Pflichtfach im Studiengang Mechatronik)
(Werthschützky, Opitz)
- Entwicklungsmethodik (PEM I) (WS 1+1)
(Schlaak, Werthschützky, Staab)

Projektseminare:

- Praktische Entwicklungsmethodik (PEM II bis IV) (SS 0+2)
Bearbeitung praktischer Themenstellungen in Gruppen
und Betreuung durch Wissenschaftliche Mitarbeiter (WS 0+2)

Praktika:

- Elektromechanische Systeme (WS 0+3)
(Schlaak, Werthschützky, Ilgen)
- Produktentwicklung (WS 0+3)
(Schlaak, Werthschützky, Ilgen)

2.2.2 Wahlpflichtfächer

Vorlesungen:

- Mikrosystemtechnik I (mit Übung) (WS 2+1)
(Schlaak, Flittner, Schlosser)
- Bauelemente der Feinwerktechnik (WS 2+0)
(Blume)
- Medizinrobotik (WS 2+0)
(Pott, Schlaak)
- Biomedizinische Technik (SS 2+0)
(Kern)
- Sensorprinzipien (MT II) (WS 2+0)
(Werthschützky)
- Sensorelektronik (MT III) (SS 1+1)
(Werthschützky, Rafflenbeul)
- Elektrische Kleinantriebe (mit Übung) (SS 2+1)
(Hoppach, Schlaak)
- Management für Ingenieure in der Elektrotechnik (WS 2+0)
(Schlaak, Kohlstedt)
- Montage- und recyclinggerechtes Konstruieren (SS 1+1)
(Weißmantel, als Blockveranstaltung)
- Lichttechnik I und II (SS 2+2)
(Khanh, Kuhn, Groh) (WS 2+0)
- Optoelektronik (WS 2+0)
(Khanh, Bodrogi, Krause)
- Technische Optik (SS 2+0)
(Khanh, Haferkemper)

Seminare:

- Institutsrundgang (WS 0+2)
Vorstellen der laufenden Studien- und Diplom- bzw. (SS 0+2)
Bachelor- und Masterarbeiten durch Kurzvorträge
(3 Minuten) mit anschließender Diskussion in den
studentischen Laborräumen: jeweils am Donnerstag 10.00 Uhr.
Am ersten Donnerstag im Monat in englischer Sprache.
- Institutskolloquium (WS 0+2)
Präsentation der Studien- und Diplom- bzw. Bachelor- (SS 0+2)
und Masterarbeiten durch einen Vortrag (20 Minuten)
mit Diskussion sowie Fachvorträge von Kooperations-
partnern aus der Industrie und Instituten: jeweils am
Donnerstag 11.00 Uhr, Raum S3|06 146.
- Mikrosystemtechnik II (SS 2+0)
(Schlaak, Staab)

2.3 Fachexkursionen

- Berlin 22.06. - 26.06.2009
(Khanh/Kuhn)
- Freiburg 14.06. - 18.06.2010
(Werthschützky/Ilgen)

2.4 Studien- und Bachelorarbeiten

Im Berichtszeitraum wurden 37 Studien- und Bachelorarbeiten bearbeitet und erfolgreich abgeschlossen. Die *Themen* der Arbeiten und Betreuer sind im Kapitel 6.1 zusammengestellt. Der *Bezug* zu den Forschungsthemen ist aus Kapitel 3 ersichtlich.

2.5 Diplom- und Masterarbeiten

Im Berichtszeitraum schlossen 22 Studierende mit der Diplom- bzw. Masterarbeit ihr Studium ab. Die Themen, Bearbeiter und Betreuer der Diplomarbeiten sind im Kapitel 6.2 zusammengestellt. Der Bezug zu den aktuellen Forschungsarbeiten ist aus Kapitel 3 ersichtlich.

2.6 Lehrveranstaltungen für andere Studiengänge

- Einführung in die Elektrotechnik mit Repetitorium und Übung (SS 4+2)
für Maschinenbauer und andere Studiengänge
(Schlaak, Greiner, Winterstein)

Wir wünschen unseren Absolventen einen erfolgreichen Start ins Berufsleben.

3 Forschung

3.1 Fachgebiet Mikrotechnik und Elektromechanische Systeme M+EMS (Prof. Schlaak)

3.1.1 Übersicht Forschungsschwerpunkte

Elektromechanische Systeme dienen der Wandlung von elektrischen in mechanische Größen, deren Anwendungen heutzutage ein breites Spektrum aufweisen. Entsprechend der Entwicklung der Mikroelektronik seit mehreren Jahrzehnten unterliegen elektromechanische Systeme einem Wandel in der Produktionstechnik. Anstelle des seriellen Fügens vieler zuvor durch mechanische Bearbeitung geformter Einzelteile werden die funktionsbestimmenden Bauteile und Komponenten durch mikrotechnische Fertigungsverfahren hergestellt. Damit geht gleichzeitig ein Produktwandel zu höherer Leistungsfähigkeit und Miniaturisierung einher.

Aufgrund der Miniaturisierung sind mikroelektromechanische Systeme (MEMS) über die Sensorik hinaus in viele Anwendungen wie Antriebe, Robotik, Fluidik, Optik bis hin zu Hochfrequenzanwendungen (RF-MEMS) vorgedrungen. Zunehmend werden mehrere Komponenten und Subsysteme zu kompletten Mikrosystemen integriert, wobei beim Entwurf verschiedene physikalische Wandlungsprinzipien berücksichtigt werden müssen. Beispielsweise ist ein elektromechanischer Antrieb nicht mehr wie in der Makrowelt allein durch ein elektromagnetisches Prinzip realisierbar, sondern elektrostatische, piezoelektrische, elektrothermische sowie fluidische Systeme sind ebenso zu untersuchen.

Gegenwärtig sind folgende Entwicklungstrends in der Mikrotechnik absehbar:

- Integrierte Mikro-Elektromechanische Systeme (MEMS) etablieren sich mit Hilfe der Silizium-Oberflächentechnologie und der Tiefentrockenätztechnik (DRIE) vorwiegend auf dem Gebiet der Sensorik.
- Eine zunehmende Durchdringung der Mikrotechnik erfolgt in verschiedenen Anwendungsbereichen der Aktorik, Fluidik und Optik.

- Kostengünstige Fertigungstechnologien für relativ großflächige Komponenten in Submikrometer-Präzision werden eingeführt, z. B. Mikroabformverfahren, Low-Cost-LIGA (Metallgalvanik, Tiefenlithographie)
- Ergänzung der Mikrotechnik durch Präzisionsbearbeitungsverfahren wie Laserbearbeitung, Mikrozerspanung sowie Aufbau- und Verbindungstechnik
- Neben Silizium etablieren sich Werkstoffe wie Glas, Keramik und Kunststoffe in der Mikrotechnik.
- Die Kunststofftechnologie wird in großer Breite für die Mikrotechnik erschlossen.
- Piezoelektrische Antriebe zeigen eine hohe Leistungsdichte und verbreiten sich in vielen Anwendungen nach den massenhaften Pilotanwendungen in der Automobiltechnik.
- Zunehmende Integration von Objekten der Nanotechnologie in Mikrosysteme (Mikro-Nano-Integration)

Aus den ersten 2004 fertig gestellten Dissertationen haben sich inzwischen eigenständige Forschungsgebiete entwickelt, die konsequent zu Kompetenzteams ausgebaut werden konnten. Die Mikropositionierung auf der Basis monolithischer kinematischer Strukturen (Dissertation U. Jungnickel) fand ihre Fortsetzung im vom BMBF geförderten Projekt INKOMAN (Intrakorporaler Manipulator), das von 2005 bis 2008 mit 4 wissenschaftlichen und einem technischen Mitarbeiter gefördert wurde. Die Piezoaktomatik wird im Rahmen der LOEWE-Initiative der Landesregierung (Landesoffensive zur Entwicklung wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz) seit 2008 im dazu gegründeten Adaptronik-Zentrum AdRIA weitergeführt. In einem von der DFG bewilligten Paketantrag wird zusammen mit zwei anderen Fachgebieten der TU Darmstadt und der Universitätsklinik Heidelberg an einer adaptiven Kniegelenk-Orthese geforscht.

Die dielektrischen Elastomeraktoren (DEA) mit der bisher weltweit einmaligen Multilayertechnologie für elektrostatische Festkörperaktoren mit elastischem Dielektrikum werden in ihrer Technologie und ihren Anwendungen in einer eigenen Arbeitsgruppe erforscht. Diese Arbeiten gingen aus der Dissertation von M. Jungmann hervor.

Mit dem Bau des Reinraumlabor für Mikrotechnik konnten seit 2002 die Mikrofertigungstechnologien zur Tiefenlithographie und Galvanoabformung in einer Vielzahl von Projekten weiterentwickelt und in diversen Anwendungen wie Schrittmotoren (Dissertation D. Eicher), Relais, RF-MEMS und mikrofluidischen Systemen demonstriert werden. Durch die Vernetzung mit regionalen Partnern aus dem mst-Netzwerk Rhein-Main e. V. gelang es, zwei BMBF-Förderprojekte (Laufzeit 2011-2013) zur

Mikro-Nano-Integration einzuwerben, so dass sich daraus ein neues Arbeitsgebiet eröffnet. Zur Vorbereitung wurde ein einjähriges wissenschaftliches Vorprojekt (2010-2011) INSIGHT (Integrationsorientierte Verfahren zur Herstellung hybrider Mikrosysteme) zur Erarbeitung der technologischen Grundlagen mit drei Stellen bewilligt.

Nach der Entwicklung der letzten 5 Jahre und dem starken personellen Aufbau wurden die Forschungsarbeiten im Fachgebiet „Mikrotechnik und Elektromechanische Systeme (M+EMS)“ in die drei Arbeitsgebiete, d.h. Kompetenzteams Mikroelektromechanische Systeme (MEMS), Dielektrische Elastomeraktoren (DEA) und Robotik mit ihren jeweiligen Anwendungen gegliedert (Abbildung 3.1).

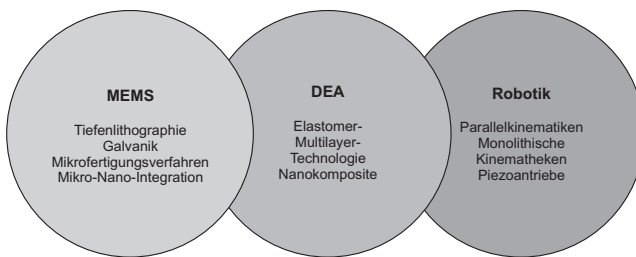


Abbildung 3.1: Technologische Ausrichtung der Arbeitsgebiete in der Forschung am Fachgebiet „Mikrotechnik und Elektromechanische Systeme“

Zu diesen Arbeitsgebieten gehören die im Folgenden aufgeführten Forschungsthemen:

- **Mikroelektromechanische Systeme (MEMS)**
 - Bistabile Mikrorelais (M. Staab)
 - Galvanische Mikrostrukturierung - BMBF-Projekt INFUNK (M. Schlosser)
 - RF-MEMS - Mikroaktorisch abstimmbare Mikrowellenkomponenten-Graduiertenkolleg TICMO (DFG) (A. Kohlstedt)
 - Mikro-Nano-Integration:
 - * Metallische Nano- und Mikrodrähte für die Inertialsensorik (F. Greiner)
 - * Einsatz metallischer Nanodrahtarrays in der Gassensorik (S. Quednau)
 - Mikrostrukturierung mit galvanisch abgeschiedenem Nickel BMBF-Projekt INSIGHT (Th. Winterstein)

-
- **Dielektrische Elastomeraktoren (DEA)**, Leitung: Dr. P. Lotz
 - Multilayertechnologie für elektrostatische Hochleistungsaktoren mit elastischen Dielektrika (M. Matysek, P. Lotz, K. Fittner)
 - Darstellung taktiler Informationen durch dielektrische Elastomeraktoren (Dissertation M. Matysek)
 - Peristaltische Fluidförderung mit dielektrischen Polymeraktoren (Dissertation P. Lotz)
 - Ventildantriebe zur Gasflusssteuerung - BMBF-Projekt INFUNK „Integration neuartiger Funktions- und Konstruktionswerkstoffe“ (K. Flittner)
 - Integrierte Sensor-Aktor-Systeme auf der Basis dielektrischer Polymeraktoren zur Erfassung und Kompensation örtlich verteilter Schwingungen - LOEWE-Zentrum Adaptronik (R. Karsten)

 - **Robotik**, Leitung Dr. P. Pott
 - Miniaturisierte intrakorporale kinematische Strukturen für die minimalinvasive Chirurgie (A. Röse)
 - Dynamisches Weißlicht-Interferometer für den Mikro- und Nanobereich - BMBF-Verbundprojekt DyNaMo (M. Kohlstedt)
 - LOEWE-Zentrum Adaptronik - AdRIA:
 - * Piezoaktorik mit intrinsischer Kraftmessung (P. Pott)
 - * Wimpernbasierte Piezoaktorik (P. Pott, A. Carrasco)
 - Aktorik und Kinematik für Kniegelenk-Orthese - DFG-Paketantrag „Adaptive Kniegelenk-Orthese“ (P. Pott, R. Müller)

3.1.2 Mikroelektromechanische Systeme (MEMS)

Bistabile Mikrorelais-Matrix für Telekommunikationsanwendungen

Bearbeiter: Matthias Staab

Bearbeitungszeitraum: 18.06.2007 - 15.06.2012

Auf Basis von verschiedenen Forschungsergebnissen zu Mikrorelais wird ein neues Konzept mit wesentlich gesteigertem Leistungsumfang entwickelt und als Labormuster realisiert. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Optimierung der MEMS-Aktorik in Bezug auf große Stellwege ($100\mu\text{m}$) und große Kräfte (10mN). Abschließend soll das entwickelte Mikrorelais in eine Schaltmatrix für Telekommunikationsanwendungen integriert werden.

Bistabile Mikrorelais-Matrix

Die Motivation zum Forschungsthema wird im Folgenden stichpunktartig dargestellt:

- Bistabil: Eliminierung der externen Energieaufnahme im Ruhezustand.
- Mikro: Verringerung der Baugröße, Einsparung von Kosten durch Batch-Fertigung, Senken von Montagekosten, Verringerung von Materialkosten.
- Relais: Galvanische Trennung von Last- und Steuerkreis, niedriger On-Widerstand, unendlicher Off-Widerstand, hoher Umsatz auf dem Relaisweltmarkt (4,66 Mrd. \$ in 2001)

Mögliche Anwendungsgebiete für Mikrorelais finden sich vor allem in der Telekommunikationsbranche. So können sie als Umschalter bei Funktionstests von Linecards (DSL & ISDN) oder zur Rekonfiguration von Telefonleitungen zwischen Serviceprovider und Hausanschluss in Form einer Schaltmatrix eingesetzt werden.

Der Stand der Technik weist über hundert MEMS-Relaiskonzepte auf. Kommerziell ist allerdings bisher keine Signalrelaisvariante erhältlich. Schwachstellen dieser existierenden Konzepte sind vor allem die geringe Stromtragfähigkeit, die schlechte Isolationsfestigkeit, der hohe Kontaktwiderstand und der komplexe Fertigungsprozess.

Das am Institut EMK entwickelte bistabile Mikrorelais weist diese Nachteile nicht mehr auf. Die Bistabilität wird durch einen magnetostatischen Haltemechanismus erzeugt, die eigentliche Aktuierung erfolgt dabei über zwei elektrothermische Aktoren aus dem Negativresist SU-8. Auf diese Weise werden die in Tabelle 3.1 dargestellten Leistungsdaten erreicht. Weitere Teilprobleme wie Gehäusung, Mikroschaltkontakte und Langzeitstabilität werden nur am Rande betrachtet. Als Demonstrator

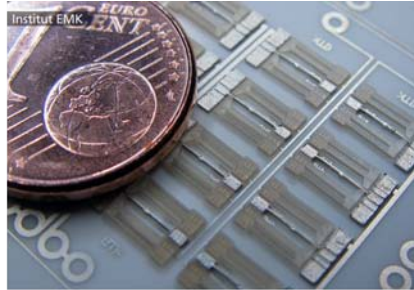
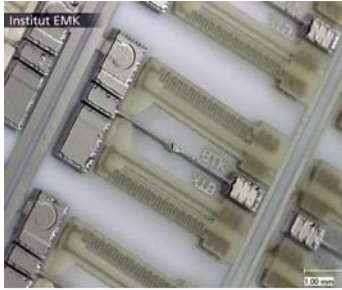


Abbildung 3.2: Bistabiles Mikrorelais (links) und Mikrorelais-Matrix im Vergleich mit 1-Cent-Stück (rechts)

soll das entwickelte bistabile MEMS-Relais in eine Matrixanordnung überführt werden.

Tabelle 3.1: Wichtige Leistungsdaten des bistabilen Mikrorelais

Stromtragfähigkeit	> 1 A
Kontaktwiderstand (Ni/Ni)	87 mOhm
Kontaktwiderstand (Au/Au)	34 mOhm
Leistungsaufnahme (Schalten)	ca. 200 mW
Isolationsfestigkeit (50 Hz)	330 V

Um die Mikroaktorik und letztlich das gesamte Mikrorelais zu charakterisieren, wird parallel die notwendige Messtechnik entwickelt. Sie umfasst zwei Systeme:

Motion-Analyzer (MEMS-Analyzer)

Der Motion-Analyzer ist in der Lage, mit Hilfe von Bildverarbeitung Mikroaktoren statisch und dynamisch zu untersuchen (vgl. Tabelle 3.2). Dabei werden zum aktuellen Projektstand laterale Auslenkungen und Kräfte von Aktoren und die zugehörigen elektrischen Größen aufgezeichnet.

Tabelle 3.2: Wichtige Leistungsdaten des Motion-Analyzers

Messfeldgröße	2,4 x 2,4 - 11,7 x 11,7 mm ²
Wiederholgenauigkeit	< 30 nm
Auflösungsvermögen	< 1,15 µm
Betriebsfrequenzbereich	0 bzw. 100 mHz - 11 kHz
Messkraft	< 1000 mN

Dynamische 4-Kanal-Stromquelle

Mit Hilfe der 4-Kanal-Stromquelle (vgl. Tabelle 3.3) ist es möglich, stromgesteuerte Aktoren dynamisch anzuregen und ihr mechanisches Verhalten z. B. mit dem Motion-Analyzer zu charakterisieren. Bei dem entstandenen Aufbau handelt es sich um ein Tischgerät, das über eine LabVIEW-Software bedienbar ist.

Tabelle 3.3: Wichtige Leistungsdaten der dynamischen 4-Kanal-Stromquelle

Maximale Spannung	24 V
Maximaler Strom pro Kanal	1000 mA
Betriebsfrequenzbereich	0 bzw. 100 mHz - 25 Hz

RF MEMS - Mikroaktorisch abstimmbare Mikrowellenkomponenten (Stipendium im Rahmen des Graduiertenkollegs TICMO)

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak

Bearbeiter: Anika Kohlstedt

Bearbeitungszeitraum: 01.09.2008 - 31.08.2011

Abstimmbare Mikrowellenkomponenten

Anwendungsfelder von steuerbaren, integrierbaren Komponenten der Mikrowellentechnik und Optik (TICMO = Tunable Integrated Components in Microwave Technology and Optics) finden sich sowohl in drahtlosen Sensorsystemen mit elektromagnetischer Kopplung, als auch in Funkkommunikationssystemen, sowie optischen Kommunikationssystemen und -netzen. Zur Realisierung steuerbarer Komponenten für den Hochfrequenzbereich werden im Rahmen des Graduiertenkollegs verschiedene Technologien verfolgt. Die Steuerbarkeit von elektrischen, magnetischen oder mikromechanischen Eigenschaften über äußere Spannung, Strom oder Temperatur soll zum einen mittels Funktionsmaterialien mit veränderbaren physikalischen Eigenschaften (nichtlineare keramische Dielektrika, Flüssigkristalle, Metamaterialien) und zum anderen mittels mikroaktorischer Techniken (MEMS) erreicht werden.

Mikromechanische abstimmbare Hohlwellenleiter

Die Größe von Wellenleiterstrukturen steht in direktem Zusammenhang mit der verwendeten Wellenlänge. So bilden Frequenzen ab 110 GHz den Übergang in den Submillimeterbereich. Das sogenannte W-Band (75 GHz - 110 GHz) ist in Radar-, Sensor- und Spektroskopieanwendungen von besonderem Interesse. Hohlwellenleiter gewährleisten hierbei eine nahezu verlustfreie Transmission.

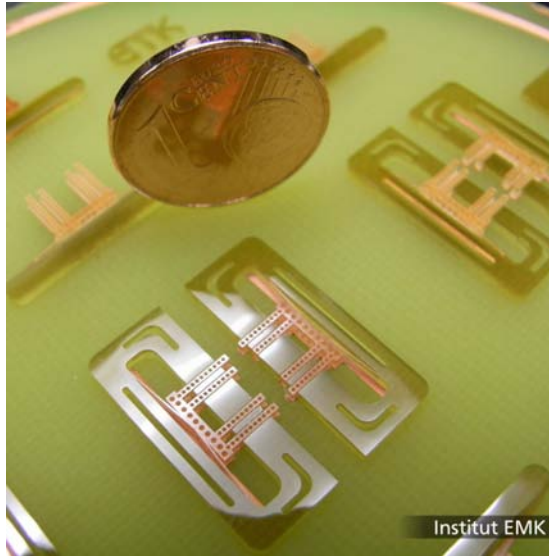


Abbildung 3.3: Erster Demonstrator des beschriebenen Filterdesigns, noch ohne Cu-Beschichtung und Abdeckung. Die gesamte Komponente hat eine Höhe von 1,27 mm.

Bei Erreichen des Submillimeterbereiches kann die Herstellung mit Hilfe mikro-technischer Prozesse erfolgen. Für die Umsetzung wird die am Institut vorhandene Erfahrung in der Realisierung verschiedener Aktuierungsmechanismen ausgenutzt und weiterentwickelt. Hier sind zum einen die elektrothermischen Aktoren auf SU8-Basis zu nennen. SU8 hat sich nach ersten Tests als langzeitstabiler Konstruktionswerkstoff erwiesen und wurde bereits in früheren Arbeiten am Institut als Aktormaterial für die Realisierung einer elektrothermisch angetriebenen Mikropositionierplattform verwendet.

Für die erste Generation von Hohlleitern wird von einer Arbeitsfrequenz von 110 GHz ausgegangen. Diese bestimmt die Abmessungen des Hohlleiters. Die genormten Rechteckhohlleiter für den Frequenzbereich 73,8 GHz - 112 GHz (R900 / WR10) haben die Kantenlängen $a = 2,54$ mm und $b = 1,27$ mm. Diese bilden einen Kompromiss aus einem möglichst großen Abstand zur Grenzfrequenz und der Abgrenzung zur Anregung weiterer Wellentypen neben der magnetischen Grundmode. In der mikrotechnischen Umsetzung wird die Rahmenstruktur für den Hohlleiter durch SU8-Strukturierung realisiert, welche von innen mit Kupfer metallisiert wird.

Hierbei ist die Abhängigkeit der Dämpfungskonstante des Leiters vom Leitungswiderstand des Wandmaterials und seiner Oberflächenbeschaffenheit zu beachten und zu optimieren. Zudem wird eine mess- und anwendungsspezifische Einspeisung in den Hohlleiterkanal realisiert werden.

Die erste am Institut realisierte Hohlleiterkomponente ist ein steuerbares Irisfilter. Das Filter wurde für eine Frequenz von 94 GHz ausgelegt und besteht aus 3 Resonatorbereichen zwischen 4 Blendenpaaren in einem Hohlleiter mit Standard-W10-Abmessungen. Die Steuerbarkeit wird über das Verschieben der Blenden in den Hohlleiterkanal ermöglicht. Der Aktuierungsmechanismus in Form von elektrothermischen Kniehebelaktoren aus SU8 ist hinter den Hohlleiterwänden in die SU8-Rahmenstruktur eingebettet (siehe Abbildung 3.3). Die Rahmenstruktur ist direkt mit dem FR4-Substrat verbunden. Der Kniehebelaktor und die damit verbundenen Blenden sind freitragend und wurden über einen Kupferopferschichtprozess gefertigt. Das Blendensystem ist mit Ätzlöchern versehen, um eine schnellere Entfernung des Kupfers zu ermöglichen.

FEM-Simulationen des Aktorsystems zeigen bei einer Temperaturänderung von 40 K einen Stellweg der Blenden um $100\mu\text{m}$. Das Filter erreicht so eine Frequenzänderung um 7 GHz mit einem minimalen Reflexionsfaktor von -24 dB (500 MHz Bandbreite) und einem Transmissionsfaktor von -1 dB (Ergebnisse aus 3D Feldsimulationen).

Galvanische Mikrostrukturierung für mikrotechnische Elemente - BMBF Projekt INFUNK

Bearbeiter: Michael Schlosser

Bearbeitungszeitraum: 01.11.2008 - 30.04.2011

Miniaturisiertes Gasventilsystem

Im BMBF-Förderprojekt INFUNK - Integration neuartiger Funktions- und Konstruktionswerkstoffe und deren Anwendung in einem miniaturisierten Ventilsystem - wird ein Gasventilsystem entwickelt und als Labormuster aufgebaut (siehe Abbildung 3.4). Mehrere dieser miniaturisierten Gasbrennereinheiten können nebeneinander zu einem Modul angeordnet werden. Die individuell schaltbaren Ventile ermöglichen es, eine Brennfläche je nach Anwendungs- oder Lastfall an- und auszuschalten und damit mit optimalem Energieeinsatz dynamisch wechselnde Flächen zu beheizen.

Bei dem Demonstrator übernimmt ein keramischer Ventilsitz die Funktion der thermischen Isolation zur Brennkammer hin. Der Ventilsitz wird in Zusammenarbeit mit

dem Fachgebiet Disperse Feststoffe unter der Leitung von Prof. Riedel aus polymerabgeleiteten Keramiken hergestellt. Das aktive Ventilelement ist durch einen dielektrischen Elastomeraktor realisiert (siehe Abschnitt 3.1.3). Über eine zusätzliche Federstruktur aus Nickel wird im nicht aktuierten Zustand das Ventil geschlossen gehalten. Mit der direkten Kombination von mikrotechnischen Herstellungsverfahren und des am Institut etablierten Schleuderprozesses für dielektrische Elastomeraktoren ist die Fertigung komplexer miniaturisierter kinematischer Strukturen kostengünstig möglich.

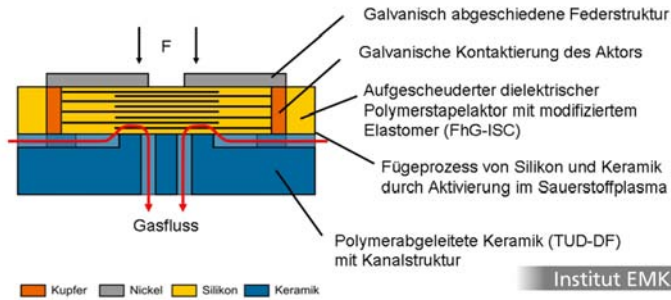


Abbildung 3.4: Schematischer Querschnitt des miniaturisierten Gasventils

Teilaspekt - Galvanische Federstrukturen aus Nickel

Ein Schwerpunkt in diesem Förderprojekt liegt auf der Kombination und Integration von mikrotechnischen Fertigungsverfahren, wie photolithographische Strukturierung und der galvanischen Abscheidung von Funktionsstrukturen. Galvanisch abgeschiedenes Nickel aus Sulfamatbädern weist günstige mechanische Eigenschaften für Federstrukturen auf. Zusätzlich lassen sich durch die Anpassung der Abscheideparameter gezielt mechanische Vorspannungen in das Material einbringen. Die hieraus resultierende Krümmung dieser Strukturen ermöglicht es, mechanische Haltekräfte während der Fertigung in das Mikrosystem einzubringen. Diese Federkraft lässt sich direkt auf die dielektrischen Elastomeraktoren aufbringen. Im Ventilbetrieb ist hierdurch ein geschlossenes Ventil im nicht ausgelenkten Aktorzustand gewährleistet. Die benötigte Federkonstante dieser Nickelfederstrukturen lässt sich über Prozessparameter wie Stromdichte, Pulsform und Zeit in weiten Bereichen einstellen. Abbildung 3.5 zeigt eine Ansicht eines Einzelventils.

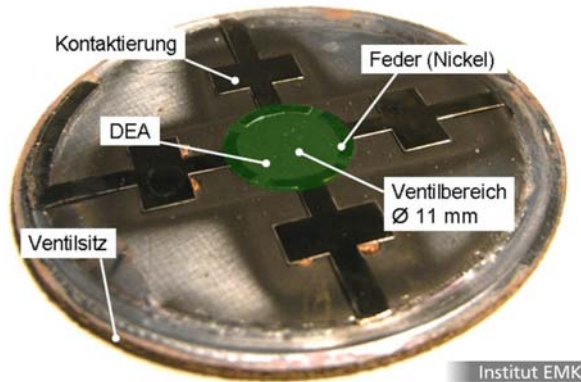


Abbildung 3.5: Im Batchverfahren hergestelltes Gasventil

Teilaspekt - Formenbau

Für die Fertigung des Brennermoduls wird ein mit Kanälen und Öffnungen versehener, keramischer Ventilsitz benötigt. Zur Abformung der Keramiken wird ein Master benötigt, der durch einen Galvanoformungsschritt hergestellt ist. Für die Herstellung wird der im UV-Bereich strukturierbare Negativresist EPON SU-8 verwendet. Dieser wird bisher zum Aufbau von mikromechanischen Strukturen am Institut eingesetzt. Mittels photolithographischer Strukturierung können hiermit Funktionselemente mit hohem Aspektverhältnis direkt hergestellt werden. Weiter kann der Photoresist auch als Formelement für eine elektrochemische Abformung eingesetzt werden. Vollständig vernetzter SU-8 weist eine hohe chemische Resistenz auf, die das Entfernen und damit ein Entformen stark erschwert. In diesem Projekt sind angepasste Prozessparameter ermittelt worden, die einen geringeren Vernetzungsgrad von SU-8 erreichen. Hierdurch ist es möglich, SU-8 mit einfachen nasschemischen Methoden zu entfernen. Signifikante Auswirkungen auf den Vernetzungsgrad haben unter anderem Belichtungs-dosis, Heizzeiten und die zugehörige Temperatur. Mit den angepassten Parametern lassen sich kostengünstig hochgenaue metallische Mikroformteile aus Nickel herstellen, die für die Abformung der keramischen Strukturen dienen (siehe Abbildung 3.6).

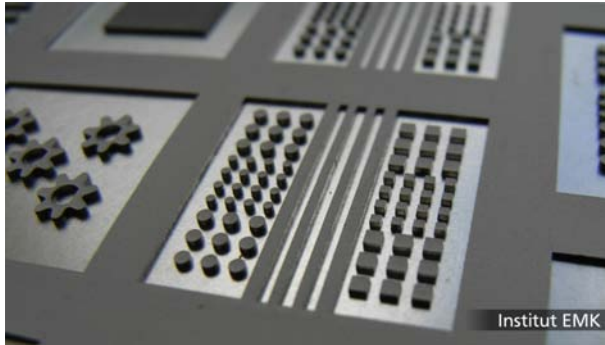


Abbildung 3.6: Galvanisch gefertigte Teststruktur aus Nickel
(Strukturhöhe: $600\ \mu\text{m}$)

Senkrechte metallische Nano- und Mikrodrähte als Federelemente in MEMS

Bearbeiter: Felix Greiner

Bearbeitungszeitraum: 01.01.2009 - 30.04.2011

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung mechanischer Eigenschaften von galvanisch abgeschiedenen, zylindrischen Metalldrähten mit Durchmessern vom Nano- bis in den Mikrometerbereich. Dazu entstehen Technologiedemonstratoren mit senkrechten, metallischen Drähten als Federelemente in Inertialsensoren. Sie bieten die Möglichkeit, multiaxial Sensor- und Aktorfunktionen in Bauteilen mit minimierter Basisfläche zu realisieren.

Pilz- und Quader-Strukturen ermöglichen die differentiell kapazitive Detektion lateraler Beschleunigungen (vgl. Abbildung 3.7). Wirkt eine horizontale Beschleunigung auf die Pilz-Struktur, reagieren die träge Inertialmasse und der elastische Draht mit einer relativen Auslenkung des Pilzkopfs gegenüber den Elektroden. Damit ändert sich die Kapazität zwischen der Mittelelektrode - der Pilz-Struktur - und den beiden seitlichen Gegenelektroden. Die Quader-Struktur reagiert auf laterale Beschleunigungen mit Verkippen der Balkenwaagen-ähnlichen Struktur und daher mit Abstandsänderungen zwischen der Mittelelektrode und den beiden Gegenelektroden.

Die Drahtbiegung in der dazu orthogonalen Ebene lässt sich analog einsetzen und erlaubt damit eine zweiachsige Beschleunigungsmessung mit einer Mittelelektrode und vier Gegenelektroden. Aktuiert man die Inertialmasse mit zwei gegenüberliegenden Elektroden elektrostatisch und bringt sie so zum Pendeln, führt eine

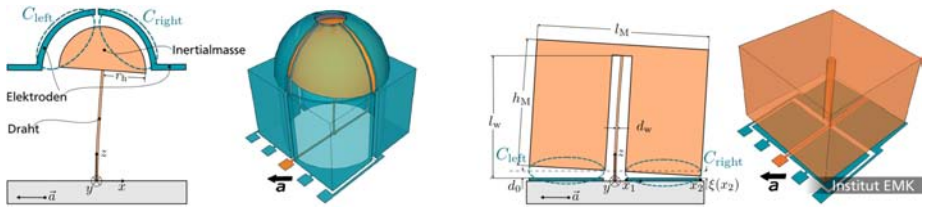


Abbildung 3.7: Neuartige multiaxiale Inertialsensoren mit Pilzstrukturen (links) und Quaderstrukturen (rechts).

Drehrate um die senkrechte Achse zu einer Taumelbewegung der Inertialmasse. Die dynamische Auslenkung senkrecht zur angetriebenen Richtung ist dann wieder differentiell kapazitiv detektierbar.

Fertigungsverfahren

Die Kombination von Lithographie mit großem Höhen-zu-Weiten-Verhältnis (Aspektverhältnis) und der anschließenden elektrochemischen Abformung erlaubt die Herstellung von senkrechten metallischen Drähten, Masselementen und konstruktiven Strukturen in einem Fertigungsschritt. Angefangen bei der Ionenstrahl-Lithographie über die Röntgenstrahl-Lithographie bis hin zur UV-Lithographie im Mikrotechniklabor des Institut EMK - jeweils gefolgt von galvanischer Abscheidung - lassen sich Nano- und Mikro-Drähte funktional integrieren (vgl. Abbildung 3.8).

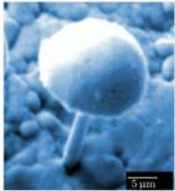
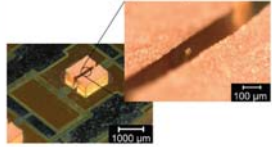
Ion-Track Lithographie Galvanoformung (IT-LiG)	X-Ray Lithographie Galvanoformung (XR-LiG)	UV Lithographie Galvanoformung (UV-LiG)
 <ul style="list-style-type: none"> • $d_w = 0.1 - 1 \mu\text{m}$ • $l_w = 30 \mu\text{m}$ • $d_h = 30 - 100 \mu\text{m}$ • $C_0 \approx \Delta C \approx 10 \text{ fF}$ • Goldstrukturen realisiert • Systemintegration im Gang • Kooperation mit GSI 	 <ul style="list-style-type: none"> • $d_w = 1 - 10 \mu\text{m}$ • $l_w = 50 - 100 \mu\text{m}$ • $C_0 \approx \Delta C \approx 0.08 - 5 \text{ pF}$ • $l_M = 200 - 1800 \mu\text{m}$ • KNMF-Projekt gestartet • Klassifizierung des Photoresists AZ125nXT für XR-LiG im Gang • Erfahrungen aus UV-LiG nutzbar • Kooperation mit KNMF 	 <ul style="list-style-type: none"> • $d_w = 10 - 100 \mu\text{m}$ • $l_w = 100 - 500 \mu\text{m}$ • $l_M = 500 - 3000 \mu\text{m}$ • $C_0 \approx \Delta C \approx 0.3 - 10 \text{ pF}$ • Kupferstrukturen realisiert • Demonstrator im Aufbau

Abbildung 3.8: Leistungsdaten und Stand der Fertigungsverfahren

Einsatz metallischer Nanodrahtarrays in der Gasflusssensorik - BMBF - Projekt 3-DOING

Bearbeiter: Sebastian Quednau

Bearbeitungszeitraum: 01.05.2010 - 31.12.2013

Das BMBF-geförderte Forschungsprojekt 3-DOING „3-Dimensionale Mikro-Nano-Integration für die Gasflusssensorik“ beschäftigt sich mit dem Einsatz metallischer Nanodrähte in Gasflusssensoren für die Gasanalyse. Das Themengebiet umfasst sowohl die Entwicklung geeigneter Integrationstechnologien für die Nanodrähte, als auch deren messtechnische Charakterisierung und eine umfassende Modellierung von Gasflüssen durch Nanostrukturen.

Das Ziel des Projektes ist die Bereitstellung eines Gasflusssensors, der metallische Nanodrähte als Messelemente nutzt.

Beteiligte Einrichtungen:

Technische Universität Darmstadt

Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik

Institut für Elektromechanische Konstruktionen (EMK)

Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak

Dipl.-Ing. Sebastian Quednau

Technische Universität Darmstadt

Fachbereich Material- und Geowissenschaften

Fachgebiet Materialanalytik

Prof. Dr. Wolfgang Ensinger

Unterauftragnehmer / Partner:

arteos GmbH

Hr. Winfried Korb

<http://www.arteos.com/>

Emerson Process GmbH

Dr. Hans Krause

<http://www.emersonprocess.com/>

Motivation und Konzept

In der Gasflussmesstechnik wird häufig das kalorimetrische Messprinzip angewendet. Da es sich hierbei um ein thermisches Prinzip handelt (vgl. Abbildung 3.9), sind

konventionelle kalorimetrische Sensoren vergleichsweise träge. In der photoakustischen Gasanalyse sind jedoch schnelle Reaktionszeiten der Sensoren unerlässlich. Metallische Nanodrähte weisen ein Oberflächen-/ Volumenverhältnis von mehr als $16 \cdot 10^6 \frac{m^2}{m^3}$ auf. Dadurch findet ein sehr schneller Temperatureaustausch mit dem den Nanodraht umgebenden Gas statt. Diese Eigenschaft soll in einem kalorimetrischen Gasflusssensor genutzt werden, um das Ansprechverhalten solcher Sensoren zu verbessern. Einer Abschätzung zufolge sind Ansprechzeiten im Mikrosekundenbereich möglich. Abbildung 3.9 zeigt die Funktionsweise des kalorimetrischen Messprinzips.

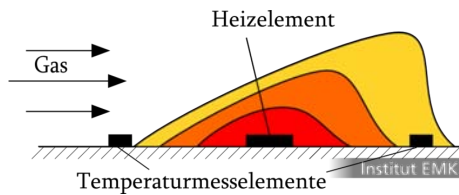


Abbildung 3.9: Funktionsweise eines kalorimetrischen Gasflusssensors

Notwendig für den Einsatz von Nanodrähten ist das Bereitstellen einer Technologiefolge zur Integration der Nanodrähte in ein Mikrosystem. Das vorgesehene Konzept sieht die Erzeugung von Verbänden aus mehreren Nanodrähten zu sog. *Nanodrahtarrays* vor. Diese Nanodrahtarrays werden in Reihe geschaltet (*kaskadiert*) um den Messeffekt zu erhöhen und das Handling der Strukturen zu verbessern. Abbildung 3.10 zeigt das Konzept der Kaskadierung von Nanodrahtarrays.

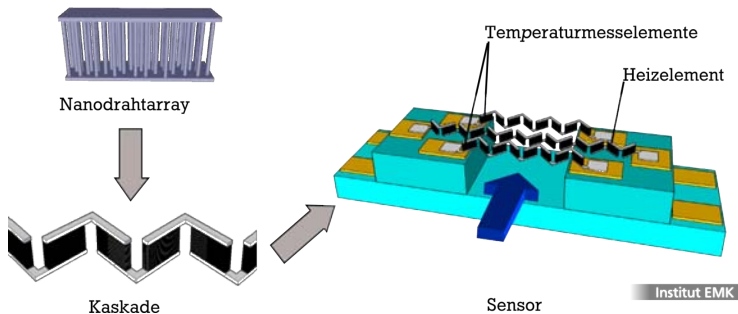


Abbildung 3.10: Konzept der Kaskadierung von Nanodrahtarrays

Ziele des Vorhabens

Am Ende des Projektes soll ein funktionstüchtiger Gasflusssensor auf Nanodrahtarraybasis entstanden sein. Die Nanodrahtarrays werden in einem Templatverfahren in einer ionenspurgeätzten Polymermembran hergestellt. Durch Lithographie auf der Membran können die einzelnen Nanodrahtarrays zu Kaskaden zusammengeschaltet werden. Diese Kaskaden können mit Hilfe eines Mikro-Montageverfahrens in ein Mikrosystem montiert werden. Ein weiterer Weg, der ebenfalls besprochen wird, ist die direkte Erzeugung der Nanodrahtarrays im Mikrosystem (Bottom-Up-Synthese).

Neben der praktischen Realisierung stellt die theoretische Modellierung einen wesentlichen Bestandteil des Projektes dar. Gasflüsse durch Nanostrukturen können nicht ohne weiteres mit herkömmlichen Modellen beschrieben werden, da die Abmessungen der Strukturen in den Bereich der mittleren freien Weglänge der Gasmoleküle liegen. Zwei Berechnungsalgorithmen können für die Modellierung solcher Gasflüsse eingesetzt werden.

- Navier-Stokes (*NS*) -Gleichungen mit Gleitrandbedingungen: Durch die Implementation spezieller Randbedingungen können die herkömmlichen Differentialgleichungen zur Beschreibung von Gasflüssen zum Einsatz kommen.
- Monte Carlo Direkt-Simulation Hierbei wird die Bewegung der Gasmoleküle mit Hilfe einer statistischen Simulation modelliert. Der Rechenaufwand ist deutlich höher als bei der Modellierung mit Hilfe der NS-Gleichungen. Die physikalischen Phänomene der Nanofluidik werden jedoch besser abgebildet.

Die Modellierung wird mittels geeigneter Demonstratoren verifiziert und kann dann ihrerseits zur Optimierung der Gasflusssensoren eingesetzt werden.

Mikrostrukturierung mit galvanisch abgeschiedenem Nickel

Bearbeiter: Thomas Winterstein

Bearbeitungszeitraum: 01.02.2010 - 31.01.2013

Anknüpfend an bisherige Forschungsarbeiten auf dem Feld der Mikroaktorik soll der Anwendungsbereich für galvanisch abgeschiedene, metallische Nickel-Strukturen in der Oberflächen-Mikromechanik erweitert werden. Zunächst sind die mechanischen, elektrischen und magnetischen Eigenschaften des Werkstoffs zu charakterisieren. Anschließend soll die Verwendung von Nickelstrukturen in Mikroantrieben (z. B. Inchworm-Antrieb) oder miniaturisierten elektroakustischen Wandlern betrachtet werden.

Derzeitiger Einsatz von Nickelstrukturen in Mikrosystemen

In den Arbeiten von C. Wohlgemuth, D. Eicher, M. Schlosser und M. Staab kommt galvanisch abgeschiedenes Nickel als Funktions- und Konstruktionswerkstoff zum Einsatz. Nickelstrukturen werden dabei als hermetisches Gehäuse, Federelemente, Heizstrukturen, oder magnetische Flussführungen eingesetzt. Abbildung 3.11a zeigt einen elektrothermischen Aktor mit Heizerstruktur aus Nickel, Abbildung 3.11b zeigt ein bistabiles Mikrorelais mit Schaltkontakten und magnetischer Flussführung aus Nickel.

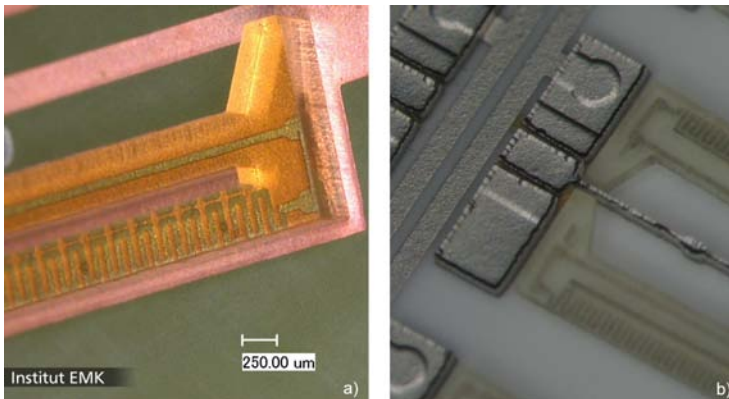


Abbildung 3.11: Nickelstrukturen als a) Hezelement, b) magnetische Flussführung

Durch geeignete Prozessführung lassen sich gezielt intrinsische Spannungen in Nickelschichten einbringen. Dies wird beim elektrostatistischen Wanderkeil-Aktor genutzt. Dabei handelt es sich um eine Kondensatoranordnung mit einer beweglichen Elektrode und variablem Elektrodenspalt. Der Aktor wird auf planarem Substrat in Oberflächenmikromechanik gefertigt und die bewegliche Elektrode durch einen Opferschichtprozess freigestellt. Intrinsische Spannungen bewirken eine Krümmung der Elektrode vom Substrat weg (siehe Abbildung 3.12). Die Nickelstruktur dient hier gleichermaßen als Elektrode und Rückstellfeder.

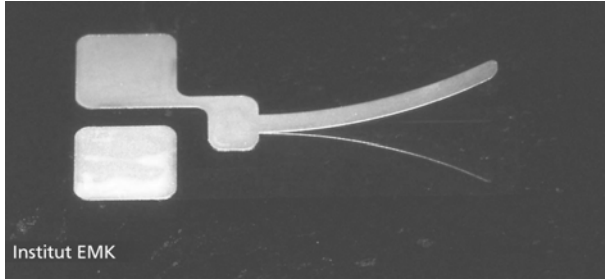


Abbildung 3.12: Elektrostatischer Wanderkeil-Aktor mit freigestellter beweglicher Elektrode (Schrägansicht 45°)

Zukünftige Einsatzmöglichkeiten

Im Rahmen des BMBF-Vorlaufprojekts INSIGHT, Integrationsorientierte Verfahren zur Herstellung hybrider Mikrosysteme, werden die mechanischen, elektrischen und magnetischen Eigenschaften der galvanisch abgeschiedenen Nickelstrukturen in Abhängigkeit der Prozessparameter bestimmt. Dies gibt die Möglichkeit der gezielten Anpassung der Schichteigenschaften auf die Anwendung.

Aufbauend auf der miniaturisierten Inchworm-Plattform von D. Eicher (siehe Abbildung 3.13), ist es möglich, bistabile Aktoren unter Ausnutzung der guten ferromagnetischen und mechanischen Eigenschaften von galvanischem Nickel zu integrieren und so energieeffiziente und schnelle Inchworm-Antriebe zu schaffen.

Alternativ ist, aufbauend auf dem Wanderkeil-Aktor, eine Nutzung als elektrostatischer Aktor denkbar. So lassen sich elektrostatisch aktivierte Nickelmembranen als elektroakustische Wandler einsetzen. Für mikrotechnisch gefertigte Lautsprecher sind Anwendungen in der Medizintechnik (z. B. Hörgeräte) oder in der Consumer-Elektronik (z. B. Mobiltelefone) denkbar.

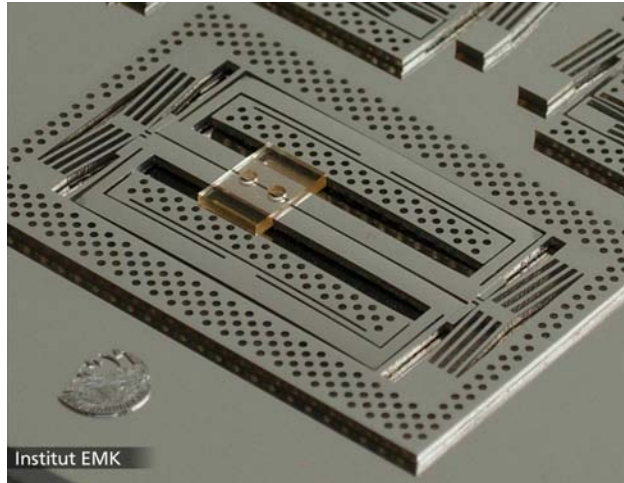


Abbildung 3.13: Miniaturisierte Inchwormplattform

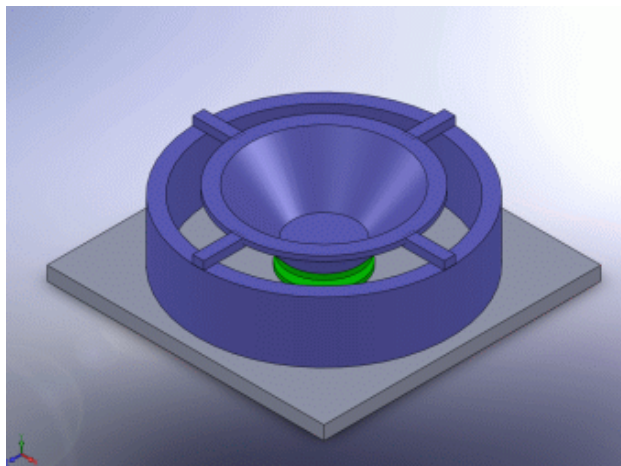


Abbildung 3.14: MEMS Lautsprecher (Simulation), Quelle: Department of Mechanical and Aerospace Engineering (MAE) University of California, San Diego

3.1.3 Dielektrische Elastomeraktoren (DEA)

Allgemeiner Überblick

Unter dem Begriff Elektroaktive Polymere (EAP) werden eine Vielzahl von Werkstoffen zusammengefasst, deren Gemeinsamkeit in der Gestaltänderung unter dem Einfluss elektrischer Ladungen besteht. Die zugrundeliegenden Wirkmechanismen sind sehr verschieden, können jedoch grundsätzlich nach ionischen und elektronischen Effekten eingeteilt werden. Bei der ersten Gruppe beruht die Gestaltänderung auf der Bewegung von Ionen innerhalb des Materials. Diese Bewegung wird bereits bei sehr niedrigen Ansteuerspannungen von wenigen Volt hervorgerufen. Da die Geschwindigkeit der Ionen langsam ist, liegen die Grenzfrequenzen dieser Materialien in der Regel im Bereich unter 10 Hz.

Im Bereich der elektronischen EAP sind die dielektrischen Elastomeraktoren (DEA) die am häufigsten verwendeten Materialien. Den großen Vorteil gegenüber den ionischen Polymeren bezüglich Grenzfrequenzen bis in den Kilohertz-Bereich und größeren erzeugbaren Kräften muss man jedoch mit hohen Ansteuerspannungen erkaufen. Je nach Aufbau der dielektrischen Elastomeraktoren können diese Spannungen bei bis zu 10 kV liegen.

Im Rahmen der Forschungsarbeiten von Markus Jungmann (1999-2004) wurde zum ersten Mal eine Technologie zur automatisierten Herstellung von gestapelten dielektrischen Elastomeraktoren mit Einzelschichtdicken unter $50\mu\text{m}$ vorgestellt (Abbildung 3.15). In den letzten Jahren wurde diese Technologie durch die Arbeiten von Marc Matysek und Peter Lotz stetig weiterentwickelt, sodass nun Aktoren mit definierten Schichtdicken bis hinab zu $5\mu\text{m}$ und einer sehr reproduzierbaren Elektrodenqualität gefertigt werden können.

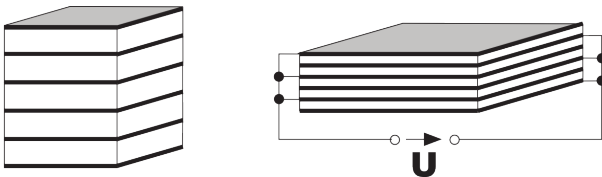


Abbildung 3.15: Dielektrischer Elastomerstapelaktor im Ruhezustand (links) und unter Spannung kontrahiert (rechts)

Die Darmstädter Dielektrischen Aktoren sind die ersten weltweit, deren Betriebsspannungen unter 300 V liegen. Darüber hinaus ist die hier entwickelte Technolo-

gie die einzige, die in der Lage ist, Aktorelemente mit Strukturbreiten von 1 mm in einen Silikonkörper mit einer Dicke von einigen Millimetern und einem Durchmesser der gesamten Anordnung von typischerweise 40 mm zu integrieren.

Es lassen sich also sehr einfach Aktorfelder herstellen, die für verschiedene Anwendungen genutzt werden können. Die Arbeitsgruppe Dielektrische Elastomeraktoren von Prof. Schlaak betreibt die Entwicklung der Herstellungstechnologie im Hinblick auf vier sehr unterschiedliche Anwendungen:

- Darstellung taktiler Informationen
- Miniaturisierte peristaltische Fluidförderung
- Ventildantriebe zur Gasflusssteuerung
- Aktive Schwingungsbeeinflussung

Im Folgenden werden die aktuellen Arbeitsthemen aus dem Bereich der Technologieentwicklung sowie die oben genannten Anwendungen dargestellt.

Technologie der gestapelten dielektrischen Elastomeraktoren

Bearbeiter: Dr. Marc Matysek, Dr. Peter Lotz, Klaus Flittner

Geringere Ansteuerspannungen

Vorrangiges Ziel der Technologienentwicklung ist die Herabsetzung der notwendigen Ansteuerspannungen. Der nächstliegende Weg hierzu ist die Herabsetzung der dielektrischen Schichtdicke. Durch den Aufbau einer eigens entwickelten Schleudeinheit können mit Drehzahlen von bis zu 14000 U/min homogene Schichten mit weniger als 5 μm Dicke reproduzierbar hergestellt werden.

Damit die mechanische Auslenkung nicht aufgrund der passiven, bisher relativ dicken Elektrodenschichten verringert wird, wird nach alternativen Elektrodenmaterialien gesucht. Traditionelles Elektrodenmaterial der dielektrischen Elastomeraktoren ist Graphit, das sich durch sehr gute Dehnbarkeit auszeichnet. Alternativ betrachtet werden metallische Schichten, Pulver und Kohlenstoff-Nanoröhren (CNT carbon nanotubes). Für die Nutzung der oben beschriebenen dünnen dielektrischen Schichten sind Elektrodendicken deutlich kleiner als 1 μm notwendig.

Ein zweiter Weg, die Leistungsfähigkeit der dielektrischen Elastomeraktoren zu steigern, liegt in der Möglichkeit, aus dem silikonbasierten Dielektrikum mit nanoskalierten anorganischen Pulvern oder organischen Zusatzstoffen ein Komposit herzustellen und dadurch die Permittivität zu erhöhen.

Kontaktierung

Weitere Optimierungen des bisherigen Herstellungsprozesses der Aktoren finden bezüglich der Elektrodenkontaktierung statt. Am Institut für EMK werden die Aktoren klassischerweise kontaktiert, indem je ein, gegebenenfalls mit Graphit versetzter Leiter durch den Elektroden- und Gegenelektrodenstapel gezogen wird. Mit diesem Prozess werden in mehr als der Hälfte aller Aktoren mehr als 70 % der Elektroden-schichten kontaktiert. Um die Ausbeute der kontaktierten Schichten weiter zu erhöhen, wird diesbezüglich sowohl nach alternativen Materialien wie zum Beispiel leitfähigen Silikon- und Epoxidharzklebern als auch nach neuen Prozessen geforscht.

Integration in Mikrosysteme

Neue Anwendungsgebiete für die Aktoren erschließen sich durch ihre Integration in Mikrosysteme. Um dies erfolgreich durchzuführen, müssen zwei grundlegende Fragestellungen betrachtet werden. Zum einen müssen die Aktoren dreidimensional strukturiert werden. Hierzu werden sowohl Verfahren betrachtet um die Aktoren zu vereinzeln als auch die Möglichkeit den Stapel durch Photostrukturierung des Silikons sofort in gewünschter Geometrie aufzubauen. Zum anderen ist eine selektive Haftung der Aktoren auf dem Substrat von Vorteil. Damit lassen sich die Aktoren auf einem Substrat verankern, ohne sie in ihrem aktiven Bereich festzubremsen und damit ihre Auslenkung zu behindern.

Lebensdauer und Zuverlässigkeit

Ein vor allem für die Überführung der Aktoren in industrielle Produkte elementarer Aspekt ist die Beurteilung und Optimierung ihrer Lebensdauer. Aus diesem Grund werden ausführliche Lebensdaueruntersuchungen für unterschiedliche Materialkombinationen und Alterungsbedingungen durchgeführt. Hierzu ist ein Messplatz entworfen und aufgebaut worden, der es ermöglicht bis zu 16 Aktoren über lange Zeiträume simultan anzusteuern und automatisiert in regelmäßigen Abständen zu charakterisieren.

Die Weiterentwicklung der Multilayertechnologie für DEA wird seit August 2009 durch das BMBF-Projekt „BelievE“ gefördert (siehe Projekte ab Seite 44).

Anwendungen der gestapelten dielektrischen Elastomeraktoren

Bearbeiter: Dr. Marc Matysek, Henry Haus, Holger Mößinger

Darstellung taktiler Informationen

Als taktile Wahrnehmung wird der Teil der menschlichen (haptischen) Wahrnehmung bezeichnet, der das Erasten von Oberflächen ermöglicht. Mittels dieser Ober-

flächensensibilität (Exterozeption - Sinneszellen in der Haut) können Auslenkungen der Haut, Drücke, Scherungen und Vibrationen, aber auch Temperaturen erfasst werden.

Anwendungsfelder für frei konfigurierbare taktile Displays sind z. B. die Erweiterung der Blindenschriftsymbole auf große Anzeigefelder zur Darstellung von Grafiken wie Stadtplänen. Auch für Anwendungen in Virtual-Reality- und Telemanipulationssystemen bietet die Rückmeldung von Kontaktkräften und Oberflächenstrukturen eine intuitivere Steuerung durch den Nutzer. Gerade in mobilen Systemen, die den Informationsumfang nur durch die Verwendung von Menüstrukturen überschaubar halten können, bietet die Integration einer „taktilen“ Rückmeldung eine deutliche Steigerung in der Benutzerfreundlichkeit.

Die Anforderungen an ein taktiles Display richten sich entsprechend nach dem menschlichen Tastsinn. Zu nennen ist hier vor allem die Zweipunktschwelle, also der gerade noch wahrnehmbare Abstand zweier benachbarter Hautdeformationsstellen, die abhängig von der Region auf der Hand 1-3 mm beträgt. Weitere Anforderungen resultieren aus der Empfindlichkeit des Tastsinns. So sollte zum Beispiel bei einer taktilen Stimulation durch Vibration (vibrotaktile Reiz) die Reizfrequenz an der Fingerspitze bei etwa 200 Hz liegen. Diese Frequenz stellt hier die maximale Empfindlichkeit bezüglich vibrotaktile Reize dar.

Der Aufbau eines universellen taktilen Displays kann mit dielektrischen Elastomerkatoren sehr flexibel erfolgen: bei freier Gestaltung der Aktorumrisse und einer hohen Aktordichte von bis zu 25 unabhängigen Aktoren pro cm^2 können frei definierbare Anzeigefelder mit steuerbarem Oberflächeneindruck realisiert werden.

Abbildung 3.16 zeigt ein Beispiel für ein taktiles Display als Benutzerschnittstelle eines MP3-Players realisiert durch fünf DEA und die schematische Darstellung der neun zugeordneten Gerätefunktionen. Die Kontaktierungsbereiche der nach außen geführten noch nicht kontaktierten Zuleitungen sind kreisförmig markiert.

Zur Darstellung der neun Gerätefunktionen sind fünf Aktoren vorgesehen. Die Mehrfachbelegung einzelner Aktoren mit mehreren Funktionen wird durch unterschiedliche vibrotaktile Signalmuster realisiert. So dient zum Beispiel der im Zentrum des Displays liegende Aktor sowohl zur Darstellung der Funktion *Play* als auch zur Darstellung der Funktion *Pause*, indem er entweder einen gleichmäßigen oder einen gepulsten vibrotaktile Reiz erzeugt. Dieses Beispiel zeigt deutlich, wie moderne Mensch-Maschine-Schnittstellen mit hoher Funktionsdichte unter Verwendung taktiler Rückmeldung intuitiver gestaltet werden können.

Neben dem Einsatz als Aktoren können DEA auch als Sensoren verwendet werden, indem ihre Kapazität ausgewertet wird. So kann zum einen der Zustand eines aktiven Displays überwacht werden, zum anderen aber auch eine Interaktion in Form

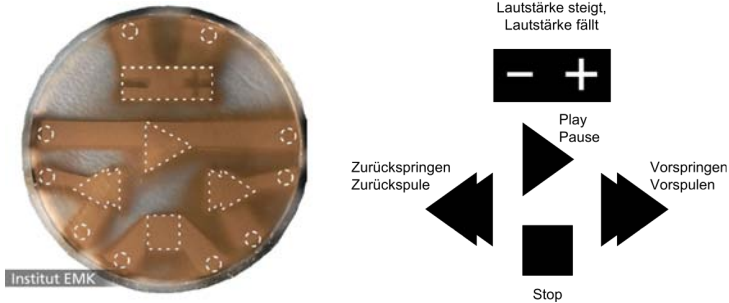


Abbildung 3.16: Tactiles Display für Multimediageräte; links: DEA mit fünf aktiven Bereichen; rechts: darstellbare Funktionen

eines drückenden Fingers von einem Nutzer erkannt werden. Der Aufbau einer kompletten Mensch-Maschine-Schnittstelle als integrierte Ein- und Ausgabeeinheit unter Verwendung des oben erläuterten Displays ist ebenfalls realisiert. Ein in Kooperation mit Philips Research aufgebauter Demonstrator einer drahtlosen Fernbedienung mit taktiler Rückmeldung ist in Abbildung 3.17 dargestellt. Die aufgebaute Elektronik ermöglicht es, sowohl die Aktoren mit der notwendigen Betriebsspannung aus einem Batterie-Spannungsniveau von 3V zu versorgen als auch einen Fingerdruck auf die Aktoroberfläche (Tastendruck) durch Integration des Ladestromes zu erkennen.



Abbildung 3.17: DEA als Mensch-Maschine-Schnittstelle

Peristaltische Fluidförderung

Bearbeiter: Dr. Peter Lotz

Bearbeitungszeitraum: 01.04.2005 - 31.10.2009

Ziel dieses Projektes war der Aufbau einer peristaltischen Pumpe mit einem sich kontinuierlich verformenden Strömungskanal. Diese Art der Pumpengestaltung vermeidet bewusst Unstetigkeiten im Verlauf der Oberfläche und fördert damit die Ausbildung einer laminaren Strömung. Im Fluid vorhandene Partikel, wie z. B. lebende Zellen (Hefezellen, Erythrozyten), werden in einer laminaren Strömung nur geringen Scherkräften ausgesetzt und können sehr schonend transportiert werden.

Die Möglichkeit der hochaufgelösten Elektrodenstrukturierung erlaubt es, die peristaltische Wandbewegung durch bis zu acht Aktorelemente innerhalb einer Länge von 32 mm darzustellen.

Ein Querschnitt durch diese Pumpe ist in Abbildung 3.18 a) links dargestellt. Die kreisrunde Form des Pumpenkörpers ergibt sich durch die Herstellung im Schleuderverfahren. Entlang des Durchmessers sind acht Aktorelemente angeordnet, die unabhängig von einander angesteuert werden. Die Abbildung zeigt den Querschnitt zu vier verschiedenen Zeitpunkten. Es ist zu erkennen, wie die Position der Hohlräume im Innern der Pumpe seitlich wandert. Abbildung 3.18 b) zeigt den realisierten Pumpenkörper mit den acht nebeneinander liegenden Aktorelementen.

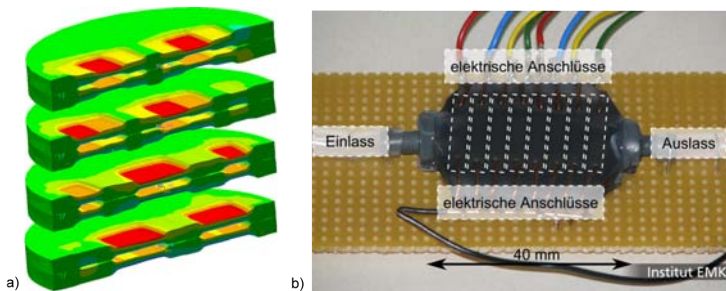


Abbildung 3.18: Peristaltische Fluidfördersystem; a) Simulierter Querschnitt zu vier verschiedenen Zeitpunkten; b) aufgebauter Demonstrator.

An mehreren aufgebauten Musterexemplaren konnten Kennlinien aufgenommen werden (siehe Abbildung 3.19). Mit der aktuellen Pumpengeometrie und der zur Verfügung stehenden Ansteuerungselektronik ist ein maximaler Volumenstrom von $12 \mu\text{l}/\text{min}$ und ein maximaler Gegendruck von $0,4 \text{ kPa}$ zu erreichen.

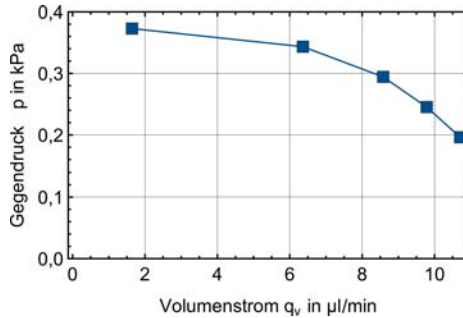


Abbildung 3.19: Kennlinie der peristaltischen Pumpe.

Ventilfeldantriebe zur Gasflusssteuerung - BMBF-Verbundprojekt „Integration neuartiger Funktions- und Konstruktionswerkstoffe“ (INFUNK)

Bearbeiter: Klaus Flittner

Bearbeitungszeitraum: 01.11.2008 - 31.10.2011

Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung und Optimierung von polymeren Funktionsmaterialien sowie die Entwicklung der notwendigen Technologien zur Strukturierung dieser Materialien und daraus folgend die Herstellung von miniaturisierten Bauelementen und Funktionsstrukturen sowie deren Integration in Mikrosystemen.

Bei den betrachteten Materialsystemen handelt es sich zum einen um weiche Polymere, die zur Herstellung der dielektrischen Elastomeraktoren verwendet werden, und zum anderen um Siloxane bzw. Silazane, die nach einer dreidimensionalen Strukturierung durch einen Pyrolyseschritt in eine Keramik umgewandelt werden. Die Entwicklung des letztgenannten Materialsystems wird am Fachgebiet Disperse Feststoffe durchgeführt.

Für die Elastomeraktoren werden kommerziell erhältliche Silikone durch organische und anorganische Zusatzstoffe durch den Projektpartner Fraunhofer Institut für Silicatforschung (ISC) modifiziert und der Einfluss auf die elektrischen und mechanischen Eigenschaften untersucht. Hierbei sind insbesondere das Elastizitätsmodul und die relative Permittivität des Materials von Interesse. Mit diesen Modifikationen soll eine erhöhte Aktorleistungsfähigkeit und eine Anpassung an die jeweilige Anwendung erreicht werden.

Als Demonstrator ist ein Ventil eines Mikrobrenners vorgesehen. Dabei übernimmt die Keramik die Funktion des Ventilsitzes und des Temperaturschutzes. Das eigentliche Ventilelement wird durch einen DEA realisiert. Über eine zusätzliche Federstruktur aus Nickel wird im nicht aktuierten Zustand das Ventil geschlossen gehalten. (Abbildung 3.20).

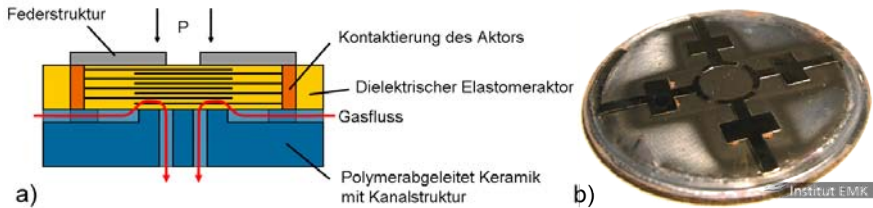


Abbildung 3.20: Miniaturisiertes Gasventil; a) schematischer Querschnitt; b) DEA auf Substrat mit strukturierter Federstruktur aus Nickel

Aktive Schwingungsbeeinflussung durch DEA

Bearbeiter: Roman Karsten

Bearbeitungszeitraum: 17.08.2009 - 30.06.2011 (30.06.2014)

Das LOEWE-Zentrum AdRIA (**Adap**tronik **Re**search, **In**novation, **Ap**plication) beschäftigt sich mit der Erforschung und Weiterentwicklung der interdisziplinären Schlüsseltechnologie „Adaptronik“. Daher kooperieren das Fraunhofer Institut LBF, mehrere Fachbereiche der TU Darmstadt sowie die Hochschule Darmstadt miteinander. Ziel ist die Erforschung neuer Materialien, die Entwicklung aktiver Methoden für die Unterdrückung störender Vibrationen und Geräusche sowie anschließend die Integration der Einzelkomponenten in komplexe Systeme.

Das Streben nach einer effektiven Nutzung natürlicher Rohstoffe führt zum Bau leichter Strukturen (Maschinen). Aufgrund der geringeren Masse weisen diese Systeme im unteren Frequenzbereich eine ungenügende Schwingungsisolierung auf. Passive Elemente wie Gummilagerung und Tilger können dieses Problem nicht lösen. Es werden daher Versuche unternommen, die Ausbreitung der störenden Vibrationen aktiv zu unterdrücken.

Für die aktive Vibrationskontrolle werden bisher hauptsächlich piezoelektrische Aktoren eingesetzt, die aber nur sehr kleine Auslenkungen vorweisen. Stattdessen

verspricht die Anwendung der dielektrischen Elastomeraktoren mehrere Vorteile. DEA vereinen aktive und passive Eigenschaften. Im unteren Frequenzbereich (0-200 Hz) verhalten sie sich aktiv und erreichen größere Auslenkungen als Piezoaktoren; in höheren Frequenzbereichen verhalten sie sich als passive Lagerung. In Abbildung 3.21 ist ein Anwendungsbeispiel für einen dielektrischen Elastomeraktor als aktive Lagerung dargestellt. Der DEA isoliert die sensible Elektronik von den Vibrationen, die durch die Unwucht des rotierenden Motors verursacht werden.

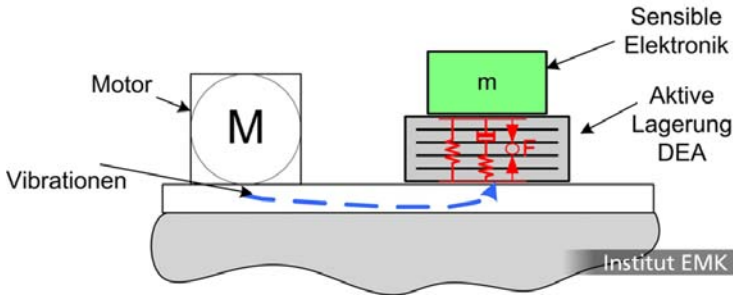


Abbildung 3.21: Schematische Darstellung einer aktiven Lagerung mit DEA.

Die Anforderungen an die dielektrischen Elastomeraktoren unterscheiden sich deutlich von den vorherigen Anwendungen. Für dieses Arbeitsfeld sind Aktoren mit höheren Stellkräften und Stellwegen erforderlich. Aktoren werden für diese Anwendung erst interessant, wenn die aktive Fläche einen Durchmesser von mindestens 25 mm aufweist. Außerdem ist ein höherer Elastizitätsmodul der Aktoren erforderlich.

Außer den mechanischen Eigenschaften des Aktors spielt die Regelung des Gesamtsystems eine wichtige Rolle. Dabei ist zu beachten, dass der Phasenwinkel zwischen der Störung und der Schwingung des DEAs 180° beträgt: nur in diesem Fall werden die störenden Vibrationen optimal unterdrückt.

Projekte

Im Folgenden werden die öffentlich geförderten Projekte aufgeführt, durch die die Arbeitsgruppe Dielektrische Elastomeraktoren im Zeitraum 2009/2010 unterstützt wurde.

- INFUNK - Integration neuartiger Funktions- und Konstruktionswerkstoffe und deren Anwendung in einem miniaturisierten Ventilsystem (BMBF)

Das BMBF-Verbundprojekt INFUNK wird im Schwerpunkt „Organische Funktionssysteme für die Mikrosysteme (polyMST)“ gefördert. Im Verbund sind die TU Darmstadt mit den Fachgebieten „Mikrotechnik und Elektromechanische Systeme“ (Prof. Schlaak) und „Disperse Feststoffe“ (Prof. Riedel) sowie das Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (FhG-ISC) in Würzburg beteiligt.

- Believe - Erforschung betriebsfester und langlebiger Materialsysteme von dielektrischen Elastomeraktoren (BMBF).

Das BMBF-Verbundprojekt Believe wird im Rahmen der Fördermaßnahme „Werkstofftechnologien von morgen - Wissenschaftliche Vorprojekte in Werkstoff- und Nanotechnologien“ seit 2009 für zwei Jahre gefördert. Im Verbund ist das Fachgebiet „Mikrotechnik und Elektromechanische Systeme“, das Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (FhG-ISC) sowie das Deutsche Kunststoff Institut (DKI) beteiligt.

- AdRIA - Adaptronik - Research, Innovation, Application
Das Adaptronikzentrum AdRIA wird im Rahmen in der Landesoffensive zur Entwicklung wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz (LOEWE) gefördert. (siehe auch Kapitel 3.3.1)
- INSIGHT - Integrationsorientierte Verfahren zur Herstellung hybrider Mikrosysteme (BMBF)

Das BMBF-Projekt INSIGHT wird als wissenschaftliches Vorprojekt seit April 2010 für 12 Monate gefördert.

Mitarbeiter

Dr.-Ing. Marc Matysek (Gruppenleitung)	2003 bis 08/2010
Herr Dr. Matysek ist auf Grund der Förderung durch das europäische Marie-Curie-Förderprogramm ab Sep. 2010 für 2 Jahre beurlaubt und bei Philips Research in Eindhoven tätig.	
Dr.-Ing. Peter Lotz (Gruppenleitung)	seit 04/2004
Dipl.-Ing. Klaus Flittner	seit 10/2007
Dipl.-Ing. Monika Hamann	2009
Dipl.-Ing. Roman Karsten	seit 08/2009
Dipl.-Ing. Henry Haus	seit 04/2010
M.Sc. Holger Mößinger	seit 11/2010

3.1.4 Robotik

Miniaturisierte intrakorporale kinematische Strukturen für die minimalinvasive Chirurgie

Bearbeiter: Andreas Röse

Bearbeitungszeitraum: 01.07.2005 - 30.06.2010

Ziel der Arbeit

Für die minimalinvasive Chirurgie wird im Institut EMK an elektrisch angetriebenen Manipulationsplattformen geforscht, die ihre Bewegung innerhalb des Körpers durch die Kombination von zwei Bewegungsarten entfalten, einer Bewegung der Plattform an sich und einer Bewegung von Manipulationsarmen auf der Plattform. Letztere wird durch parallelkinematische Mechanismen in mehreren Freiheitsgraden entfaltet. Diese Arbeit wird für eine Anwendung in der minimalinvasiven Chirurgie bereits erfolgreich im BMBF-Projekt INtraKORporaler MANipulator (INKOMAN, 2005-2008) erprobt. Die Arbeit beschäftigt sich mit der Entwurfsmethodik, der kinematischen Beschreibung sowie der Ausgestaltung und dem Aufbau von kleinen parallelkinematischen Mechanismen.

Entwurf von parallelkinematischen Mechanismen

Die Entwurfsmethodik für chirurgische parallelkinematische Mechanismen sieht den Entwurf in drei Schritten vor:

- Entwurf einer seriell kinematischen Kette (der Hauptkette), die die gewünschte Bewegung abbildet
- Ermittlung der zu verteilenden Freiheitsgrade mittels Grübler-Kutzbach-Tchebycheff Kriterium zur mechanischen Bestimmung eines komplexen Stab-Gelenk-Mechanismus
- Ergänzung des Mechanismus um weitere kinematische Ketten (die Nebenketten), die die Bewegung der Hauptkette nicht einschränken, aber laut vorheriger Berechnung gemeinsam mit der Hauptkette einen mechanisch bestimmten Mechanismus bilden.

Abbildung 3.22 zeigt ein Funktionsmuster eines so entworfenen parallelkinematischen Mechanismus für das Projekt INKOMAN

Zur Berechnung der inverskinematischen Beziehung wurde ein Newton-Näherungsalgorithmus vorgeschlagen, der auf der Annahme basiert, dass bei Erfüllung des Grübler-Kutzbach-Tchebycheff Kriterium eine eindeutige zusammengesetzte Stellung des Mechanismus existiert. Eine Bewegung der Werkzeugplattform im Raum

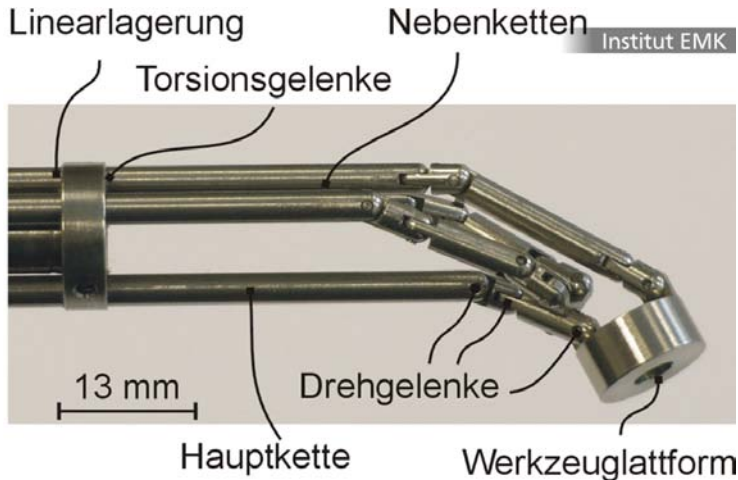


Abbildung 3.22: Parallelkinematische Mechanismen für das Projekt INKOMAN mit Gesamtfreiheitsgrad 4. Für eine mechanische Bestimmtheit müssen insgesamt 22 Gelenkfreiheitsgrade auf die 4 kinematischen Ketten verteilt werden.

wird durch die Bewegung der Hauptkette vorgegeben. Der Näherungsalgorithmus „zieht“ die Nebenketten auf die Hauptkette und liefert so eine zusammengesetzte Konfiguration, die auch die Stellung der Antriebe enthält und so eine Lösung für das kinematische Problem bietet.

Eine Starrkörpersimulation des entworfenen Mechanismus hilft bei der Ermittlung von Kennwerten für die Stabilität und das mechanische Spiel des Mechanismus - den sogenannten Singulärwerten der Übertragungsmatrix. In dem Forschungsvorhaben werden die Singulärwerte über dem gesamten Arbeitsraum ermittelt und schattiert dargestellt. Abbildung 3.23 zeigt eine Darstellung des Arbeitsraumes des Mechanismus aus Abbildung 3.22.

Eine abschließende Abschätzung beschäftigt sich mit der Umsetzbarkeit von parallelkinematischen Mechanismen im Kunststoff-Spritzguss-Verfahren mit einem elastisch verformbaren Thermoplast. Diese Umsetzung verspricht für die minimalinvasive Chirurgie austauschbare Instrumentenspitzen. Hierzu wurde von vornherein auf die Gestaltung der Mechanismen mit den einfachsten Gelenken - d. h. Drehgelenken und Filmgelenken - Wert gelegt. Die Auslegung von Filmgelenken geschieht dehnungsbezogen. Die Materialdehnungen dürfen in einem normalen Betrieb die

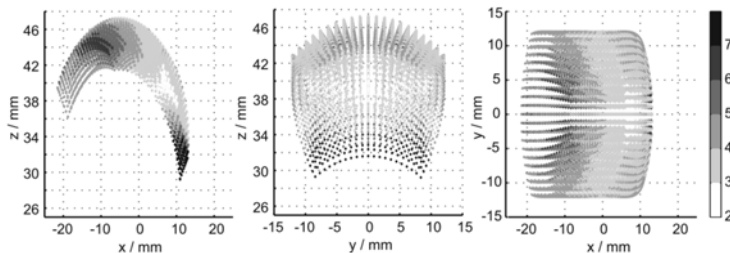


Abbildung 3.23: Darstellung der Singulärwerte des Mechanismus aus Abbildung 3.22 über seinem Arbeitsraum. Heller dargestellte Bereiche entsprechen niedrigeren Singulärwerten. Dies deutet auf eine bessere Verteilung der Kräfte innerhalb des Mechanismus hin.

Streckdehnungen des Materials nicht überschreiten. Eine Verifikation der prognostizierten Eigenschaften eines solchen Mechanismus geschieht mit der Finiten-Elemente-Methode. Abbildung 3.24 zeigt hierzu eine Simulation der Auslenkung des betrachteten Mechanismus auf einer festgelegten Trajektorie.

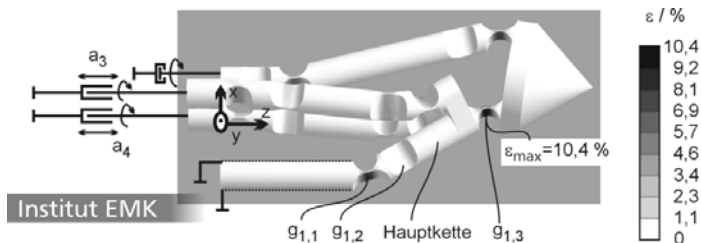


Abbildung 3.24: Finite-Elemente-Simulation der Auslenkung eines monolithischen Mechanismus auf einer festgelegten Trajektorie. Die maximalen Dehnungen liegen hier bei ca. 10%. Der Mechanismus wird von den Antrieben (a_n) bewegt. Die Drehgelenke der Hauptkette ($g_{m,n}$) dienen exemplarisch der Überprüfung der vorausgerechneten Werte für die Dehnungen.

Piezoelektrische Stellantriebe

Im Rahmen des vom Land Hessen geförderten LOEWE-Zentrum/AdRIA wird an der Integration von Aktoren und Sensoren in adaptive Strukturen gearbeitet. Dieses

Projekt (siehe Abschnitt 3.3.1) besteht aus drei Teilprojekten, von denen die folgenden zwei Themen im Fachgebiet Mikrotechnik und Elektromechanische Systeme durchgeführt werden.

Piezoaktorik mit intrinsischer Kraftmessung

Bearbeiter: Dr. Peter Pott

Bearbeitungszeitraum: 01.04.2009 - 30.06.2011

Ziel dieses Vorhabens ist der Aufbau eines piezoelektrisch erregten Ultraschallmotors mit intrinsischer Kraft- bzw. Drehmomentmessung. Der erste Prototyp (Abbildung 3.25) besteht aus einem keramischen Zylinder, der von einem tangential anliegenden Resonaterbalken in Rotation versetzt wird. Der Kontaktpunkt vollführt hierbei eine elliptische Bewegung, deren Ausprägung durch die Phasenlage und Amplitudenwerte der Steuerspannung des tangential bzw. radial angeordneten Piezostapelaktors bestimmt wird. Abbildung 3.26 verdeutlicht den Aufbau.

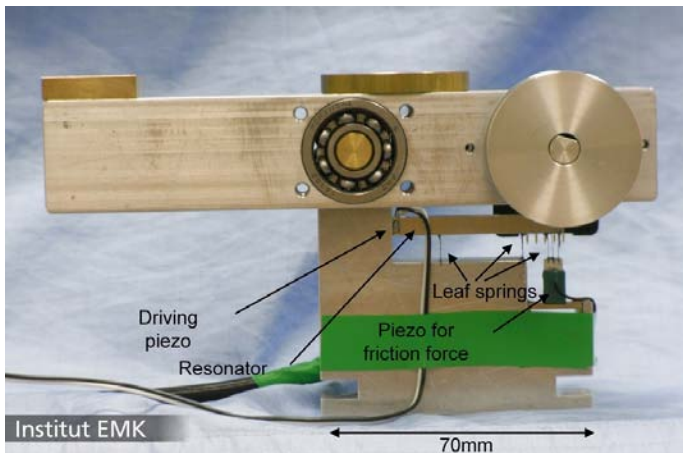


Abbildung 3.25: Erster Prototyp mit intrinsischer Momentenmessung (Schema siehe Abbildung 3.26).

Zur Ermittlung des abgegebenen Drehmoments wird das Signal, das an dem tangential angeordneten Piezoaktor angelegt wird, analysiert. Dazu stehen der Phasenversatz von Strom und Spannung, die Verschiebung der Resonanzfrequenz und im

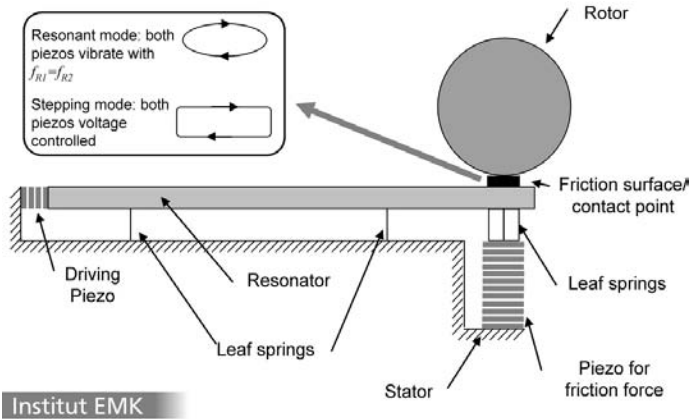


Abbildung 3.26: Schematische Darstellung des Ultraschallmotors

Besonderen das Signal einer kapazitiven Brückenschaltung, die eine direkte Aussage über die von der Piezokeramik aufgrund ihrer Verformung proportional rückwirkende Spannung erlaubt, zur Verfügung [Pott u. Schlaak 2010a]. Die Auswertung und Darstellung der Signale erfolgt mit Hilfe eines LabView-Programms und zukünftig direkt über einen Microcontroller mit FPGA (DA 1750). Diese Arbeit beinhaltet darüber hinaus eine Ansteuerung zur Regelung von Drehmoment, Drehwinkel und Winkelgeschwindigkeit.

Ausblick

Die nächsten Schritte in diesem Projekt sind die endgültige Inbetriebnahme der μC -Schaltung, die im Rahmen der Diplomarbeit von S. Matich entwickelt wird, die weitere Miniaturisierung des mechanischen Aufbaus sowie mittelfristig die Verbesserung der Energieeffizienz des Aktors.

Wimpernbasierte Piezoaktorik

Bearbeiter: Dr. Peter Pott, A. Carrasco

Bearbeitungszeitraum: 01.04.2009 - 30.06.2011

Wimperantriebe werden in der Natur von zahlreichen Einzellern zum Vortrieb benutzt. Technisch lassen sich solche Antriebe mit Hilfe von metallischen oder organischen, axial belasteten Balkenstrukturen nachbilden. Im Gegensatz zum biologischen Mechanismus, bei dem sich ein im Fluid treibender Körper gegen das Fluid

abstützt, indem dessen Viskosität ausgenutzt wird, soll in dem AdRIA-assozierten Teilprojekt ein definierter anisotroper richtungsabhängiger Reibzustand zwischen einem Stator und einem Läufer oder Rotor erreicht werden. Abbildung 3.27 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Rotationsmotors. Abbildung 3.28 zeigt einen prototypisch ausgeführten Linearmotor, der zur Evaluation verschiedener Wimpermaterialien verwendet wird (SA 1751). Das Wirkprinzip beruht neben der Ausnutzung der Haft- und Gleitreibung auf der Massenträgheit des bewegten Körpers. Zur Modellierung des Reibungseffekts bieten sich Starrkörperansätze aber auch elastische Ansätze an. Abbildung 3.29 zeigt einen möglichen Ansatz zur Modellierung.

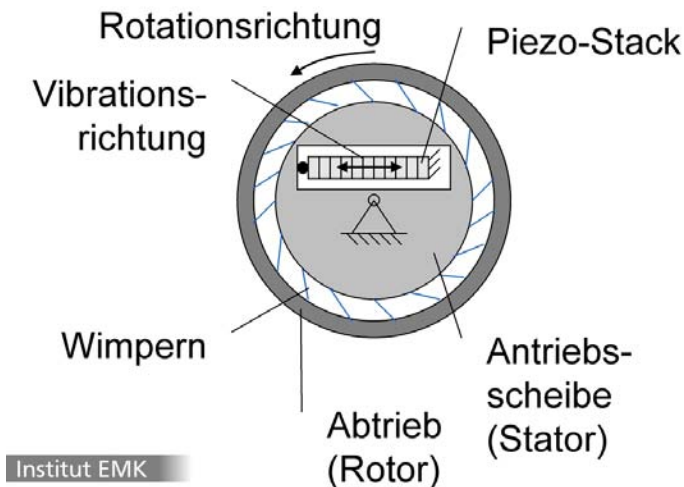


Abbildung 3.27: Schematische Darstellung eines rotativen Wimpernantriebs. Der zentral angeordnete Stator wird von einem Piezostapelaktor zu einer Drehschwingung angeregt. Diese wird über den anisotropen Reibzustand in eine gleichförmige Drehbewegung des Rotors umgewandelt.

Zu Beginn des Vorhabens stand die Auswahl eines viel versprechenden Konzepts. Dabei sollte erörtert werden, ob eher rotierende oder linear verschiebende Motoren innerhalb des AdRIA-Projekts benötigt werden. Da das Konzept der Wimpernantriebe zunächst unidirektional ist, soll untersucht werden, wie mit geringem technischem Aufwand und ohne die Anzahl der Komponenten zu verdoppeln, eine Richtungsumkehr erreicht werden kann.

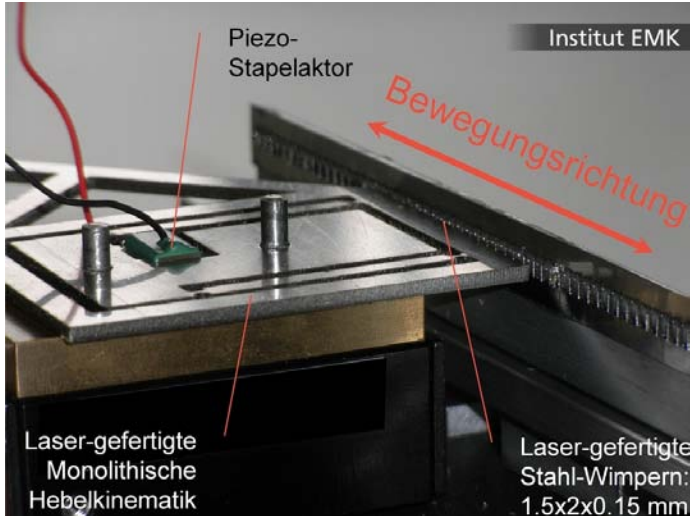


Abbildung 3.28: Linearmotor zur Evaluation der Leistungsfähigkeit verschiedener Wimpernmaterialien (hier mit Stahlwimperf). Kantenlänge 80 mm.

Nach Klärung des prinzipiellen Aufbaus ist ein erster Motor konstruiert und aufgebaut worden [Pott u. Schlaak 2010b]. Dabei wurde einerseits der möglichst einfache und mit den vorhandenen Ressourcen fertigbare Aufbau angestrebt, andererseits die Verschleißkompensation bzw. -resistenz und die Realisierung einer konstanten Vorspannung berücksichtigt. Für die Herstellung der Wimperf wurde auf ein in der Literatur beschriebenes Verfahren für CFK-Wimperf zurückgegriffen und dieses alternativ auch für GFK-Wimperf angewandt. Darüber hinaus wird mit Wimperf aus lasergeschnittenen Edelstahl experimentiert.

Die Modellierung der physikalischen Zustände innerhalb des Motors orientiert sich zunächst an den in der Literatur beschriebenen Verfahren. Damit soll das Erreichen der angestrebten Leistungsdaten abgeschätzt und das Versuchsszenario entworfen werden.

Ausblick

Die nächsten Schritte in diesem Projekt sind die Realisierung eines funktionstüchtigen unidirektional arbeitenden Motors (SA 1751) sowie die Validierung der Modellvorstellungen.

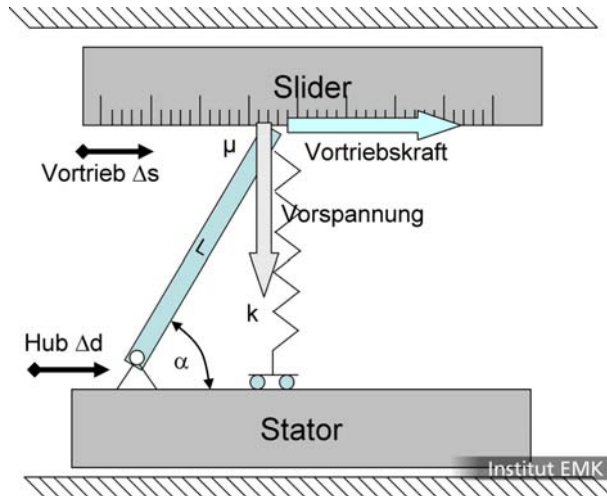


Abbildung 3.29: Wirkprinzip. Der Stator führt eine lineare (horizontale) Schwingung aus. Die Wimpernoberfläche (durch eine einzelne Balkenstruktur symbolisiert) überträgt die Bewegung in nur einer Richtung (hier: rechts).

Dynamisches Weißlicht-Interferometer für den Nano- und Mikrobereich -
 BMBF-Förderprojekt: „DyNaMo“

Bearbeiter: Mark Kohlstedt
 Bearbeitungszeitraum: 01.11.2006 - 31.12.2010

An diesem BMBF-Verbundprojekt im Förderschwerpunkt „Nano Chance“ sind das Institut EMK und die Firma Precitec Optronik GmbH (Rodgau) als Partner beteiligt.

Motivation

Zur Vermessung kleinster beweglicher Strukturen werden optische Messverfahren bevorzugt, da sie eine berührungslose und damit weitestgehend rückwirkungsfreie Charakterisierung ermöglichen. Mit Hilfe der Weißlichtinterferometrie ist es möglich sprunghafte Höhenunterschiede zuverlässig zu charakterisieren, sowie großflächige Messobjekte schnell und präzise zu analysieren.

Ziel des Vorhabens

In diesem Projekt soll ein miniaturisierter Aufbau eines Interferometers erarbeitet werden. Innerhalb eines Messvorgangs soll ein Volumen von $(10 \times 10 \times 10) \text{ mm}^3$, bei einer Auflösung von ca. 50 nm charakterisiert werden.

Des Weiteren sollen Masse und Volumen bisheriger Geräte unterschritten werden. Dies gelingt jedoch nur mit Hilfe einer systemintegrierten aktiven Schwingungsdämpfung. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Erhöhung der Messgeschwindigkeit, was hohe Ansprüche an die Rechenkapazität und die Datenverarbeitung stellt. Außerdem soll eine Vermessung von dynamischen Messobjekten ermöglicht werden.

Stand der Arbeiten

Das eigentliche Oberflächenmesssystem besteht aus einem neu angeordneten Interferometer nach Michelson. Für die Detektion der Verkipfung und der aktiven Schwingungsdämpfung wurden zusätzliche Fabry-Pérot-Interferometer in den Aufbau integriert. In Abbildung 3.30 ist eine Prinzipskizze beider Interferometer im Gesamtaufbau dargestellt.

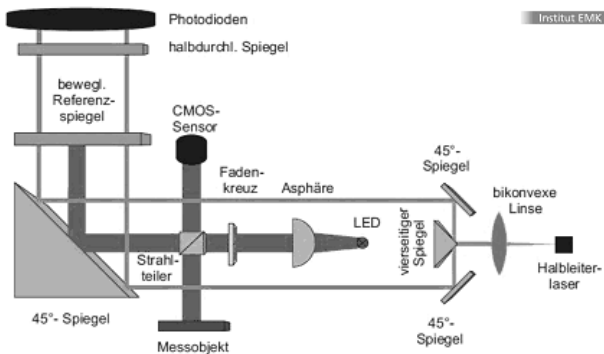


Abbildung 3.30: Prinzipskizze des Aufbaus

Im Rahmen einer ausführlichen Evaluation wurden die unterschiedlichsten Aktorprinzipien bewertet. Als bestes Aktorprinzip erwies sich das elektrodynamische. Durch eine geeignete Spulen- und Magnetanordnung sind diese sehr schwingungsarm und besitzen einen konstanten Kraftverlauf. Des Weiteren können sehr niedrige Geschwindigkeiten von kleiner $60 \mu\text{m/s}$ gefahren werden. Jedoch ist eine schwingungsarme Führung notwendig.

Auch für diesen Teilaspekt wurden unterschiedliche Führungsarten genauestens untersucht und eine Federführung ausgewählt. Sie zeichnet sich durch eine geringe Reibung (nur innere Reibung), eine meist einfache Struktur, einer geringen

Anzahl von Bauelementen sowie völliger Spielfreiheit aus. Durch den geringen Verschleiß muss auch nur ein minimaler Wartungsaufwand betrieben werden. Jedoch sind auch diese kinematischen Systeme nur begrenzt belastbar und der Führungsweg ist kraftabhängig. Für die genaue Analyse des Systems wurden verschiedene Federstrukturen erstellt und anschließend durch FEM-Simulationen charakterisiert. Abschließend wurden die am besten geeigneten Strukturen in Neusilber geätzt bzw. in Federstahl geschnitten und im Aufbau abschließend charakterisiert.

Für die aktive Schwingungsdämpfung wurde der Laboraufbau eines Fabry-Pérot-Interferometers analysiert. Hier bestanden die Untersuchungen zum einen aus der Wahl eines geeigneten Sensors zur Detektion der Interferenz und zum anderen einer Lichtquelle, welche die Vielstrahlinterferenz auch über eine größere Wegstrecke ermöglicht.

3.2 Fachgebiet Mess- und Sensortechnik (MuST)

(Prof. Werthschützky)

3.2.1 Übersicht der Forschungsschwerpunkte

Eine Hauptanwendung elektromechanischer Systeme sind Sensoren zur Messung mechanischer Größen, wie Kraft, Drehmoment, Druck, Beschleunigung, Geschwindigkeit, Weg und Durchfluss. Die reproduzierbare Erfassung dieser Messgrößen ist Voraussetzung für die Analyse, Steuerung und Regelung von industriellen Prozessen sowie Prozessen in der Fertigung, im Fahrzeug, in der Medizin und auch im Haushalt. Hierzu ist der Einsatz von Einzelsensoren oder von Sensorsystemen mit zunehmend integrierter Signalverarbeitung erforderlich. Außerdem vollzieht sich durch die Anwendung weiterentwickelter Mikrotechnologien zunehmend der Übergang vom Einzelsensor bzw. Sensorsystem zu direkt gekoppelten Sensor-Aktor-Systemen mit integrierter Informationsverarbeitung. Eine wichtige Anwendung ist die Integration haptischer Schnittstellen in Bediensysteme, z. B. in medizinische Assistenzsysteme.

Die Forschung im Fachgebiet „Mess- und Sensortechnik“ umfasst daher die in der Abbildung 3.31 angegebenen Themenfelder.

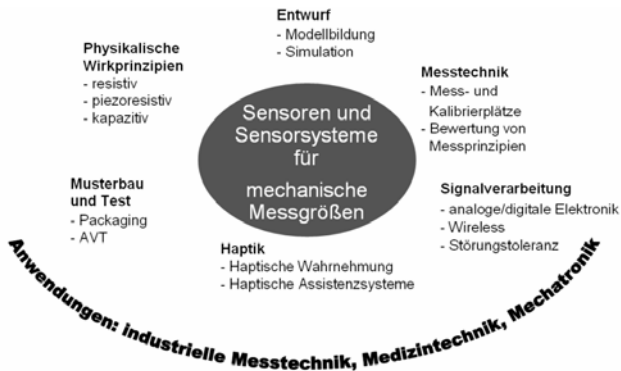


Abbildung 3.31: Themenfelder der Forschung im Fachgebiet Mess- und Sensortechnik

Die Fortschritte der Mikro- und Feinwerktechnik und der integrierten Signalverarbeitung in Richtung mikroelektromechanischer Systeme (MEMS) werden in der

Mess- und Sensortechnik vor allem durch folgende Entwicklungstrends gekennzeichnet:

- Vervollkommnung bewährter Messprinzipien für langzeitstabile MEMS-Sensoren.
- Übergang von Einzelsensoren zu miniaturisierten Sensorsystemen für mehrere gleichartige oder unterschiedliche Messgrößen.
- Sicherung einer umwelt- und medienrobusten Gehäusung der MEMS-Sensoren bei gleichzeitig vernachlässigbarer Rückwirkung auf die Messgröße und das Messelement.
- Integration einer zunehmend anspruchsvolleren Signalverarbeitung durch rauscharme Analogelektronik und Mikrocontroller direkt in die Sensoren (Smart Sensor). Übernahme von zusätzlichen Funktionen, wie Regelungs- und Steuerungsaufgaben, Korrektur von systematischen und die Reduzierung von zufälligen Messfehlern.
- Weitere Miniaturisierung von Sensorelementen und Übergang zu strukturintegrierten Sensornetzwerken z. B. in sicherheitskritischen Bauteilen.
- Erhöhung der Sensorverlässlichkeit durch selbständiges Erkennen von Störungen und deren Ursachen auf Basis integrierter Algorithmen zur Sensorselbstüberwachung und Auslösung von Maßnahmen zur Sensorrekonfiguration, z. B. durch redundante Sensoren, analytische Modellansätze oder Schätzalgorithmen.
- Übergang zu direkt gekoppelten Sensor-Aktor-Systemen, z. B. zur Gestaltung von haptischen Mensch-Maschine-Schnittstellen in medizinischen Assistenzsystemen.
- Drahtlose Energie- und Signalübertragung für Sensoren und Sensorsysteme (RF-MEMS).
- Vernetzte MEMS-Sensorelemente als energieautarke Sensorsysteme.

Ausgehend von diesen grundsätzlichen Entwicklungstrends sind die aktuellen Forschungsthemen des Fachgebiets auf die noch breitere Anwendung des piezoresistiven Effekts in Silizium-Miniatursensoren zur Erfassung mechanischer Größen, den Prototypenbau und Test neuartiger elektromechanischer Sensoren und Sensorsysteme, die Gestaltung haptischer Schnittstellen in der Medizintechnik als direkt gekoppelte Sensor-Aktor-Systeme und die erweiterte Sensorsignalverarbeitung in Richtung Selbstüberwachung und Rekonfiguration ausgerichtet. Diese Forschungsschwerpunkte wurden im Berichtszeitraum in drei Forschungskomplexen bearbeitet

- **MEMS-Sensorik:**

- Miniaturkraftsensor für Katheterisierungen in der Kardiologie
DFG-Projekt „HapCath“/Thorsten Meiß
- Strukturintegrierte Dehnmesselemente in Form miniaturisierter Silizium-Dehnmesselemente oder gedruckter Sensorstrukturen
LOEWE-Projekt „Adria“/Jacqueline Rausch
- Überlastfester miniaturisierter Silizium-Höchst drucksensor
Industrieforschung/Patrick Heinickel
- Überlastfester Silizium-Differenz drucksensor für die Prozessmesstechnik
Industrieforschung/Timo Kober
- Robuste elektrische Kontaktierung von miniaturisierten Silizium-Messelementen
DFG-Projekt „HapCath“/Tim Rossner
- Medizinisches Druck-Sensorarray zur Messung des Zungendrucks gegen den Gaumen bei Kindern
DFG-Projekt „Zungendrucksensorsystem“ /Ingmar Stöhr

- **Haptik:**

- Entwurf und Gestaltung eines haptischen Assistenzsystems für Katheterisierungen
DFG-Projekt „HapCath“/Thorsten Meiß, Stephanie Sindlinger, Thomas Opitz
- Haptische Schnittstelle für minimalinvasive Instrumente
Jacqueline Rausch, Sebastian Kassner
- Messtechnische Analyse der haptischen Wahrnehmung
DFG-Projekt/ Christian Hatzfeld

- **Sensor-Signalverarbeitung:**

- Sensorinterface zur drahtlosen Signalübertragung eines Zungendrucksarrays
DFG-Projekt „Zungendrucksystem“/Ingmar Stöhr
- Selbstüberwachendes Sensorsystem zur Zustandsüberwachung rotodynamischer Pumpen
DFG-Projekt „Sensorsystem“/Reinhard Werner
- Sensorsignalverarbeitung bei der Erfassung von Hirnpotentialen
EU-Projekt „EUPRIM“/Lutz Rafflenbeul

Diese im Berichtszeitraum bearbeitenden Forschungsthemen sind vor allem anwendungsorientiert. Auf Basis des piezoresitiven Messeffektes werden durch miniaturisierte Sensoren neue Anwendungen in der Medizin- und Automatisierungstechnik erschlossen. Dagegen sind die Arbeiten zur Haptik sowohl grundlagen- als auch anwendungsorientiert.

Als technologische Basis für die Herstellung der Prototypen stehen am Institut die feinwerktechnische Werkstatt, das mechanische Mikrobearbeitungslabor und das neue Mikrotechnik-Labor zur Verfügung. Darüber hinaus werden bewährte als auch neu geschaffene Kooperationsbeziehungen zu kompetenten industriellen und institutionellen Partnern genutzt.

Zur Finanzierung der grundlagen- und anwendungsorientierten Forschungsarbeiten dienen vorzugsweise Drittmittel von der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Schwerpunktprogramme des BMBF und Forschungsk Kooperationen mit der Industrie.

In den folgenden Abschnitten werden die Zielstellungen, die Lösungsansätze und die Ergebnisse der im Berichtszeitraum bearbeiteten Forschungsthemen zusammenfassend vorgestellt.

3.2.2 MEMS-Sensorik

Subminiatur-Kraftsensor und Signalverarbeitung

Bearbeiter: Thorsten Meiß

Bearbeitungszeitraum: 01.09.2004 - 31.08.2010

Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projektes „HapCath“- haptischer Katheter - werden Kräfte, die bei Katheterisierungen von Herzkranzgefäßen an der Spitze von Kathetern und deren Führungsdrähten auftreten, gemessen und dem Arzt verstärkt haptisch dargestellt. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung geeigneter Mikro-Kraftsensoren und deren Integration in die Führungsdrahtspitze, deren Durchmesser lediglich 0,36 mm beträgt.

In der ersten Arbeitsphase wurden Anforderungen für neuartige Kraftmesselemente abgeleitet und zwei unterschiedliche Silizium-Kraftsensoren in Silizium-Volumen-Mikromechanik mit piezoresistivem Wirkprinzip gefertigt. Das Messelement mit asymmetrischem Grundkörper nach Abbildung 3.32 a wird durch anisotropes Nasätzen strukturiert. Die mechanische Struktur des zweiten Kraftmesselements wird

mittels eines Trockenätzprozesses gefertigt. Beide Elemente weisen sich durch einen hohen Miniaturisierungsgrad (Abmessungen $(200 \times 200 \times 640) \mu\text{m}^3$), sehr geringe Kosten in der Serienfertigung, große Übertragungsfaktoren, hohe Linearität und hohe mechanische Grenzfrequenzen im Megahertz-Bereich aus. Die zwei Messelement-Typen sind zur Messung eines Kraftvektors bestimmt.

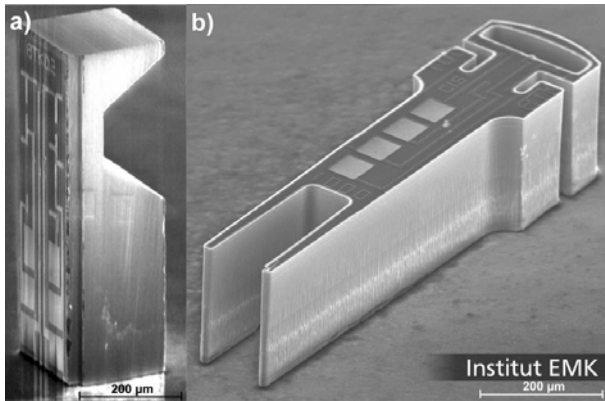


Abbildung 3.32: REM-Aufnahmen der Mikro-Kraftsensoren. a) Typ 1 und b) Typ 2

Bearbeitungsstand

Beide Kraftsensortypen wurden beginnend mit Präparationen am Institut EMK mit zusätzlichen Kooperationen gefertigt und dann zur Fertigung in einer professionellen Halbleiterlinie beim CiS¹ in Erfurt überführt. Zur Integration in den Führungsdraht ist eine industriell anwendbare Kontaktierung mit sechs isolierten elektrischen Leitern mit einer Länge von 180 cm bei Durchmessern um $20 \mu\text{m}$ notwendig. Für ein in diesem Projekt neu entwickeltes Verfahren zur Mikro-Drahtkontaktierung wurde ein Patent erteilt (siehe auch Forschung Tim Roßner) [Meiss u. a. 2009c]. Mit dem asymmetrischen Element wurden zahlreiche Erfahrungen zur Kontaktierung mittels verschiedener Kontaktierungs-Verfahren gesammelt, so dass zügige Kontaktierungen möglich sind. Mit diesen Elementen wurden erstmalig komplette Führungsdrähte mit Kraftsensorik inkl. Packaging [Meiss u. a. 2008] aufgebaut. Zur Validierung des Konzepts HapCath wurde ein Demonstrator konzipiert, an dem nun Führungsdrähte in einem Herzmodell mit und ohne skalierte Krafrückmeldung praktisch getestet werden können [Meiss u. a. 2009a].

¹ CiS, *Forschungsinstitut für Mikrosensorik und Photovoltaik GmbH*, Erfurt, Germany

Detaillierte Messergebnisse wurden veröffentlicht und zeigen die gute Sensor-Charakteristik bezüglich großem Übertragungsfaktor sowie geringem Linearitäts- und Hysteresefehler, auch für Messelemente mit festem Packaging von einer Härte von Shore A 70 [Meiss u. Werthschützky 2009]. Neueste Ergebnisse zeigen die Charakterisierung der Elemente bezüglich der 3-Komponenten Kraftvektor-Messung (Abbildung 3.33)

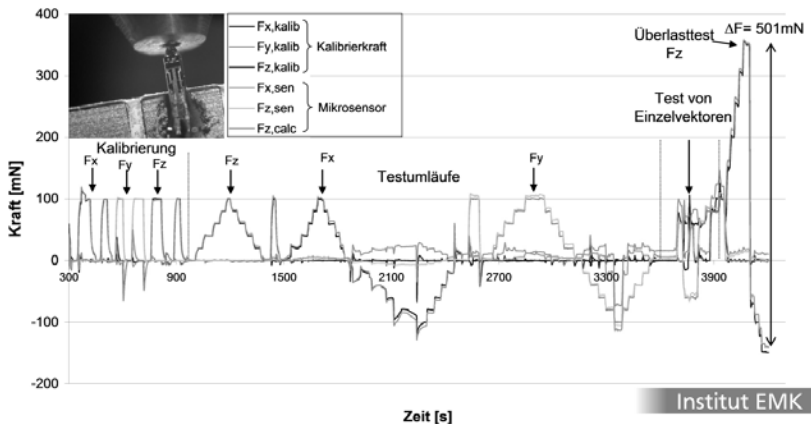


Abbildung 3.33: Anliegende Kräfte und errechnete Kräfte vom Mikro-Kraftsensor K02 während eines verkürzten Kalibrierzyklusses. *Die Messspannungen sind linear unabhängig errechnet. Dunkle Kennlinien spiegeln die Istkraft wieder, helle Kurven das Ausgangssignal des Mikro-Kraftsensors.*

Ausblick

Es wurde ein Stand erreicht, der die Validierung des *HapCath*-Systems ermöglicht und nun den Weg für die haptische Untersuchungen am Gesamtsystem eröffnet. Zur Umsetzung der Ergebnisse in die Anwendung wird ein Transferprojekt für die wirtschaftliche und stabile Fertigung taktile Führungsdrähte angestrebt. Der Transfer der Forschungsergebnisse der derzeit kleinsten Kraftsensoren in weitere Anwendungen, auch für andere Forschergruppen, ist in konkreter Bearbeitung.

Bearbeiter: Jacqueline Rausch

Bearbeitungszeitraum: 01.01.2009 - 30.06.2011

Aufgabenstellung

Der Leitgedanke der Adaptronik, Struktursysteme mit Intelligenz auszustatten, um aktiv auf verändernde Umgebungsbedingungen zu reagieren, macht die Entwicklung strukturintegrierbarer Sensor-Aktor-Systeme notwendig. Typische Applikationen sind das Überwachen der Stabilität und des Schwingungszustandes von (Leichtbau-) Konstruktionen wie Brücken oder Karosserien bzw. die aktive Schwingungsreduktion. Hierzu werden innerhalb der Konstruktionselemente die mechanischen Größen Beschleunigung, Kraft oder Dehnung messtechnisch erfasst und die elektrische Ausgangsgröße der jeweiligen Signalverarbeitungseinheit zugeführt. Auch in der minimalinvasiven bzw. robotergestützten Chirurgie (vgl. Projekt INKOMAN in Kapitel 3.1.4) findet sich dieser Gedanke wieder. So sind miniaturisierte Sensoren (Durchmesser $\ll 10$ mm), die in die Instrumentenspitze integriert werden können, von zentraler Bedeutung für die Regelung des Systems [Rausch u. Werthschützky 2009]. Langfristiges Ziel ist es, Sensoren möglichst schon im Herstellungsprozess in die Struktur zu integrieren bzw. die Struktur aus intelligenten z.B. dehnungssensitiven Materialien zu fertigen.

Zu diesem Zweck werden am Institut EMK im Rahmen des Projekts AdRIA (siehe Berichtsteil 3.3.1) miniaturisierte Dehnmesselemente entwickelt und mit dem Stand der Technik verglichen. Unter Ausnutzung des piezoresistiven Effekts kann so auf kleinstem Raum der Verformungszustand beliebiger Strukturen überwacht werden.

Bearbeitungsstand

Zur Erfassung der Oberflächendehnung wurden optische (Faser-Bragg-Gitter-Sensoren, $K \approx 0,78$) und (piezo-)resistive Prinzipien ($K \leq 155$) untersucht [Rausch u. a. 2009]. Als Messobjekt dienen Stahlverformungskörper. Beim letztgenannten Sensorprinzip stehen zwei Sensortechnologien im Fokus: Siliziumtechnologie (Messelementdicken von $30\text{-}68\ \mu\text{m}$) sowie das Beschichtungsverfahren Drucken (Sieb- und Inkjetdruck, Messelementdicken von ca. $1\text{-}9\ \mu\text{m}$).

So erfolgt am Institut EMK die Entwicklung und Charakterisierung miniaturisierter, inhomogen dotierter Si-Dehnmesselemente mit integrierter Vollbrücke zur punktuellen Dehnungsmessung (Abbildung 3.34). Abhängig von der Dotierung können so K-Faktoren von bis zu 120 erzielt werden. Der Entwurf ist abgeschlossen und die Präparation von insgesamt 4 Varianten erfolgte durch das CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik und Photovoltaik GmbH [Rausch u. Werthschützky 2010].

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren (IDD) an der TU Darmstadt wurden siebgedruckte Sensorstrukturen entworfen und charakterisiert. Ziel ist es kostengünstig die Integration der Sensoren schon im Fertigungsprozess zu realisieren. Ein Aspekt, der hierbei untersucht wird, ist die Umformbarkeit der z.B. auf Blech integrierten Sensoren. Die verwendeten funktionalen Druckfluide sind Silbersuspensionen und weisen bisher rein resistives Verhalten auf. Ziel ist es, die Empfindlichkeit durch die Verwendung neuartiger Druckfluide zu erhöhen [Salun u. a. 2010].

Die Charakterisierung der Dehnmessenelemente erfolgt in einem nach DIN EN ISO 178 bzw. EN 658-3 konzipierten 4-Punkt-Biegemessplatz.

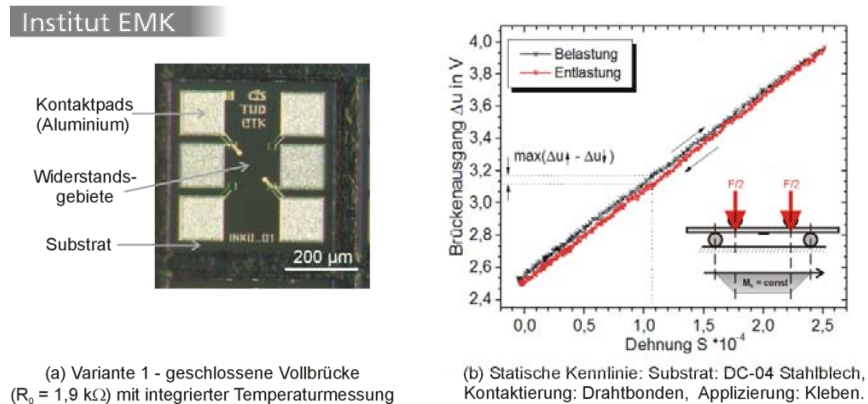


Abbildung 3.34: Inhomogen dotiertes Si-Dehnmesselement (Dicke $50 \mu\text{m}$).

Ausblick

Der Forschungsschwerpunkt bei den Si-Elementen liegt derzeit in der Aufbau- und Verbindungstechnik, um durch die Integration des Messelements am Messobjekt keine Einbuße in der Empfindlichkeit durch mangelhafte Dehnungsübertragung zu erhalten. Im Bereich der gedruckten Sensoren soll zukünftig verstärkt das Druckverfahren Inkjet eingesetzt werden, um aufgrund der geringen Schichtdicken auch transparente Dehnungssensoren realisieren zu können.

Bearbeiter: Patrick Heinickel

Bearbeitungszeitraum: 01.11.2007 - 31.10.2012

Ziel der Arbeit

Auf dem Markt verfügbare Hochdrucksensoren sind derzeit meist aus einem Metallverformungskörper aufgebaut. Dieser ist mit Dehnungsmesselementen, wie DMS in Dünnfilm-, Dickfilm- bzw. Halbleiterausführung, bestückt. Das Know-How dieser Sensoren steckt vor allem im aufwendig zu fertigenden monolithischen Metallverformungskörper. Das Prinzip ermöglicht das Messen von Drücken bis 1,5 GPa. Die Nachteile sind hohe Kosten und der vergleichsweise geringe Überlastschutz von maximal 120 % des Nenndrucks, da die Gefahr der plastischen Verformung besteht. Piezoresistive Silizium-Messelemente finden als kostengünstige Primärsensoren für Relativ- und Absolutdruckbereiche von 10 kPa bis 100 MPa industrielle Anwendung in Massen- und Konsumgütern. Sie vereinen eine Reihe von Vorteilen, wie niedrige Fertigungskosten, miniaturisierte Abmessungen, hohen Grundwiderstand und hohen Übertragungsfaktor. Allerdings weisen sie einen entscheidenden Nachteil auf: Übertreffen die bei Druckbelastung auftretenden mechanischen Zugspannungen in der Druckplatte die Bruchspannung von Silizium, so führt dies zum sofortigen Bersten der Silizium-Druckplatte, da ein plastischer Verformungsbereich entfällt. Der maximale Nenndruck piezoresistiver Silizium-Drucksensoren ist üblicherweise auf ca. 100 MPa beschränkt. Um die Vorteile des piezoresistiven Silizium-Drucksensors auch im Hochdruckbereich nutzen zu können, besteht das Ziel des Forschungsvorhabens in der Entwicklung eines kostengünstigen, überlastfesten, piezoresistiven Hochdruck-Sensors einschließlich des erforderlichen Packaging für Nenndruckbereiche von 50 MPa bis 500 MPa.

Bearbeitungsstand

Beim neuartigen Silizium-Hochdruck-Messelement, dem Verbundelement, wird auf eine abgedünnte Druckplatte verzichtet. Ein Vollkörper-Silizium-Messelement mit integrierten piezoresistiven Widerständen wird anodisch an einen im Vergleich zu Silizium weicheren Gegenkörper gebondet. Durch allseitige, also hydrostatische Druckbelastung des Verbundelements stellt sich eine schalenförmige Verwölbung, infolge der stärkeren Stauchung des weicheren Substratmaterials, ein. Diese druckabhängigen mechanischen Differenzspannungen verändern die Werte der im Silizium implantierten Widerstände aufgrund des piezoresistiven Effektes. Dieses neuartige Verspannungsprinzip bildet die Funktionsgrundlage der Konstruktionsvariante. Ein weiterer Vorteil der Konstruktionsvariante ist die hohe Überlastfestigkeit, die

sich aufgrund der allseitigen Druckbelastung ergibt [Heinickel u. Werthschützky 2009a].

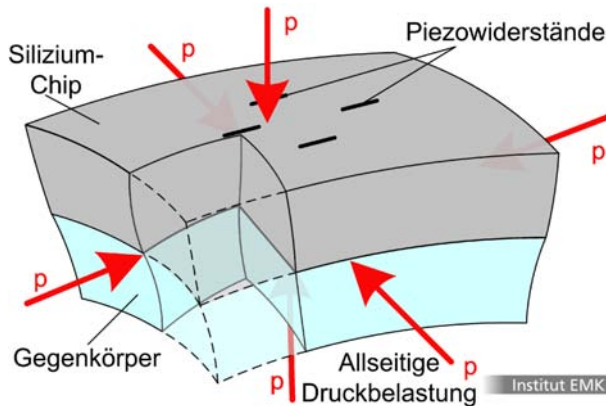


Abbildung 3.35: Verbundelement unter hydrostatischer Druckbelastung als piezoresistives Messelement für den Hochdruckbereich bis 500 MPa

Analytische Beschreibungen, FEM-Simulationen und messtechnische Untersuchungen bilden die Entwurfs- und Optimierungsgrundlage für das neuartige Messelement. Zur messtechnischen Charakterisierung der neuen Elemente wurde am Institut ein spezieller Hochdruck-Messplatz aufgebaut. Durch die Verwendung einer Druckwaage können bis zu 500 MPa mit einer maximalen Messunsicherheit von 5 ppm zur statischen Charakterisierung erzeugt werden. Die Verbundelemente werden mit einem stabilisierten Gleichstrom von 1 mA versorgt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden hauptsächlich geometrische Parameter und Materialkombinationen mit dem Ziel der Steigerung der Empfindlichkeit untersucht. Die Tabelle zeigt die Entwicklung der charakteristischen Werte der messtechnischen Untersuchung vom ersten aufgebauten Messelement zum aktuellen Messelement. Es handelt sich um einen kontinuierlichen Optimierungsprozess - die Zwischenstufen sind nicht dargestellt [Heinickel u. Werthschützky 2009b] [Heinickel u. Werthschützky 2010].

Die Tabelle zeigt, dass die Optimierungen zu einer Steigerung der Empfindlichkeit um Faktor 20 geführt haben bei gleichzeitiger Reduzierung der systematischen statischen Fehler um Faktor 30 bis 50. Die Empfindlichkeit bezogen auf den Nenndruckbereich ist aktuell mindestens Faktor zwei niedriger als von Silizium-Drucksensoren

Tabelle 3.4: Entwicklung der messtechnisch bestimmten charakteristischen Werte der Verbundelemente: Erste Variante und aktuell optimierte Variante

	Erste Variante	Aktuelle Variante
Übertragungsfaktor B_0	0,224 $\mu\text{V}/(\text{V } 10^5 \text{ Pa})$	4,22 $\mu\text{V}/(\text{V } 10^5 \text{ Pa})$
Linearitätsfehler F_{Lin}	8,2 %	0,22 %
Hysterese Fehler F_{Hyst}	4,1 %	0,08 %
Nullpunktfehler F_{Null}	6,2 %	0,18 %

im Normaldruckbereich mit Platte. Somit ist auch weiterhin Optimierungspotential an den Verbundelementen vorhanden.

Ausblick

Neben dieser Optimierung des Verbundelementes steht das Packaging und eine angepasste und optimierte Aufbau- und Verbindungstechnik im Fokus künftiger Forschungsarbeiten zur Entwicklung eines Silizium-Hochdruck-Sensors.

Für die Förderung des Forschungsvorhabens danken wir der Fa. EPCOS AG, ein Unternehmen der TDK-EPC Corporation.

Überlastfester Silizium-Differenzdrucksensor für die Prozessmesstechnik

Bearbeiter: Timo Kober

Bearbeitungszeitraum: 15.11.2007-14.11.2012

Der Stand der Technik bei Differenzdrucksensoren für die Prozessmesstechnik ist durch einen unteren Nennmessbereich von $\Delta p_N = 1 \text{ kPa}$ bei einem statischen Druck von $p_{\text{Stat}} = 16 \text{ MPa}$ und einer Messunsicherheit $\leq 2 \cdot 10^{-3}$ gekennzeichnet. Bei Prozessdrucksensoren wird die geforderte Überlastfestigkeit derzeit durch eine zusätzliche, feinwerktechnisch hergestellte Metallüberlastplatte in der ölgefüllten Messzelle gewährleistet. Diese Zusatzeinrichtung bestimmt das derzeitige Bauvolumen, das erforderliche Ölfüllvolumen des Kapillarsystems und somit auch den möglichen Einsatztemperaturbereich der Messzelle.

Zielstellung der Forschungsarbeiten ist es, das Silizium-Messelement selbst überlastfest zu konzipieren (Abbildung 3.36). Gelingt es, den Überlastschutz in das Messelement selbst zu integrieren, können zusätzliche mechanische Baugruppen im Messwerk eingespart werden. Die Messplatte legt sich im Überlastfall an das homogene Gegenlager aus Glas an (Abbildung 3.37). Dem Messwerk kommt dabei nach wie vor die Aufgabe der Medientrennung zu.

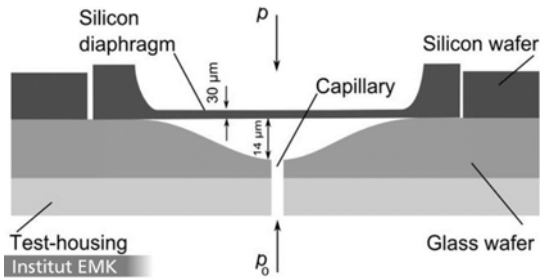


Abbildung 3.36: Testaufbau zur Bestimmung der Berstfestigkeit der Siliziummessplatte am homogenen Gegenlager aus Glas.

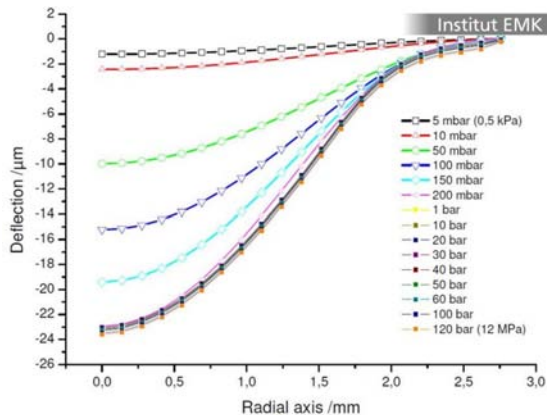


Abbildung 3.37: Strukturiertes Gegenlager aus Glas

Die Überlastfestigkeit des neu konzipierten Messelementes weist einen Berstwert von mehr als 5 MPa auf. Dabei ist das Messelement für einen Nennmessbereich von 1 kPa ausgelegt. Weitere Untersuchungen zum dynamischen Verhalten der Messplatte am Gegenlager sowie statistische Absicherung des Berstwertes durch erweiterten Musterbau sind Zielstellung weiterer Forschungsarbeiten.

Bearbeiter: Tim Rossner

Bearbeitungszeitraum: 05.05.2009 - 09.05.2014

Aufgabenstellung

Miniaturisierung spielt in der Medizintechnik eine herausragende Rolle. Vor allem in Hinblick auf minimal-invasive Chirurgie oder implantierbare Geräte sind sehr kleine Abmessungen der eingesetzten Werkzeuge, Aktoren und Sensoren unabdingbar. Einhergehend mit den immer weiter schrumpfenden Abmessungen, müssen auch die Folgetechnologien der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) an die neuen Anforderungen angepasst werden.

Ziel der Forschungsarbeit ist es, die elektrische Kontaktierung von medizintechnischen Produkten zu optimieren. Dabei werden die bekannten Technologien auf ihre Einsatzfähigkeit und Wirtschaftlichkeit hin untersucht und eine Empfehlung für die jeweiligen Anwendungsbereiche gegeben. Als Bewertungskriterien werden die minimale Anschlussgröße, Langzeitstabilität, sinnvolle Anschlusslänge oder Biokompatibilität untersucht. Die ausgewählten Technologien werden am Beispiel des Kraftsensors für einen Haptischen Katheter [Meiss u. Werthschützky 2009] und an Zungendrucksensorarrays [Stöhr u. a. 2009b] angewendet und überprüft.

Bearbeitungsstand

Am Beispiel eines Mikrokraftsensors für einen Haptischen Katheter wurden die Klebetechnologien isotropes Kleben (Isotropic Conductive Adhesive, ICA), anisotropes Kleben (Anisotropic Conductive Adhesive, ACA) so wie die Löttechnologie angewendet. Der Anschluss von extrem kleinen Kontaktstellen von $(40 \times 50) \mu\text{m}^2$ in Verbindung mit einer sehr langen Zuleitung von 1,8 m ist eine sehr kritische Anwendung [Meiss u. a. 2009c]. Abbildung 3.38 zeigt einen isotrop leitfähig kontaktierten Mikrokraftsensor mit sechs Anschlussdrähten.

Im Rahmen des Projektes HapCath wurde ein neuartiges Verfahren entwickelt und patentiert [Meiss u. a. 2010], das kostengünstige unedle Kupferleiter, die gute elektrische und mechanische Eigenschaften aufweisen, mit einem edlen Goldkontaktsystem an der Verbindungsstelle kombiniert. Nur durch ein edles Kontaktsystem wie Gold kann eine langzeitstabile elektrische Verbindung durch isotropes Kleben gewährleistet werden. Bei diesem Verfahren werden isolierte Kupferdrähte an der Schnittfläche galvanisch mit Nickel beschichtet. Durch die Stromdichte und Dauer der Beschichtung kann die Größe der aufmetallisierten Kugeln eingestellt werden. Anschließend werden die Nickelkugeln am Ende der Drähte chemisch mit Gold beschichtet. Abbildung 3.38 zeigt ein im Verbund hergestelltes Drahtbündel mit Nickel/Gold Kugeln.

Ausblick

In Zukunft ist die genaue messtechnische Untersuchung der verschiedenen leitfähigen Klebetechniken geplant. Dabei wird auch ein neuartiges Verfahren zur Kontaktierung von Mikrokabeln durch nicht leitfähige Folie (Non-Conductive Foil, NCF) untersucht. Die verschiedenen Varianten werden vor allem auf Übergangswiderstand, Langzeitstabilität, Biokompatibilität und Automatisierungspotential untersucht.

Um im Rahmen des Projektes HapCath (Haptische Katheter) die Positionierung von 6 Einzeldrähten zu vereinfachen, läuft gegenwärtig die Entwicklung und der Aufbau einer Laserdirektbelichtungsanlage, die an eine Nd:YAG Laseranlage gekoppelt ist. Damit wird es möglich sein, auf einem flexiblen Substrat Kupferleiterbahnen so zu strukturieren, dass diese als Leiterbahnen in einen Führungsdraht von $360\mu\text{m}$ Durchmesser integriert werden können. Die Leiterbahnen werden durch einen UV-Laser direktbelichtet und anschließend ohne Umspannen, also ohne Versatz an der gleichen Anlage durch einen Nd:YAG Laser ausgeschnitten. So können flexible Leiterbahnen mit weniger als $50\mu\text{m}$ breiten Leiterbahnen und weniger als $50\mu\text{m}$ Abstand zwischen den Leiterbahnen (lines and spaces kleiner $50\mu\text{m}$) hergestellt werden.

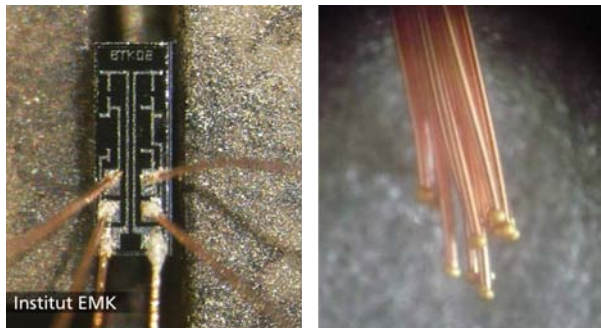


Abbildung 3.38: Kontaktierung durch Mikrodrähte.

Isotrop leitfähig kontaktierter Mikrokraftsensor (links) und isolierte Kupferdrähte mit Nickel/Gold Kugeln (rechts)

Bearbeiter: Ingmar Stöhr

Bearbeitungszeitraum: 01.08.2006 - 31.07.2011

Aufgabenstellung

Im Rahmen des DFG Projektes „Zungendruckmessung“ soll ein System zur Erfassung des Drucks zwischen Zunge und hartem Gaumen entstehen. Es soll zur Untersuchung der funktionalen Abläufe beim Schlucken und Sprechen dienen, aber auch den statischen Zungendruck erfassen können. Die Erfassung des Drucks soll orts aufgelöst mit bis zu zehn Messstellen erfolgen. Die Signalübertragung soll drahtlos erfolgen, da Kabel den Patienten zusätzlich irritieren und die natürliche Zungenfunktion beeinflussen. Dies bedingt die Integration der Energieversorgung und der Auswertelektronik in das im Mund befindliche Messsystem.

Bearbeitungsstand

Als Drucksensoren wurden die derzeit kleinsten am Markt erhältlichen piezoresistiven Absolutdruckmesselemente ausgewählt. Die Messelemente SM5108 von Silicon Microstructures, USA, weisen Abmessungen von $(0,65 \times 0,65 \times 0,65) \text{ mm}^3$ auf. Zum Schutz vor Umwelteinflüssen bei gleichzeitiger Sicherstellung der Druckeinleitung wird ein neues, polymerbasiertes Packaging entwickelt [Stöhr u. a. 2009a]. Besondere Anforderungen sind eine geringe Dicke und der Schutz der Bonddrähte bei der Montage des Sensorsystems in einer Gaumenplatte. Erreicht wird dies durch einen Verguss mit zwei unterschiedlichen Materialien (Abbildung 3.39).

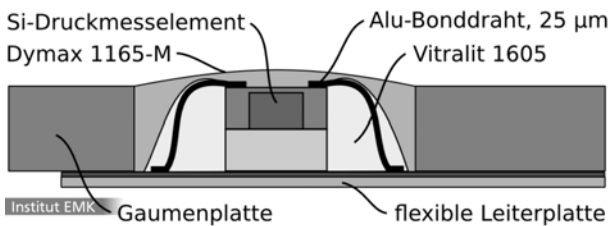


Abbildung 3.39: Querschnitt durch das entwickelte Packaging der piezoresistiven Absolutdruckmesselemente, bestehend aus einem harten (Vitalit 1605) und einem weichen Material (Dymax 1165-M)

Ein UV-härtendes Epoxidharz (Vitalit 1605) mit einer Härte von Shore D80 umgibt die Bonddrähte. Nach der Montage des Sensorsystems in der Gaumenplatte erfolgt ein Verguss mit einem medizinisch zugelassenen Acrylurethan mit einer Shorehärte

te von A55. Die Dicke des Messsystems beträgt mit diesem Packaging nur einen Millimeter.

Ein weiteres wesentliches Element des Messsystems ist die Auswertelektronik. Da die Ausleitung der Messwerte drahtlos erfolgen soll, muss die Auswertelektronik ebenfalls in der Gaumenplatte integriert werden [Stöhr u. a. 2010a]. Die Herausforderung liegt hierbei bei einer maximal zur Verfügung stehenden Grundfläche von 2 cm^2 bei gleichzeitig möglichst geringer Bauhöhe. Als Teil eines drahtlosen Sensorsystems muss auch die Leistungsaufnahme minimiert werden. Wegen der höheren Integrationsdichte sind integrierte Schaltungen diskret aufgebauten überlegen. So kommt ein hochintegrierter Auswerte-IC (AD7194) von Analog Devices zum Einsatz. An diesen können direkt bis zu acht piezoresistive Brücken angeschlossen werden. Ein 24-Bit Delta-Sigma-Wandler übernimmt die Digitalisierung. Da die Silizium-Messelemente eine größere Leistungsaufnahme als Mikrocontroller und AD-Wandler zusammen aufweisen, werden diese nur während der Abtastung vom Mikrocontroller mit Spannung versorgt. Durch diese Maßnahme kann die Leistungsaufnahme des Messsystems um 74 % reduziert werden. Abbildung 3.40 zeigt die entwickelte Auswertelektronik.

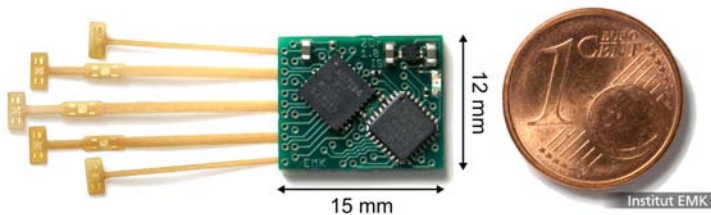


Abbildung 3.40: Auswertelektronik mit zentralem Auswerte-IC AD7194 und angeschlossenen Flexleitern, auf denen die Druckmesselemente montiert werden

Ausblick

Erste Untersuchungen haben ergeben, dass sich die geschaltete Versorgungsspannung der Messelemente nicht nachteilig auf die Messunsicherheit auswirkt. Die im Vergleich zu kapazitiven Sensoren höhere Leistungsaufnahme resistiver Sensoren stellt einen Nachteil dieses Messprinzips dar. Daher soll das Potential einer geschalteten Versorgungsspannung und ihre Auswirkungen auf die messtechnischen Eigenschaften des Messelementes genauer untersucht werden. Gerade im Bereich autarker Sensorsysteme wäre das ein großer Vorteil.

3.2.3 Haptik

Aktorik und Integration in den Behandlungsablauf

Bearbeiter: Stephanie Sindlinger (geb. Klages) und Thomas Opitz
Bearbeitungszeitraum: 15.10.2004 - 31.03.2009
15.05.2009 - 14.05.2014

Aufgabenstellung

Die an der Führungsdrahtspitze gemessenen Kräfte sollen über eine haptische Aktorik verstärkt auf den Draht gekoppelt werden. Die wichtigsten Anforderungen an die haptische Aktorik sind in der Tabelle 3.5 zusammengefasst:

Tabelle 3.5: Haptische Anforderungen an die Aktorik

max. Kraft	F_{\max}	200 mN
Obere Grenzfrequenz	f_{grenz}	1000 Hz
max. Drehmoment	M_{\max}	100 mNm

Die zu entwickelnde Aktorik darf durch die während der Operation auftretenden Flüssigkeiten Blut und Kontrastmittel, die den Reibkoeffizienten der Oberfläche verändern, nicht negativ beeinflusst werden.

In der Abbildung 3.41 ist der piezoelektrische Ultraschallaktor dargestellt, der zur Erzeugung der haptischen Kraftwirkung entwickelt wurde.

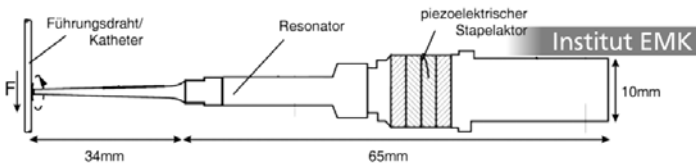


Abbildung 3.41: Einkopplung des piezoelektrischer Ultraschallaktors am Führungsdraht

Der Aktor besteht aus einem piezoelektrischen Stapelaktor, der einen mechanischen Resonator in zwei seiner Eigenmoden gleichzeitig zum Schwingen anregt. Die Überlagerung einer longitudinalen und einer transversalen Moden ergibt an der Spitze eine lissajousförmige Schwingung, die direkt durch Reibkopplung auf den

Führungsdraht wirkt. Vorteil der hohen Arbeitsfrequenzen zwischen 20 kHz und 80 kHz ist, dass den Kardiologen eine konstante Kraftwirkung dargestellt wird. Die einzelnen Kraftimpulse sind nicht hör- als auch nicht spürbar.

Bearbeitungsstand

Seit Beginn des Projektes wurden die folgenden Forschungsschwerpunkte bearbeitet und auf mehreren internationalen und nationalen Kongressen veröffentlicht [Meiss u. a. 2009a], [Kern u. a. 2007].

- Entwurf des Aktors mit FEM-Simulationen
Für den Entwurf des Aktors werden FEM-Simulationen durchgeführt. Variiert werden die Form des Resonators (stufenförmig, elliptisch und linear verjüngend) und die Abmessungen der Spitze. Zielgrößen sind die Ermittlung der Eigenmoden, sowie die Maximierung der Amplitude an der Spitze.
- Ansteuerung und Regelung des Aktors
Zur Ansteuerung des Aktors werden zwei Sinussignale mit Schwingungsfrequenz der einzelnen Moden gemischt. Die Frequenzen werden in LabView erzeugt und in einem Mikrocontroller gemischt. Das gemischte Signal wird auf die Ansteuerspannung von $V_{SS} = \pm 300\text{V}$ verstärkt.
- Entwicklung und Aufbau zweier Versuchsstände
Zum Test des Aktors sind zwei Versuchsumgebungen entwickelt und aufgebaut worden. In dem ersten Versuchstand wird das durch den Aktor erzeugte Drehmoment gemessen. Der Aktor treibt eine luftgelagerte Kugel an. Die Bewegung der Kugel wird über zwei optische senkrecht zueinander montierte optische Sensoren erfasst. Über die Winkelbeschleunigung der Kugel werden das Drehmoment und die erzeugte Leistung berechnet.
Im zweiten Versuchstand wird die Kraft direkt auf den Führungsdraht gekoppelt. Ziel ist die Bewertung des haptischen Feedbacks durch Kardiologen.

Ausblick

Im Anschlußprojekt (siehe T. Opitz) soll die Entwicklung der Aktorik weiter vorangetrieben werden. Hierzu wird eine elektrodynamische Bedieneinheit entwickelt, um einen Vergleich von piezoelektrischer und elektrodynamischer Aktorik zu ermöglichen. Die Beurteilung der Antriebskonzepte erfolgt hierbei messtechnisch als auch subjektiv durch Kardiologen. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen anschließend in die Entwicklung eines neuartigen hybriden haptischen Displays einfließen, das die Vorteile von elektrodynamischer und piezoelektrischer Aktorik kombiniert. Weitere Aufgabenfelder sind die Gewährleistung der Biokompatibilität, die Miniaturisierung der haptischen Bedieneinheit, die Erfüllung der Anforderungen zur Zulassung als Medizinprodukt und die Beurteilung des Gesamtsystems durch Kardiologen.

Haptisches Bedienelement für die minimalinvasive Chirurgie

Bearbeiter: Sebastian Kassner

Bearbeitungszeitraum: 01.08.2007 - 30.06.2012

Aufgabenstellung

Für Patienten bedeuten minimal-invasive Operationen im Vergleich zu offener Chirurgie häufig einen beschleunigten Heilungsverlauf und geringere Beschwerden nach dem Eingriff.

Auf der anderen Seite stellen jedoch minimal-invasive Techniken erhöhte Anforderungen an den Chirurgen. Besonders der nahezu vollständige Verlust des Tastsinns erschwert die Durchführung präziser Manipulationen.

Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung einer neuen haptischen Mensch-Maschine-Schnittstelle. Diese Schnittstelle soll die Steuerung des neuartigen Chirurgesystems „INKOMAN“ unter aktiver Krafterückmeldung ermöglichen. Auf diese Weise soll der Arzt wieder in die Lage versetzt werden Gewebestrukturen zu ertasten, feinfühlig zu arbeiten und übermäßige Beanspruchungen des Gewebes zu vermeiden.

Die Forschung in diesem Projekt hat ihren Ursprung im Rahmen des BMBF-geförderten Vorhabens „SOMIT FUSION“ zur Entwicklung neuer schonender Operationsverfahren in der Leber-Chirurgie, das bis Ende 2008 am Institut EMK durchgeführt wurde.

Tabelle 3.6 fasst die wichtigsten Anforderungen an das haptische Bedienelement zusammen.

Tabelle 3.6: Zusammenstellung ausgewählter Anforderungen

Bezeichnung	Wert
Bedienung	intuitiv, mit einer Hand
zu steuernde Kinematik an der Instrumentenspitze von INKOMAN	Struktur mit 4 Freiheitsgraden
Intensität des haptischen Feedbacks	$F = 5 \text{ N}$
Grenzfrequenz des haptischen Feedbacks	$f_g = 400 \text{ Hz}$

Die Forschungsaufgabe gliedert sich im Wesentlichen in die Aspekte:

- Dynamische Analyse von mechanischen Gewebe-Eigenschaften
- Aktorik und deren Regelung
- Getriebe-Verhalten und dynamisches Übertragungsverhalten von parallelkinematischen Mechanismen

Bearbeitungsstand

Grundlage für die Entwicklung der haptischen Bedieneinheit ist das Steuerkonzept des INKOMAN-Systems. Hierzu wurden mehrere Bedienelemente als Prototyp realisiert und ein Konzept erfolgreich im Tierversuch getestet. Kernkomponente dieses Konzeptes ist ein 2. . . 3 DOF Joystick, das in einen Handgriff integriert ist [Kassner u. a. 2009].

Die Integration der haptischen Rückmeldung im Joystick erfolgt als „impedanzregertes System“. Ziel ist es, dem Arzt ein räumliches haptisches Feedback in den drei Koordinaten (x,y,z) zur Verfügung zu stellen. Zur Erzeugung des haptischen Feedbacks kommen drei BLDC-Antriebe zum Einsatz [Kassner u. a. 2010].

Eine parallelkinematische Struktur dient zur Übersetzung der drei Motor-Momente in eine kartesische Krafrückmeldung. Die eingesetzte „DELTA-Struktur“ entstammt der Klasse „translatationaler paralleler Mechanismen“ und weist im Vergleich zu anderen parallelkinematischen Konzepten ein homogenes Übertragungsverhalten im Arbeitspunkt auf [Kassner u. Werthschützky 2010].



Abbildung 3.42: 1-DOF-Funktionsmuster zum Komponententest (links) und DELTA-Parallel-Kinematik (3 DOF Joystick)(rechts)

Ausblick

Neben dem Getriebeverhalten ist aus haptischer Sicht besonders das dynamische Übertragungsverhalten von Interesse. Aus diesem Grund steht die Entwicklung neuer Beschreibungsformen für das dynamische Mehrkörperverhalten solcher Mechanismen im Fokus der aktuellen Forschung. Als Werkzeug kommt u. a. die elektromechanische Netzwerktheorie zum Einsatz. Zur messtechnischen Untersuchung entsteht ein Impedanzmessplatz.

Analyse menschlicher Kraftwahrnehmung

Bearbeiter: Christian Hatzfeld

Bearbeitungszeitraum: 01.04.2008 - 31.03.2011

Aufgabenstellung

Im Rahmen des DFG-Projekts „Analyse menschlicher Kraftwahrnehmung“ soll die menschliche Wahrnehmung mechanischer Größen wie Kraft und Geschwindigkeit mit dem Ziel einer effektiveren Gestaltung von haptischen Schnittstellen untersucht werden.

Ausgehend von offenen Fragestellungen zur Wahrnehmung aus den bisherigen Projekten zu haptischen Schnittstellen soll zum einen die menschliche Wahrnehmung von Kräften bestimmt und zum anderen die Abhängigkeit der Wahrnehmung von äußeren Parametern untersucht werden. Die Untersuchung soll sich auf die technisch wichtigen Kontakte an Fingerkuppe sowie Faust- und Präzisionsgriff konzentrieren.

Bearbeitungsstand

Nach mehreren Optimierungszyklen des Messplatzes [Hatzfeld u. a. 2010b], [Hatzfeld u. a. 2009] wurden erste Studien durchgeführt:

Kraftwahrnehmung: Im Rahmen dieser Studie wurden die ersten Wahrnehmungskurven aufgenommen, die auf einer Ansteuergröße Kraft anstatt Auslenkung basieren. Diese Daten eröffnen neue Möglichkeiten der Auslegung und Qualifizierung von haptischen Systemen. Mit einer verfeinerten Messmethodik und einer größeren Probandenzahl sollen diese Ergebnisse in Zukunft statistisch gesichert werden [Hatzfeld u. Werthschützky 2010].

Parameterabhängigkeit der Wahrnehmung: Verschiedene Studien zeigen eine Abhängigkeit der menschlichen haptischen Wahrnehmung von Umgebungseinflüssen wie Temperatur und Merkmale des Probanden wie z. B. das Alter. In dieser Studie wurden erstmals verschiedene Einflüsse in einem Versuchsplan kontrolliert verändert und quantitativ bestimmt. Die Ergebnisse zeigen mehrere relevante Einflüsse und sollen durch weitere Versuche noch verfeinert werden. Auch aus diesen Versuchen lassen sich verschiedene Implikationen für die Entwicklung haptischer Systeme ziehen, die die Arbeit des Entwicklers erleichtern und zu besseren Systemen führen.

Einfluss des Frequenzbereichs auf Nutzerwertungen: Zur Beurteilung von Bedienelementen wie Schaltern und Tastern existieren verschiedene Ansätze. Den meisten gemein ist eine Betrachtung im niedrigen Frequenzbereich, während aktuelle Forschungen aus dem Bereich der Haptik auch hochfrequenten Signalen im Bereich bis

1 kHz eine große Bedeutung zuweisen. Es wurde nachgewiesen, dass höhere Frequenzen tatsächlich eine bessere Vorhersage von Nutzerwertungen bei Drucktastern ermöglichen als standardmäßig implementierte Verfahren [Hatzfeld u. a. 2010a].

Ausblick

Neben der Aufnahme zusätzlicher Messdaten zur statistischen Sicherung der Ergebnisse sollen weitere Messungen mit anderen Griffsituationen durchgeführt werden. Neben der absoluten Wahrnehmungsschwelle, die bisher untersucht wurde, sollen auch andere, frequenzabhängige Wahrnehmungskenngrößen wie die Just Noticeable Difference (JND) untersucht werden. Weiterhin werden die verwendeten Messmethoden in einer Simulation miteinander verglichen, um eine kürzere zeitliche Belastung des Probanden und genauere Ergebnisse zu erhalten.

Im Bereich der Übertragung haptischer Informationen sollen im Rahmen des Projekts Möglichkeiten zur Vereinfachung der Signalauswertung durch bekannte Datenkompressionsverfahren untersucht werden. Hier bieten sich Analogien aus den bisher gewonnen Erkenntnissen im Bereich der Schall- und Lichtwahrnehmung als erste Ansatzpunkte an.

3.2.4 Sensor-Signalverarbeitung

Integriertes Sensorsystem für rotodynamische Pumpen

Bearbeiter: Reinhard Werner

Bearbeitungszeitraum: 01.06.2005 - 31.05.2010

Aufgabenstellung

Ziel der Forschungsarbeit ist es, ein Sensorsystem zu entwickeln und in eine bestehende Kreiselpumpe zu integrieren. Mit Hilfe der Sensorsignale soll der aktuelle Betriebszustand bestimmt und der Wirkungsgrad optimiert werden. Die Bearbeitung wird in enger Zusammenarbeit mit dem Institut „Fluidsystemtechnik“ des Fachbereichs Maschinenbau, das den Pumpenmessplatz zur Verfügung stellt, durchgeführt. Der ausgewählte Demonstrator (Abbildung 3.43) liefert einen maximalen Volumenstrom q_v von $180 \text{ m}^3/\text{h}$ bei einer maximalen Druckerhöhung Δp von 600 kPa . Dies entspricht einer mechanischen Antriebsleistung von 24 kW .

Die Hauptaufgabe der Arbeit besteht im Entwickeln des integrierten Sensorsystems mit angepasster Auswerteeinheit. Das Sensorsystem soll die Betriebsgrößen der Pumpe, z. B. Förderhöhe, und die Prozessgrößen für die Anlage, z. B. Volumenstrom, erfassen. In der Auswerteeinheit werden die Ausgangssignale der Sensoren

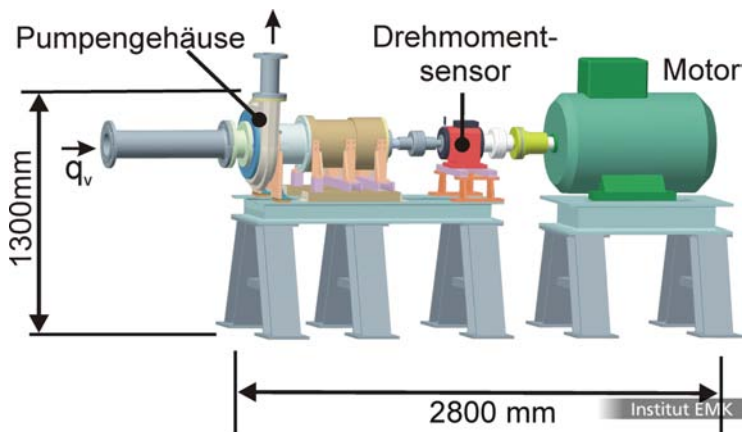


Abbildung 3.43: CAD Darstellung der Kreiselpumpe

verstärkt, digitalisiert, gefiltert und bewertet, um sie anschließend der Betriebszustandsanalyse und Arbeitspunkteinstellung zuzuführen. Außerdem werden Merkmale für die Selbstüberwachung des Sensorsystems abgeleitet. Hierzu sind geeignete Überwachungsverfahren auszuwählen. Eine Rekonfiguration ermöglicht eine Aufrechterhaltung des Betriebs, notfalls auch eingeschränkt, wenn ein Sensor ausfällt. Somit wird ein Totalausfall der Kreiselpumpe wie auch des Sensorsystems verhindert. Die Auswerteeinheit soll die gewonnenen Informationen an eine übergeordnete Prozessleitstelle weiterleiten, um auf Veränderungen kurzfristig zu reagieren.

Zur Analyse des Betriebszustands der Pumpe werden ausgewählte Messgrößen benötigt. Sowohl aus Kosten- als auch Zuverlässigkeitsgründen wird eine möglichst geringe Anzahl von Sensoren angestrebt. Die bisherigen Untersuchungen führen zu folgenden direkt zu erfassenden physikalischen Messgrößen in und an der Kreiselpumpe:

- zugeführter elektrischer Strom und Spannung : $i(t), u(t)$
- ortsabhängige statische und dynamische Drücke: $p_i(x), p_j(x,t)$
- Temperatur des Fluids: $\vartheta(t)$

Bearbeitungsstand

Zum Abschluss des Projektes wurde in das Sensorsystem eine Selbstüberwachung integriert. Sie basiert auf der Kenntnis der Druckverhältnisse in der Kreiselpumpe bei unterschiedlichen Betriebspunkten.

Zum Ablauf der Selbstüberwachung:

An vier Stellen in und an der Kreiselpumpe werden die Absolutdrücke gemessen und aus ihnen zwei unabhängige Druckdifferenzen berechnet. Zusammen mit der Drehzahl und jeweils einem Kennfeld bestimmt das Sensorsystem den zur Druckdifferenz passenden Volumenstrom (Abb. 3.44). Steigt die Differenz zwischen den beiden Werten über einen definierten Schwellwert, so wird ein Diagnosevorgang aktiviert. In einem ersten Schritt wird überprüft, ob sich alle möglichen Druckdifferenzen bei der aktuellen Drehzahl in einem gültigen Bereich befinden. Ist dies nicht der Fall, so lässt sich der gestörte Sensor identifizieren. Sind die berechneten Druckwerte gültig, so folgt der zweite Schritt. Mit Hilfe von virtuellen Drucksensoren wird jeweils aus drei gemessenen Drücken der vierte berechnet. Grundlagen sind ebenfalls Kennfelder. Die Differenz zwischen den gemessenen und den errechneten Drücken wird in einer sich anschließenden Diagnoseroutine analysiert. In ihr ist das Wissen hinterlegt, wie von den Abweichungen auf den Sensor geschlossen werden kann.

Das Projekt wurde im Zeitraum Juni 2005 bis Mai 2008 durch die DFG gefördert.

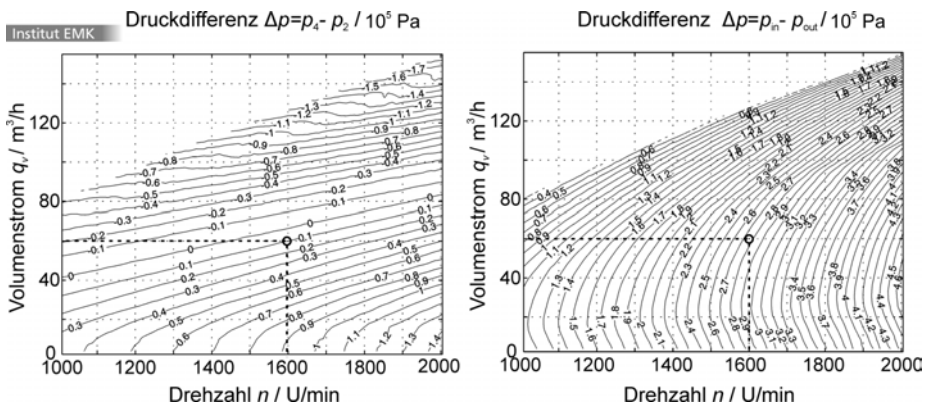


Abbildung 3.44: Bestimmung des von q_v bei $n=1600 \text{ U}/\text{min}$ und $\vartheta p = 10 \text{ kPa}$ innerhalb der Pumpe (links) und $\vartheta p = 270 \text{ kPa}$ an den Anschlüssen der Pumpe (rechts)

Bearbeiter: Lutz Rafflenbeul

Bearbeitungszeitraum: 01.09.2006 - 31.8.2011

Aufgabenstellung

In Kooperation mit dem Deutschen Primatenzentrum (DPZ, Göttingen) ist das Institut EMK Teil des durch die EU geförderten Forschungsnetzwerks EUPRIM-NET von acht europäischen Primatenzentren.

Ein Forschungsfeld der Sensorimotor Gruppe des DPZ ist die Bewegungsplanung von Primaten. Hierzu wird im Gehirn gemessene Aktivität in verschiedenen Experimentierumfeldern betrachtet, in denen die Versuchstiere Entscheidungen für eine Armbewegung treffen. Zur Messung der Gehirnaktivität werden Mikroelektroden in das Gehirn eingebracht und die sich ändernden elektrischen Potentiale abgeleitet und verstärkt. Die am Computer erfassten Signale werden anhand charakteristischer Signalverläufe (Spikes) mittels Cluster-Algorithmen einzelnen Neuronen zugeordnet. Bisher ist dabei eine Kopffixierung der Versuchstiere an einem Experimentierstuhl erforderlich, um die Tiere vor Verletzungen zu schützen.

Um die Belastung von Versuchstieren zu reduzieren wird im Rahmen des EUPRIM-NET-Projektes ein minimalinvasives Messsystem zur Aufnahme neuronaler Aktivität entwickelt. Ziel ist ein miniaturisiertes, auf dem Kopf der Tiere getragenes, drahtloses Übertragungssystem. Dieses soll die Beobachtung von sich frei bewegenden Rhesus-Affen ermöglichen. Neben einer erheblichen Verbesserung der Situation der Versuchstiere, eröffnet die drahtlose Erfassung neue Beobachtungsmöglichkeiten in Experimenten sozial interagierender Tiere.

Da das Messsystem einerseits von den Affen getragen werden muss, jedoch andererseits gegen Beschädigung durch die Tiere geschützt werden soll, ist eine hohe Integrationsdichte bei gleichzeitig stabiler Gehäusung erforderlich.

Neuronale Signale haben eine Bandbreite von etwa 10 kHz und weisen eine charakteristische Signalfrequenz von etwa 1 kHz auf. Bei einer Abtastrate von 25 kHz mit einer Auflösung von 8 Bit resultiert eine erforderliche Übertragungsbandbreite von 200 kBit/s pro Kanal.

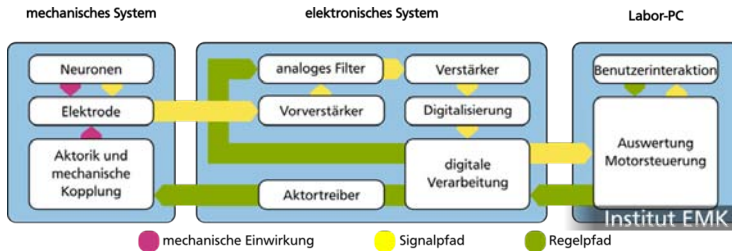


Abbildung 3.45: Struktur des Telemetriesystems zur neuronalen Ableitung

Bearbeitungsstand

Am Institut wurde ein mobiles Vier-Kanal-Messsystem aufgebaut. Abbildung 3.45 zeigt die Struktur des entwickelten Telemetriesystems. Ein mobiles elektronisches System verstärkt und filtert die aufgenommenen Potentialschwankungen einzelner Neuronen und ermöglicht über einen programmierbaren Verstärker eine Anpassung an die Signalstärke. Die Messdaten werden drahtlos an einen Labor-PC übertragen und können dort ausgewertet werden.

Da sich das Gehirn relativ zur Spitze der Mikroelektrode bewegt, ist eine Nachführung über eine Aktorik erforderlich. Hierfür verfügt das System über eine Steuereinheit und einen Motortreiber.

Der Aufbau besteht aus einem zweilagigen Platinenstapel mit einer Grundfläche von 20 mm x 30 mm und wird über einen Lithium-Ion Akku mit Energie versorgt.

Erste Messungen im Tierversuch zeigen die Funktion des Messsystems, verdeutlichen jedoch auch die zu geringe Datenrate des zur drahtlosen Übertragung verwendeten Bluetooth-Moduls. So lassen sich zwar bereits Spikes aufzeichnen, die für das Clustering erforderlichen Frequenzbereiche oberhalb von 5 kHz fehlen jedoch in der Aufzeichnung [Rafflenbeul u. a. 2010].

Abbildung 3.46 zeigt das ungehäuste Telemetriesystem. Da sich auf der Unterseite der Hauptplatine das Bluetooth-Modul mit einer Antenne befindet, ist in Hinblick auf die Sende- und Empfangsqualität ein Teil der Platinenfläche nicht bestückt.

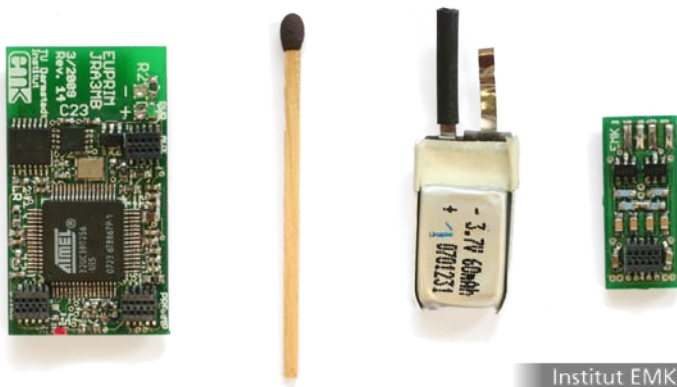


Abbildung 3.46: Hauptplatine, Akku und Vorverstärker

Ausblick

Da die Datenübertragung zur Zeit den Flaschenhals in der Messwerterfassung darstellt, wird ein Wechsel der Übertragungstechnik stattfinden. Im Rahmen einer Studienarbeit wurde bereits ein Übertragungsmodul auf Basis von Wireless LAN entwickelt und aufgebaut, das als Ersatz für das Bluetooth-Modul zum Einsatz kommen wird.

Parallel wird die Möglichkeit verfolgt, einen Mikroaktor in das System zu integrieren, um ein vollständig von den Tieren tragbares Gerät zu erhalten. Weitere Tierversuche müssen zeigen, dass bei Verwendung des neu entwickelten mobilen Systems eine Messung ebenso wie mit konventionellen stationären Messsystemen möglich ist.

3.2.5 HapCath - Haptisches Assistenzsystem für Katheterisierungen

Bearbeiter: Thorsten Meiß, Stephanie Sindlinger, Thomas Opitz, Tim Rossner (MuST)

Bearbeitungszeitraum: 09/2004 - 03/2010 (weitere Förderanträge in Bearbeitung)

Im Forschungsprojekt „HapCath“ - Haptischer Katheter - wird ein medizinisches Assistenzsystem entworfen und erprobt, welches dem Mediziner ermöglicht, sich bei Katheterisierungen des Herzens durch den Körper zu tasten. In der Abbildung 3.47 ist das Prinzip des Assistenzsystems für Katheterisierungen dargestellt.

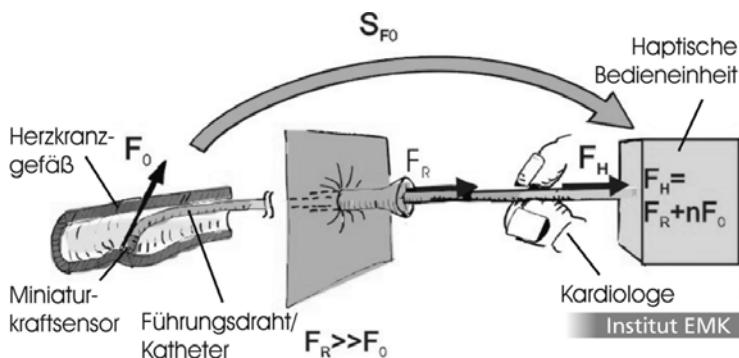


Abbildung 3.47: Struktur des Assistenzsystems für Katheterisierungen mit aktiver haptischer Rückmeldung (Force Feedback).

Bei Herzkatheterisierungen wird ein Führungsdraht durch das Gefäßsystem in die Herzkranzgefäße eingeführt. Hierdurch können beispielweise Verschlüsse der Herzkranzgefäße geöffnet und durch einen nachfolgenden Katheter weitere diagnostische Werkzeuge eingeführt werden. Da die Reibkraft F_R des Führungsdrahtes im Gefäßsystem die Kontaktkraft der Führungsdrahtspitze F_0 weit übersteigt, gibt die Kraft F_H an der Hand des Mediziners nicht die mechanischen Vorgänge an der Führungsdrahtspitze wieder, wodurch die Navigation des Drahtes sehr schwierig ist. Um diese zu verbessern wird das System HapCath entwickelt. Die Kräfte zwischen der Führungsdrahtspitze und der Aderwand F_0 werden durch in die Drahtspitze integrierte Kraftsensoren gemessen (siehe T. Meiß). Die gemessene Kraft F_0 wird durch das Signal S_{F_0} nach außen geführt. In der haptischen Bedieneinheit wird das Signal verstärkt und als skalierte Kraft F_H extrakorporal auf den Führungsdraht zurück

gekoppelt (siehe Forschung S. Sindlinger und T. Opitz). Ziel ist es, dem Anwender durch eine Krafrückkopplung einen haptischen Eindruck des Gefäßsystems zu ermöglichen und dadurch Aderabzweige zu ertasten, sowie Plaque und Gefahren erkennen zu können. Hierdurch soll die Navigation des Drahtes vereinfacht, das Komplikationsrisiko gesenkt, die Erfolgsrate gesteigert und insgesamt der Patient und Mediziner weniger belastet werden.

2004 wurde die erste durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft geförderte Phase mit der Mikro-Kraftsensorik (T. Meiß) und der Konzeptionierung der Bedieneinheit für HapCath (S. Klages) begonnen. Ende 2010 schließen wir jetzt die erste Förderphase ab. Derzeitig wird an einem Antrag zur weiteren Überführung der Ergebnisse in die Industrie zur Fertigung eines taktilen Führungsdrahtes gearbeitet. Die Forschungen im Bereich der Bedienschnittstelle werden in Zukunft weiter in Richtung haptische Differenzierung von diagnostisch relevanten und für den Ablauf der Katheterisierung wichtigen Parametern verlaufen. Ansätze in der kognitiven Sensorik können hier interessant werden und sollen untersucht werden (siehe T. Opitz). Auch ein Mediziner soll zukünftig direkt im Projekt eingebunden werden. Auf Basis der Erarbeitung neuer Technologien zur Kontaktierung der Mikrokraftsensoren wird T. Rossner im HapCath-Team mit der Erforschung spezieller Kontaktierungstechnologien für medizinische Sensoren tätig sein und auch weitergehende Fragestellungen im Aufbau von Mikrosensoren der EMK-Forschung fachlich unterstützen [Meiss u. a. 2010]. Anhand eines Demonstrators des Systems [Meiss u. a. 2009a] können am Institut EMK und auf Messen und Tagungen erste Haptische Katheterisierungen vorgestellt und erprobt werden.

3.3 Gemeinsame Projekte

3.3.1 AdRIA - Adaptronics Research Innovation and Application

Leitung des Technologiebereichs *Aktorik und Sensorik* Prof. Dr.-Ing. H. F. Schlaak
Bearbeiter: Dr. Peter P. Pott, Alvaro Carrasco, Roman Karsten, Jacqueline Rausch
Bearbeitungszeitraum: 01.10.2008 - 30.06.2011 bzw. 30.06.2014

Allgemeiner Überblick

Das Projekt „AdRIA - Adaptronics Research Innovation and Application“ ist ein im Rahmen der hessischen Landesexzellenzinitiative (LOEWE - Landes-Offensive zur Entwicklung Wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz) ins Leben gerufenes Gemeinschaftsprojekt der TU Darmstadt, des Fraunhofer-Instituts für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF) und der Hochschule Darmstadt. Es umfasst etwa 50 wissenschaftliche Mitarbeiter in insgesamt zehn Technologiebereichen. Das Projekt ist örtlich am Fraunhofer-Institut LBF in Darmstadt-Kranichstein angesiedelt. Im dortigen „AdRIA-Zentrum“ existieren großzügige Laborflächen, Büroräume für die Mitarbeiter sowie der schnelle Zugriff auf die Ressourcen des LBF. Zur Sicherstellung des Know-how-Transfers besitzen die meisten wissenschaftlichen Mitarbeiter darüber hinaus einen Arbeitsplatz in ihren Heimatinstitutionen. Das Projekt läuft von Juni 2008 bis Juni 2014, wobei zum Juni 2011 eine Zwischenevaluation ansteht.

Der Technologiebereich „Aktorik & Sensorik“ wird hierbei maßgeblich vom Institut EMK gebildet. Ziel ist hierbei die Strukturintegration von Aktoren und Sensoren zur Messung und Beeinflussung von Schwingungen. Die Sensorik-Teilgruppe, geleitet von Prof. Werthschützky, umfasst hier die Teilprojekte:

- Silizium-Sensorik und gedruckte Sensorik (beides J. Rausch)
- Drehmoment- und Drehbeschleunigungsmessung (O. Yapici)
- Kraft- und Beschleunigungsmessung (Ch. Hatzfeld)

Die Aktorik-Teilgruppe wird von Prof. Schlaak geleitet und beschäftigt sich mit:

- Piezoaktorik mit intrinsischer Drehmomentmessung (Dr. P. Pott)
- wimperbasierten Piezoaktorik (A. Carrasco)
- Einsatz der EAP-Technologie zur Schwingungsbeeinflussung (R. Karsten)

Die Arbeit im Projekt AdRIA führt zu einer weit reichenden Vernetzung des Instituts und seiner Mitarbeiter mit komplementären Einrichtungen der TU und dem LBF. Beispielsweise erfolgt die Entwicklung der gedruckten (Dehnungs-)Sensorschichten am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren (IDD) (Prof. E. Dörsam; Technologiebereich *Fertigung*) oder der Technologiebereich *Embedded Systems* (Prof. A. Koch) stellt FPGA-Hardware für die Implementierung von Auswertungsalgorithmen der intrinsischen Kraftmessung in Piezo-Ultraschallantrieben zur Verfügung.

Im Bereich der elektronischen EAP sind die dielektrischen Elastomeraktoren (DEA) die am häufigsten verwendeten Materialien. Den großen Vorteil gegenüber den ionischen Polymeren bezüglich höherer Grenzfrequenzen bis in den Kilohertz-Bereich und größeren erzeugbaren Kräften muss man jedoch mit hohen Ansteuerspannungen erkaufen. Dank der erfolgreichen Multilayertechnologie lassen sich die Spannungen unter 1000 V reduzieren.

3.3.2 Adaptive Kniegelenk-Orthese mit Leistungsabgabe zur Mobilitätsunterstützung älterer Menschen

Bearbeiter: Thorsten Meiß (MuST), Roman Müller (M+EMS), Markus Grün (IAT), Michele Vanoncini (Orthopädische UK Heidelberg)
Bearbeitungszeitraum: 01.09.2010 - 31.08.2013

Aufgabenstellung

Ziel des Verbundprojektes ist die Erarbeitung der wissenschaftlichen Grundlagen für die Entwicklung einer adaptiven Kniegelenk-Orthese mit Leistungsabgabe zur Mobilitätsunterstützung älterer Menschen. Diese neuartige Orthese stellt ein mechatronisches Assistenzsystem dar, welches spezielle biomechanische Bewegungsmuster unterstützt.

Dieses Projekt entspringt einer intensiven Kooperation zwischen vier Arbeitsgruppen an der Technischen Universität Darmstadt und der Orthopädischen Universitätsklinik Heidelberg. Die Bearbeitung des Projektes erfolgt in folgender fachlicher Gliederung:

- Biomechanik und Bewegungsanalyse (Universitätsklinik Heidelberg, Dr. S. Wolf)
- Mess- und Sensortechnik (EMK MuST, Prof. R. Werthschützky)
- Automatisierungstechnik (IAT, Prof. U. Konigorski)
- Aktorik und Kinematik (EMK M+EMS, Prof. H. Schlaak)

Lösungsansatz

Ziel dieses durch vier Arbeitsgruppen bearbeiteten Forschungsprojektes ist die Erarbeitung der wissenschaftlichen Grundlagen für die Entwicklung einer adaptiven Kniegelenk-Orthese mit Leistungsabgabe zur Mobilitätsunterstützung älterer Menschen.

Leistungsmessungen im Bewegungslabor lassen bereits bei einer anteiligen aktorischen Unterstützung von 10 bis 30% der ursprünglichen Muskelleistung eine wesentlich höhere Mobilität des älteren Menschen erwarten. Dieser neuartige Orthesentypus stellt deshalb ein mechatronisches Assistenzsystem dar, welches ältere Menschen in ihrem Bewegungsablauf stabilisiert und in belastungsintensiven Situationen unterstützt (Abbildung 3.48).

Für die Regelung eines solchen Systems ist die Mustererkennung von Bewegungsszenarien notwendig, die - durch kinematische und kinetische Parameter gekennzeichnet - prognostischen Charakter für die Bewegungsabsicht bietet. Basis für die Umsetzung bilden bekannte Starrkörpermodelle der Biomechanik und Regelungsmodelle für komplexe mechatronische Systeme sowie eigene experimentelle Untersuchungen im Bewegungslabor. Das abzuleitende regelungstechnische Modell des Assistenzsystems präzisiert die Anforderungen an die Sensorik einschließlich der erforderlichen Unterstützungskräfte und -momente. Die Signalverarbeitung enthält die zur Bewegungsunterstützung benötigten Regelungs- und Steuerungsalgorithmen und liefert die Stellgrößen für die Aktorik. Die durch die elektromechanischen Antriebe erzeugten Kräfte unterstützen durch eine physiologisch angepasste Kinematik die komplexe Beinbewegung. Besondere Aufmerksamkeit gilt dabei der Gestaltung der Fixierung der Orthese am Bein zur Sicherung einer reproduzierbaren Kraft- und Momenten-Einleitung.

Die Zweckmäßigkeit des erarbeiteten Lösungsansatzes soll Versuchsaufbauten und abschließend an einem Demonstrator mit gesunden Probanden im Bewegungslabor nachgewiesen werden. Die Ergebnisse sollen zukünftig als grundlegende Systemansätze für die Weiterentwicklung von Orthesen und Prothesen genutzt werden können.

Bearbeitungsstand

Im September 2010 wurde das Projekt begonnen. Erste Untersuchungen zur weiteren Quantifizierung der Anforderungen an das notwendige Unterstützungsmoment beim Aufstehen erfolgen derzeit im Ganglabor in Heidelberg. Auf technischer Basis werden erste Modelle für die Regelung entworfen und getestet (IAT), Sensorsysteme entworfen, welche die Bestimmung Lage der Orthese im Raum ermöglichen sowie die Aktivität des Orthesennutzers messbar werden lassen (MuST), sowie spe-

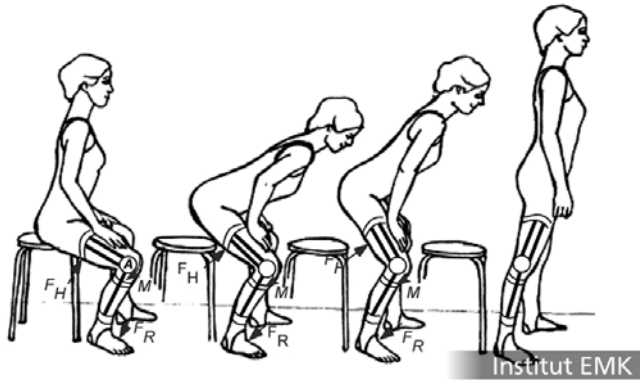


Abbildung 3.48: Prinzipskizze einer einfachen Kinematik zum Unterstützen von Transferbewegungen. Beispiel Aufstehen: Aktiver Antrieb A , Hebekraft F_H , Reaktionskraft F_R , Hebemoment M

zielle Aktorkonzepte definiert, welche ein adäquates Unterstützungsmoment generieren ($M+EMS$).

3.4 Fachgebiet Lichttechnik

3.4.1 Übersicht

Nach dem Dienstantritt von Prof. Khanh am 01.10.2006 entwickelt sich das Fachgebiet Lichttechnik innerhalb vier Jahre von 2006 bis 2010 zu einer international und national anerkannten Forschungsstelle für die allgemeine und automotive Lichttechnik sowie zu einem optischen Entwicklungszentrum für die Leuchtenindustrie. In den letzten zwei Jahren gibt es vier Haupttendenzen, die das Handeln des Lehrstuhls wesentlich bestimmten und weiterhin bestimmen werden:

1. Die intensive gesellschaftliche Diskussion über den Klimawandel, Umweltverschmutzung und daraus folgend die Konsequenzen zur Energieeffizienzsteigerung und Energieeinsparung. Im Prozess der Erfüllung des Kyoto-Protokolls spielen Deutschland innerhalb der Europäischen Gemeinschaft wie die Beleuchtungstechnik im Ensemble der möglichen zur Energieeffizienzsteigerung beitragenden Technologien eine gewichtige Rolle.
2. Nach mehr als 100 Jahren nach der Entwicklung von der Glühlampe durch T. Edison und nach mehr als 50 Jahren Entwicklung der Entladungslampen stehen die Beleuchtungstechnik und die Photonik an der Schwelle einer neuen Revolution mit der LED-Technologie mit allen Vorzügen eines Halbleiterbauelements, das nach kurzer Zeit die Lichtausbeute von mehr als 110 lm/W erreicht hat und somit den Weg zur Kfz-Lichttechnik, Innenraumbeleuchtung und Außenbeleuchtung sicher findet.
3. Zur drastischen Reduzierung der Verkehrsunfälle bei Nacht reicht es nicht mehr aus, nur Scheinwerfer mit hoher Lichtstrommenge zu entwickeln. Viel mehr müssen intelligente Scheinwerfer- und Heckleuchtensysteme entwickelt werden, die sich in der Lichtverteilung und Lichtstärke abhängig von der aktuellen Verkehrssituation adaptiv einstellen. Zu den dazu notwendigen intelligenten Steuerungssystemen gehören Sensorsysteme (CCD, CMOS, Radar, thermische Sensoren wie Bolometer. . .), Displaysysteme und die LED-Technologie.
4. Die neue Entwicklung von hochqualitativen weißen LEDs mit hoher Farbwiedergabe. Einerseits muss die Farbwiedergabe farbtechnisch neu definiert werden. Andererseits versucht die LED-Industrie neue Phosphorensysteme mit hoher Effizienz und Farbwiedergabe zu entwickeln. Damit ist der Weg der LED-Technologie zur Innenraumbeleuchtung frei.

Von Anfang an behält das Fachgebiet diese vier Strömungen im Auge und entwickelt dementsprechend die Arbeitskonzepte, wobei eine sehr enge Zusammenarbeit und eine intensive Diskussion mit der Industrie im Vordergrund stehen. Zur Konzeptionierung und Umsetzung der Arbeitsschritte verfolgt das Fachgebiet von Anfang an konsequent die folgenden Ziele. Demnach soll eine moderne Ausbildungsstätte:

- die Nähe zur Industrie suchen und seine Lehrprogramme mit der Industrie abstimmen
- innovative Studienmodelle entwickeln, wobei verschiedene Lehrgebiete integriert werden,
- ein modernes Weiterbildungsangebot ausarbeiten, das universell und photo-nisch orientiert ist,
- und ein breites Dienstleistungsangebot anbieten, das sich von der Beratung, über Mess- und Entwicklungsdienstleistung, bis hin zur Entwicklungs- und Forschungsplanung erstreckt. Es soll dabei den Charakter eines Kompetenzzentrums haben. Darauf werden mittel- und langfristige Forschungs- und Entwicklungsvorhaben mit der Industrie und anderen Forschungspartnern abgestimmt.

Ableitend von diesen grundsätzlichen Zielen wurden in den letzten zwei Jahren in den Bereichen Lehre, Forschung und Entwicklung des Fachgebietes Lichttechnik vier große Schwerpunkte gebildet, die im Folgenden näher erläutert werden. Wichtig ist dabei, dass neben den Themen Verkehrs-/Kfz-Lichttechnik und Augenphysiologie/Farbwahrnehmung als traditionelle Forschungsgebiete der Lichttechnik in Darmstadt insbesondere die Bereiche der Optoelektronik (LEDs, Sensorik) und der Energieeffizienz hinzukommen.

- **Verkehrs- und Kfz-Lichttechnik:**

Zum Ausbau des Know-hows werden aktuelle Themen in der Kfz-Lichttechnik wie beispielsweise LED-Scheinwerfer sowie deren Entwicklung und Bewertung, Fahrerassistenz-Systeme, Nighttime-driving, Head-up Displays, Sichtweitenverbesserung mit Infrarotkameras, Motorrad-Tagesfahrlicht, Scheinwerferreinigungsanlagen usw. intensiv behandelt. Darüber hinaus kommt den Forschungsthemen im Bereich rund um die Wahrnehmung des Menschen in verschiedensten Verkehrssituationen große Bedeutung zu. Hierzu zählen insbesondere das mesopische Sehverhalten (Blickfeld, Blickverhalten der Autofahrer, spektrale Empfindlichkeitsverschiebung, Reaktionszeit, Kontrastwahrnehmung in der Dämmerung in Abhängigkeit von der Lichtfarbe etc.) sowie die Blendungseigenschaften konventioneller und LED-integrierter

Autoscheinwerfer und anderer Kfz-Lichtanlagen. Folgende Mitarbeiter arbeiten auf diesem Gebiet: N. Müller, D. Polin, C. Schiller.

- **Optoelektronik - Technische Optik**

Im Bereich der Optoelektronik nehmen Leuchtdioden (LED) aufgrund ihrer ständig wachsenden Bedeutung als Lichtquelle der Zukunft in einer Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten eine zentrale Rolle ein. Neben den Grundlagen bei Strahlungserzeugung und Messtechnik für LEDs und OLEDs sowie der Untersuchung der Ausführungsformen (Chip-on-Board etc.) sind die Entwicklung und Evaluierung von LED-Modulen von zentraler Bedeutung in der Forschung des Fachgebietes. Die vielfältigen Anwendungsbereiche derartiger LED-Module erstrecken sich dabei von der Kfz-Lichttechnik über die Beleuchtungstechnik (z.B. LED-Leuchten für die Straßenbeleuchtung) bis hin zum optischen Gerätebau sowie der Medientechnik (Filmscanner, LED-Monitore und -Projektoren). Weitere Forschungsbereiche in der Optoelektronik am Fachgebiet Lichttechnik sind die Untersuchung des Alterungsverhaltens der LEDs in Autoscheinwerfern bei hoher Umgebungstemperatur, Untersuchungen zur Verbesserung der Farbwiedergabeeigenschaften von weißen LEDs und der LED-Farbgamut für die Displaytechnik sein.

Einen zweiten wichtigen Themenkomplex im Bereich Optoelektronik und Technische Optik wird die Optische Radiometrie (UV-VIS-IR-Spektralbereich) bilden, die sich mit der Messtechnik für Messungen von spektralen Strahldichten, Bestrahlungsstärken sowie Strahlungsleistungen im Bereich von 250 nm bis 900 nm befasst. In dem Forschungs- und Entwicklungsbereich der Optischen Strahlungsanwendung fällt auch die Entwicklung von LED-UV-Wasserentkeimungsanlagen bei den Wellenlängen um 250 nm-280 nm, die zu einem wichtigen Bestandteil im Fachgebiet geworden ist.

Einen dritten Themenkomplex in der Technischen Optik bilden die Simulation und das Design von optischen und beleuchtungstechnischen Systemen (z.B. Leuchten und Scheinwerfer). Folgende Mitarbeiter arbeiten auf diesen Gebieten: W. Pepler, S. Groh, Q. V. Trinh, M. Böll.

- **Augenphysiologie - Farbwahrnehmung**

Die Untersuchung der Physiologie des Sehens und die Erforschung der Farbwahrnehmung bilden neben der Verkehrs- und Kfz-Lichttechnik einen Forschungsschwerpunkt, der sich bis an die Anfänge der Lichttechnik in Darmstadt vor nunmehr 54 Jahren zurückverfolgen lässt. Dementsprechend umfangreich ist hier das über die Jahrzehnte gewachsene Fachwissen. So werden auch in Zukunft Fragestellungen wie beispielsweise der Einfluss von Blendung auf die Wahrnehmung und die spektrale Empfindlichkeit des Auges

bei verschiedenen Adaptationszuständen (Tag, Dämmerung, Nacht) eine dominierende Rolle in der Forschung und Lehre des Fachgebietes Lichttechnik spielen.

Hierzu zählen auch die Untersuchungen von Einflüssen unterschiedlicher Lampenspektren auf das Kontrastverhalten und somit auf die Straßenverkehrssicherheit, die wahrnehmungsgerechte Lichtmesstechnik im mesopischen Bereich, aber auch praktische Versuche zum Test der Modelle zur Bestimmung von äquivalenten Leuchtdichten im mesopischen Bereich. Beachtung finden ebenso weitere Bereiche der Grundlagenforschung, wie z.B. die Erforschung der Farbdifferenzwahrnehmung und Farbwahrnehmung bei unterschiedlichen Leuchtdichten des Sehobjektes, bei unterschiedlichen Lampenspektren (chromatische Adaptation) und bei strukturlosen- sowie strukturbehafteten Objekten.

Von zentraler Bedeutung und von hohem Nutzen für die Entwicklung von LED-Innenraumleuchten sowie neuen Entladungslampen ist die Forschung zur Neudefinition der Farbwiedergabeindizes, die am Fachgebiet zurzeit intensiv durchgeführt wird und das große Interesse der großen Lampenfirmen gefunden hat. Folgende Mitarbeiter arbeiten auf diesen Gebieten: P Bodrogi, S. Brückner, N. Krause, S. Söllner, N. Haferkemper.

- **Energie-Energieeffizienz**

Das Bewusstsein zur Energieeffizienzsteigerung ist in den letzten Jahren außerordentlich ausgeprägt in der kommunalen Stadtbeleuchtung (Straßenbeleuchtung) und in der Automotiven Lichttechnik. Das Fachgebiet Lichttechnik gestaltet das internationale und nationale Geschehen auf diesem Gebiet maßgebend und aktiv. Das Handeln äußert sich in folgenden Arbeiten:

- Entwicklung des Energiesparkonzepts zur öffentlichen Beleuchtung in der Stadt Darmstadt
- Untersuchung der Energieeinsparpotentiale durch Feldtests in zwei Städten wie Lippstadt und Darmstadt
- Analyse der Energiesparpotentiale und Untersuchung des Energienutzungsverhaltens in den zwei Städten Wiesbaden und Mainz. Das wird in den nächsten Monaten bis Anfang 2011 im Auftrag der Hessischen Landesregierung auf Hessische Städte erweitert.
- Auftritt als Key Note Speaker oder Diskussionsleiter zu den Energiethemata auf den wichtigsten Tagungen zur Straßenbeleuchtung und LED-Technologie (wie zum Beispiel CIE-Tagung im März 2010 in Wien)

-
- Interviews in den meisten großen deutschen Zeitungen über die Energiesparpotentiale in der öffentlichen Beleuchtung (Berliner Morgenpost, die Welt, Frankfurter Rundschau, Frankfurter Allgemeine. . .) um die Kommunen, Institutionen und private Verbraucher auf ein neues Energienutzungsverhalten vorzubereiten. Das ist mindestens genau so wichtig wie eine technologische Vorbereitung. Folgende Mitarbeiter arbeiten auf diesen Gebieten: T. Kuhn.

Eine thematische Überschneidung zwischen den vier aufgeführten Schwerpunktthemen ist dabei erwünscht und führt zu Synergieeffekten. Um die Tätigkeiten am Fachgebiet durch eine entsprechende Mess- und Gerätetechnik zu unterstützen, wird das bestehende Lichtmesslabor modernisiert und erweitert. Im Lehr- und Weiterbildungsangebot wird mittelfristig ein breites Spektrum an Praktika im Labor angeboten werden, damit die Studierenden und die externen Teilnehmer aus der Industrie die Eigenschaften lichttechnischer Bauelemente und Systeme frühzeitig anhand konkreter Versuche kennenlernen können. Das Lichtmesslabor mit den regelmäßig gewarteten und genau kalibrierten Messgeräten ist ein Dienstleistungs- und Beratungszentrum für die lichttechnisch-optische sowie kino- und fernsehtechnische Industrie. Es bildet die Grundlage für eine zeiteffiziente und hochqualitative Entwicklung von Lichtprodukten.

Mit der Verfolgung und Realisierung dieser o. g. Ziele wurde erreicht, das Fachgebiet Lichttechnik an der TU Darmstadt nach einem Zeitraum von 4 Jahren sowohl in der Industrie, in der internationalen Forschungslandschaft als auch universitätsweit als ein optoelektronisch-photonisch, wahrnehmungstechnisch orientiertes, industrienahe und für die Universität aktives Fachgebiet wahrgenommen wird.

3.4.2 Verkehrs- und Kfz-Lichttechnik

Einfluss der Komplexität des Straßenumfeldes bei Nachtfahrten auf die Wahrnehmung von Verkehrszeichen

Bearbeiter: Nina Müller

Bearbeitungszeitraum: 01.07.2010 - 31.12.2012

Bei Nachtfahrten plötzlich im Sichtfeld auftauchende Blendquellen, wie z.B. stark beleuchtete Gebäude in Industriegebieten oder Werbetafeln, können den Autofahrer von der eigentlichen Fahraufgabe ablenken und die Erkennung von verkehrsrelevanten Objekten erschweren. Um den Einfluss der Störfaktoren zu klassifizieren und die Auswirkungen festzustellen wurde bereits ein Modell entworfen (Reinisch 2010). Dieses wird nun verfeinert und erweitert, wobei besonders die zukünftige Altersverteilung bei Autofahrern berücksichtigt wird, also mehrheitlich Probanden älter als 50 Jahre untersucht werden.

Dazu werden zunächst Einflüsse von einzelnen Parametern der Störfaktoren im Labor untersucht: Größe, Position, zeitliche Veränderlichkeit usw. Danach werden in einer zweiten Versuchsreihe ihre Wechselwirkungen festgestellt und ein erstes Modell des subjektiven Komplexitätsempfindens erstellt. Zur Verifikation der Ergebnisse aus dem Labor werden Feldtests durchgeführt: Die Probanden fahren eine vorher festgelegte Strecke in einem Testfahrzeug, wobei ständig Biometrische Daten wie Herzfrequenz und Hautleitwert aufgenommen werden. Zusammen mit ihrer mündlichen Aussage werden die Beleuchtungsszenarios hinsichtlich ihrer Komplexität bewertet; die Ergebnisse werden mit dem bestehenden Modell verglichen.

Ziel ist es, ein mathematisches Modell zur Bewertung von Beleuchtungssituationen zu erstellen, somit Behörden eine Richtlinie zur Bebauung an die Hand zu geben und die Verkehrssicherheit zu erhöhen.

Die Untersuchungen der Objektparameter im mesopischen Bereich (Dämmerungssehen) dienen außerdem dem besseren Verständnis der Wahrnehmung in diesem Helligkeitsbereich.

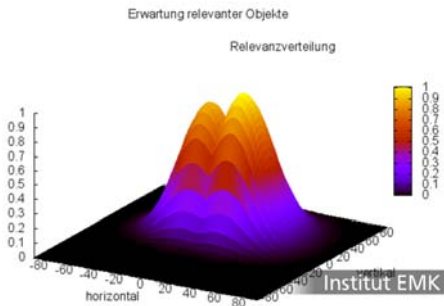


Abbildung 3.49: Beispiel Objekteigenschaften: Verteilung der Erwartung für das Erscheinen relevanter Objekte abhängig von der Position im Gesichtsfeld

Die visuelle Wahrnehmung des Menschen im mesopischen Bereich des Sehens (Dämmerungssehen)

Bearbeiter: Christoph Schiller

Bearbeitungszeitraum: 01.01.2009 - 31.12.2010

Viele Aufgaben der visuellen Wahrnehmung finden unter Bedingungen statt, die in der Helligkeit des Umfeldes (Adaptation) unter dem Niveau für das übliche Sehen bei Tage liegen. Der Straßenverkehr in den Dunkelstunden stellt das menschliche Auge durch einen großen Verlust an Sehleistung vor besonders große Herausforderungen. Abhilfe schafft hier sowohl die Frontbeleuchtung von Kraftfahrzeugen als auch die stationäre Straßenbeleuchtung.

Moderne Scheinwerfersysteme bei Kraftfahrzeugen nutzen Entladungslampen („Xenonlicht“). Diese erbringen im Vergleich zu bisherigen Halogenscheinwerfern einen deutlich nachweisbaren Vorteil durch eine Verbesserung der Sehleistung bei Nacht. Viele Verkehrsteilnehmer fühlen sich von Xenonscheinwerfern jedoch mehr geblendet. Bei in Zukunft verwendeten Frontscheinwerfern auf der Basis Licht emittierender Dioden (LED) wird eine ähnliche Tendenz befürchtet. Laboruntersuchungen haben bereits gezeigt, dass Lichtquellen mit einem erhöhten Blauanteil (erhöhte Farbtemperatur), was sowohl für Entladungslampen als auch LEDs gilt, bei gleich eingestellter Leuchtdichte einen größeren Helligkeitseindruck beim Menschen hervorrufen (SA 1657). Diese Tatsache stellt unter energetischen Gesichtspunkten einen Vorteil der Lichtquellen mit höherer Farbtemperatur dar, da weniger Energie für eine identische Helligkeitswirkung benötigt wird.

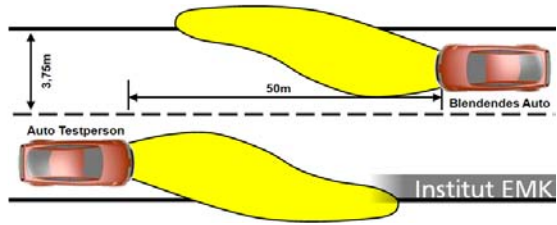


Abbildung 3.50: Untersuchung der subjektiv empfundenen Blendung am Flugplatz in Griesheim

Für eine vergleichende Beurteilung kompletter Scheinwerfersysteme reichen Labortests nicht aus. Deshalb wurden Testfahrten im realen Straßenverkehr und Untersuchungen unter Bedingungen, die dem alltäglichen Straßenverkehr sehr nahe kommen durchgeführt. Diese dienen dazu, die Eigenschaften der drei verschiedenen Scheinwerfersysteme mit Halogen-, Xenon- und LED-Lichtquellen grundlegend zu analysieren. Entscheidende Kriterien sind die subjektiv empfundene Blendung der getesteten Personen, die ermittelte durchschnittliche Sichtbarkeitsweite und die Ergebnisse aus den Befragungen von durchgeführten Fahrtests. Abbildung 3.50 zeigt exemplarisch den Aufbau, mit dem die subjektiv empfundene Blendung durch Scheinwerfer des Gegenverkehrs am Außengelände der TU Darmstadt (Flugplatz in Griesheim) ermittelt wird.

In innerstädtischen Bereichen ist die Dichte an sehr unterschiedlichen Verkehrsteilnehmern besonders hoch. Da die Kraftfahrzeugbeleuchtung die Anforderungen des Stadtverkehrs nicht erfüllt, wird hier zusätzlich die stationäre Straßenbeleuchtung eingesetzt, um die Verkehrssicherheit zu erhöhen.

Erste durchgeführte Untersuchungen zeigen, dass viele Verkehrsteilnehmer weißes Licht in der Straßenbeleuchtung bevorzugen. Dies ist auch aus physiologischer Sicht von Vorteil. Gegenüber dem weit verbreiteten gelben Licht von Natriumdampflampen bietet weißes Licht deutliche Vorteile im seitlichen Erkennen, beispielsweise, wenn Fußgänger eine Straße überqueren möchten. Das Ziel der Untersuchungen im Bereich der Straßenbeleuchtung besteht darin, eine geeignete Lichtquelle zu finden, die die visuelle Wahrnehmung des Menschen optimal unterstützt und dabei dennoch eine gute Effizienz zum Schutz der Umwelt aufweist.

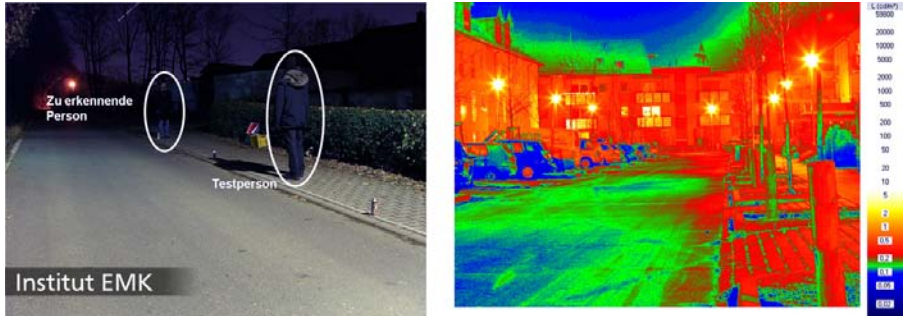


Abbildung 3.51: Straßenbeleuchtung - Links: Test zur Gesichtserkennung bei verschiedenen Lampentypen, Rechts: Die Leuchtdichteaufnahme zeigt die Lichtverschwendung der Straßenbeleuchtung an Hauswänden

Untersuchung physiologischer Effekte bei PWM-gesteuerter LED-Beleuchtung

Bearbeiter: Dmitrij Polin

Bearbeitungszeitraum: 01.11.2010 bis 01.11.2013

Das menschliche Auge ist in der Lage rasch aufeinander folgende Lichtreize nur unterhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz wahrzunehmen. Oberhalb dieser Frequenz wird das Flimmern als ein konstanter Reiz mittlerer Leuchtdichte empfunden. Bisherigen Untersuchungen zeigen, dass die Flimmerverschmelzungsfrequenz bei Tagessehen etwa 80 Hz beträgt und in der Dämmerung auf ungefähr 20 Hz sinkt.

Diesen physiologischen Effekt benutzt man beim Dimmen von LEDs, indem sie bei einer PWM-Frequenz von über 100 Hz betrieben werden. Die mittlere Leuchtdichte wird dabei über das Tastverhältnis eingestellt. Trotz einer hohen Pulsfrequenz tritt in bestimmten dynamischen Fällen ein sogenannter Perlschnureffekt: Durch eine schnelle relative Bewegung eines periodisch diskontinuierlichen Lichtreizes wird eine zeitlich und örtlich getrennte Leuchtspur wahrgenommen. Dies könnte beispielsweise durch Stroboskopeffekt auf periodischer Infrastruktur zu Irritationen führen.

Diese Arbeit hat zum Ziel, die genannten physiologische Effekte in Abhängigkeit sowohl von technologischen Parametern, wie beispielsweise die Pulsfrequenz oder die spektrale Zusammensetzung des Lichtreizes, als auch von physiologischen Aspekten, wie z. B. die Pupillengröße oder das Alter, zu untersuchen.

3.4.3 Energie - Energieeffizienz

Aspekte der LED-Straßenbeleuchtung

Bearbeiter: Thomas Kuhn

Bearbeitungszeitraum: 15.07.2008 - 14.07.2011

Aufgabenstellung

Im Rahmen einer ZIM-Förderung soll die LED-Technik für die Straßenbeleuchtung im Bereich der Anliegerstraßen nutzbar gemacht werden. Anliegerstraßen stellen 60 bis 70 % aller beleuchteten Straßen in Deutschland dar. Die derzeit in diesem Bereich eingesetzten Leuchtmittel besitzen eine maximale Lichtausbeute von etwa 80 lm/W.

Neben der reinen Integration hocheffizienter LED-Technik zusammen mit dem optischen System in eine Straßenleuchte, werden die Wahrnehmungsveränderungen bei den Verkehrsteilnehmern durch das neue Spektrum der LEDs überprüft. Darüber hinaus werden die Grundlagen überprüft, in wieweit die Norm DIN EN 13201 für die Straßenbeleuchtung und deren Bewertungsmaßstäbe tatsächlich den Anforderungen heutiger Verkehrssituationen entsprechen.

Die Untersuchungen zur Wahrnehmung erfolgen sowohl in Laborversuchen als auch in realen Teststraßen mit Probandengruppen.

Aktueller Stand des Projektes

Innerhalb einer Diplomarbeit (DA 1679) wurden die Anforderungen ermittelt, die für die lichttechnische Realisierung einer Straßenleuchte notwendig sind. Darüber hinaus wurde ein bestimmter LED-Typ ausgewählt, der für die zu entwickelnde LED-Leuchte eingesetzt werden kann. Reale Straßen wurden vermessen, um so eine Simulationsgrundlage für lichttechnische Bewertungen zur Verfügung zu stellen. Der Stand der Technik bereits bestehender LED-Leuchten wurde umfangreich analysiert.

Bis Ende 2008 wird eine erste reale Teststraße mit bereits verfügbaren LED-Leuchten realisiert, um erste Wahrnehmungsuntersuchungen durchführen zu können (vgl. Abbildung 3.52).

Weiteres Vorgehen

Aufbau der Technik, Vermessung des Beleuchtungsniveaus und Probandentests innerhalb der Teststrecke in Darmstadt werden in den nächsten Wochen durchgeführt und mit Simulationsergebnissen verglichen (vgl. Abbildung 3.53).



Abbildung 3.52: Erste Teststrecke mit LED-Leuchten in Darmstadt

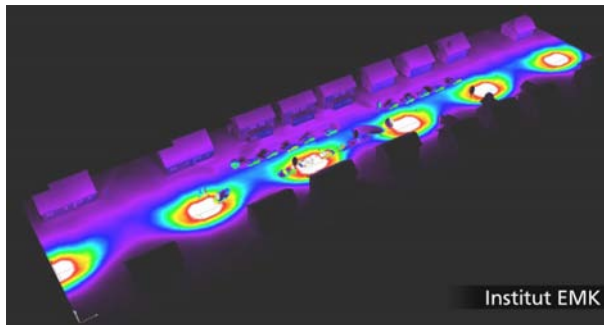


Abbildung 3.53: Beispiel für eine Beleuchtungsstärkesimulation einer Teststrecke

Anschließend erfolgt die Entwicklung der LED-Straßenleuchte. Aufgabenfelder bei der Entwicklung sind die Optik, die Treiberelektronik samt den LED, sowie die Mechanik und das Thermische Management.

3.4.4 Augenphysiologie - Farbwahrnehmung

Farbwiedergabe für moderne Lichtquellen

Bearbeiter: Peter Bodrogi

Bearbeitungszeitraum: 01.02.2009 - 31.12.2010

Eine wichtige Aufgabe der modernen Beleuchtungsplanung besteht darin, neue Lichtquellen mit einer zur Sehaufgabe passenden spektralen Verteilung sowie neue Leuchten mit angemessenen räumlichen Lichtstärkeverteilungen zu wählen, so dass die Gegenstände in den zu beleuchtenden Innen- und Außeneinrichtungen durch die verwirklichte spektrale und räumliche Strahldichtevertelung im Sehfeld, durch die entstehenden Farbeindrücke bei der visuellen Wahrnehmung der Menschen eine hohe und langzeitige Akzeptanz des neuen Beleuchtungssystems finden. Diese Akzeptanz (oder gute Farbwiedergabe) entsteht vorwiegend auf Basis der Farberinnerung des Benutzers, durch Vergleichen der Farbwahrnehmung der Gegenstände unter Tageslicht oder Glühlampenlicht mit der Farbwahrnehmung unter den eingesetzten Kunstlichtspektren, s. Abb. 3.54.



Abbildung 3.54: Zur Beurteilung der Farbwiedergabe-Eigenschaft einer Testlichtquelle vergleicht der Benutzer die Farbwahrnehmung der Gegenstände unter einer Referenzlichtquelle (links) mit der Farbwahrnehmung unter einer Testlichtquelle (rechts). In den wichtigsten Situationen ist die Referenzseite (links) nicht vorhanden und die Beurteilung geschieht auf Basis der Farberinnerung.

Den Farbwiedergabeeigenschaften kommt bei der Auswahl einer Lichtquelle vom Benutzer in der Praxis große Bedeutung zu. Man findet heutzutage viele künstliche Lichtquellen, deren Lichtfarbe dem natürlichen Licht zu einer bestimmten Tageszeit

sehr ähnlich ist, bzw. der Lichtfarbe einer Halogenglühlampe sehr nahe kommt. Dies bedeutet, dass diese Lichtquellen die „weiße“ Farbempfindung einer neutralweißen Oberflächenfarbe nicht stören, solange die Lichtquelle selbst als Weiß empfunden wird.

Probleme mit den Farbempfindungen im beleuchteten Raum entstehen erst, wenn man farbige Oberflächen mit der Lichtquelle beleuchtet, weil in der spektralen Strahldichteverteilung der Lichtquelle bestimmte Spektralbereiche fehlen bzw. nur niederwertig vorhanden sein können. Die numerische Bewertung der Wirkung der spektralen Strahldichteverteilung auf die wahrgenommene Farbwiedergabeeigenschaft der Lichtquelle ist kompliziert. Daher spielen die Thematik Farbwiedergabe allgemein und der Farbwiedergabeindex nach der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE) in der lichttechnischen Praxis eine wichtige Rolle.

Die Farbwiedergabe einer Testlichtquelle ist dann besser, wenn die Erscheinung der reflektierenden Objektfarben unter der Testlichtquelle mit der Farberscheinung unter einer Referenzlichtquelle besser übereinstimmt. Die Übereinstimmung bestimmt der Benutzer visuell, indem er diesen Vergleich zwischen Test- und Referenzlichtquelle - bewusst oder unbewusst - durchführt. Die Farbwiedergabeeigenschaft wird heute international durch den CIE-Farbwiedergabeindex R_a beschrieben. Visuelle Experimente haben gezeigt, dass dieser CIE-Farbwiedergabeindex die Farbwiedergabeeigenschaft moderner Lichtquellen (wie weißer Leuchtdioden mit speziellen spektralen Strahldichtefunktionen) nicht genau beschreibt, wie das die CIE neulich festgestellt hat.

Es ist vorgesehen, dass die CIE in der absehbaren Zukunft einen neuen, für alle Lichtquellen brauchbaren Farbwiedergabeindex vorschlagen wird. Natürlich ist die Anzahl der möglichen mathematischen Methoden zur Berechnung der Farbwiedergabe unendlich. Maßgeblich für die Annahme einer Methode sind die visuellen Experimente, wobei die Antworten der Versuchspersonen die Methode bestätigen. Eine weitere Komplikation besteht darin, dass jede Versuchsperson die Erscheinung der Farben und der wahrgenommenen Farbunterschiede anders bewertet sowie oft unterschiedliche Meinungen über die Farbwiedergabe äußert.

Außer der Farbwiedergabe existieren noch weitere Aspekte der Farbqualität der Lichtquellen, wie z.B. die Farbharmone, die Farbpräferenz oder die Größe des Farbgamut, die durch andere Maßzahlen (d.h. nicht durch den Farbwiedergabeindex, sondern z.B. den sog. Harmoniewiedergabeindex, Farbpräferenzindex oder Farbgamutindex) beschrieben werden können.

Untersuchungen zur Erweiterung der Farbwiedergabeindex-Definition auf neuartige Lichtquellen

Bearbeiter: Stefan Brückner

Bearbeitungszeitraum: 01.10.2008 - 31.01.2011

Die Fähigkeit einer Lichtquelle, mit ihr beleuchtete Farben natürlich und unverfälscht erscheinen zu lassen, bezeichnet man als Farbwiedergabe. Zur quantitativen Kennzeichnung von Lichtquellen wurde 1965 der Farbwiedergabeindex eingeführt. Das zugrunde liegende Berechnungsmodell steht derzeit jedoch in Diskussion, da der damit berechnete Farbwiedergabeindex, insbesondere bei LED-Beleuchtung, nicht mit den visuellen Erscheinungen der Farben übereinstimmt.

Mit Hilfe von visuellen Tests werden Daten zur Farbwahrnehmung unter verschiedenen Lichtquellen gesammelt. Diese Daten fließen dann in die Neudefinition des CIE Farbwiedergabe-Index (CRI) ein, die zur Zeit in der CIE Arbeitsgruppe TC 1/69 diskutiert wird. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf verschiedenen LED-Lichtquellen, es werden sowohl verschiedene weiße Leuchtdioden als auch Mischungen unter farbigen (RGB) und kombiniert farbigen und weißen LEDs untersucht. Um einen Vergleich zu ermöglichen, werden aber auch Glühlampen und verschiedene Leuchtstofflampen aufgenommen.



Abbildung 3.55: Tabletop-Aufbau für visuelle Test; verschiedene Lichtquellen werden nacheinander eingeschaltet, Versuchspersonen bewerten die farbliche Erscheinung der Objekte

Reflexionsmessungen an natürlichen und künstlichen Objekten

Bearbeiter: Nathalie Krause

Bearbeitungszeitraum: 01.03.2010 - 01.09.2010

Derzeit wird an einem neuen Formelsatz für den Farbwiedergabeindex gearbeitet. Dabei ist es wichtig zu wissen, für welche Oberflächenfarben (z. B. gesättigt / ungesättigt oder natürlich / künstlich) dieser Formelsatz gültig sein soll. Um darüber Aussagen treffen zu können, muss zunächst ermittelt werden, welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede die verschiedenen Spektren dieser Oberflächenfarben aufweisen.

Das Ziel dieser Messungen ist es, alle spektral vermessenen Farben auf etwa 30 zu reduzieren, die möglichst gleichverteilt im $a_c b_c$ -Diagramm des CIECAM02-Farberscheinungsmodells liegen sollen.

Zunächst wurden im sichtbaren Wellenlängenbereich die spektralen Strahldichtefaktoren mittels eines Spektralradiometers gemessen. Bei einer $0^\circ/45^\circ$ -Messgeometrie diente eine Glühlampe als Lichtquelle. Folgende Objekte wurden mit unterschiedlichen Sättigungen verwendet: Blätter, Blumen, verschiedenstes Obst und andere diverse Lebensmittel, Textilien sowie Druckerzeugnisse.

Aus den so ermittelten Reflexionsspektren wurden danach mit Hilfe der Normspektralwertfunktionen die Normfarbwerte (X, Y, Z) für jedes Objekt berechnet. Aus diesen Normfarbwerten wurden nun die Koeffizienten a_c und b_c des CIECAM02-Modells berechnet. Die Ergebnisse aller vermessenen Objekte sowie die Testfarben von CIE, Yoshi Ohno und die ColorChecker Farben sind in Abbildung 3.56 dargestellt.

Es lässt sich erkennen, dass die Koeffizienten a_c und b_c für die meisten Farben kleiner als etwa 60 sind. Das ist dadurch zu erklären, dass die zugehörigen Spektren relativ breite statt schmale Peaks aufweisen. Die größten Werte stammen fast ausschließlich von künstlichen Farben. Weiterhin fällt deutlich auf, dass die natürlichen Farben nur einen recht begrenzten Bereich des Diagramms abdecken. Im blaugrünen Bereich lassen sich so gut wie keine natürlichen Farbpigmente finden.

Diese Untersuchung hat gezeigt, dass sich allein mit natürlichen Farben keine 30 gleichverteilten Punkte im $a_c b_c$ -Diagramm des CIECAM02-Modells finden lassen!

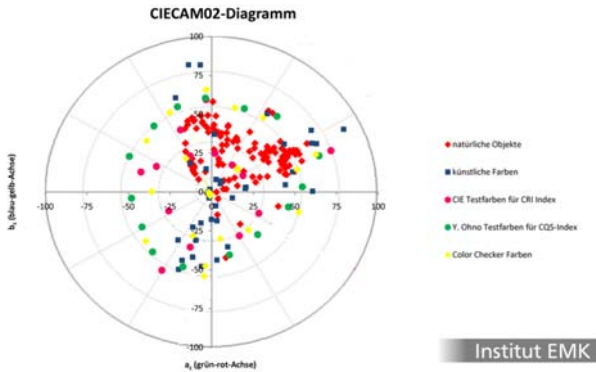


Abbildung 3.56: CIECAM02-Diagramm; a_c und b_c beziehen sich auf die Buntheit

Helligkeitswahrnehmung im photopischen Leuchtdichtebereich

Bearbeiter: Stefan Söllner

Bearbeitungszeitraum: 01.01.2011 - 31.07.2013

Mit dem Aufkommen der LED als Massenbeleuchtungsmittel treten auch bisherige Unzulänglichkeiten der Lichtmessung und -bewertung mehr in den Vordergrund. Ein Beispiel ist die Helligkeitswirkung von Leuchtmitteln, die vom Betrachter zum Teil anders wahrgenommen wird als Messgeräte und Mathematik voraussagen. Daher soll die Kontrast- und Helligkeitswahrnehmung nicht nur im mesopischen Dämmerungsbereich, sondern auch im photopischen, dem Tagsehbereich, neu bewertet werden.

Zunächst werden bestehende Helligkeits- und Kontrastwahrnehmungsmodelle umgesetzt und mit einem Testsatz an Daten geprüft, um verschiedene Stärken und Schwächen dieser Modelle zu studieren. Parallel dazu werden die Hellempfindlichkeitskurven mehrerer Probanden unter verschiedenen Bedingungen vermessen, beispielsweise bei verschiedenen Seh winkeln oder spektralen Verteilungen einer Lichtquelle.

Dann werden Feldtests durchgeführt, bei denen zunächst einzelne Sehobjekte isoliert in einfacher Umgebung präsentiert und bewertet werden. Im weiteren wird die Komplexität dieser Feldtests erhöht, bis man zu nahezu realistischen Szenarien kommt, die von den Probanden nach verschiedenen Kriterien bewertet werden

sollen und auch komplexe Parameter wie Konzentration, Leseintelligenz oder Kontrastunterscheidungsvermögen abgefragt werden.

Von besonderem Interesse im Forschungsprojekt ist die langsam etablierte bildaufgelöste Messtechnik, die es erlaubt, für künftige, räumlich aufgelöste Helligkeitswahrnehmungsmodelle schnelle und exakte Messungen durchzuführen.

Untersuchung des Pupillendurchmessers

Bearbeiter: Nils Haferkemper, Dmitrij Polin

Bearbeitungszeitraum: 01.12.2009 - 30.6.2011

Die Pupille spielt beim Sehvorgang eine ganz entscheidende Rolle. Ganz unabhängig davon, dass sie mit der Hornhaut das erste optisch relevante Element in unserem Sehsystem darstellt ist sie maßgeblich für die Adaptation an die Umgebungshelligkeit verantwortlich.

Selbstverständlich existieren ein paar wenige Publikationen - besonders zwischen den 60er und 80er Jahren - zu dem Thema, jedoch sind deren Aussagen sehr uneinheitlich bezüglich der Ergebnisse. Dies lässt sich besonders auf die unterschiedliche teils unsystematische Methodik, die unzureichende Messtechnik (Auswertung per Video) sowie mangelnde Kenntnisstände zurückführen.

Aus diesem Grund wurde ein eigenes Messsystem auf moderner Stereo-Kamerabasis aufgebaut welches eine Bestimmung des Durchmessers mit 0,1 mm Auflösung bei 25 Hz erlaubt.

Mithilfe eines speziellen Aufbaus ist die spektrale Empfindlichkeitsfunktion des Pupillendurchmessers aufgenommen worden welche gezeigt hat, dass die offensichtliche Korrelation mit der messtechnisch erfassten Leuchtdichte nur sehr gering ist. Besonderer Wert wurde dabei auf die inter- und intraindividuelle Streuung, sowie auf die Altersabhängigkeit gelegt, welche sich deutlich in der Ermüdung der Pupillenverengung (Miosis) als auch der Pupillenweitung (Mydriasis) zeigt.

Ziel der Arbeit ist die Erstellung eines Modells zur Beschreibung des Pupillendurchmessers in Abhängigkeit vom Alter sowie spektraler und auch örtlicher Verteilung der Strahlung im Gesichtsfeld.

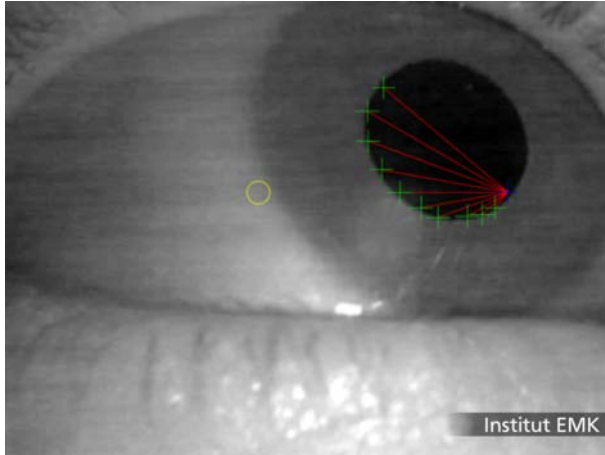


Abbildung 3.57: Aufnahme einer Pupille mit Stereo-Kamera

3.4.5 Optoelektronik - Technische Optik

LED Photometrie

Bearbeiter: Andreas Groh

Bearbeitungszeitraum: 01.01.2011 - 01.07.2013

Die Aufgabe der Photometrie im Allgemeinen liegt darin, lichttechnische Größen so exakt wie möglich zu bestimmen. In der physikalischen Photometrie müssen die hierfür verwendeten Sensoren an die spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges ($V(\lambda)$) angepasst werden. Dies erfolgt in der Regel durch eine Filterung des auftreffenden Lichtes.

Neuartige Lichtquellen, insbesondere moderne Hochleistungs-LEDs, stellen hohe Anforderungen an die photometrische Messtechnik und an die absolute Rückführbarkeit der lichttechnischen Einheiten. Die lichttechnische Vermessung von LEDs mit den klassischen Methoden der Photometrie ist ein Thema, das aktuell stark diskutiert wird. Im Speziellen die Anforderungen an die Genauigkeit der Messtechnik, welche mindestens erfüllt werden müssen.

Bei der Kalibrierung von photometrischen Empfängern wird eine Lichtquelle verwendet, deren spektrale Verteilung der Normlichtart A (Glühlampe mit 2856 K)

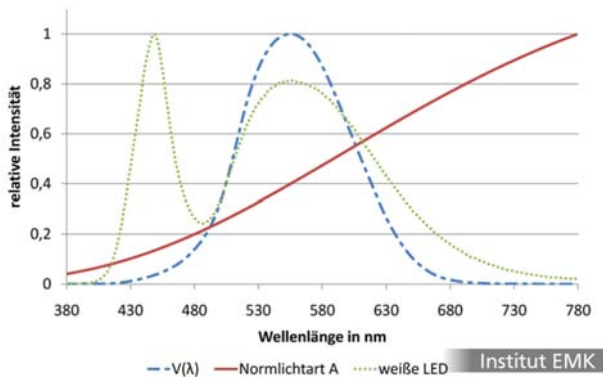


Abbildung 3.58: Vergleich $V(\lambda)$, Normlichtart A, weiße LED

entspricht. Durch die Schmalbandigkeit, vor allem von farbigen LEDs, wirken sich mögliche Fehlanpassungen der $V(\lambda)$ -Filterung wesentlich stärker aus als bei konventionellen breitbandigen Leuchtmitteln wie Glühlampen oder Halogenleuchtstofflampen. Bei der Vermessung von Lichtquellen, deren spektrale Verteilung stark von der Verteilung der Normlichtart A abweicht, ist eine Korrektur der Messwerte mittels eines spektralen Korrekturfaktors unabdingbar. Um diesen Korrekturfaktor bestimmen zu können ist es notwendig die Lichtquelle relativ spektral zu vermessen. Der aktuelle Trend in der „LED-Messtechnik“ ist die Messung von LEDs spektralradiometrisch durchzuführen. Bei dieser Methode ist eine spektrale Korrektur nicht notwendig, da die Anpassung an die spektrale Hellempfindlichkeit mathematisch und nicht durch Filterung erfolgt. Dieser vermeintliche Vorteil wird in der Regel mit einer deutlich höheren Messunsicherheit der spektralen Messtechnik im Vergleich zu den klassischen photometrischen Methoden erkauft.

Ein Ziel der Forschung ist es Verfahren zur lichttechnischen Vermessung von LEDs, insbesondere Hochleistungs-LEDs, zu definieren. Verschiedene erfolgversprechende Methoden sollen aufgebaut und mit einem Referenzmessplatz verglichen werden, um sie betreffend ihrer Messunsicherheiten, des erforderlichen Aufwands, den Kosten der notwendigen Messtechnik und ähnlichen Kriterien zu charakterisieren. Ein Hauptaugenmerk soll hierbei auf der Einfachheit und Genauigkeit der Methode liegen, um einen einfachen Transfer der Ergebnisse in die alltägliche Anwendung in Messlaboren ermöglichen zu können.

Modellierung des LED-Verhaltens

Bearbeiter: Vinh Quang Trinh

Bearbeitungszeitraum: 01.11.2009 - 31.12.2010

Das von Leuchtdioden (LED) abgegebene Licht zeigt eine starke Abhängigkeit von Parametern wie Strom und Temperatur. In vielen Anwendungen müssen deshalb Temperatur- und Farbsensoren eingesetzt werden. Durch eine mathematische Modellierung des LED-Verhaltens und Implementierung des Modells in einem Mikrocontroller können teure und kompliziert anzuwendende Farbsensoren eingespart werden.

Für den Aufbau von LED-Modellen am Fachgebiet Lichttechnik müssen grundlegende Messungen an LEDs mit unterschiedlichen Bedingungen durchgeführt werden. Dazu werden etwa 40 farbige LEDs von unterschiedlichen Firmen vermessen. Aus diesen Messungen können alle benötigten Parameter zur Interpolation der mathematischen Gleichungen erzeugt werden.

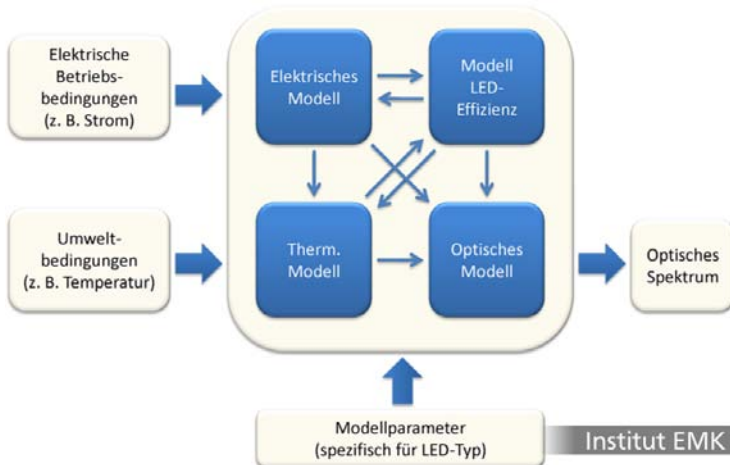


Abbildung 3.59: Schematische Darstellung des LED-Modells mit Teilmodellen für elektrisches, thermisches und optisches Verhalten sowie die Effizienz (Wirkungsgrad) der LED

LED-Innenraumbeleuchtung

Bearbeiter: Wjatscheslaw Pepler

Bearbeitungszeitraum: 01.06.2008 - 31.05.2011

Durch das Aufkommen neuer Lichtquellen, wie beispielsweise den Leuchtdioden, sowie neue Erkenntnisse der Lichtwahrnehmung und der Beeinflussung der inneren Uhr und des Wohlbefindens, verändern sich die Konzepte und Paradigmen in der Innenraumbeleuchtung. Das Hauptziel der Arbeit ist es mit den Leuchtdioden als Lichtquelle eine moderne Innenraumbeleuchtung aufzubauen.

Als erster Schritt wird der aktuelle Stand der Technik ermittelt. In einer breitangelegten Studie werden die aktuellen Leuchten mit LEDs und konventionellen Leuchtmitteln, wie zum Beispiel den Leuchtstofflampen, vermessen. Die interessanten Parameter sind dabei vor allem die momentan erreichbare Energieeffizienz, die in der Innenraumbeleuchtung verwendeten, verschiedenen Lichtverteilungen und Farbtemperaturen.

Ausgehend von den in Deutschland bzw. der Europäischen Union geltenden Normen, sowie unter Berücksichtigung des aktuellen Stands der medizinischen Forschung, die sich mit dem Einfluss des Lichts auf die Gesundheit, das Wohlbefinden und die Arbeitsleistung des Menschen beschäftigt, werden die Anforderungen an die Innenraumbeleuchtung aufgestellt. Dabei werden auch die Möglichkeiten der modernen Gebäudeautomatisierung zur Steuerung der Leuchten berücksichtigt.

Durch ihre elektrischen, thermischen und lichttechnischen Eigenschaften erfordert die LED eine ganzheitliche Vorgehensweise und kann während der Leuchtenentwicklung nicht von anderen Komponenten getrennt betrachtet werden. Auf der anderen Seite bietet eine in sich integrierte Leuchte wenig Flexibilität sowohl für den Hersteller als auch den Anwender und bereitet Schwierigkeiten bei der Logistik und der Instandhaltung. Aus diesem Grund sind Konzepte für einen modularen Aufbau der LED-Leuchten zu entwickeln, die es ermöglichen, mit relativ geringem Aufwand Leuchten für verschieden Zwecke durch Kombination der Module zu entwickeln.

Zum Abschluss der Arbeit werden die entwickelten Konzepte aufgebaut und auf ihre Praktikabilität durch aufgebaute Funktionsmuster, sowie Alltagstauglichkeit und Akzeptanz durch Probandenbefragungen untersucht.

Oberflächenuntersuchungen

Bearbeiter: Marvin Böll

Bearbeitungszeitraum: 01.01.2011 - 31.03.2013

Das Fachgebiet Lichttechnik setzt sich mit dem Thema Transmission und Reflexion bereits im Bereich der Fahrzeugscheinwerfer und Straßenbeleuchtung auseinander und strebt eine Erweiterung der Untersuchungen auf den Bereich der Photovoltaik an. Im Fokus der Untersuchungen soll dabei die Optimierung der Transmission stehen. Durchschnittlich weisen die für handelsübliche PV-Module verwendeten Gläser eine Transmission von ca. 91 % auf. Die Herstellung von Gläsern mit einer höheren Transmission ist zwar möglich, wird aber in der Regel aus Gründen der Wirtschaftlichkeit nicht realisiert. Um den Wirkungsgrad und somit die Ausbeute weiter zu erhöhen verwendet man antireflektierende Schichten und/oder Strukturen auf der Oberfläche. Im Rahmen der Arbeiten sollen diese beiden Aspekte näher untersucht werden:

Untersuchung der Antireflexionsschichte: Für viele Anwendungen gehört das Aufbringen einer entspiegelnden Schicht zum Stand der Technik. Im Bereich der Photovoltaik sind diese Antireflex-Beschichten allerdings noch eine Ausnahme. Ein Grund dafür ist das Problem der Aufbringung solcher Schichten auf einige Glástypen, bzw. dass die Schichten nicht ausreichend lange auf der Glasoberfläche haften bleiben. Im Rahmen der Arbeit sollen ausgewählte Gläser (AR) auf ihr Transmissionsverhalten in Abhängigkeit von der Zeit untersucht werden.

Untersuchung der Oberflächengeometrie: Ein Problem von Solarmodulen ist die Abhängigkeit vom Sonnenstand. Durch die Verwendung einer strukturierten Oberfläche wird eine Lichtlenkung möglich. Im Fall der Photovoltaik kann so der Einfluss des Einfallswinkels der Sonne reduziert werden. Im Rahmen der Arbeit sollen verschiedene Strukturen hinsichtlich ihrer lichtlenkenden Eigenschaften untersucht werden.

4 Laboratorien und Ausrüstung

Das Institut EMK verfügt über zahlreiche technische Ausrüstungen, die den mikro- und feinwerktechnischen Prototypenbau sowie deren messtechnische Untersuchung ermöglichen. Im Einzelnen stehen folgende Ausrüstungen und Messeinrichtungen zur Verfügung:

4.1 Reinraumlabor Mikrotechnik (Klasse 1000 bis 10000)

Das Reinraumlabor (Abb. 4.1) umfasst eine Fläche von 120 m² und besteht aus zwei Räumen mit je 60 m². Der erste Bereich dient der Photolithographie, Nassätztechnik und Galvanik-Beschichtung, im zweiten gegenüberliegenden Bereich sind die Anlagen zur Vakuumbeschichtung (Aufdampfen, Sputtern), die Trockenätzanlagen, die Aufbau- und Verbindungstechnik sowie Messmikroskope aufgestellt.

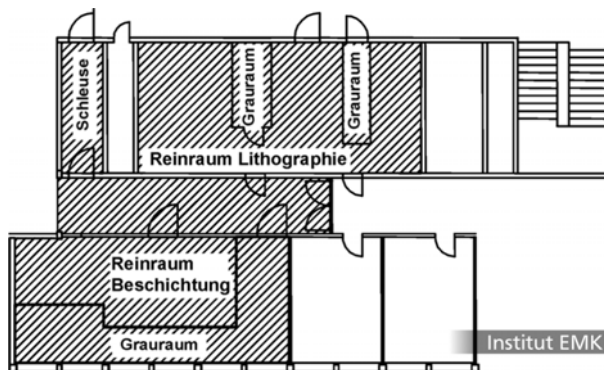


Abbildung 4.1: Reinraum-Labor für Mikrotechnik (Grundriss, schematisch)

Nach den großen Investitionen des Aufbaus und der Erweiterung des Reinraumlabor, die 2004 und 2005 aus dem Innovationsfond des Landes finanziert wurden, sind punktuelle Ergänzungen angeschafft worden. Aus Projektmitteln wurde ein Digitalmikroskop Keyence VHX600 mit verschiedenen Objektiven gekauft (Abbildung 4.2 c). Dieses Mikroskop ermöglicht Aufnahmen mit hoher Tiefenschärfe, in-

dem das resultierende Bild aus einer Vielzahl von Aufnahmen aus verschiedenen Höhenlagen zusammengesetzt wird.

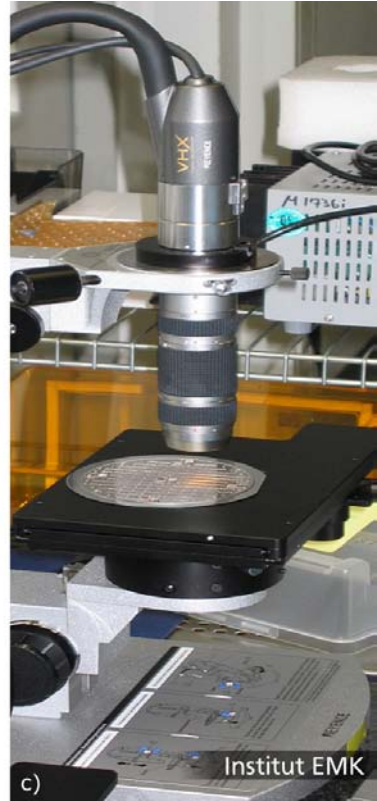
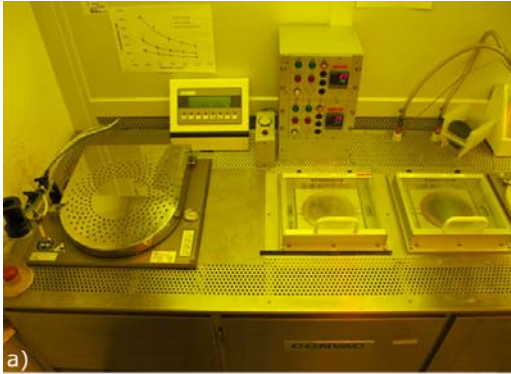


Abbildung 4.2: a) Lackschleuder mit Hotplate-Tisch b) Oberflächen-Profilometer und Belichter c) Digitalmikroskop Keyence VHX600

Im Reinraumlabor Mikrotechnik stehen folgende Geräte und Anlagen zur Verfügung:

- Photolithographie
 - Ofen für HMDS-Haftvermittler (IMTEK)
 - Spincoater mit rotierendem Deckel für Dickresiste (Süss MicroTec Delta 80 GYRSET)

- Spincoater für Standardresiste (Sawatec SM180)
- Hotplates mit programmierbarem Temperaturprofil (Abbildung 4.2 a)
- Mask-Aligner zur Kontakt- und Proximity-Belichtung (Süss MicroTec MA56 M)
- Megaschall-Entwicklungssystem (SONOSYS)
- Div. Tauchentwicklungsbecken für Positiv- und Negativresist
- Plasma-Verascher (Technics 300-E)
- Schichtabscheidung
 - Aufdampfanlage mit Widerstands- und Elektronenstrahlverdampfer, Diffusionspumpsystem (Balzers BAK 660)
 - Sputteranlage mit 4 Stationen, Turbopumpsystem (Alcatel SCM 600), siehe Abbildung 4.3 a)
 - Mikrogalvanik-Anlage mit 2 Prozessbecken je 50l Badvolumen (MOT), siehe Abbildung 4.4

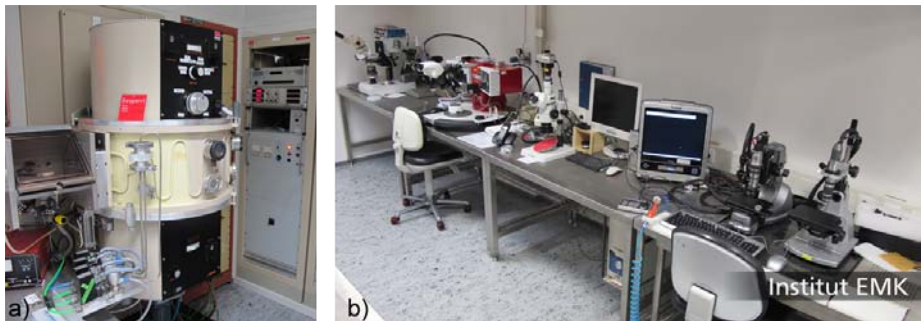


Abbildung 4.3: a) Sputteranlage b) Aufbau und Verbindungstechnik mit Digitalmikroskop

- Nass- und Trockenätztechnik
 - temperierbare Ätzbecken
 - Spülbecken, Rinser-Dryer, Trockenschrank
 - Trockenätzanlagen: Parallelplatten-Reaktor und RIE-Anlage (beide Plasma Technology)

- Aufbau- und Verbindungstechnik
 - Aluminium-Dünndraht-Handbonder (Dynapert, Model 5315)
 - Vakuumtrockenschrank, Vakuumofen mit Schutzgasen
 - Präzisions-Läpp- und Poliermaschine (Logitech)
 - Ball/Wedge (Gold), Deep Access Wedge/Wedge (Aluminium) Drahtbonder mit automatisierter z- und y-Achse (Delvotec 53xx BDA)



Abbildung 4.4: Mikrogalvanik-Anlage

- Inspektion und Qualitätssicherung
 - Oberflächenprofiler mit erweitertem Mess- und Scanbereich (Veeco DEKTAK 8, Abbildung 4.2 b)
 - Strukturweitenmesssystem (Leitz CD-2, Keyence-Mikroskop)
 - Digitalmikroskop Keyence VHX600, siehe Abbildung 4.2 c) und 4.3 b)
 - diverse optische Mikroskope incl. Bilderfassung
 - Zug-Schertester (DAGE BT22)

Für Spenden oder kostengünstige Angebote zur Vervollständigung der Laboreinrichtungen sind wir weiterhin sehr dankbar.

4.2 Labor für dielektrische Polymeraktoren

Zur Verbesserung der Reproduzierbarkeit und des Arbeitsschutzes werden die Forschungsarbeiten an dielektrischen Polymeraktoren im EAP-Labor mit separatem Zu- und Abluftsystem durchgeführt. Die zweite vollautomatische Multilayer-Fertigungsanlage in einem modularen Konzept ist um weitere Module ergänzt worden.

-
- Fertigungsanlage für dielektrische Polymeraktoren - Typ I (bis zu 100 Schichten, Schichtdicke bis 25 μm)
 - Fertigungsanlage für dielektrische Polymeraktoren, - Typ II (bis zu 100 Schichten, Schichtdicken bis 10 μm)
 - Vakuumofen (BIOBLOCK 45004)

4.3 Mikromontagelabor

- Hochtemperaturofen bis zu 3000 °C unter Vakuum oder Schutzgas (P330 von Nabertherm)
- Mikromontageplatz mit Vakuumgreifer, Zweibackengreifer, Heiztisch bis 500 °C, Dispenser, Heißluft und Präzisionsmessspitzen zur Zweipunktmessung (Tomm 1 von Arteos)
- Pulltester (Microtester 22 von Dage)
- Verschiedene UV-Quellen
- Geregelte Mikrogalvanik

4.4 Klimatisierte Präzisionsmesslabore (Klasse 100 000)

- Rechnergestützter Messplatz zur hochgenauen Druckmessung (Messbereich 10 Pa bis 100 kPa, Temperaturbereich -20 bis +150 °C, Feuchtebereich 10 bis 90 % r. F., Messunsicherheit 10^{-4})
- Lasertriangulator-Messsystem zur Oberflächenbeurteilung, Abstands- und Profilmessung (Messbereich 820 μm bzw. 150 μm , Auflösung 2 μm bzw. 0,38 μm)
- Präzisionsspannungs- u. -kapazitätmessplatz (Auflösung 1 μV bzw. 0,1 fF)
- Messplatz zur Charakterisierung von Piezo-Biegewandlern (Kraft-Weg-Kennlinien)
- Kraftmessplatz zur statischen und dynamischen Charakterisierung von Kraftsensoren (Frequenzbereich bis 800 Hz, Nennkräfte bis 2,5 N)
- Optischer Messplatz mit faseroptischen Messgeräten
- Präparationsarbeitsplatz mit Laminar Flow-Box
- Motion-Analyzer für MEMS mit Hochgeschwindigkeits-CMOS-Kamera auf der Basis eines Waferprobers (Electroglass EG 2001X)
- Weißlicht-Interferometer mit Hochgeschwindigkeits-CMOS-Kamera

4.5 Weitere Präzisionsmessplätze

- Rechnergestützter Höchstdruckmessplatz (Messbereich 5 MPa bis 500 MPa, Messunsicherheit $< 10^{-3}$)
- Messplatz zur Bestimmung mechanischer Impedanz (Frequenzbereich 0,1 Hz bis 30 kHz, Messbereich 0,1 Ns/m bis 1 kNs/m)
- Messplatz für dynamische Druckmessung Messbereich 1 Hz - 10 kHz mit maximaler Amplitude von 1,5 - 70 kPa, Messunsicherheit des Referenzsensors 0,5 %
- Messplatz zur statischen und dynamischen Charakterisierung von dielektrischen Polymeraktoren mit 2 Laser-Triangulatoren
- Vollautomatisierter Lebensdauer-Messplatz für dielektrische Polymeraktoren (16 Aktoren gleichzeitig)



Abbildung 4.5: Messplatz zur dynamischen Druckkalibrierung

4.6 Haptik-Messplatz

- Geregelte Kraftquelle (Frequenzbereich statisch bis 1 kHz, Amplitude bis 10N, Auflösung 10 mN)
- Rechnergesteuerter Messplatz mit Auswertung von Kraft, Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung (Frequenzbereich statisch bis 10 kHz)

-
- Impedanzmessplätze für Weichgewebe mit Perfusionsmöglichkeit, Elastometrie und Impedanzmessungen im niedrigen Frequenzbereich
 - Ausstattung für parameterkontrollierte Probandenmessungen (akustische Abschottung, Temperaturregelung)

4.7 Chemielabor

- Arbeitsplätze mit Abzug und Anschluss an Neutralisationsanlage

4.8 Feinmechanische Werkstatt

Die feinmechanischen Werkstätten im Hans-Busch-Institut sind räumlich zusammengelegt und nach einer kompletten Renovierung im Erdgeschoss sowie im 1. OG konzentriert worden.

Im Rahmen des LOEWE-Zentrums AdRIA (Adaptronik) wurde 2010 ein Nd:YAG-Bearbeitungslaser (Alpha Laser AC 200) mit Positioniereinrichtung und vollautomatischer Steuerung beschafft und steht dem Institut EMK als Dauerleihgabe zur Verfügung (Abbildung 4.6). Mit diesem Gerät können Präzisionsschnitte und Schweißverbindungen durchgeführt werden.

Die Werkstatt verfügt über:

- Analoge Drehbänke (8)
- Analoge Fräsmaschinen, zum Teil mit digitaler Anzeige (5)
- Deckel FP2 NC Fräsmaschine mit Dialog-4-Steuerung
- CNC-Präzisionsdrehmaschine (Schaublin 102 CNC)
- Spezialwerkzeuge zur spanenden Feinstbearbeitung von Edelstählen
- Ultraschall- und Erodieranlage zur Strukturierung von Silizium und Glas
- Diamantsäge für Silizium- und Keramik-Wafer
- Materialbearbeitungslaser Alpha Laser AC 200 mit CAD/CAM-Software.
- Präzisionsbearbeitungsplatz für die Mikrozerspanung
- Impulsschweißanlage (Messer Griesheim FP5)
- Punktschweißanlage



Abbildung 4.6: Alpha Laser AC 200

4.9 Erneuerung der Praktikumsausstattung durch Bereitstellung zusätzlicher Mittel

Das Praktikum EMS wurde durch Mittel des Hochschulpakts und durch Mittel zur Qualitätssicherung der Lehre aufgewertet. Neue Labornetzteile Frequenzgeneratoren, Multimeter und Messrechner konnten angeschafft werden. Ein neuer Versuch Piezobiegebalken kann durch einen neuen Lasertriangulator und Oszilloskope realisiert werden.



Abbildung 4.7: Neuausstattung der Praktikumsversuche EMS mit Laborgeräten

4.10 Lichttechnisches Labor

Das lichttechnische Labor des Instituts umfasst eine Fläche von 225 m². Neben einer umfangreichen Ausstattung zur Messung aller gängigen lichttechnischen Größen und Charakterisierung von Oberflächen und transmittierenden Medien bietet der Laborbereich auch Räume zur Durchführung von physiologischen und psychophysischen Probandentests. Dies ist für die Forschung des Fachgebietes Lichttechnik von besonderer Bedeutung, da sich ein großer Teil der Erforschung der Bedürfnisse und der Leistungsfähigkeit der menschlichen visuellen Wahrnehmung widmet.



Abbildung 4.8: Große Ulbrichtkugel (1,5 m Radius)

Besondere Aufmerksamkeit erfahren in diesem Zusammenhang die Unterstützung der Kraftfahrer durch neue Ansätze in der Automobilbeleuchtung, das Dämmerungssehen im Allgemeinen sowie die Farbwahrnehmung des Menschen.

Im lichttechnischen Labor stehen folgende klassischen Messgeräte zur Verfügung:

- Integrale Messungen an LED, Lampen und Leuchten

Messgerät	Strahlungstechnische Messgröße
Ulbricht-Kugel (Durchmesser: 3 m)	Lichtstrom
Ulbricht-Kugel (Durchmesser: 1 m)	Lichtstrom
LED-Messplatz mit Ulbricht-Kugel und Peltierkühlsystem	Lichtstrom und Strahlungsleistung von Hochleistungs-LED bei gezielter Variation der Substrattemperatur
Goniophotometer für Leuchten	Lichtstärke bzw. Lichtstärkeverteilun- gen von Innenraum- und Straßen- leuchten
Goniophotometer für Kfz- Leuchten	Lichtstärke bzw. Lichtstärke- verteilungen von Kfz-Leuchten
Beleuchtungsstärkemess- geräte	Beleuchtungsstärke
Leuchtdichtemessgerät	Leuchtdichte
CCD-Leuchtdichtekamera	Ortsaufgelöste Leuchtdichte (Bildgröße: 1379 Pixel x 1032 Pixel)
Dreibereichsfarbmess- geräte	Farbtemperatur, Farbmaßzahlen

Des Weiteren nimmt die Entwicklung neuer Applikationen der LED-Technik einen weiten Raum ein. Dazu wurden richtungsweisende Messaufbauten selbst entwickelt, mit denen die Hochleistungs-LEDs und deren Treiberschaltungen auch in den Grenzbereichen der Schaltfrequenzen, Betriebstemperaturen und Stromstärken zuverlässig vermessen werden können.

Derzeit erfolgt die Erweiterung und Modernisierung der Laborräume, in deren Zuge auch die Gebäudetechnik inklusive der Klimatisierung erneuert wird. Weitere strategische Neuanschaffungen im Bereich der Fernfeld-Messtechnik und neue, innovative Eigenentwicklungen in der LED-Messtechnik sind derzeit geplant.

- Spektrale Messungen an Leuchtmitteln

Messgerät	Strahlungstechnische Messgröße
Diodenzeilen-Spektralradiometer	Spektrale Bestrahlungsstärke im Bereich von 350 bis 850 nm
Spektraler LED-Messplatz	Spektrale Strahlstärke von Hochleistungs-LED für Messbedingungen A und B nach CIE 127,
Strahldichtekamera	Spektrale Strahldichte (380 nm bis 780 nm, 1 nm Auflösung)
Spektralmessplätze (250 nm bis 900 nm)	Spektrale Bestrahlungsstärke - von Hochleistungs-LED - für Messungen nach COLIPA
Farbmessplätze (Spektral- und Dreibereichsmessverfahren)	Farbtemperatur, Farbmaßzahlen und Farbwiedergabe

- Messung von lichttechnischen Materialkennzahlen

Messgerät	Strahlungstechnische Messgröße
Reflexions- und Transmissionsmesseinrichtung	Reflexionsgrad, Grad der gestreuten Reflexion, Transmissionsgrad und Grad der gestr. Transmission nach DIN 5036
Rückstrahlmesseinrichtung	Rückstrahlwert und spezifischer Rückstrahlwert
Retroreflektometer	Leuchtdichtekoeffizienten von Fahrbahnmarkierungen und -oberflächen
Goniophotometer zur Bestimmung der Streulichtindikatrix	Reflexions- und Transmissions-Indikatrix für streuende Materialien

- Messung an Strahlungsempfängern

Messgerät	Strahlungstechnische Messgröße
Spektralmessplatz	Spektrale Empfindlichkeit von Empfängern (250 nm bis 1050 nm)

- Kalibrierungen

Referenzobjekt	Strahlungstechnische Messgröße
Lichtstärkenormal	Lichtstärke
Lichtstromnormal	Lichtstrom
Leuchtdichtenormal	Leuchtdichte
Reflexionsnormale	Spektrale Reflektionsfaktoren

4.11 August-Euler-Flugplatz

Ursprünglich war er der erste zivile Flugplatz in Deutschland. Der Flugpionier August Euler erhielt im 1908 die erste offizielle Lizenz für das Flugfeld im Griesheimer Sand vor den Toren Darmstadts und bildete in der Folge viele Piloten dort aus.

Im Nachkriegsdeutschland wurde der Flughafen durch die amerikanische Armee militärisch genutzt, bevor die Universität das Gelände von der Bundesvermögensverwaltung erstand. Nach der Grundsanierung des Towergebäudes steht das 65 ha große Gelände seit August 2008 jenen Fachgebieten zur Forschung zur Verfügung, die sich an dessen Finanzierung beteiligt haben.

Da die Forschung des FG Lichttechnik einen großen Schwerpunkt in der Verkehrslichttechnik besitzt, sind Freifeldversuche unter kontrollierten Bedingungen unerlässlich. Die Möglichkeiten, die sich nun am Flugplatz in Griesheim bieten, sind in Deutschlands Universitätslandschaft einmalig (Abbildung 4.9).



Abbildung 4.9: Testgelände August-Euler-Flugplatz

Neben der ca. 1,2 km langen Landebahn stehen der Taxiway sowie eine Dynamikfläche und weitere für realistische Fahrversuche unter reproduzierbaren Bedingungen zur Verfügung. Neben der Versuchsstrecke bietet das Gelände nach der Renovierung auch repräsentative Seminarräume und Büroflächen für die forschenden Fachgebiete mit allen Annehmlichkeiten.

5 Dissertationen

5.1 Entwurf und tiefenlithographische Realisierung mikrostrukturierter Schrittantriebe

Dirk Eicher
Referent: Prof. Dr.-Ing. H. F. Schlaak
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. N. Schwesinger

TU Darmstadt
Tag der Prüfung:
27. Januar 2011

Seit der Etablierung der Mikrosystemtechnik konzentrieren sich kommerzielle Anwendungen vorwiegend im Bereich der Sensorik, während in der Antriebstechnik nach wie vor feinwerktechnische Lösungen mit eingeschränktem Miniaturisierungsgrad überwiegen. Ziel dieser Arbeit war daher die Weiterentwicklung und Miniaturisierung der am Institut entwickelten monolithischen Schrittantriebe auf Basis des Inchwormprinzips (Dissertation U. Jungnickel, 2004). Mittels tiefenlithographischer Strukturierung von SU-8 wird der Übergang vom miniaturisierbaren zum miniaturisierten Antrieb vollzogen (Abb. 5.1).

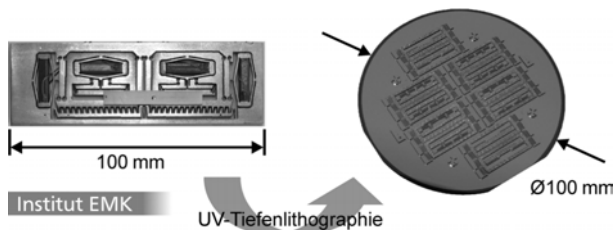


Abbildung 5.1: Überführung von feinwerktechnischer in mikrotechnische Fertigung

Mikrotechnische Fertigung

Nach Auswahl und Beschaffung der fehlenden Anlagen wurde eine durchgängige Prozesskette zur tiefenlithographischen Strukturierung des epoxidbasierten Negativlacks SU-8 zur Fertigung der Schrittantriebe eingeführt. Opferschichten aus unvernnetztem SU-8 oder galvanisch abgeschiedenem Kupfer dienen zur Herstellung

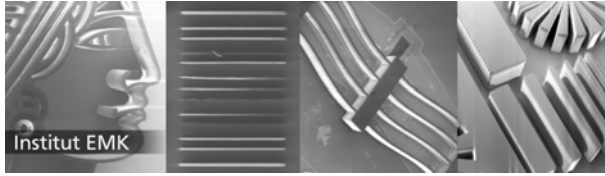


Abbildung 5.2: Tiefenlithographisch hergestellte Strukturen aus SU-8 (Schichtdicke $500\ \mu\text{m}$, minimale Strukturweite $10\ \mu\text{m}$)

freitragender nachgiebiger Strukturen. Elektrothermische Aktoren lassen sich durch Aufbringen einer metallischen Heizelektrode integrieren.

Als Grundlage für die Auslegung der mikromechanischen Antriebselemente werden relevante Materialeigenschaften, wie Elastizitätsmodul und thermischer Ausdehnungskoeffizient der realisierten SU-8-Strukturen, charakterisiert. Außerdem wird der Einsatz des Platinenmaterials FR-4 als Substrat für zukünftige System-on-a-PCB untersucht.

Miniaturisierte Inchwormplattform aus SU-8

Das Antriebsprinzip beruht auf wechselseitigem Klemmen und Verschieben eines Läufers. Dies wird durch die koordinierte Ansteuerung von je zwei elektrothermischen Vorschub- und Klemmaktoren realisiert. Durch Summation von Einzelschritten werden Stellwege von $20\ \text{mm}$ bei Schrittweiten von $10 - 50\ \mu\text{m}$ ermöglicht.

Nach Diskussion der Vor- und Nachteile gängiger Wandlungsmechanismen der Mikrosystemtechnik werden aufgrund der erreichbaren hohen Kräfte und Stellwege elektrothermische Kniehebelaktoren als Aktorelemente zur Erzeugung der schrittweisen Bewegung ausgewählt. Diese ermöglichen im Vergleich zu elektrostatischen oder piezoelektrischen Wandlern große Auslenkungen und Kräfte und lassen sich durch Metallisierung der SU-8-Strukturen prozesstechnisch einfach integrieren. Aufgrund des hohen Ausdehnungskoeffizienten und niedrigen Elastizitätsmoduls von SU-8 werden die erforderlichen Auslenkungen bereits ab Temperaturen von $100\ ^\circ\text{C}$ erreicht.

Die Auslegung des elektro-thermo-mechanischen Systems erfolgt anhand nichtlinearer, dreidimensionaler Finite-Elemente-Simulation (ANSYS). Ausgehend von einer elektrischen Spannung wird zunächst das nichtlineare elektrothermische Feldproblem gelöst. Anschließend werden die resultierenden Knotentemperaturen als Last einer thermomechanischen Rechnung aufgeprägt. Aufgrund der gegebenen Größenverhältnisse kann der Wärmetransport über die Luft im Gegensatz zur Wär-

mestralung nicht vernachlässigt werden und ist mittels experimentell ermittelter Übergangskoeffizienten als Randbedingung zu berücksichtigen. Ergebnis der Simulation sind die Kraft-Weg-Kennlinien der Aktoren in Abhängigkeit der angelegten Spannung.

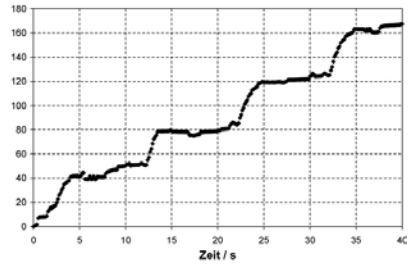
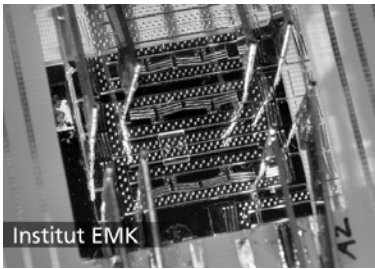


Abbildung 5.3: Miniaturisierte Inchwormplattform, Weg-Zeit-Diagramm

Die Verifizierung des Finite-Elemente-Modells erfolgt statisch und dynamisch auf einem umgerüsteten Wafer-Prober mittels hochauflösender CCD-Kamera und Bildverarbeitungsalgorithmen zur Mustererkennung (DA Staab, 2007). Auf diesem Messplatz kann schließlich auch die Funktion des tiefenlithographisch strukturierten Schrittantriebs nachgewiesen werden. Abb. 5.3 zeigt einen realisierten Prototypen und ein damit aufgenommenes Weg-Zeit-Diagramm.

Bistabile Mechanismen

Zur Verbesserung der Effizienz des gesamten Antriebssystems wurden bistabile Mechanismen aus SU-8 untersucht und hergestellt (Abb. 5.4). Damit ist es möglich, Klemm-Mechanismen zu realisieren, die den Läufer stromlos und damit energieeffizient in einer beliebigen Position halten können. Nach Diskussion theoretischer Grundlagen wird die Realisierbarkeit bistabiler Elemente aus SU-8 gezeigt und ein Konzept zur Integration in den mikrostrukturierten Schrittantrieb vorgestellt.

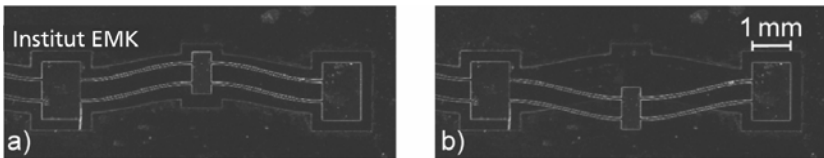


Abbildung 5.4: Bistabiler Mechanismus aus SU-8: a) erste stabile Position (Fertigungsstellung), b) zweite stabile Position

Im letzten Teil der Arbeit werden mögliche Anwendungen der miniaturisierten Inchwormplattform im Bereich der Mikropositionierung vorgestellt sowie ein Ausblick auf mögliche Anknüpfungspunkte gegeben.

5.2 Untersuchungen zur spektralen Empfindlichkeit des menschlichen Auges im mesopischen Bereich

Achim Freiding

Referent: Prof. Dr.-Ing. H. F. Schlaak

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh

TU Darmstadt

Tag der Prüfung:

22. Januar 2010

Mit dem Beginn der physikalischen Photometrie wurde es notwendig, die menschliche Hellempfindung und deren spektralen Verlauf zu kennen. Denn der menschliche Helligkeitseindruck kann nur dann mit Hilfe der physikalischen Messtechnik erfasst werden, wenn die menschliche Hellempfindlichkeit bekannt ist. Für die physikalische Photometrie ist die spektrale Hellempfindlichkeit die Grundlage. Die verwendeten Empfänger werden in ihrer spektralen Empfindlichkeit so durch Filter modifiziert, dass sie der spektralen Empfindlichkeit des Menschen entsprechen. Nur so ist eine Übereinstimmung der Messgröße, mit der menschlichen Empfindung zu erreichen.

1903 wurde die Commission Internationale de Photometrie mit dem Ziel gegründet, die spektrale Hellempfindlichkeit zu bestimmen. Die Nachfolgeorganisation, die Commission Internationale d'Éclairage veröffentlichte 1924 in einer Empfehlung den spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$. Dieser Hellempfindlichkeitsgrad gilt für ein Testzeichen unter einem Beobachtungswinkel von zwei Grad bei fovealer Beobachtung und photopischen Bedingungen (Tagessehen). Schon damals war bekannt, dass sich der spektrale Hellempfindlichkeitsgrad in Abhängigkeit der Untersuchungsparameter, unter anderem der Helligkeit (Leuchtdichte), selbst ändert.

Heute liegen die Hellempfindlichkeitsgrade für das Tages- und Nachtsehen vor, die von der CIE publiziert wurden. Für den Dämmerungsbereich (mesopisches Sehen) existiert jedoch keine international anerkannte Bewertungsfunktion, obwohl im nächtlichen Straßenverkehr und der Außenbeleuchtung Leuchtdichten auftreten, die im mesopischen Bereich liegen. Eine exakte Strahlungsbewertung unter diesen Gegebenheiten ist somit bis heute nicht möglich. Eine der größten Schwierigkeiten ist hierbei, dass die spektrale Empfindlichkeit von der Leuchtdichte selbst abhängig ist und der mesopische Bereich durch den Leuchtdichteübergang vom Tag-

zum Nachtsehen und nicht durch ein definiertes Leuchtdichteniveau charakterisiert ist.

Die spektrale Empfindlichkeit im mesopischen Bereich zeichnet sich nach heutigem Verständnis durch das Zusammenspiel der beiden Photorezeptortypen des menschlichen Auges, den Stäbchen und Zapfen, aus. Beide Empfängertypen liefern Signale, die schon in der Netzhaut vorverarbeitet und nach den Eigenschaften Farbe, Kontrast und Bewegung getrennt werden. Diese Aufteilung bleibt auch in den höheren Verarbeitungsstufen erhalten. Die Helligkeitsinformation wird in den magnozellulären Schichten des seitlichen Kniehöckers verarbeitet, daher wird der achromatische Kanal auch magnozellulärer Kanal genannt. Die Farbinformationen werden analog im chromatischen oder parvozellulären Kanal weiterverarbeitet, da die Farbinformationen in den parvozellulären Schichten des seitlichen Kniehöckers weitergeleitet werden.

In den durchgeführten Untersuchungen wurde die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges anhand von Probanden ermittelt. Hierzu wurde ein geeigneter Versuchsstand erstellt, der es erlaubt, die Untersuchungsparameter, wie Umfeldleuchtdichte, Beobachtungswinkel, Pulsform des Testreizes und der Darbietungsfrequenz zu variieren.

Abschließend wurde ein Modellansatz entwickelt, der es erlaubt, die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges zu bestimmen.

Alle resultierenden Kurven der spektralen Empfindlichkeit zeigen, im Gegensatz zum bekannten spektralen Hellempfindlichkeitsgrads $V(\lambda)$, einen deutlichen Einfluss des chromatischen Systems.

Das abschließend vorgestellte Modell zur Beschreibung der Ergebnisse, bei dem die Gegenfarbensysteme und das achromatische System als Grundgrößen eingehen, zeigt gute Übereinstimmungen. Der Beitrag des achromatischen Kanals zur spektralen Empfindlichkeit wird demnach durch die Beiträge des chromatischen Kanals in Abhängigkeit der Untersuchungsparameter ergänzt.

5.3 Kontaktphysikalische Simulation von Schichtsystemen

Michael Leidner
Referent: Prof. Dr.-Ing. H. F. Schlaak
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. F. Berger

TU Darmstadt
Tag der Prüfung:
27. Mai 2009

Zurzeit beträgt der weltweite Steckverbindermarkt etwa 33 Milliarden USD. Elektrische Kontakte sind in allen Bereichen des täglichen Lebens zu finden. Unter einem

elektrischen Kontakt ist in dieser Arbeit die stromführungsfähige Berührungsfläche zweier Kontaktstücke zu verstehen. Angefangen von kleinsten Abmessungen von nur einigen Zehntel Millimetern in der Elektronik bis hin zu großen Bauformen von einigen Zentimetern Durchmesser in der Energieübertragung dienen elektrische Kontakte zur Verbindung einzelner Stromkreissegmente. Je nach Anwendung werden über die Kontaktpunkte hohe Leistungen von mehreren hundert Ampere oder Datensignale mit einer Rate von mehreren Gigahertz geleitet. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den Steckverbinderkontakten, wobei jedoch ein Großteil der erarbeiteten Ergebnisse auch auf Relaiskontakte anwendbar ist. Als Kenngrößen der Steckverbinderkontakte kann man zum einen die Steckhäufigkeit nennen, welche in erster Linie von der mechanischen Beanspruchung (Kontaktnormalkraft) und Oberflächenbeschaffenheit (Oberflächenbeschichtung) abhängt. Zum anderen gilt als weitere Kenngröße der Kontaktübergangswiderstand, der sich in erster Linie aus einer Kombination des Engewiderstands, des Bahnwiderstandes und weiteren Widerstandskomponenten auf Grund von Fremdschichten auf der Kontaktoberfläche einstellt.

Basierend auf Papkowich-Neuber Potentialen werden numerische Verfahren vorgestellt, mit deren Hilfe sowohl die elastisch-plastische Deformation, die Verteilung der inneren Spannungen als auch der Engewiderstand sowie die Stromdichteverteilung im Kontaktpunkt realer elektrischer Kontakte simuliert werden kann. Die Verfahren erlauben neben der Analyse gemessener 3D-Oberflächen auch die Simulation virtueller Oberflächentopographien mit vorgegebenen Rauheiten, fraktalen Eigenschaften bzw. Oberflächenanisotropien. Aufwendige FEM-Modelle zur Abbildung der Oberflächentopographie werden daher nicht benötigt. Die Kontaktpartner können wahlweise als Ein-, Zwei- oder Dreifachschichtsysteme unterschiedlicher Materialpaarungen modelliert werden. Die mechanische Kontaktbelastung lässt sich sowohl durch Normalkraft als auch durch zusätzliche statische Reibkraft vorgeben. Aufgrund der verwendeten FFT (Fast Fourier Transformation) und Multigrid-Algorithmen wurden die erforderlichen Rechenzeiten so weit minimiert, dass mittels gängiger PC-Hardware Berechnungen mit Auflösungen von $128 \times 128 \times 64$ Raumpunkten innerhalb weniger Minuten durchgeführt werden können.

Alle in die Software implementierten Algorithmen werden soweit möglich mit Beispielen aus der Literatur beziehungsweise mit realen Messergebnissen verglichen und validiert. Es werden die grundlegenden Einflussgrößen wie Oberflächentopographie, Kontaktnormalkraft und Schichtaufbau auf den Kontaktwiderstand beziehungsweise die Spannungen und Deformationen typischer Steckverbinderkontakte untersucht. Der in dieser Arbeit entwickelte iterative Lösungsalgorithmus erlaubt die Berechnung der elektrischen Kenngrößen im Innern realer mehrschichtiger

Steckverbinderkontakte. Der so simulierte Engewiderstand stimmt sehr gut mit den experimentell bestimmten Werten für die getesteten Kontaktoberflächen Gold, Silber und Zinn überein.

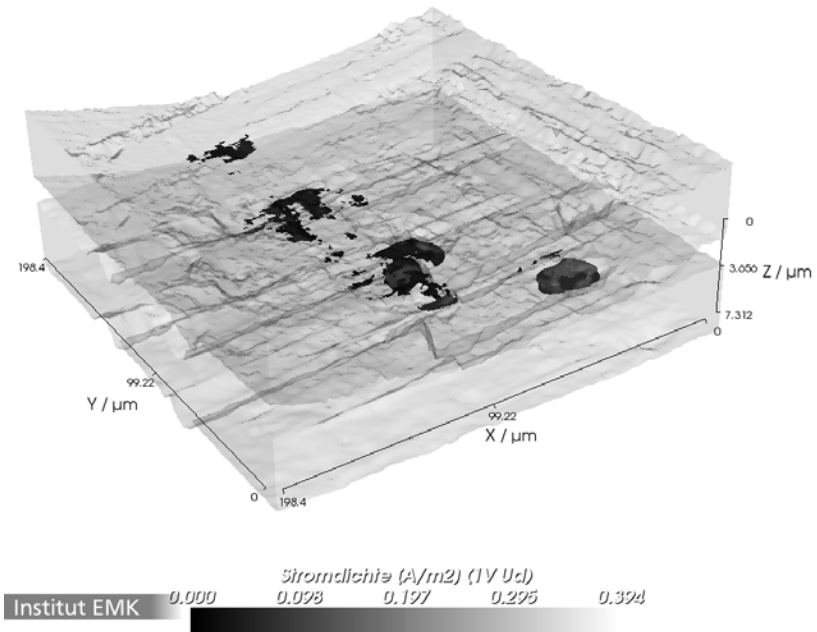


Abbildung 5.5: 50 % Niveauläche bezüglich der maximalen Stromdichte; elastisch/plastischer Fall, gemessene Oberfläche; Kontaktsystem Au/Ni/CuSn₄; Kontaktnormalkraft $F_N = 1$ N, Strombelastung 1 A.

5.4 Dielektrische Elastomerstapelaktoren für ein peristaltisches Fluidfördersystem

Peter Lotz
 Referent: Prof. Dr.-Ing. H. Schlaak
 Korreferent: Prof. Dr.-Ing. U. Wallrabe

TU Darmstadt
 Tag der Prüfung:
 30. November 2009

Dielektrische Elastomeraktoren sind eine Klasse von elektroaktiven Polymeren, die seit ca. 10 Jahren intensiv erforscht werden. Diese Aktoren beruhen auf dem elek-

trostatischen Prinzip der Anziehung entgegengesetzter Ladungen. Aufgrund ihres geringen Gewichtes, der hohen Flexibilität und großen Auslenkung wird diesen Festkörperaktoren ein hohes Potenzial zugeschrieben, in den kommenden Jahren konventionelle Aktortechnologien zu ersetzen.

Die Technologie der dielektrischen Elastomerstapelaktoren wird im Rahmen dieser Arbeit verwendet, um eine peristaltische Pumpe zu entwickeln. Bei der peristaltischen Fluidförderung wird das Bewegungsmuster biologischer Hohlgorgane nachgeahmt. Die periodische Kontraktion und Relaxation der Muskeln dieser Organe führt dazu, dass Medien durch das Organ hindurch bewegt werden. Technische Umsetzungen dieses für biologische Flüssigkeiten schonenden Pumpprinzips gibt es bisher nur in Form von Schlauchpumpen. Bei diesen Geräten steht einem kleinen Schlauchdurchmesser eine unverhältnismäßig große Antriebsmechanik gegenüber.

Für die technologische Realisierung der in den peristaltischen Pumpenkörper integrierten Aktorelemente sind umfangreiche Prozesscharakterisierungen und -optimierungen notwendig. Dieser Thematik ist der erste Schwerpunkt gewidmet. Ausgehend vom Stand der Technik der Materialien und Prozessierung von Dielektrikum und Elektrode werden Möglichkeiten zur Reduzierung der Betriebsspannung untersucht. Es wird gezeigt, dass durch das Einbringen von anorganischen Partikeln mit hoher Dielektrizitätszahl eine Verdoppelung der Leistungsfähigkeit der Aktoren zu erwarten ist. Mit Hilfe eines Modells aus konzentrierten Bauelementen wird erklärt, wie der Schichtwiderstand der Elektroden Betriebsparameter wie z. B. die maximale Arbeitsfrequenz beeinflusst. Zur Charakterisierung der Aktoren werden spezielle Messplätze entwickelt. Um die gewonnenen Messdaten zu verifizieren und erklären zu können wird ein elektrisch-mechanisches Modell dielektrischer Elastomerstapelaktoren entwickelt. Das mechanische Verhalten wird in diesem Modell mit Hilfe eines modifizierten Festkörpermodells beschrieben. Durch die Kombination des elektrischen und mechanischen Modells kann die dynamische Auslenkung der Aktoren über einen großen Frequenzbereich beschrieben werden.

Im zweiten Teil wird die peristaltische Fluidförderung betrachtet. Es wird dargestellt, in welcher Form wichtige Parameter wie Wellenlänge, Amplitude und geometrische Abmessungen die Förderleistung beeinflussen. Es werden zwei Möglichkeiten aufgezeigt, wie aus dielektrischen Elastomeraktoren Fluidfördersysteme aufgebaut werden können. Mit Ergebnissen numerischer Simulationen werden die Möglichkeiten und Grenzen dieser Fluidsysteme aufgezeigt und es werden Designparameter für die Aktorik der peristaltischen Pumpe definiert.

Der dritte Teil der Arbeit widmet sich der Realisierung des Fluidfördersystems. Anhand der im zweiten Teil definierten Parameter wird eine Variante der peristaltischen Pumpe mit dielektrischen Elastomeraktoren entwickelt und realisiert. Hierbei

wird sowohl auf die Besonderheiten der Fertigung als auch auf die messtechnische Charakterisierung der Elastomeraktoren und der Pumpe eingegangen. Die Fertigung zeichnet sich dadurch aus, dass der gesamte Pumpenkörper mit integrierten Aktorelementen und innenliegendem Kanal in einem durchgehenden Prozess vollautomatisiert hergestellt wird. Die Charakterisierung zeigt die Leistungsfähigkeit der Aktortechnologie und die fluidischen Kennwerte der Pumpe. Die Messungen an mehreren Pumpenexemplaren ergeben eine maximale Förderleistung von bis zu $11 \mu\text{l}/\text{min}$, siehe Abbildung 3.19 auf Seite 42. Damit zeigt diese Arbeit erstmalig, wie die Vorzüge dielektrischer Elastomerstapelaktoren für fluidische Anwendungen genutzt werden können.

5.5 Dielektrische Elastomeraktoren in Multilayer-Technologie für taktile Displays

Marc Matysek

Referent: Prof. Dr.-Ing. H.F. Schlaak

Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. H. Lehr

TU Darmstadt

Tag der Prüfung:

13. November 2009

Dielektrische Elastomeraktoren (DEA) gehören zur Klasse der elektroaktiven Polymere (EAP) und zu dem großen Bereich der „Smart Materials“. Das Grundprinzip dielektrischer Elastomeraktoren entspricht dem eines elektrostatischen Aktors, allerdings sind die in diesem Falle dehnbaren Elektroden durch ein Elastomer als nachgiebiges Dielektrikum voneinander getrennt. Wird eine elektrische Spannung an die Elektroden angelegt, so führen die elektrostatischen Anziehungskräfte zu einer Stauchung des Dielektrikums in Feldrichtung und durch die fast vollständige Inkompressibilität der Elastomere gleichzeitig zu einer Ausdehnung in den beiden orthogonalen Raumrichtungen.

Eine spezielle Herstellungstechnologie solcher dielektrischen Elastomeraktoren ist die Multilayer-Technologie. Dabei werden besonders dünne dielektrische Schichten hergestellt, wodurch eine vergleichsweise niedrige Betriebsspannung für die Aktoren benötigt wird. Im Vergleich zu einschichtigen DEA, die Betriebsspannungen im Bereich von 2 kV bis 20 kV benötigen, sind mit der Multilayertechnologie Betriebsspannungen deutlich unter 1 kV möglich. Um den Nachteil der mit den dünneren Schichten verbundenen geringeren absoluten Deformation auszugleichen, werden mehrere solcher Schichten aufeinander gestapelt. Diese mechanische Serienschaltung erlaubt eine Anpassung der Aktorik an viele Anwendungsgebiete. Dielektrische Elastomerstapelaktoren sind damit für Anwendungen prädestiniert, bei denen eine niedrige Betriebsspannung und eine hohe Aktordichte erforderlich sind.

Für die Darstellung taktiler Reize, also vom Menschen mit der Haut erfühlbare Stimulationen, sind genau diese beiden Eigenschaften von großer Bedeutung. Mittels einer Analyse der Kenngrößen taktiler Wahrnehmung werden die Anforderungen an ein taktiler Display ermittelt. Der Vergleich dieser Anforderungen mit den Leistungsdaten einiger realisierter Systeme verdeutlicht, dass es derzeit kein System gibt, das für eine statische und dynamische Stimulation ausgelegt ist. Größtes Potential dafür weisen Aktoren aus aktiven Materialien auf.

Bei der Entwicklung einer Technologie zur reproduzierbaren Herstellung dielektrischer Elastomerstapelaktoren stehen die Definition und Auslegung der Prozessschritte zur Herstellung der dielektrischen Filme und der Elektroden im Fokus. Die Vorteile und Herausforderungen dabei werden sowohl von Material- als auch Herstellungsparametern beeinflusst. Die Herstellung von dielektrischen Filmen mit einer frei wählbaren Dicke im Bereich von $5\mu\text{m}$ bis $100\mu\text{m}$ ermöglicht einstellbare Betriebsspannungen von etwa 200 V bis 2,4 kV. Von entscheidender Bedeutung ist dabei die Gleichmäßigkeit der Schichtdicke. Mit einer maximalen Schwankung der Schichtdicke eines dielektrischen Films von unter 5 % ist eine hohe Präzision erreicht. Die kleinsten realisierbaren Elektrodenstrukturen haben eine Breite von 0,5 mm, der Flächenwiderstand beträgt $10\text{k}\Omega$ bei einer Schichtdicke von $5\mu\text{m}$.

Der Aufbau der zur Charakterisierung dieser Aktoren erforderlichen speziellen Messplätze ist ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit. So können unterschiedliche Aktorkennwerte, insbesondere die Dickenänderung, im statischen und dynamischen Betrieb erfasst und protokolliert werden. Weitere Messplätze dienen der Erfassung der mechanischen und elektrischen Impedanz der Aktoren sowie der Bestimmung des dehnungsabhängigen Flächenwiderstandes von Elektroden und Zuleitungen.

Mit Hilfe der gewonnenen Messdaten wird ein Modell für das elektromechanische Wandlungsverhalten der Aktoren entwickelt und verifiziert. Die modellhafte Beschreibung des viskoelastischen Materialverhaltens wird durch die Einführung eines fraktionalen Elementes entscheidend verbessert. Mit dem Modell werden schließlich anwendungsspezifische Anforderungen an die Auslegung der Aktoren ermittelt.

Abschließend werden die realisierten Aktoren und Konzepte zur Darstellung taktiler Informationen vorgestellt. Dabei handelt es sich zum einen um einen Antrieb für ein Blindenschrift-Modul, bei dem statische Auslenkungen im Bereich einiger $100\mu\text{m}$ erforderlich sind. Zum anderen wird ein dynamisches taktiler Display entwickelt, das Vibrationen mit bis zu 600 Hz spürbar darstellen kann. Abbildung 5.7 zeigt ein vibrotaktiler Display in Benutzung. Die frei konfigurierbare Darstellung kombinierter statischer und dynamischer Oberflächeninformationen mit einer örtlichen Auflösung von 1 mm in einem weiteren Display zeigt abschließend das Potential der entwickelten Technologie.

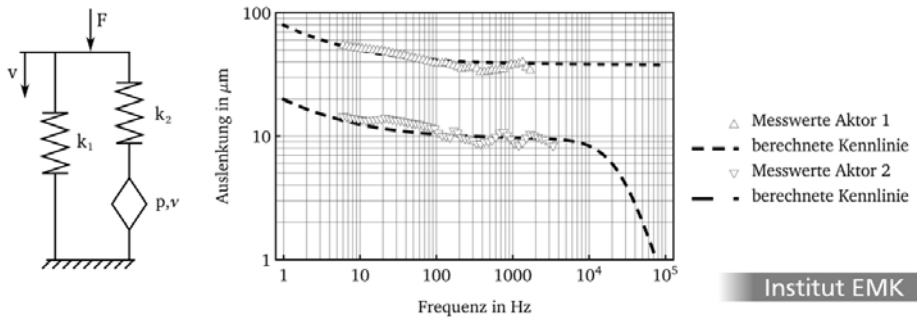


Abbildung 5.6: Mechanisches Modell der Aktoren (links), zugehöriges Diagramm mit Messwerten und Modellkurven für das frequenzabhängige elektromechanische Wandlungsverhalten (rechts).

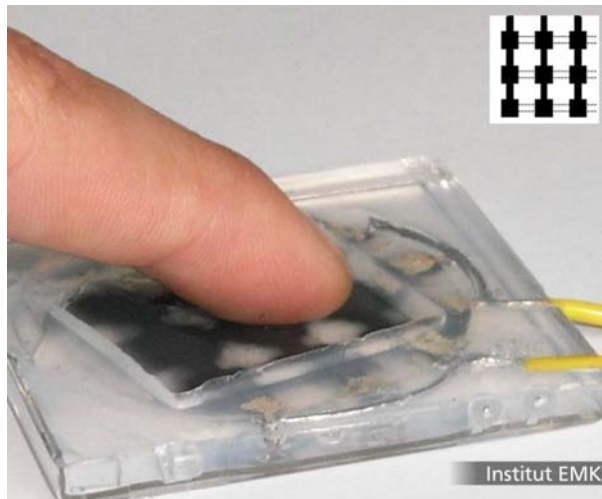


Abbildung 5.7: Vibrotaktiler Display in Matrix-Struktur mit Nutzerfinger

5.6 Optimierung moderner visueller Technologien (Habilitation)

Peter Bodrogi

Begutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. T. Q. Khanh
Univ.-Prof. Dr. Ch. Schierz
Prof. Karl Gegenfurtner

TU Darmstadt
Tag des Vortrages:
27. April 2010

In dieser Habilitationsschrift wurden relevante Eigenschaften des menschlichen Sehsystems untersucht und für die Entwicklung von Methoden zur Optimierung moderner visueller Technologien benutzt. Die Untersuchungen wurden für die Technologien der selbstleuchtenden Bildschirme und der Lichtquellen der Innen- und Außenbeleuchtung durchgeführt.

Für selbstleuchtende Bildschirme sind Kalibrierungsmethoden entwickelt worden, mit denen die Farben empfindungsgemäß dargeboten werden können. Außerdem wurden neue Bildschirmprimärvalenzen für einen größeren Farbgamut sowie neue Subpixelarchitekturen zur räumlich optimalen Auflösung entworfen. Moderne selbstleuchtende Bildschirme stellen oft großflächige Farbreize dar, deren Farberscheinung ebenfalls modelliert wurde. Die Modellierung chromatischer Nachbilder kann zur Erhöhung der Bildqualität von Videosequenzen eingesetzt werden. Zudem wurden die Prinzipien der ergonomischen Anwendung des Farbkontrasts, die zur Optimierung des visuellen Suchens nach farbigen Objekten beitragen, untersucht.

Im Themenkreis „Kognitive, präferierte und emotionale Farbe“ stellen langfristige Gedächtnisfarben wichtige kognitive Farbeffekte dar, die zur Erhöhung der wahrgenommenen Farbqualität der Farbbildschirme benutzt werden können. Die Stärke der visuell erweckten Kinofilm-Farbemotionen wurde mit einem auf den technischen Parametern der Videosequenz basierenden mathematischen Modell berechnet. Faktoren der Farbbildpräferenz wie lokaler und globaler Kontrast, Chroma und Bunton wurden dabei berücksichtigt. Damit konnte ein neuer Algorithmus zur Erhöhung der Bildqualität für junge und ältere Beobachter entwickelt werden.

Zur Optimierung von Innenraumlichtquellen wurden Prinzipien zur Erneuerung des CIE-Farbwiedergabeindex vorgestellt. Es wurde ein Konzept für den Farbharmoniewiedergabeindex vorgeschlagen. Ein wichtiger Teil der vorliegenden Habilitationsschrift bildete die Untersuchung der mesopischen Sehleistung zur Optimierung von Außenlichtquellen. Zu diesem Zweck wurden die Vorgänge der mesopischen Detektion nahe der Wahrnehmungsschwelle für verschiedene Netzhautpositionen modelliert. Es stellte sich heraus, dass die Aktivität der chromatischen Netzhautmechanismen anstelle des z. Z. benutzten x-Modells ein Mehrparametermodell erfordert.

Als solches wurde das sog. CHC-Modell eingeführt, das den konventionellen Begriff Leuchtdichte nicht mehr anwendet. Stattdessen wurde die Adaptation der an der mesopischen Detektion teilnehmenden Netzhautmechanismen einzeln und in Abhängigkeit von der Netzhautposition modelliert.



6 Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten

6.1 Studien- und Diplomarbeiten

6.1.1 Studienarbeiten

- [SA 1623] Sasaran, Catalin:
Konstruktionskatalog für Gelenke zur intrakorporalen Anwendung
(Röse)
- [SA 1690] Berghoff, Patrick:
Greifwerkzeug für die minimalinvasive Chirurgie
(Röse)
- [SA 1695] Wolf, Nicolai:
Einsatz piezoelektrischer Antriebe in haptischen Displays
(Kassner / Wohlleber)
- [SA 1696] Decker, Jona:
Optimierung des Schwingungsverhaltens eines piezoelektrischen
Ultraschallaktors
(Sindlinger)
- [SA 1697] Schwamb, Philip:
Entwicklung und Bewertung von Algorithmen für mehrkanalige
Farbmischung
(Haferkemper)
- [SA 1698] Bachmann, Matthias:
Aufbau einer Infrarot-Übertragungsstrecke
(Rafflenbeul)
-

-
- [SA 1699] Yapici, Süha Orcun:
Entwickeln und Implementieren einer Kraft- und E-Modulmessung für Mikrostrukturen
(Staab)
- [SA 1700] Matich, Sebastian:
Ansteuerung von piezoelektrischen Ultraschall-Wanderwellenmotoren
(Wohlleber / Röse)
- [SA 1701] Zydek, Bastian:
Aufbau eines Versuchsstandes zur Charakterisierung von Fernlichtassistenzsystemen und Validierung durch Probandenversuche (Sprute)
- [SA 1702] Dassinger, Florian:
Entwicklung eines stromgesteuerten MEMS-Aktors für bistabile Mikrorelais
(Staab)
- [SA 1705] Schulmeister, Michael:
Entwicklung eines Hochleistungs LED-Moduls zur Erzeugung von Blitzlicht zur optischen Diagnose an sich bewegendem Objekten
(Pepler)
- [SA 1706] Seipel, Christian:
Parallelkinematiken zur Übertragung eines haptischen Feedback in drei Freiheitsgraden
(Kassner)
- [SA 1711] Wang, Yi:
Aufbau und Test eines Hochdrucksensors mit piezoresistiven Dehnungsmessstreifen
(Heinickel)
- [SA 1712] Haus, Henry:
Entwicklung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle unter Verwendung dielektrischer Elastomeraktoren
(Matysek)

-
- [SA 1713] Manderscheid, Moritz:
Entwicklung eines polymerbasierten Packagings von Silizium-Druckmessenelementen für den Einsatz im Mundraum
(Stöhr)
- [SA 1714] Baum, Christian:
Messtechnische Charakterisierung eines Zweichip-Differenzdruck-
messelementes
(Kober)
- [SA 1715] Eberhardt, Johannes:
Kalibrierung von minaturisierten Drei-Komponenten-Kraftsensoren
(Meiß)
- [SA 1718] Schuster, Philipp:
Verfahrensentwicklung zur Integration und Freistellung metalli-
scher Nanodrähte in Mikrosysteme für die Gasfluss-Sensorik
(Greiner)
- [SA 1719] Yang, Yu:
Vergleich von Gehäusungen für Mikrorelais im Hinblick auf Kosten
und Langzeitstabilität
(Staab)
- [SA 1724] Lotichius, Jan:
Entwurf eines Systems zur Ortung von Lebewesen und Objekten
innerhalb von Gebäuden
(Rafflenbeul)
- [SA 1726] Aust, Henning:
Überwachung der Drucksensoren eines Sensorsystems auf Basis von
Kennlinien zur Volumenstrombestimmung
(Werner)
- [SA 1727] Kimme, Felix:
Auslegung eines spektralen Strahlungsflussnormals auf Basis von
Hochleistungsleuchtdioden
(Groh / Haferkemper)

-
- [SA 1729] Schlußner, Alexander:
Entwicklung und Aufbau einer Auswerteelektronik für ein piezoresistives Drucksensorarray
(Stöhr)
- [SA 1730] Wang, Yu:
Statisches Übertragungsverhalten eines überlastfesten Siliziumdrucksensors
(Kober)
- [SA 1731] Büttgen, Christoph:
Auslegung und Aufbau einer Lageregelung für Voicecoil-Aktoren
(Kohlstedt)
- [SA 1732] Brandt, Isabell:
Potential und Chancen der Mikrosystemtechnik am Beispiel von Mikrorelais
(Staab)
- [SA 1733] Shine, Gautam:
Design and fabrication of an indirectly heated electrothermal actuator
(Staab)
- [SA 1734] Förster, Florentine:
Untersuchung des quantitativen Einflusses ausgewählter Parameter auf die haptische Wahrnehmung des Menschen
(Hatzfeld)
- [SA 1736] Streit, Flavio:
Auslegung und Optimierung von Verformungskörperstrukturen für die mehrdimensionale Kraftmessung in minimalinvasiven Instrumenten
(Rausch)
- [SA 1742] Seiler, Christian:
Entwurf, Auslegung und Test eines gedruckten, resistiven Dehnungssensors
(Rausch)

-
- [SA 1744] Pfeffer, Daniel:
Entwicklung und Charakterisierung einer WLAN-Übertragungs-
strecke
(Rafflenbeul)
- [SA 1748] Neupert, Carsten:
Universeller Messplatz zur Messung der mechanischen Impedanz
(Kassner)
- [SA 1751] Schönbach, Tobias:
Entwicklung und Aufbau eines Piezomotors auf Basis von
Kohlenstoff-Mikrowimpern
(Pott)
- [SA 1752] Dechant, Moritz:
Entwicklung eines kamerabasierten Messstandes zur Vermessung ei-
nes in Sektoren unterteilten Fernlichts
(Groh / Totzauer, Audi AG)

6.1.2 Diplomarbeiten

- [DA 1689] Knell, Holger:
Entwicklung einer Ansteuerung für ein dentales piezoelektrisches
Ultraschall-Schwingungssystem
(Werthschützky / Rein, Sirona)
- [DA 1691] Hamann, Monika:
Evaluierung und Charakterisierung leitfähiger Materialien für Elek-
troden von dielektrischen Elastomeraktoren
(Lotz)
- [DA 1703] Interwies, Steffen:
Optische Bestimmung von Blutparametern in Dialysemaschinen
(Werthschützky)

-
- [DA 1704] Nottrodt, Oliver:
Entwicklung eines Messsystems zur Bestimmung des thermischen Widerstandes und farbmetrischer Eigenschaften von Hochleistungs-LED's im Pulsbetrieb
(Pepler)
- [DA 1707] Totzauer, Alexander:
Implementierung einer Adaptiven Scheinwerferansteuerung auf einem Evaluierungsboard
(Sprute)
- [DA 1710] Opitz, Thomas:
Optimierung der Ansteuerelektronik eines piezoelektrischen Ultraschallaktors
(Sindlinger)
- [DA 1716] Schulmeister, Michael:
Entwicklung eines Messverfahrens zur Prüfung der Empfindlichkeit von Inertialsensoren auf Drehschwingungen
(Werthschützky / Albrecht, Continental Teves)
- [DA 1720] Winterstein, Thomas:
Optische Ablenkeinrichtung auf Basis eines Wanderkeil-Antriebes mit galvanisch abgeschiedener Nickel-Elektrode
(Schlosser)
- [DA 1721] Quednau, Sebastian:
Integration und Einsatz metallischer Nanodrahtarrays in Mikrosysteme für die Gasfluss-Sensorik
(Schlaak / Greiner)
- [DA 1722] Berghoff, Patrick:
Evaluierung und Herstellung hochtopographischer Substrate auf Siliziumbasis für Dünnschicht-Lithium-Ionen-Batterien
(Schlaak)

-
- [DA 1723] Haus, Henry:
Development of driving electronics for dielectric elastomer actuators in mobile applications
(Matysek / Dr.Brokken, Philips)
- [DA 1725] Schwamb, Philipp:
Entwicklung temperaturstabiler, weißer OLED für automotive Anwendungen
(Haferkemper)
- [DA 1735] Sperber, Frank:
Analyse der mechanischen Gewebeeigenschaften von Darmgewebe - Anforderungen an haptische Displays in der Single-Port Chirurgie
(Kassner)
- [DA 1737] Gaus, Vladimir:
Inbetriebnahme und Kalibrierung eines Bispektralmessplatzes sowie Auswertung der Messdaten nach aktuellen physiologischen Gesichtspunkten
(Hafekemper / Schiller)
- [DA 1738] Wolf, Nicolai:
Aufbau und Automatisierung eines Messplatzes zur Bestimmung der spektralen Blendwirkung von optischer Strahlung
(Bodrogi)
- [DA 1739] Bado, Bertrand:
Konzeptentwicklung und -umsetzung eines Blutleckdetektors in der Dialyse
(Werthschützky / Abel, Fresenius Medical Care)
- [DA 1741] Eberhardt, Johannes:
Entwurf und Aufbau von Beschleunigungssensoren mit Mikro-Nagel-Strukturen
(Greiner)

-
- [DA 1746] Wang, Yue:
Theoretische Analyse und experimentelle Validierung eines mikrofluidischen Synthesystems zur Darstellung von Radiomarkierungsstoffen für die Positronen-Emissions-Tomographie (Schlaak / Hardt / Dr.Samper, GE Global Research)
- [DA 1747] Manderscheid, Moritz:
Entwicklung eines non-destruktiven Verfahrens zur Beseitigung von Biofilmen bei Zahnimplantaten (Opitz / Dr. Oehme, Sirona)
- [DA 1749] Dassinger, Florian:
Optimierung einer mikrotechnisch gefertigten abstimmbaren Filterkomponente und Integration in einen Standard-WR10-Hohlwellenleiter (Kohlstedt, A.)
- [DA 1750] Matich, Sebastian:
Entwicklung und Test einer Schaltung zur Ansteuerung und Regelung eines resonanten Antriebs (Pott)

6.2 Bachelor- und Masterarbeiten

6.2.1 Bachelorarbeiten

- [BA 1709] Minamisava Faria, Carlos:
Integration von Mikro-Kraftsensoren in einen Führungsdraht für Katheterisierungen
(Meiss)
- [BA 1728] Hummel, Jonas:
Exemplarische Untersuchung der Übertragbarkeit von akustischen und visuellen Wahrnehmungsphänomenen auf die haptische Wahrnehmung
(Hatzfeld)
- [BA 1743] Jung, David Samuel:
Kontaktkraftmessung an einer kieferorthopädischen Apparatur zur Korrektur von Unterkieferrücklagen
(Stöhr)

6.2.2 Masterarbeiten

- [MA 1745] Mößinger, Holger:
Demonstrating the application of dielectric polymer actuators for tactile feedback in a mobile consumer device
(Lotz / Dr.Brokken, Philips)



7 Veröffentlichungen und Vorträge

Im folgenden Kapitel sind die Veröffentlichungen und Vorträge des Instituts aus den Jahren 2009 und 2010 zusammengestellt. Die Sortierung erfolgt alphabetisch zunächst nach Autor, Co-Autor und dann nach Jahr. Sollten mehrere Dokumente bzw. Vorträge von dem gleichen Autor im entsprechenden Jahr veröffentlicht worden sein, so wird die Jahreszahl mit fortlaufenden kleinen Buchstaben ergänzt.

In der Online-Version ist es sogar möglich, sich direkt über den Link mit der Quelle auf dem Server der Bibliothek zu verbinden. Sofern ein aktiver Internetanschluss besteht folgen sie einfach dem Link:

<http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/xxxxx/> im entsprechenden Zitat.



Literaturverzeichnis

Ballas u. a. 2009

BALLAS, R. G. ; PFEIFER, G. ; WERTSCHÜTZKY, Roland: *Elektromechanische Systeme der Mikrotechnik und Mechatronik: Dynamischer Entwurf- Grundlagen und Anwendungen*. Berlin-Heidelberg : Springer, 2009 <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43888/>

Ballas u. a. 2010

BALLAS, R. G. ; WERTSCHÜTZKY, Roland ; LENK, A. ; PFEIFER, G.: *Electromechanical Systems in Microtechnology and Mechatronics: Electrical, Mechanical and Acoustic Networks, their Interactions and Applications*. Berlin-Heidelberg : Springer, 2010 <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46555/>

Bodrogi u. a. 2009a

BODROGI, Peter ; BÖLL, Marvin ; SCHILLER, Christoph ; KHANH, Tran Q.: *Brightness appearance of automotive front lighting light sources ? a series of visual experiments*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43871/>. Version: August 2009 (ISAL 2009 Proceedings)

Bodrogi u. Brückner 2009

BODROGI, Peter ; BRÜCKNER, Stefan: *Re-defining the colour rendering index*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43889/>. Version: Mai 2009 (CIE-Konferenz)

Bodrogi u. a. 2009b

BODROGI, Peter ; BRÜCKNER, Stefan ; KHANH, Tran Q.: *Effect of inter-observer variability of colour vision on the colour quality of modern light sources*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43872/>. Version: August 2009 (Lux-Europa-Konferenz)

Bodrogi u. a. 2009c

BODROGI, Peter ; BRÜCKNER, Stefan ; KHANH, Tran Q.: *Effect of inter-observer variability of colour vision on the colour quality of modern light sources*. <http://>

tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43873/. Version: August 2009 (Luxjunior-Konferenz)

Bodrogi u. a. 2009d

BODROGI, Peter ; BRÜCKNER, Stefan ; KHANH, Tran Q.: The newest research results for a re-defintion of the color rendering index of today light sources. In: *DfWG-Tagung, Berlin , Bd. (2009) .* (2009). <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/42581/>

Bodrogi u. a. 2010a

BODROGI, Peter ; BRÜCKNER, Stefan ; KHANH, Tran Q.: *Dimensions of light source colour quality.* <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46764/>.
Version: 2010

Bodrogi u. a. 2010b

BODROGI, Peter ; BRÜCKNER, Stefan ; KHANH, Tran Q.: Dimensions of light source colour quality. In: *CGIV2010 2010* (2010). <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46660/>

Bodrogi u. Khanh 2009

BODROGI, Peter ; KHANH, Tran Q.: *Farbkonstanz und Analyse der Lichtquellen für die Lichtindustrie.* <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43757/>.
Version: August 2009

Bodrogi u. a. 2009e

BODROGI, Peter ; KHANH, Tran Q. ; BRÜCKNER, Stefan: *Colour Rendering of new white LED light sources ? visual tests.* <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46572/>. Version: 2009

Bodrogi u. a. 2010c

BODROGI, Peter ; KHANH, Tran Q. ; BRÜCKNER, Stefan: Ordinal Scale Based Description of Color Rendering. In: *Color Research and Application 2010* (2010). <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46574/>

Bodrogi u. a. 2010d

BODROGI, Peter ; KHANH, Tran Q. ; SCHILLER, Christoph ; HAFERKEMPER, Nils ; BÖLL, Marvin: Jüngste Labortestergebnisse der mesopischen Helligkeitswahrnehmung verschiedener Straßenlampenspektren und weißer LEDs. In: *Licht 2010* (2010). <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46569/>

Bodrogi u. a. 2009f

BODROGI, Peter ; SCHANDA, J. ; KHANH, Tran Q.: *Forschungspotentiale und jüngste Forschungsergebnisse im mesopischen Bereich für eine wahrnehmungsgerechte Verkehrs- und Kfz-Lichttechnik*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/35336/>. Version: August 2009

Bodrogi u. a. 2010e

BODROGI, Peter ; SCHANDA, J. ; TARCZALI, T: *Colour Rendering Properties of LED sources*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46600/>. Version: November 2010

Bodrogi u. a. 2010f

BODROGI, Peter ; SCHILLER, Christoph ; HAFERKEMPER, Nils ; BÖLL, Marvin ; KHANH, Tran Q.: *Jüngste Labortestergebnisse der mesopischen Helligkeitwahrnehmung verschiedener Straßenlampenspektren und weißer LEDs*. In: *Licht 2010* (2010). <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46506/>

Bousonville u. Rausch 2009a

BOUSONVILLE, M. ; RAUSCH, Jacqueline: *Reference Signal Generation with Direct Digital Synthesis for FAIR*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43890/>. Version: August 2009 (11th International Conference on Heavy Ion Accelerator Technology)

Bousonville u. Rausch 2009b

BOUSONVILLE, M. ; RAUSCH, Jacqueline: *Universal picosecond timing system for the Facility for Antiproton and Ion Research*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43891/>. Version: August 2009 (Phys. Rev. ST Accel. Beams Nr. 4, Bd. 12 (2009) American Physical Society, S. 042801)

Brückner u. a. 2009a

BRÜCKNER, S. ; BODROGI, P ; KHANH, Tran Q.: *Colour Rendering of new white LED light sources ? visual tests*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43921/>. Version: August 2009 (Lux-Europa-Konferenz)

Brückner u. a. 2009b

BRÜCKNER, Stefan ; BODROGI, Peter ; KHANH, Tran Q.: *Inter-observer variability of colour vision and its effect on the colour quality of modern light sources*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46760/>. Version: 2009

Brückner u. a. 2010

BRÜCKNER, Stefan ; BODROGI, Peter ; KHANH, Tran Q.: *Was bestimmt die Lichtqualität in der Innenbeleuchtung? Ergebnisse einer Reihe wahrnehmungspsychologischer Feldtests.* <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46763/>. Version: 2010

Brückner u. Khanh 2010

BRÜCKNER, Stefan ; KHANH, Tran Q.: *Was bestimmt die Lichtqualität in der Innenraumbelichtung? - Ergebnisse visueller Versuche.* <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46762/>. Version: Oktober 2010

Budelmann u. a. 2009

BUDELMANN, C. ; MEISS, Thorsten ; WERTHSCHÜTZKY, Roland: *Entwicklung einer sicheren Echtzeit-Signalverarbeitungseinheit zum Betrieb eines haptischen Führungsdrahtes für Herzkatheterisierungen.* <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43922/>. Version: August 2009 (DESIGN&ELEKTRONIK-Entwicklerforum ?Embedded goes medical)

Dannhauer u. a. 2009

DANNHAUER, W. ; PHILIPPS, M. ; THAM, A. ; WERTHSCHÜTZKY, Roland ; KOBER, Timo ; STÖHR, Ingmar: *Differential pressure sensor i.e. micromechanical differential pressure sensor, for detecting difference between two medium pressures, has measuring diaphragm lying at base in case of one-sided overload and having even contour.* <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43923/>. Version: August 2009

Dannhauer u. a. 2010

DANNHAUER, Wolfgang ; THAM, Anh T. ; STOLZE, Dieter ; WERTHSCHÜTZKY, Roland ; KOBER, Timo: *Mikromechanischer Drucksensor.* <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46729/>. Version: Februar 2010

van Erp u. a. 2010

ERP, Jan van ; KYUNG, Ki-Uk ; KASSNER, Sebastian ; CARTER, Jim ; BREWSTER, Stephen ; WEBER, Gerhard ; ANDREW, Ian: *Setting the Standards for Haptic and Tactile Interactions: ISO's Work.* <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43778/>. Version: Juli 2010 (Lecture Notes in Computer Science). – DOI 10.1007?978-3-642-14075-4

Flaschenträger u. a. 2010

FLASCHENTRÄGER, David ; THIEL, Jennifer ; RAUSCH, Jacqueline ; ATZRODT, Heiko ; HEROLD, Sven ; MELZ, Tobias ; WERTHSCHÜTZKY, Roland ; HANSELKA, Holger: *Implementation and Characterisation of the Dynamic Behaviour of a Three-dimensional Truss Structure for Evaluating Smart Devices*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46882/>. Version: September 2010. – Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit, Technische Universität Darmstadt.

Flittner u. a. 2009

FLITTNER, Klaus ; MATYSEK, Marc ; LOTZ, Peter ; SCHLOSSER, Michael ; SCHLAAK, Helmut F: *Integrated gas valve array using dielectric elastomer actuators*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43924/>. Version: August 2009 (Smart Structures ? NDE. Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XI. Proceedings of SPIE)

Flittner u. a. 2010a

FLITTNER, Klaus ; SCHLOSSER, Michael ; LOTZ, Peter ; MATYSEK, Marc ; SCHLAAK, Helmut F: *Integration of dielectric elastomer stack actuators into micro systems*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43748/>. Version: März 2010

Flittner u. a. 2010b

FLITTNER, Klaus ; SCHLOSSER, Michael ; MATYSEK, Marc ; LOTZ, Peter ; SCHLAAK, Helmut F: *Integrated Fabrication of Dielectric Elastomer Stack Actuators for Use in Micro Systems*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43752/>. Version: Juni 2010

Frohnappfel u. a. 2009

FROHNAPFEL, A. ; BRÜCKNER, Stefan ; BODROGI, Peter ; KHANH, Tran Q.: *Untersuchungen zur Farbwahrnehmung: Personenabhängige Streuungen der Farbwahrnehmungen und Konsequenzen für die Farbpraxis*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43886/>. Version: August 2009 (FKT, Fernseh- und Kino-Technik Nr. 1-2)

Fronapfel u. a. 2010

FRONAPFEL, Anja ; BRÜCKNER, Stefan ; BODROGI, Peter ; KHANH, Tran Q.: *Untersuchung zur Farbwahrnehmung - Personenabhängige Streuungen der Farbwahrnehmungen und Konsequenzen für die Praxis*. In: *FKT* (2010), November, Nr. 1-2. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46598/>

Gao u. a. 2009

GAO, J. ; MÜLLER, W. F. O. ; GREINER, P.F. ; EICHER, Dirk ; WEILAND, T. ; SCHLAAK, Helmut F.: *Combined simulation of micro permanent magnetic linear contactless displacement sensor*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43925/>.
Version: August 2009

Gao u. a. 2010

GAO, J. ; MÜLLER, W. F. O. ; GREINER, P.F. ; EICHER, Dirk ; WEILAND, T. ; SCHLAAK, Helmut F.: *Combined simulation of micro permanent magnetic linear contactless displacement sensor*. In: *Sensors 2010* 10 (2010), September, Nr. 9, 8424-8436. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/45821/>

Greiner u. a. 2009a

GREINER, F. ; SCHLAAK, Helmut F. ; TSCHULENA, G. ; KORB, W.: *Mikro-Nano-Integration - Einsatz von Nanotechnologie in der Mikrosystemtechnik*. In: *Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung*. 13 (2009), August, Nr. 1. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43927/>

Greiner u. a. 2010

GREINER, P.F. ; EBERHARDT, J. ; SCHLAAK, Helmut F.: *Metallic Micro Nails Made by direct LiG process - MiNiMAL*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46789/>.
Version: Oktober 2010 (ANKA/KNMF Joint Users Meeting)

Greiner u. a. 2009b

GREINER, P.F. ; SCHLAAK, Helmut F. ; BRACHT, A.: *Mikro-Nano-Integration - Brücke in die Nanowelt*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43926/>.
Version: August 2009 (Mikroproduktion Nr. 5 , Bd. 7)

Griesheimer u. a. 2010

GRIESHEIMER, S. ; SALUN, L. ; DÖRSAM, E. ; GÖTZ, P. ; IBIS, M. ; RAUSCH, Jacqueline: *Forming limit curves of flexible sensors on metal surfaces*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43275/>.
Version: 2010

Groh u. Khanh 2009a

GROH, Andreas ; KHANH, Tran Q.: *Spektrale, lichttechnische und thermische Parameter von amberen Hochleistungs-LEDs auf Basis von InGaAlP und InGaN mit amberem Phosphor*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46761/>.
Version: 2009

Groh u. Khanh 2009b

GROH, Andreas ; KHANH, Tran Q.: *Spektrale, lichttechnische und thermische Verhalten von amberen Hochleistungs-LEDs auf der Basis von InGaAlP-System und blauen InGaN-System mit dem amberen Phosphor*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43874/>. Version: August 2009 (Luxjunior-Konferenz,)

Haferkemper u. a. 2009a

HAFERKEMPER, Nils ; SCHWAMB, P. ; KHANH, Tran Q.: *Untersuchung von Optimierungsverfahren für n-kanalige Farbmischung*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43875/>. Version: August 2009 (Luxjunior-Konferenz)

Haferkemper u. a. 2009b

HAFERKEMPER, Nils ; SCHWAMB, P. ; KHANH, Tran Q.: *Untersuchung von Optimierungsverfahren für n-kanalige Farbmischung*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43870/>. Version: August 2009 (DfWG-Tagung)

Haferkemper u. a. 2009c

HAFERKEMPER, Nils ; SPRUTE, J. H. ; SCHILLER, Christoph ; KHANH, Tran Q.: *Experiment Series on the Effect of DRL usage on Motorcycle Conspicuity*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43876/>. Version: August 2009 (ISAL 2009 Proceedings)

Haferkemper u. a. 2010a

HAFERKEMPER, Nils ; SPRUTE, J. H. ; SCHILLER, Christoph ; KHANH, Tran Q.: *The Effect of LED Daytime Running Lights on Motorcycle Conspicuity and Detection Distance Estimation - Latest Test Results*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46595/>. Version: November 2010

Haferkemper u. a. 2010b

HAFERKEMPER, Nils ; SPRUTE, J. H. ; SCHILLER, Christoph ; KHANH, Tran Q.: *The Effect of LED Daytime Running Lights on Motorcycle Conspicuity and Detection Distance Estimation - Latest Test Results*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46576/>. Version: 2010

Haferkemper u. a. 2010c

HAFERKEMPER, Nils ; SPRUTE, J. H. ; SCHILLER, Christoph ; KHANH, Tran Q.: *Untersuchung der Auffälligkeit, Erkennbarkeit und Geschwindigkeitseinschätzung von Motorrädern mit LED-Tagfahrlicht*. In: *VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 2010 (2010)*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46594/>

Haferkemper u. a. 2010d

HAFERKEMPER, Nils ; SPRUTE, J. H. ; SCHILLER, Christoph ; KHANH, Tran Q.: Untersuchung zum Einsatz von LED-Tagfahrlicht an Motorrädern. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 2010 (2010), Nr. 2. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46579/>

Hatzfeld u. a. 2009

HATZFELD, C. ; KERN, T. A. ; STÖHR, Ingmar ; WERTHSCHÜTZKY, Roland: *Development of a highly dynamic force source*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43976/>. Version: August 2009 (Proceedings of the EuroSensors XIII Conference)

Hatzfeld u. a. 2010a

HATZFELD, Christian ; KERN, Thorsten A. ; WERTHSCHÜTZKY, Roland ; KAPPERS, Astrid M. L. (Hrsg.) ; ERP, Jan B. F. (Hrsg.) ; TIEST, Wouter M. B. (Hrsg.) ; HELM, Frans C. T. d. (Hrsg.): *Improving the Prediction of Haptic Impression User Ratings Using Perception-Based Weighting Methods: Experimental Evaluation*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43934/>. Version: 2010 (Lecture Notes on Computer Science (LNCS))

Hatzfeld u. a. 2010b

HATZFELD, Christian ; KERN, Thorsten A. ; WERTHSCHÜTZKY, Roland: Design and Evaluation of a Measuring System for Human Force Perception Parameters. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 162 (2010), September, 202–209. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46311/>

Hatzfeld u. Werthschützky 2010

HATZFELD, Christian ; WERTHSCHÜTZKY, Roland ; KAPPERS, Astrid M. L. (Hrsg.) ; ERP, Jan B. F. (Hrsg.) ; TIEST, Wouter M. B. (Hrsg.) ; HELM, Frans C. T. d. (Hrsg.): *Vibrotactile Force Perception Thresholds at the Fingertip*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43935/>. Version: 2010 (Lecture Notes on Computer Science (LNCS)). – Proceedings of the International Eurohaptics Conference 2010, Amsterdam

Heinickel u. Werthschützky 2009a

HEINICKEL, Patrick ; WERTHSCHÜTZKY, Roland: *Functionality of a novel overload resistant silicon high pressure sensing element*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/36712/>. Version: Juni 2009

Heinickel u. Werthschützky 2009b

HEINICKEL, Patrick ; WERTHSCHÜTZKY, Roland: *Novel Silicon High Pressure Sensing Element*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43978/>. Version: Mai 2009

Heinickel u. Werthschützky 2010

HEINICKEL, Patrick ; WERTHSCHÜTZKY, Roland: *Effect of the thickness - ratio of the piezoresistive composite element for measuring high - pressure*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46536/>. Version: September 2010

Kassner u. a. 2010

KASSNER, Sebastian ; RAUSCH, Jacqueline ; WERTHSCHÜTZKY, Roland: System Design of a Haptic Laparoscopic Telemanipulation System. In: *Biomedizinische Technik* 55 (2010), November, Nr. 1. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46747/>

Kassner u. a. 2009

KASSNER, Sebastian ; RÖSE, Andreas ; WERTHSCHÜTZKY, Roland ; SCHLAAK, Helmut F.: *Operational Concept for a Handheld Laparoscopic Telemanipulation System: Design and Animal Experiment*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/42560/>. Version: September 2009

Kassner u. Werthschützky 2010

KASSNER, Sebastian ; WERTHSCHÜTZKY, Roland: *Parallel Kinematics for Haptic Feedback in Three Degrees of Freedom: Application in a Handheld Laparoscopic Telemanipulation System*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43777/>. Version: Juli 2010 (Lecture Notes in Computer Science). – DOI 10.1007/978-3-642-14064-8

Kern u. a. 2007

KERN, T. A. ; KLAGES, S. ; MEISS, Thorsten ; WERTHSCHÜTZKY, Roland: *Closed loop stability analysis of an assistance system for catheterization*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/6419/>. Version: Januar 2007 (World haptics 2007 : proceedings . - Los Alamitos, Calif. ?u.a.? : IEEE Computer Society, 2007 , S. 597-598 ISBN: 0-7695-2738-8)

Khanh 2009a

KHANH, Tran Q.: *Jahre V(λ)? Lichttechnik: Entstehung, Wesen der Wahrnehmung, Defizite und neue Aspekte für eine wahrnehmungsgerechte Lichttechnik*. <http://>

tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43979/. Version: August 2009 (Zeitschrift Licht Nr. 7?8)

Khanh 2009b

KHANH, Tran Q.: *LED erhellt Darmstädter Straße*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43981/>. Version: August 2009 (Umweltmagazin , Bd. H. 1-2 (2009) Springer VDI-Verlag)

Khanh 2010a

KHANH, Tran Q.: *LED - A technology for quality and energy efficiency*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46509/>. Version: 2010

Khanh 2010b

KHANH, Tran Q.: *Vergleich biologischer Sehsysteme mit technischen Sensorsystemen*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43982/>. Version: August 2010 (Sensor-Magazin , Bd. H. 2 (2009) Magazin Verlag Hightech Publications KG (Nenndorf))

Khanh u. a. 2010a

KHANH, Tran Q. ; BODROGI, Peter ; BRÜCKNER, Stefan: *Farbwiedergabeindex - Untersuchungsmethoden und jüngste internationale Forschungsergebnisse zur Redefinition*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46507/>. Version: 2010

Khanh u. a. 2010b

KHANH, Tran Q. ; BODROGI, Peter ; BRÜCKNER, Stefan: *Rank-order based description of colour rendering: definition, observer variability and validation*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46510/>. Version: 2010

Khanh u. a. 2009a

KHANH, Tran Q. ; BODROGI, Peter ; HAFERKEMPER, Nils ; SCHILLER, Christoph: *Wahrnehmungstechnische Aspekte und Nutzerakzeptanz vom LED-Licht in der Straßenbeleuchtung*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/42582/>. Version: 2009

Khanh u. a. 2010c

KHANH, Tran Q. ; BODROGI, Peter ; HAFERKEMPER, Nils ; SCHILLER, Christoph: *Wahrnehmungstechnische Aspekte und Nutzerakzeptanz vom LED-Licht in der Straßenbeleuchtung*. 7. VDI-Tagung: Innovative Beleuchtung mit LED. 2009.

In: 7. VDI-Tagung: *Innovative Beleuchtung mit LED*. 2009 7. VDI (2010). <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/42579/>

Khanh u. a. 2010d

KHANH, Tran Q. ; BODROGI, Peter ; HAFFERKEMPER, Nils ; SCHILLER, Christoph ; VAS, Zoltan ; VARADY, Geza ; SCHANDA, Janos: *Effect of chromatic mechanisms on the detection of mesopic incremental targets at different eccentricities*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46504/>. Version: 2010

Khanh u. Groh 2009

KHANH, Tran Q. ; GROH, Andreas: *Spectral, photometric and thermal parameters of amber high power LEDs based on InGaAlP and InGaN with amber phosphors*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46562/>. Version: 2009

Khanh u. a. 2009b

KHANH, Tran Q. ; KUHN, T. ; SCHILLER, Christoph: *Strassenbeleuchtung mit konventionellen Lichtquellen und LEDs im Vergleich; Lichttechnischer Praxisbericht einer wissenschaftlich begleiteten Teststrasse in Darmstadt*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43980/>. Version: August 2009 (Electrosuisse, Bulletin SEV?AES Nr. H. 9)

Khanh u. a. 2009c

KHANH, Tran Q. ; SCHILLER, Christoph ; KUHN, T. ; BÖLL, Marvin: *Straßenbeleuchtung mit LEDs und konventionellen Lichtquellen im Vergleich ? Eine licht- und wahrnehmungstechnische Analyse aus einer wissenschaftlich begleiteten Teststraße in Darmstadt*. In: *Licht* 2009 (2009), Oktober, Nr. 10. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46568/>

Khanh u. a. 2010e

KHANH, Tran Q. ; SCHILLER, Christoph ; KUHN, T. ; PEPLER, Wjatscheslaw ; BRÜCKNER, Stefan: *Lichttechnische und technologische Aspekte der LED - Straßenbeleuchtung*. In: *Licht* 2010 (2010), August, Nr. 7-8, 536–542. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46511/>

Khanh u. a. 2009d

KHANH, Tran Q. ; SPRUTE, J. H. ; BÖLL, Marvin ; GROH, Andreas ; SCHILLER, Christoph: *HID vs. Tungsten Halogen Headlamps: Driver Preferences and Visibility Distance*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46565/>. Version: 2009

Khanh u. a. 2009e

KHANH, Tran Q. ; STECKERT, C. ; BÖLL, Marvin: *Über die Wirkung von Lampenspektren auf die Wahrnehmbarkeit und Auffälligkeit von Fahrbahnmarkierungen bei Nacht*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43877/>. Version: August 2009 (Straßenverkehrstechnik)

Kober u. a. 2010

KOBER, Timo ; SINDLINGER, Stefan ; WERTHSCHÜTZKY, Roland: *Analyse des Übertragungsverhaltens von Differenzdrucksensoren durch dynamische Druckkalibrierung*. In: *tm - Technisches Messen* 77 (2010), Februar, Nr. 2, 83–88. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46663/>

Kober u. a. 2009

KOBER, Timo ; STÖHR, Ingmar ; SINDLINGER, Stefan ; WERTHSCHÜTZKY, Roland: *Analyzing amplitude and phase response of differential pressure sensors using a dynamic pressure source*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43983/>. Version: Mai 2009

Kober u. Werthschützky 2010a

KOBER, Timo ; WERTHSCHÜTZKY, Roland: *Mikromechanischer Überlastschutz für Drucksensoren durch strukturierte Gegenlager aus Glas*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46662/>. Version: Mai 2010

Kober u. Werthschützky 2010b

KOBER, Timo ; WERTHSCHÜTZKY, Roland: *Overload-resistant pressure sensors in the nominal range of 10 mbar (1 kPa)*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46540/>. Version: September 2010

Kohlstedt u. Schlaak 2010a

KOHLSTEDT, Anika ; SCHLAAK, Helmut F: *Design for Micromechanically Tuneable Microwave Hollow Waveguide Devices*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46719/>. Version: Juni 2010

Kohlstedt u. Schlaak 2010b

KOHLSTEDT, Anika ; SCHLAAK, Helmut F: *Tiefenlithographieprozess für SU-8-Dickschicht-Funktionsstrukturen auf FR4-Leiterplattenmaterial*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46718/>. Version: Mai 2010

Kohlstedt u. a. 2009

KOHLSTEDT, Anika ; STAAB, Matthias ; SCHLAAK, Helmut F.: *Langzeituntersuchungen zur Eignung von SU-8 als Konstruktionswerkstoff*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43984/>. Version: Oktober 2009

Kuhn u. a. 2009a

KUHN, T. ; SCHILLER, Christoph ; HAFFERKEMPER, Nils ; KHANH, Tran Q.: *LED-street lighting- technological, energy, lighting aspects and results of real tests on the roads*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43878/>. Version: August 2009 (Lux-Europa-Konferenz)

Kuhn u. a. 2009b

KUHN, T. ; SCHILLER, Christoph ; KHANH, Tran Q.: *Kosten sparen, Umwelt schützen*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43885/>. Version: August 2009 (LICHT Nr. 5)

Kuhn u. a. 2010a

KUHN, T. ; SCHILLER, Christoph ; KHANH, Tran Q.: *Feld- und Labortests zur lichttechnischen Bestimmung von Energiesparpotentialen in der heutigen Straßenbeleuchtung mit konventionellen Technologien*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43985/>. Version: August 2010 (Zeitschrift Licht Nr. 5 , Bd. (2009) Pflaum Verlag (München))

Kuhn u. a. 2010b

KUHN, T. ; SCHILLER, Christoph ; KHANH, Tran Q.: *Feldmessungen an Farhbahnbelägen von deutschen Straßen und Konsequenzen auf eine energieeffiziente Straßenbeleuchtung*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46512/>. Version: Oktober 2010

Kuhn u. a. 2010c

KUHN, T. ; SCHILLER, Christoph ; PEPLER, Wjatscheslaw ; KHANH, Tran Q.: *Die LED - Straßenbeleuchtung von heute - lichttechnische und technologische Aspekte*. In: *Licht 2010* (2010), Oktober. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46513/>

Kuhn u. a. 2009c

KUHN, Thomas ; SCHILLER, Christoph ; KHANH, Tran Q.: *Eine Analyse aktueller LED-Straßenleuchten aus lichttechnischer Sicht*. In: *Licht 2009* (2009), Nr. 1?2, 88–93. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46584/>

Leidner 2009a

LEIDNER, Michael: *Kontaktphysikalische Simulation von Schichtsystemen*. Darmstadt, TU Darmstadt, Diss., August 2009. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/39225/>

Leidner 2009b

LEIDNER, Michael G.: *Kontaktphysikalische Simulation von Schichtsystemen*. Darmstadt, TU Darmstadt, Diss., Oktober 2009. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/36648/>. – Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2009

Lotz 2009

LOTZ, Peter: *Dielektrische Elastomerstapelaktoren für ein peristaltisches Fluidfördersystem*. Darmstadt, TU Darmstadt, Diss., Dezember 2009. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/40543/>

Lotz u. a. 2010

LOTZ, Peter ; MATYSEK, Marc ; FLITTNER, Klaus ; SCHLAACK, Helmut F: *Modeling of non ideal dielectric elastomer stack actuators*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43749/>. Version: März 2010

Lotz u. a. 2009

LOTZ, Peter ; MATYSEK, Marc ; SCHLAACK, Helmut F: *Peristaltic Pump made of Dielectric Elastomer Actuators*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/45748/>. Version: August 2009 (Smart Structures ? NDE. Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XI. Proceedings of SPIE)

Matysek 2010

MATYSEK, Marc: *Dielektrische Elastomeraktoren in Multilayer-Technologie für textile Displays*. Darmstadt, TU Darmstadt, Diss., Januar 2010. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/40544/>

Matysek u. a. 2010a

MATYSEK, Marc ; LOTZ, Peter ; FLITTNER, Klaus ; SCHLAACK, Helmut F: *High Performance Dielectric Elastomer Stack Actuators: Low Voltage and High Bandwidth*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43753/>. Version: Juni 2010

Matysek u. a. 2010b

MATYSEK, Marc ; LOTZ, Peter ; FLITTNER, Klaus ; SCHLAACK, Helmut F: *Vibrotac-*

tile display for mobile applications based on dielectric elastomer stack actuators. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43750/>. Version: März 2010

Matysek u. a. 2009a

MATYSEK, Marc ; LOTZ, Peter ; SCHLAAK, Helmut F.: *Tactile Display with Dielectric Multilayer Elastomer Actuators*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/45749/>. Version: August 2009 (Smart Structures ? NDE. Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XI. Proceedings of SPIE)

Matysek u. a. 2009b

MATYSEK, Marc ; LOTZ, Peter ; WINTERSTEIN, Thomas ; SCHLAAK, Helmut F.: *Dielectric Elastomer Actuators for Tactile Displays*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/45750/>. Version: März 2009

Meiss u. a. 2009a

MEISS, Thorsten ; BUDELMANN, C. ; KERN, T. A. ; SINDLINGER, Stefan ; MINAMISAVA, C. ; WERTHSCHÜTZKY, Roland: *Intravascular Palpation and Haptic Feedback during Angioplasty*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/45751/>. Version: März 2009

Meiss u. a. 2008

MEISS, Thorsten ; KERN, T. A. ; KLAGES, S. ; MINAMISAVA, C. ; WANG, Y. ; WERTHSCHÜTZKY, Roland: *The Influence of the Packaging on an In-Vivo Micro-Force Sensor*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/35354/>. Version: August 2008

Meiss u. a. 2009b

MEISS, Thorsten ; KERN, T. A. ; SINDLINGER, Stefan ; WERTHSCHÜTZKY, Roland: *HapCath - Highly Miniaturized Piezoresistive Force Sensors for Interior Palpation of Vessels during Angioplasty*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/45808/>. Version: Oktober 2009

Meiss u. a. 2009c

MEISS, Thorsten ; ROSSNER, Tim ; MINAMISAVA, C. ; WERTHSCHÜTZKY, Roland: *Neue Methode zur Kontaktierung isolierter Mikrodrähte*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/45809/>. Version: Oktober 2009

Meiss u. a. 2010

MEISS, Thorsten ; ROSSNER, Tim ; WERTHSCHÜTZKY, Roland: *Verfahren zur*

miniturisierbaren Kontaktierung isolierter und unisolierter Drähte. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46783/>. Version: Juni 2010

Meiss u. Werthschützky 2009

MEISS, Thorsten ; WERTHSCHÜTZKY, Roland: Konstruktion eines Mikrokraftsensors für Herzkatheterisierungen. In: *TM - Technisches Messen*, Nr.6, 2009 76 (2009), Juni, 292–299. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/45810/>

Münchow 2009

MÜNCHOW, Götz: *Two-Phase Electrophoresis of Biomolecules*. Darmstadt, TU Darmstadt, Diss., Juli 2009. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/39209/>

Özver-Krochmann u. Khanh 2009

ÖZVER-KROCHMANN, Z. ; KHANH, Tran Q.: *Measuring systems for spectral radiometric and photometric characterisation of LEDs*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43879/>. Version: August 2009 (Lux-Europa-Konferenz)

Pott u. a. 2010a

POTT, Peter P ; KAMPING, Sandra ; BOMBA, Isabelle C. ; DIESCH, Eugen ; FLOR, Herta ; SCHWARZ, Markus L.: An MR-compatible device for automated and safe application of laser stimuli in experiments employing nociceptive stimulation. In: *Journal of Neuroscience Methods* 186 (2010), Januar, Nr. 1, 1–7. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46545/>

Pott u. Schlaak 2010a

POTT, Peter P ; SCHLAAK, Helmut E: *Hybrid Stepping Actuator with Intrinsic Force-/Torque Measurement*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43754/>. Version: Juni 2010

Pott u. Schlaak 2010b

POTT, Peter P ; SCHLAAK, Helmut E: *Neuartiger Wimperantrieb auf piezoelektrischer Basis*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/45747/>. Version: September 2010

Pott u. Schwarz 2010

POTT, Peter P ; SCHWARZ, M.L.R.: *State of the Art of Medical robotics - Areas of Application*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46546/>. Version: Oktober 2010

Pott u. a. 2010b

POTT, Peter P ; WAGNER, Achim ; BADREDDIN, Essameddin ; WEISER, Hans-Peter ; SCHWARZ, Markus L. R.: Inverse Dynamic Model and a Control Application of a Novel 6-DOF Hybrid Kinematics Manipulator. In: *Journal of Intelligent & Robotic Systems* (2010). <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46717/>

Quednau 2010

QUEDNAU, Sebastian: *Integration und Einsatz metallischer Nanodrahtarrays in Mikrosysteme für die Gasfluss-Sensorik*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/42387/>. Version: Mai 2010. – Fachbereichsbibliothek Nachrichtentechnik (NTB), Bibliotheks-Sigel 17?24

Quednau u. a. 2010

QUEDNAU, Sebastian ; GREINER, PF ; SCHLAAK, Helmut F ; RAUBER, Markus ; ENSINGER, Wolfgang ; NEUMANN, Reinhard: *Integration von Nanodrahtarrays in Mikrosysteme für die Gasflusssensorik*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/42820/>. Version: März 2010

Rafflenbeul u. a. 2010

RAFFLENBEUL, Lutz ; WERTHSCHÜTZKY, Roland ; GAIL, Alexander: *Drahtloses Messsystem zur Erfassung neuronaler Aktivität in der Primatenforschung*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46725/>. Version: September 2010

Rafflenbeul u. a. 2009

RAFFLENBEUL, Lutz ; WERTHSCHÜTZKY, Roland ; HÖHL, Dirk ; THOMAS, Sascha ; REIN, Stefan ; GAIL, Alexander: *Wireless raw data acquisition system of neuronal activities of freely moving animals*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46726/>. Version: März 2009 (Proceedings Eighth Göttingen Meeting of the German Neuroscience Society)

Rausch u. a. 2009

RAUSCH, Jacqueline ; HEINICKEL, Patrick ; WERTHSCHÜTZKY, Roland ; KOEGEL, B. ; ZOGAL, Karolina ; MEISSNER, Peter: *Experimental Comparison of Piezoresistive MEMS and Fiber Bragg Grating Strain Sensors*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/45811/>. Version: 2009

Rausch u. Werthschützky 2009

RAUSCH, Jacqueline ; WERTHSCHÜTZKY, Roland: *A Miniaturised Piezoresisti-*

ve Multi-Component Force Sensor for Minimally Invasive Surgery. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/45812/>. Version: Mai 2009

Rausch u. Werthschützky 2010

RAUSCH, Jacqueline ; WERTHSCHÜTZKY, Roland: *Design und Test miniaturisierter, piezoresistiver Silizium-Dehnmesselemente.* <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46691/>. Version: September 2010

Röse u. a. 2009

RÖSE, Andreas ; WOHLLEBER, C. ; SCHLAAK, Helmut F. ; WERTHSCHÜTZKY, Roland: *A Novel Piezoelectric Driven Laparoscopic Instrument with Multiple Degree of Freedom Parallel Kinematic Structure.* <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/45813/>. Version: Oktober 2009

Salun u. a. 2010

SALUN, L. ; GRIESHEIMER, S. ; GÖTZ, P. ; IBIS, M. ; RAUSCH, Jacqueline: *Mechanical and electrical stability of printed layers against mechanical deformation.* <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43276/>. Version: 2010

Schiller u. a. 2009a

SCHILLER, Christoph ; HAFERKEMPER, Nils ; KHANH, Tran Q.: *Discomfort Glare ? Impact of headlamp optics, spectrum of adaptation and SPD.* <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43880/>. Version: August 2009 (ISAL 2009 Proceedings)

Schiller u. a. 2010a

SCHILLER, Christoph ; KUHN, T. ; BÖLL, Marvin ; BODROGI, Peter ; KHANH, Tran Q.: *LED street lights for a medium-size town in germany - energy saving potential, lighting quality and user acceptance.* <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46508/>. Version: 2010

Schiller u. a. 2010b

SCHILLER, Christoph ; KUHN, T. ; BÖLL, Marvin ; BODROGI, Peter ; KHANH, Tran Q.: *LED STREET LIGHTS FOR A MEDIUM?SIZE TOWN IN GERMANY ? ENERGY SAVING POTENTIAL, LIGHTING QUALITY AND USER ACCEPTANCE.* <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46570/>. Version: 2010

Schiller u. a. 2009b

SCHILLER, Christoph ; KUHN, T. ; BÖLL, Marvin ; KHANH, Tran Q.: *Straßen-*

beleuchtung mit LEDs und konventionellen Lichtquellen im Vergleich ? Eine licht- und wahrnehmungstechnische Analyse aus einer wissenschaftlich begleiteten Teststraße in Darmstadt. In: *Licht* 2009 (2009), Nr. 10. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46590/>

Schiller u. a. 2009c

SCHILLER, Christoph ; SPRUTE, J. H. ; HAFERKEMPER, Nils ; BODROGI, Peter ; KHANH, Tran Q.: *Psychologische Blendung bei Halogen- und Xenonscheinwerfern*. In: *Automobiltechnische Zeitschrift : ATZ* (2009), August, Nr. Nr. 2. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/35457/>

Schiller u. a. 2009d

SCHILLER, Christoph ; SPRUTE, J. H. ; HAFERKEMPER, Nils ; BODROGI, Peter ; KHANH, Tran Q.: *Psychologische Blendung bei Halogen- und Xenonscheinwerfern*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43887/>. Version: August 2009 (ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift Nr. 2)

Schlaak u. Greiner 2009

SCHLAAK, Helmut F. ; GREINER, R.F.: *Mikro-Integration ? Neue Funktionen für Mikrosysteme durch Nanotechnologie*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/45814/>. Version: Oktober 2009

Schlosser u. a. 2010a

SCHLOSSER, Michael ; STAAB, Matthias ; SCHLAAK, Helmut F.: *Nasschemisches Entfernen dicker SU-8-Schichten aus galvanisch abgeschiedenen Strukturen*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/45427/>. Version: Mai 2010

Schlosser u. a. 2010b

SCHLOSSER, Michael ; WINTERSTEIN, Thomas ; SCHLAAK, Helmut F.: *Electrostatic Moving Wedge Actuator Made of Electroplated Nickel*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/45428/>. Version: Juni 2010

Schuster u. a. 2009

SCHUSTER, G. ; STÖHR, Ingmar ; WERTHSCHÜTZKY, Roland ; KOPP, S.: *Erfassung des Zungendrucks beim Sprechen mit miniaturisierten Drucksensoren*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43881/>. Version: September 2009

Sprute u. a. 2010a

SPRUTE, J. H. ; HAFERKEMPER, Nils ; KHANH, Tran Q.: *Fernlichtnutzung:*

Fehlbedienung und Risikokompensation durch Autofahrer ? Potenziale für Fernlichtassistenzsysteme. In: *VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* 2010 (2010), Nr. 2. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46578/>

Sprute u. a. 2010b

SPRUTE, J. H. ; HAFERKEMPER, Nils ; SCHILLER, Christoph ; KHANH, Tran Q.: *Implications of Adaptive High Beam Headlighting Systems for Discomfort and Disability Glare*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46592/>. Version: November 2010

Sprute u. a. 2009

SPRUTE, J. H. ; SÖLLNER, S. ; HAFERKEMPER, Nils ; SCHILLER, Christoph ; ZYDEK, B. ; KHANH, Tran Q.: *Investigations on Glare Impact at Long Distances*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43882/>. Version: August 2009 (ISAL 2009 Proceedings)

Staab u. a. 2009

STAAB, Matthias ; DASSINGER, F. ; SCHLOSSER, Michael ; SCHLAAK, Helmut F.: *Magnetisch bistabiles Mikroaktorsystem mit elektrothermischem Antrieb*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/45815/>. Version: Oktober 2009

Staab u. Schlaak 2010a

STAAB, Matthias ; SCHLAAK, Helmut F.: *Indirectly Heated Electrothermal Actuator for a Magnetostatic Bistable Micro Actuator System*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/45744/>. Version: Juni 2010

Staab u. Schlaak 2010b

STAAB, Matthias ; SCHLAAK, Helmut F.: *Integration von feinmechanischen Verfahren in die Mikrotechnik zur kostengünstigen Herstellung von magnetischen Mikro-systemarrays*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/45746/>. Version: Mai 2010

Stöhr u. a. 2009a

STÖHR, Ingmar ; MADERSCHIED, M. ; WERTSCHÜTZKY, Roland: *Neuartiges polymerbasiertes Packaging von Silizium-Druckmesselementen zum Einsatz in der Kieferorthopädie*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/45816/>. Version: Dezember 2009

Stöhr u. a. 2010a

STÖHR, Ingmar ; MANDERSCHIED, Moritz ; SCHLEUSSNER, Alexander ; SCHUSTER, Gabriele ; WERTHSCHÜTZKY, Roland: *System zur Erfassung des Zungendrucks mittels piezoresistiver Silizium-Drucksensoren*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46269/>. Version: Oktober 2010

Stöhr u. a. 2009b

STÖHR, Ingmar ; SCHUSTER, G. ; WERTHSCHÜTZKY, Roland ; KOPP, S.: *Telemetrisches Messsystem für die Erfassung der Zungenfunktion und des Zungendrucks*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43883/>. Version: September 2009 (82. Jahrestagung der DGKFO)

Stöhr u. a. 2010b

STÖHR, Ingmar ; SCHUSTER, Gabriele ; WERTHSCHÜTZKY, Roland: *System zur Erfassung des Drucks der Zunge gegen den harten Gaumen*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46270/>. Version: September 2010

Stöhr u. a. 2010c

STÖHR, Ingmar ; SCHUSTER, Gabriele ; WERTHSCHÜTZKY, Roland ; KOPP, Stefan ; HASELHUHN, Klaus: *Messung von Kräften und Drücken im Mundraum - Eine Übersicht bisheriger Techniken und neue Ansätze*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46714/>. Version: November 2010

Szabó u. a. 2009a

SZABÓ, F. ; BODROGI, Peter ; SCHANDA, J.: *A colour harmony rendering index based on predictions of colour harmony impression*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43884/>. Version: August 2009 (Lighting Research and Technology)

Szabó u. a. 2009b

SZABÓ, F. ; BODROGI, Peter ; SCHANDA, J.: *Experimental Modeling of Colour Harmony*. In: *Color Research and Application 2009* (2009). <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46654/>

Szabó u. a. 2009c

SZABÓ, F. ; SCHANDA, J. ; BODROGI, Peter: *A Colour Harmony Rendering Index based on New Colour Harmony Formulae*. In: *Lighting Research and Technology 2009* (2009). <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46655/>

Szabó u. a. 2009d

SZABÓ, F. ; SCHANDA, J. ; BODROGI, Peter: Modelling of Colour Harmony. In: *Color Research and Application* 2009 (2009). <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46653/>

Vas u. a. 2010a

VAS, Z. ; SCHANDA, J. ; BODROGI, Peter ; VARADY, Geza: *NON-ADDITIVITY ERRORS IN MESOPIC PHOTOMETRY*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46658/>. Version: 2010

Vas u. a. 2009

VAS, Z. ; SCHANDA, J. ; VARADY, Geza ; BODROGI, Peter: *Non-additivity errors in mesopic photometry*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46652/>. Version: 2009

Vas u. a. 2010b

VAS, Z. ; SCHANDA, J. ; VARADY, Geza ; BODROGI, Peter: THE NON-ADDITIVITY PHENOMENON IN MESOPIC PHOTOMETRY. In: *Svetotechnika* 2010 (2010). <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46659/>

Wehrheim u. a. 2010

WEHRHEIM, F. ; MEYER, J. ; SCHLAAK, Helmut F: *Dielectric elastomer bending tube actuators with rigid electrode structures*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/43751/>. Version: März 2010

Werner u. Werthschützky 2009a

WERNER, Reinhard ; WERTSCHÜTZKY, Roland: *Entwicklung eines Sensorsystems für rotodynamische Pumpen*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/45817/>. Version: 2009

Werner u. Werthschützky 2009b

WERNER, Reinhard ; WERTSCHÜTZKY, Roland: *Flow Rate Detection as an Example of Analytic Redundancy*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/45818/>. Version: 2009

Werner u. Werthschützky 2009c

WERNER, Reinhard ; WERTSCHÜTZKY, Roland: *Intensity determination of cavitation at rotating pumps by means of integrated miniaturised pressure transducers*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/45819/>. Version: Mai 2009

Werthschützky u. Werner 2009

WERTSCHÜTZKY, Roland ; WERNER, Reinhard: *Sensor Self-Monitoring and Fault-Tolerance*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/45820/>. Version: 2009

yazhu u. a. 2009

YAZHU, L. ; BODROGI, Peter ; KHANH, Tran Q.: *Implications of human colour constancy for the lighting industry*. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/46650/>. Version: 2009



8 Mitarbeit in Gremien

8.1 Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh

- Member of the CIE TC 2-40: Characterizing the Performance of Illuminance and Luminance Meters
- DIN Normungsinstitut FNF Beiratsmitglied (Periode 2009-2011)
- Beiratsmitglied LitG Hessen (Lichttechnische Gesellschaft Deutschlands)
- DIN Normungsinstitut FNL 3-Mitglied (Periode 2009-2011)
- Mitglied des Technisch-Wissenschaftlichen Ausschusses der Lichttechnischen Gesellschaft Deutschland

8.2 Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak

- Vorstandsvorsitzender vom mst-Netzwerk Rhein-Main e. V. - Kompetenznetzwerk Mikrosystemtechnik Rhein-Main
- Vorstandsmitglied in der VDE/VDI-Gesellschaft für Mikroelektronik, Mikrosystem- und Feinwerktechnik (GMM)
- Weitere Funktionen in der GMM:
 - Mitglied des Beirats der GMM
 - Stellv. Leiter des Fachbereichs 4 „Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie“ der GMM
 - Leiter des Fachausschusses 4.8 der GMM „Werkstoffe und Fertigungsverfahren“ in der Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie
 - Mitglied in den Fachausschüssen 4.4 „Mikroaktoren“, 4.7 „Mikro-Nano-Integration“ und 3.3 „Elektrische Geräte- und Stellantriebe“ der GMM
 - Mitglied im Arbeitskreis „Hochschulprofessoren der Mikro- und Feinwerktechnik“
- Member of IEEE, Member of Photonics, CPMT and ED Societies

-
- Mitglied in OPTENCE e. V., Kompetenznetz Optische Technologien Hessen/Rheinland-Pfalz
 - Akademische Selbstverwaltung der TU Darmstadt
 - Dekan des Fachbereichs etit (seit Okt. 2008, Wiederwahl Okt. 2010)

8.3 Prof. Dr.-Ing. habil. Roland Werthschützky

- Vorsitzender des Wissenschaftsrates des AMA-Fachverbandes für Sensorik e. V. bis 2009
- Mitglied des Vorstandes des AMA-Fachverbandes für Sensorik bis 2009
- Mitglied des Wissenschaftlichen Beirates des CiS-Instituts für Mikrosensorik in Erfurt
- Mitglied des VDE-Ausschusses Ingenieurausbildung
- Mitglied im Arbeitskreis Hochschulprofessoren der Mikro- und Feinwerktechnik
- Mitglied im Arbeitskreis der Hochschullehrer für Messtechnik (AHMT)
- Wissenschaftlicher Leiter der internationalen Konferenz „SENSOR'09“, 26. 05. 2009 bis 28. 05. 2009 in Nürnberg

9 Wissenschaftlicher Austausch

9.1 Weiterbildungsseminar piezoresistive Silizium-Sensoren

Das Fachgebiet Mess- und Sensortechnik bietet mit Unterstützung der AMA Weiterbildungs-GmbH das Weiterbildungsseminar zu piezoresistiven Silizium-Sensoren seit 2009 jährlich an. Das Seminar gibt eine Einführung und Übersicht zu den Entwurfgrundlagen und Anwendungen von piezoresistiven Silizium-Sensorelementen zur Erfassung mechanischer Größen (Abbildung 9.1). Es stellt die wichtigsten Technologien der Sensorfertigung und der typischen Sensorelektronik dar und gibt einen Ausblick auf zukünftige Anwendungen.

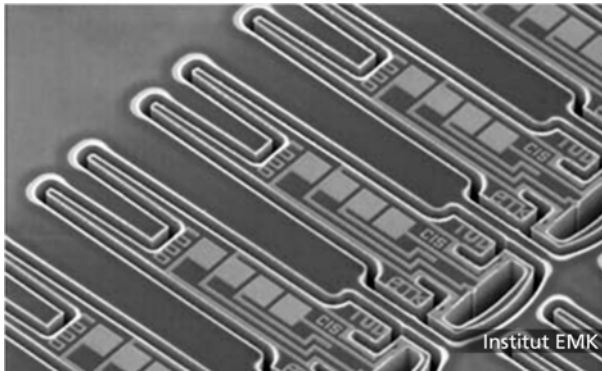


Abbildung 9.1: Silizium-Mikro-Kraftsensor

Das Seminar zeigt zunächst die historische Entwicklung dieser Technik auf. Die Entwurfgrundlagen werden anschließend überblicksmäßig in phänomenologischer Form vorgestellt. Es wird aufgezeigt, welche Größen bei der Entwicklung selektiv empfindlicher und langzeitstabiler Sensorelemente vor allem zu berücksichtigen sind. Der Teil Grundlagen wird abgerundet durch das Vorstellen moderner Verfahren der Signalverarbeitung. Der zweite Teil des Seminars widmet sich den Anwendungen. Zunächst werden moderne Beispiele aus den Gebieten der Medizintechnik, des

Maschinenbaus, der Kfz-Technik und der Prozessmesstechnik vorgestellt. Abschließend erfolgt ein Ausblick auf neuartige Anwendungen bei Dehnmesselementen für die Adaptronik, Höchstdrucksensoren und Feuchtesensoren sowie in der Gassenso-rik. Der nächste Seminartermin findet am 21. Juni 2011 statt.

9.2 Weiterbildungsseminare am Fachgebiet Lichttechnik

Das Fachgebiet Lichttechnik bietet in regelmäßigen Abständen mehrere über zwei bis drei Tage dauernde Weiterbildungsseminare zu verschiedenen Themen an. Die Seminare wenden sich dabei an die Ingenieure, Lichtplaner, Architekten aus der Industrie und Behörden, sowie an Medienschaffende, Arbeitswissenschaftler und sonstige an den aktuellen Themen interessierte Personen.

Die Teilnehmerzahl wird meistens auf 20 bis 30 Personen begrenzt, um den persönlichen Kontakt zu den Teilnehmern nicht zu verlieren. Da bei manchen Seminaren die Nachfrage deutlich höher ist, werden die jeweiligen Seminare mehrmals im Jahr angeboten.

In den letzten Jahren wurden folgende Themen angeboten:

- Das Seminar „Grundlagen der Lichttechnik“ beschäftigt sich mit dem Bau und Wirkungsweise des menschlichen Auges, der Physiologie des Sehens sowie den Größen und Einheiten der Lichttechnik und deren Messung.
- Das Aufbauseminar „LED-Technik, Anwendung, praktische Experimente“ behandelt die Lichterzeugung mit lichtemittierenden Dioden. Im Laufe des Seminars werden dann die speziellen Anforderungen an die Messtechnik, das thermische Verhalten der LEDs, die Schaltungstechnik und die Optiken für die LEDs erläutert und in praktischen Übungen im lichttechnischen Labor vertieft.
- „Einführung in die Verkehrs- und Kfz-Lichttechnik“ gibt den Teilnehmern einen Überblick über die lichttechnischen Einrichtungen an Kraftfahrzeugen und die verwendeten Lichtquellen. Es werden auch ausführlich die gültigen Normen und Regelungen behandelt.
- Während des Seminars „UV-Technik: Grundlagen, Technologien und Messtechnik“ werden die Eigenschaften der ultravioletten Strahlung und deren Wirkung auf die lebende Materie behandelt. Die Teilnehmer lernen auch, wie die UV-Strahlung erzeugt und gemessen werden kann.
- Die „Displaytechnik“ beschäftigt sich mit unterschiedlichen Monitor- und Projektortechnologien, der Vermessung und Charakterisierung der Geräte sowie

spezielle Anforderungen an Einsatzbereiche. Um den Kenntnisstand der Teilnehmer anzugleichen wird eine Einführung in die Wahrnehmung und Grundlagen zu Farben durchgeführt.

Ein besonderes Augenmerk wird auf die praxisnahe Orientierung der Veranstaltungen gelegt, schließlich sollen die Teilnehmer das erworbene Wissen direkt in ihren Betrieben anwenden können. Aus diesem Grund finden auch praktische Übungen und Vorführungen in unserem Labor statt. Dadurch wird eine ausgewogene Kombination aus Theorie und Praxis geschaffen, was bei den Teilnehmern sehr gut ankommt.

Die Abende zwischen den einzelnen Seminartagen werden dazu genutzt, einander in einer gemütlichen Atmosphäre in einem der vielen Darmstädter Lokale kennenzulernen, neue Kontakte zu knüpfen und verschiedene Themen zu reden.

9.3 mst-Netzwerk Rhein-Main e. V.

Dem 2004 gegründeten Kompetenznetzwerk Mikrosystemtechnik - mst-Netzwerk Rhein-Main e. V. - gehören inzwischen etwa 40 Unternehmen und wissenschaftliche Institutionen aus dem ganzen Rhein-Main-Gebiet an. In sechs Arbeitsgruppen des Netzwerks findet ein intensiver Erfahrungsaustausch über technologische Fragestellungen statt. 2007 wurde das noch junge Netzwerk in die Bundesinitiative Kompetenznetze Deutschland aufgenommen, was als eine besondere Auszeichnung gilt. Ferner ist eine Vielzahl von konkreten Forschungskooperationen innerhalb des Netzwerks entstanden und es wurden über 1,5 Mio. € an Fördermitteln in die Region eingeworben.

Darüber hinaus hat das Netzwerk diverse Projekte durchgeführt und Dank der Förderung durch die Hessen-Agentur die Geschäftsführung und das Netzwerkmanagement ausweiten können. Zum Thema „Mikro-Nano-Integration“ ist eine Studie in der Reihe Hessen-Nanotech ausgearbeitet worden.

Besondere Höhepunkte der Netzwerkarbeit bilden die Jahrestagungen, die einem besonderen Schwerpunktthema gewidmet sind und unter hochrangiger politischer Beteiligung stattfinden.

**Jahrestagung „Mikrosystemtechnik für energieeffiziente Systeme“
am 2. Juli 2009 an der Justus-Liebig-Universität Gießen**

Eine erfolgreiche Jahrestagung hat das mst-Netzwerk Rhein-Main e. V. am 2. Juli 2009 in der Aula der Justus-Liebig-Universität Gießen abgehalten. Dazu haben 7

Experten aus Industrie und Hochschule ihre Erfahrungen in Vorträgen den über 100 Besuchern übermittelt. Das Thema Energieeffizienz ist heute aktuell, wobei es einerseits um die Einsparung von Energie als auch um den effizienten Einsatz von Energie geht. Dass dabei Komponenten der Mikrosystemtechnik eine tragende Rolle spielen, ist bisher wenig bekannt, zumal das Thema Energie stets an große Anlagen denken lässt.

Die Jahrestagung des mst-Netzwerks Rhein-Main e. V. griff deshalb das Thema energieeffiziente Systeme auf. Dabei spielen die Chancen von mikrosystemtechnischen Lösungen in energieeffizienten Systemen eine Rolle, und wir zeigten innovative Produkten und aktuelle Forschungs- und Entwicklungsarbeiten vor, die weitere interessante Produkte und Systeme erwarten lassen.

Mit einem Übersichtsvortrag „Prometheus entfesselt - Mikroenergie-technik für verteilte eingebettete Systeme“ startete Prof. Peter Woias vom Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK) an der Universität Freiburg. Er zeigte für die Vision von energieautonomen Systemen Lösungsmöglichkeiten, Stand der Technik und Forschungsfelder auf, sowie innovative Anwendungsmöglichkeiten. Thematisch hat sich der Beitrag von Burkhard Habbe Geschäftsführer der erst 2006 gegründeten jungen Firma Micropelt GmbH in Freiburg über „Thermoharvesting - eine dauerhafte thermische Energieversorgung für drahtlose Systeme“ angeschlossen. Mit Mikrosystemtechnik sind hochwertige Thermogeneratoren verfügbar, die oftmals mehr Energie erzeugen können als Batterien, sofern ein Temperaturgefälle von 3 - 10 ° oder mehr verfügbar ist.

Mikrosystemtechnik-Komponenten mit großem Anwendungspotential in der Energieeffizienz-Frage stellte Dr. Jörg Schieferdecker, Geschäftsführer der Heimann Sensor GmbH in Eltville vor. Er zeigte Entwicklungen von neuesten Thermopile-Einzelsensoren und Sensor-Arrays, etwa Thermopile-Zeilen mit bis zu 16 Einzel-elementen, sowie monolithische Matrixarrays mit bis zu 32 x 32 Einzelelementen. Die Anwendungsfelder liegen im Bereich thermische Bildaufnahme und Infrarot-Gasanalyse, etwa für Komfortüberwachung und Energieeinsparung in Haushalt und Maschinenbau, bei der Brandvorsorge und -überwachung, für Gebäudethermographie und Sicherheitstechnik.

Auch „Magnetoresistive Sensoren helfen Energie zu sparen“, wie Dr. Rolf Slatter als Geschäftsführer der Sensitec GmbH in Lahnau berichtete. Er hat sich auf die Anwendung von den neuen DS4000 Stromsensoren mittels magnetoresistiven Stromsensoren konzentriert. Damit können hohe Nennströme, bis 150 A mit Genauigkeiten besser 1 % schnell (mit einer Dynamik besser als 1 μ s) bestimmt werden.

Auch die Justus-Liebig-Universität Gießen engagiert sich in diesem Bereich. Hier stellte Prof. Martin Eickhoff vom 1. Physikalischen Institut das im Frühjahr 2009

neu etablierte „LaMa - Laboratorium für Materialforschung“ als interdisziplinäre Einrichtung der Universität vor. Die Fähigkeiten von 11 Arbeitgruppen der Physik, insbesondere im Bereich Mikro- und Nanostrukturierung und der Chemie im Bereich Elektrochemie und Grenzflächenforschung wurden zusammengeführt und stehen gemeinsam für Forschung, Lehre, Fort- und Weiterbildung und für Dienstleistungen zur Verfügung.

Jahrestagung „Mikrosystemtechnik für Anwendungen im Automobil“ am 30. Juni 2010 in der IHK Darmstadt

Am 30. Juni traf sich das mst-Netzwerk Rhein-Main e. V. zu seiner 7. Jahrestagung. Schwerpunkt der diesjährigen Veranstaltung war die Mikrosystemtechnik für Anwendungen im Automobil. Das Thema stieß auf reges Interesse der rund 100 Teilnehmer, die hoch motiviert den Vorträgen der 6 Referenten aus Industrie und Hochschulen folgten und sich bis zum Ende an den Diskussionen beteiligten. Gut wurde auch die begleitende Ausstellung besucht.

Nach Eröffnung der Veranstaltung durch den Vorsitzenden des mst-Netzwerkes, Professor Dr. Helmut F. Schlaak, bescheinigte Jürgen Illing, Geschäftsführer der HA Hessen Agentur GmbH, dem mst-Netzwerk in seinem Grußwort, dass es mittlerweile zu den leistungsfähigsten Plattformen und Katalysatoren für die gemeinsame Technologieentwicklung zwischen Wissenschaft und Wirtschaft in Hessen zähle.

Danach schloss sich der Eröffnungsvortrag von Dr. Jiri Marek, Robert Bosch GmbH, an. Jeri Marek, Zukunftspreisträger des Bundespräsidenten 2008, stellte in den Mittelpunkt seines Vortrages die smarten Sensoren, die in vielfältigem Einsatz die Automobil- und Konsumelektronik erobert haben. In Zahlen heißt dies: 78 % aller Autos nutzen MEMS-Drucksensoren für das Motormanagement, 90 % aller Autos nutzen MEMS-Beschleunigungssensoren in den Airbags, 28 % aller neuen Mobiltelefone nutzen MEMS-Beschleunigungssensoren und 25 % aller neuen Digitalkameras nutzen MEMS-Kreiselsensoren. Am Ende seines Vortrages gab Marek noch einen kurzen Ausblick auf zukünftige Einsatzgebiete von MEMS-Sensoren wie z. B. „MEMS autofocus“ in Mobilfunkkameras, „Energy harvester“, Mikrobrennstoffzellen oder „Micromirror“ für portable Projektoren.

Nach diesem überaus ansprechenden Vortrag zum Einsatz smarter Sensoren in der Automobil- und Konsumelektronik stellte Prof. Dr. Friedemann Völklein in seiner Laudatio den ersten Preisträger des mst-Förderpreises Mikrosystemtechnik 2010 vor. Matthias Schmitt erhielt den mit 1000,- € dotierten Preis aus den Händen von Prof. Helmut F. Schlaak und Prof. Friedemann Völklein für seine hervorragende Masterarbeit auf dem Gebiet der „Chipkonstruktion zur Messung der Seebeck-Spannung

an Nanodrähten“, die er im Rahmen des Masterstudiengangs Angewandte Physik an der Hochschule RheinMain anfertigte.



Abbildung 9.2: Förderpreis Mikrosystemtechnik: Preisübergabe (von links) Prof. Schlaak, Matthias Schmitt, Prof. Völklein

Im zweiten Teil der Veranstaltung folgten Vorträge der Sensitec GmbH und der Continental AG. Während Dr. Rolf Slatter, Sensitec GmbH, in seinem Vortrag „Neuartige MR-Sensoren für Anwendungen im Automobil“ auf die technische Betrachtung der Sensoren einging, konzentrierte sich Dr. Bernd Piller, Continental AG, mehr auf die Anwendungsmöglichkeiten. So stellte er am Beispiel ContiGuard das Zusammenspiel vieler Sensoren in aktiven und passiven Sicherheitssystemen zur Optimierung der Fahrsicherheit im Auto vor.

Im nachfolgenden Vortrag von Günther Battenberg, Battenberg Robotics GmbH & Co. KG, wurden die Sensoren nicht im automobilen Einsatz, sondern zur Erhöhung der Werthaltigkeit von Fahrzeugen gezeigt. Battenberg stellte in seiner Präsentation den Einsatz von Sensoren für eine wahrnehmungsbasierte Qualitätsbewertung im Automobil vor, mit deren Hilfe beispielsweise die Haptik von Oberflächen bewertet werden kann. Und auch Dr. Helge Schmidt, Tyco Electronics AMP GmbH, näherte sich dem Thema Mikrosystemtechnik im Automobil aus einer neuen Perspektive. In seinem Vortrag „Nanotechnologien für Steckverbinderkontakte“ griff er die Bedeutung von Werkstoffen und Materialeigenschaften für die Mikrosystemtechnik auf. Durch den Einsatz der Nanotechnologie lässt sich an Kontakten beispielsweise eine gute elektrische Leitfähigkeit mit hoher mechanischer Festigkeit kombinieren. Dies erhöht die Verschleißfestigkeit und reduziert gleichzeitig die Kontaktwiderstände.

Nimmt man die Inhalte der Vorträge zusammen, kann man die Mikrosystemtechnik als Plattform für viele Funktionen im Auto bezeichnen. Eine gute Ergänzung von Technology Push und Market Pull wirkt als stetiger Antreiber von Entwicklungen in den Bereichen Sicherheit, Komfort, Umwelt, Motor und Abgas und Energieeffizienz.

Informationen zu den laufenden Arbeiten sowie Anträge auf Mitgliedschaft, die Satzung und Beitragsordnung sind auf der Homepage des Netzwerks <http://www.mst-rhein-main.de> zu finden.

9.4 GMM-Workshop „Technologien und Werkstoffe der Mikrosystem- und Nanotechnik“, 10.-11. Mai 2010, Darmstadt

Die VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikrosystem- und Feinwerktechnik (GMM) hatte unter der wissenschaftlichen Leitung von Prof. Schlaak zum Thema „Technologien und Werkstoffe der Mikrosystem- und Nanotechnik“ führende Experten nach Darmstadt eingeladen. Die Bedeutung des Themas spiegelte sich in der hohen Resonanz wieder. Mit insgesamt 26 Vorträgen und diversen Postern wurde der zweite Workshop dieser Art von über 60 Teilnehmern übereinstimmend als erfolgreich bewertet. Diesmal wurden alle Poster in Kurzpräsentationen im Plenum vorgestellt und anschließend ausführlich diskutiert.



Abbildung 9.3: GMM-Workshop 2010 „Technologien und Werkstoffe der Mikrosystem- und Nanotechnik“

„Neben der Siliziumtechnik sind im letzten Jahrzehnt diverse Materialsysteme wie Metalle, Keramiken, Gläser und Kunststoff mit ihren Fertigungsverfahren in den

Vordergrund getreten“, erläutert Prof. Schlaak, Wissenschaftlicher Leiter des Workshops. Im diesjährigen Workshop standen die dreidimensionalen Strukturierungsverfahren im Vordergrund. Große Fortschritte in den Spritzgieß- und Heißprägeverfahren, aber auch die Weiterentwicklung klassischer Formgebungsverfahren hätten die Miniaturisierung vorangetrieben, ergänzt Schlaak. Somit habe sich das Feld der Materialsysteme und Fertigungstechnologien in der Mikrosystemtechnik stark erweitert, so dass es für fast alle Anforderungen zugeschnittene Lösungen gebe.

10 Besondere Ereignisse

10.1 Festkolloquium aus Anlass der 80. Geburtstage der Professoren Buschmann und Cramer

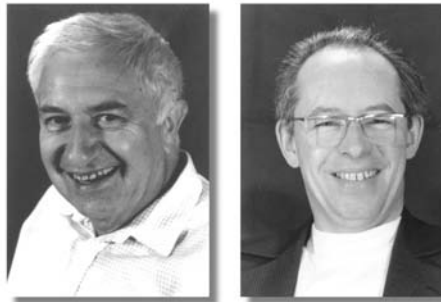


Abbildung 10.1: Die Professores B. Cramer und H. Buschmann

Am Nachmittag des 8. Oktobers 2010 fand am Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik ein Festkolloquium aus Anlass der 80. Geburtstage von Prof. Dr.-Ing. Heinrich Buschmann und Prof. Dr.-Ing. Bernhard Cramer statt. Beide Professoren prägten in den 1970er und 1980er Jahren ganz wesentlich das Profil von EMK in Lehre und Forschung. Aus Anlass ihres Jubiläums würdigte mit diesem Festkolloquium das Institut EMK und der Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der TU Darmstadt das langjährige Wirken der beiden Jubilare.

Das Kolloquium war mit mehr als 100 Gästen sehr gut besucht. Nach der Begrüßung durch den Vizepräsidenten, Herrn Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl, würdigte der Dekan des Fachbereiches, Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak, das erfolgreiche Wirken beider Jubilare bei der Entwicklung des Institutes EMK. Anschließend folgten drei Vorträge von ehemaligen Doktoranden. Dr.-Ing. Teddy Woll von der Daimler AG gab einen Einblick in die Bedeutung des Luftwiderstandes bei der PKW-Entwicklung. Anschließend beantwortete Herr Dr.-Ing. Ralf E. Löser die Fragestellung „Wie kommt

ein EMK 'ler zum Gewerblichen Rechtsschutz?“. Den Abschluss des Blockes der ehemaligen Schüler bildete der Beitrag von Dr.-Ing. Gert Fuhrmann zur besonderen industriellen Bedeutung des methodischen Entwickelns als eine Kernkompetenz von EMK.

Nach der Kaffeepause folgten drei Beiträge aus den aktuellen Forschungsarbeiten der drei EMK-Fachgebiete. Herr Dr.-Ing. Peter Lotz gab in seinem Beitrag einen Überblick zum Stand der Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Dielektrischen Elastomeraktoren. Herr Dipl.-Ing. Sebastian Kassner stellte haptische Assistenzsysteme für minimal-invasive Interventionen vor und Herr Dipl.-Ing. Thomas Kuhn gab einen Einblick in Messergebnisse und Akzeptanztests der ersten deutschen flächendeckenden LED-Straßenbeleuchtung in Lippstadt. Alle sechs Vorträge sind in der Festschrift des Institutes zusammengefasst.

Das Kolloquium endete mit den Rückblicken der Jubilare auf ihr so erfolgreiches Ingenieursleben. Die zahlreichen Erfahrungen und Tipps sind sicher nicht nur für die Jüngeren wertvolle Anregungen.

Anschließend wurde durch die Kolloquiumsteilnehmer die Möglichkeit eines ausführlichen Rundganges durch die Forschungslabors von EMK intensiv genutzt. Der für die Jubilare sicher freudige und für das Institut so erfolgreiche Tag klang mit einem gemütlichen Zusammensein im Traditionsraum des Instituts aus.

10.2 DFB 2010 - Darmstädter Fachtagung für Beleuchtung

Das Fachgebiet Lichttechnik beschäftigt sich bereits seit vielen Jahren mit den Fragestellungen rund um das Thema Straßenbeleuchtung in Forschung und Praxis. Seit 2008 wurden Testanlagen mit LED-Leuchten in Darmstadt und anderen Kommunen erprobt und wissenschaftlich betreut. Die Ergebnisse fließen dabei in die aktuellen Veröffentlichungen ein ([Khanh u. a. 2009b], [Khanh u. a. 2009c], [Khanh u. a. 2010e]).

Um den Austausch zwischen Kommunen und Energieversorgern als Betreiber der Straßenbeleuchtung, aber auch Herstellern, Lichtplanern und Prüflaboren zu verstärken, wurde vom 20. - 22. September 2010 von der Lichttechnik erstmalig die Tagung „Darmstädter Fachtagung für Beleuchtung“ in Darmstadt organisiert. Das Schwerpunktthema der Fachtagung lautete „Potentiale der LED-Straßenbeleuchtung“. Als Tagungsort wurde das Wissenschafts- und Kongresszentrum „darmstadtium“ gewählt.

Obwohl die Fachtagung erstmalig durchgeführt wurde, war die Resonanz mit mehr als 200 Teilnehmern sehr groß. 56 % der Teilnehmer kamen aus Unternehmen, 24%

von Straßenbeleuchtungsbetreibern und 10% aus Kommunen. Aus 39 eingereichten Kurzfassungen wurden von der 7 köpfigen Tagungsleitung 18 Vorträge für die Tagung ausgewählt. Inhaltlich deckten die Vorträge die folgenden Schwerpunkte ab:

- Lichtplanung und Lichtgestaltung
- Entwicklung von LED-Leuchten
- Parameter aktuelle LED-Leuchten
- Richtlinien und Leuchtenprüfung
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen
- Lichtwahrnehmung
- Vergleich zwischen LED und konventioneller Technik
- Erfahrungsberichte aus der Praxis

Die Fachtage wurden von einer Ausstellung begleitet. 13 Aussteller präsentierten die gesamte Wertschöpfungskette einer LED-Leuchte, angefangen von der Lichtplanung und den neusten LEDs bis hin zur fertigen LED-Leuchte.



Abbildung 10.2: Begrüßungsvortrag von Professor Khanh

10.3 ISAL 2009

Das achte International Symposium on Automotive Lighting war trotz des weltweiten Absatzeinbruches auf dem Automobilmarkt ein voller Erfolg. Mehr als 450 Teilnehmer nahmen an der alle zwei Jahre stattfindenden Tagung im Darmstadtium teil. Mit 65 Vorträgen, 30 Postern und 31 schriftlichen Beiträgen war die ISAL auch im Jahr 2009 die wissenschaftliche Tagung für den Austausch über Forschungsergebnisse und Ideen für die Zukunft der Automobilbeleuchtung. Die wichtigsten Themen in jenem Jahr waren:

- Energieeffizienz in der Automobilbeleuchtung
- Messung von Scheinwerfern, mesopische Lichtwahrnehmung und Physiologie des Wahrnehmungsapparates
- LED-Technologien für die Frontbeleuchtung
- Fahrerassistenzsysteme, Integration ins Fahrzeug
- Adaptive Frontbeleuchtung

Das Symposium wurde komplettiert von 30 Ausstellern, die neueste Messtechnik, Scheinwerfer, Simulationssoftware, Leuchtentechnik und anderes zeigten. Der Call-for-Papers für die ISAL 2011 ist bereits verteilt und die durchweg positive Resonanz auf die Veranstaltungsreihe PAL/ISAL lässt hoffen, dass sie noch viele Jahre die automobilen Beleuchtung prägen wird.

10.4 Blended Learning am Institut EMK: „Einführung in die Elektrotechnik“ unterstützt durch digitales Lehrangebot

Die Grundlagenveranstaltung „Einführung in die Elektrotechnik“ wird seit dem Jahr 2004 vom Institut EMK ausgerichtet und vermittelt jährlich im Sommersemester Grundlagen der Elektrotechnik für Studierende der Natur- und Ingenieurwissenschaften außerhalb der Elektrotechnik. Vornehmlich Studenten des Maschinenbaus, aber auch Materialwissenschaftler, Gewerbelehrer, sowie vereinzelt Mathematiker und Physiker bilden den Hörerkreis. Je Veranstaltungsturnus hören etwa 900 Studenten die Vorlesung.

Klassisches Vorlesungskonzept bis Sommer 2008

Das Vorlesungskonzept orientierte sich bis zum Sommersemester 2008 an dem der klassischen Massenveranstaltung: Zwei Vorlesungstermine pro Woche werden ergänzt durch 90-minütige, betreute Übungsgruppen. Den Studierenden wird der

Stoff in den Vorlesungen vorgetragen, die Vertiefung und Anwendung des Stoffs, sowie das Erlernen einer systematischen Denk- und Arbeitsweise geschieht in den Übungen.

Das „E-Learning Center“ der Technischen Universität Darmstadt fördert seit einiger Zeit die multimediale Unterstützung der Vorlesung unter Nutzung von Online-Medien. Ziel ist es, die Vorlesung im Internet dauerhaft zu dokumentieren, Inhalte digital zur Verfügung zu stellen und bis zu 20 % des Stoffs in einem rein digitalen Angebot zu vermitteln.

„Blended-Learning“-Konzept seit Sommer 2009

Durch die Einbeziehung der neuen Medien ist es leichter den breit gefächerten Hörerkreis der Veranstaltung zu erreichen, den selbstorganisierten Lernprozess der Studierenden zu unterstützen und flexibler zu gestalten. Seit dem Sommersemester 2009 wird daher die „Einführung in die Elektrotechnik“ mit einem „Blended-Learning“ Konzept angeboten:

Die Präsenzveranstaltungen, Vorlesung und Übung, bestehen unverändert, werden aber durch ein digitales Angebot erweitert. Alle Vorlesungsunterlagen, außer dem Skript, werden auf einer zentralen Plattform, dem Learning Management System „Clix 8“, zum Download bereitgestellt. Die Vorlesungsveranstaltung wird in Ton und handschriftlichen Notizen aufgezeichnet und den Studenten am Folgetag veröffentlicht. Abbildung 10.3 zeigt eine Präsentationsfolie mit handschriftlichen Annotationen. Anstelle eines Tafel- oder Overheadvortrags werden die Notizen mittels Tablet-PC direkt in die Präsentationsfolien geschrieben und aufgezeichnet.

Die Aufgabenblätter der Übungen werden erst nach erfolgreicher Bearbeitung eines Online-Tests zur Verfügung gestellt. Dieser Test besteht aus 3 - 5 Kurzfragen und prüft das Verständnis der neu vermittelten Grundlagen.

Die Lösungsvorschläge der Übungen in Papierform werden durch eine „Vorrechnübung“ ergänzt: In einer Aufzeichnung von 90 min. Länge wird die vollständige Übung in Bild und Ton vorgerechnet.

Anmeldungen zu Klausuren, News-Sektion und schriftliche Informationen aller Art sind auf der Homepage zur Veranstaltung verfügbar. Das bestehende Online-Forum der Maschinenbaustudenten wird aktiv betreut und inhaltliche und organisatorische Fragen der Studenten hier beantwortet.

Somit ruht das E-Learning-Konzept auf drei Säulen: Clix als Downloadplattform mit Onlinetests, Homepage für schriftliche Information und der Forenbetreuung.

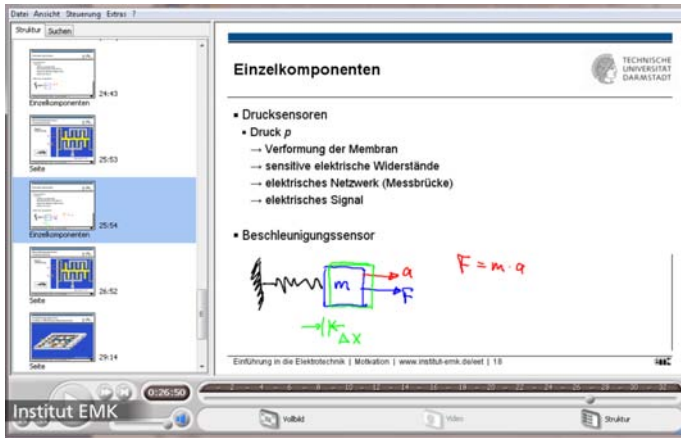


Abbildung 10.3: Vorlesungsaufzeichnung: Powerpoint-Präsentation mit handschriftlichen Annotationen

„E-Teaching Award“ in zwei Kategorien für das neue Konzept

Seit dem Jahr 2004 vergibt die „Carlo und Karin Giersch-Stiftung“ an der Technischen Universität Darmstadt den „E-Teaching Award“ für herausragende Leistungen im E-Learning: Hochqualitative und von den Studierenden gut angenommene E-Learning-Konzepte werden mit einem Preisgeld von gesamt 12.000 € prämiert.

Im ersten Jahr (2009) mit dem neuen „Blended-Learning“-Konzept wurde die „Einführung in die Elektrotechnik“ bereits in zwei von drei Kategorien ausgezeichnet (siehe Abbildung 10.4):

- „best practice“ für die wirkungsreichen Milderung der Problematik einer Massenveranstaltung mit E-Learning-Elementen in Verbindung mit einer simultanen Hebung des Qualitätsniveaus.
- „student proof“, als von den Studenten am häufigsten nominierte Veranstaltung.

Die Konzeptumstellung hat sich damit als Erfolg erwiesen, denn die Akzeptanz und Qualität der Veranstaltung konnten nachweislich gesteigert werden.



Abbildung 10.4: Auszeichnung für digitale Lehre: E-Teaching-Awards „student - proof“ und „best practice“ für das Sommersemester 2009

Fortsetzung folgt. . .

Nach einem Mitarbeiterwechsel im Jahr 2010 stehen für das Sommersemester 2011 umfangreiche Erweiterungen des Veranstaltungskonzepts an: Ein größerer Fragenkatalog zu den Kurztests, eine spielerische Wissensabfrage im Stile von „Wer wird Millionär“, sowie kurze, dreiminütige Lehrvideos zu komplexen Inhalten erweitern das digitale Lehrangebot. Weiterhin wird das Learning Management System „Clix 8“ durch „Moodle“ ersetzt. In Moodle können die bisherigen drei Säulen des E-Learnings vereint werden und Downloads, Wissensabfragen, schriftliche Informationen, Neuigkeiten und Forenunterstützung in einem kompakten Internetauftritt angeboten werden.

10.5 Projektseminar PEM I 2008/2009: Es geht glatt!

Im Wintersemester 2008/2009 wurden im Rahmen der Lehrveranstaltung „Praktische Entwicklungsmethodik“ elektromechanische Curler „EMKurler“ entwickelt.

Das Projektseminar (PEM) ist seit vielen Jahren das „Wahrzeichen“ des Instituts für Elektromechanische Konstruktionen. Hier lernen die Studierenden anhand eines motivierenden Projekts (PEM I) den theoretischen Hintergrund zum systematischen und methodischen Vorgehen beim Lösen einer technischen Aufgabenstellung. Auf diese Weise sammeln die Studierenden schon in ihrer Ausbildung Erfahrungen, die sie als Ingenieure in der Industrie sofort einsetzen können. Neben dem technischen Fachwissen sind dies vor allem auch die sozialen Kompetenzen, die durch wechselnde Gruppenzusammensetzungen gefördert werden.

In Teams von fünf bis sechs Studierenden sollte innerhalb des Wintersemesters jeweils ein elektromechanisches Gerät entwickelt werden, das in einem Curling-Wettkampf möglichst viele Punkte sammelt. Die Geräte dürfen die Grundfläche von DIN A5 bei einem maximalen Gewicht von 1 kg nicht überschreiten. Der Curling-Vorgang muss nach dem Startsignal vollautomatisch ablaufen. Neben der zeitlich begrenzten Entwicklungszeit von einem Semester steht ein auf 75 € limitiertes Budget zur Verfügung.

Für den Wettbewerb war die erzielte Punktzahl und damit die Positioniergenauigkeit entscheidend.



Abbildung 10.5: Sieger-Team beim Curling-Wettbewerb mit Manfred Hübner (Vorsitzender Breitensport des Deutschen Curling Verbands e. V.)



Abbildung 10.6: Studierende beim Positionieren ihres Curling-Roboters

10.6 Projektseminar PEM I 2009/2010: Trennung leicht gemacht!

Im Wintersemester 2009/2010 wurden im Rahmen der Lehrveranstaltung „Praktische Entwicklungsmethodik“ elektromechanische Doppelkekstrenner „EMKekstrenner“ entwickelt.

In Teams von vier bis fünf Studierenden sollte innerhalb des Wintersemesters jeweils ein elektromechanisches Gerät entwickelt werden, das in einem Doppelkeks-Trennwettkampf möglichst viele Punkte sammelt. Die Geräte dürfen die Grundfläche von DIN A5 bei einem maximalen Gewicht von 2 kg nicht überschreiten. Der Trennvorgang muss nach dem Startsignal vollautomatisch ablaufen. Neben der zeitlich begrenzten Entwicklungszeit von einem Semester steht ein auf 75 € limitiertes Budget für Zukaufteile zur Verfügung.

Die Schwierigkeiten beim Keks-Trennwettbewerb lagen vor allem an den deutlich temperaturabhängigen Eigenschaftsänderungen der Schokocreme und den Toleranzen in der Doppelkeks-Breite. Für den Wettbewerb waren Trenngeschwindigkeit und Ästhetik der Trennprodukte entscheidend.



Abbildung 10.7: Studierende bei der Preisverleihung des Doppel-Keks-Trenners



Abbildung 10.8: Einer der entwickelten Keks-Trenn-Roboter „EMKlappe“

10.7 Umbau des Lichttechnik-Labors

Nach neunmonatiger Umbauzeit ist nun das Lichtlabor im Gebäude S2|09 in der Hochschulstraße 4a durch das Fachgebiet Lichttechnik feierlich wieder in Betrieb genommen worden.

Im September 2009 war das denkmalgeschützte Gebäude geräumt und in den folgenden Monaten unter Federführung des Dezernats Bau und Immobilien umgebaut und saniert worden. Die Planung wurde vom Darmstädter Büro Design in Architektur in Abstimmung mit den Dezernaten Nachhaltiger Betrieb und Bau sowie dem Hochschulrechenzentrum erstellt und umgesetzt. Zeitplan und Budget wur-

den eingehalten. Die Gebäudehülle wurde energetisch auf den neuesten Stand gebracht, die technische Infrastruktur dem Bedarf entsprechend erneuert. Besonders im Inneren sind die Veränderungen deutlich erkennbar: Durch die räumliche Neuorganisation eines Hallenbereichs wurden zusätzliche Flächen für die Vorbereitung der Versuche geschaffen, und die Besucher können nun in einem kleinen Foyer angemessen empfangen werden. Der helle, repräsentative Eingangsbereich und die natürlich beleuchtete Flurzone grenzen sich von den dunkel gehaltenen Versuchsräumen ab. In der großen Versuchshalle wurden die schwarz gestrichenen Glasscheiben durch neue, speziell für die Sanierung von alten Fenstern entwickelten Doppelglasscheiben ersetzt und eine Verdunkelungsanlage installiert. Die Forscher können nun bei Tageslicht die Versuche vorbereiten. Die Lichtversuche werden dann bei völliger Dunkelheit durchgeführt. Die Versuchshalle zählt zu den ersten Gebäuden der Technischen Hochschule - heute TU Darmstadt - aus dem Jahre 1895. Von 1905 bis 1908 folgte die erste Erweiterung des Gebäudes durch die beiden seitlich angeordneten Bürogebäude und die erste Erweiterung der Halle. Im Jahre 1937 wurde die Halle noch einmal erweitert.



Abbildung 10.9: Spuren der Sanierung: Die ehemalige Hauptwand dient heute als Trennwand zu den Versuchsräumen. Das alte Außenfenster und die ehemalige Außentür wurden markant hervorgehoben.



11 Fördervereine

11.1 EMKlub

Aus dem Kreis der ehemaligen Studenten und Mitarbeiter kam 1995 der Vorschlag, einen Förderverein zu gründen, der die Arbeit des Instituts begleitet und unterstützt. Daneben soll er helfen, die Kontakte der Absolventen zu ihrem Institut und untereinander zu pflegen. Gerade die Tatsache, dass die „Ehemaligen“ in sehr unterschiedlichen Arbeitsgebieten tätig sind, macht persönliche und fachliche Verbindungen besonders reizvoll. Nach den notwendigen Vorbereitungsarbeiten wurde der *„Verein der Freunde des Instituts für Elektromechanische Konstruktionen an der Technischen Universität Darmstadt e. V.“* gegründet und ins Vereinsregister eingetragen.

Der Förderverein kann und will nicht in Wettbewerb zur Vereinigung der Freunde der TU Darmstadt treten. Er sieht vielmehr seine Aufgaben unterhalb der Ebene, in der die großzügige Förderung durch die Freunde der TU Darmstadt angesiedelt ist. Andererseits kann er in Bereichen wirksam werden, die sich speziell auf das Institut beziehen, wie zum Beispiel die erwähnte Kontaktpflege.

So wie sich innerhalb und außerhalb der Universität für das Institut die Kurzform EMK eingeführt hat, haben die ersten Mitglieder des Fördervereins diesem spontan den Namen EMKlub gegeben. Der Verein hat inzwischen 230 Mitglieder. Die Mitgliederversammlung fand in den letzten beiden Jahren jeweils im Herbst statt. Gastgeber war im Jahr 2009 die Firma Braun GmbH in Kronberg. Im Jahr 2010 wurde die Mitgliederversammlung mit dem Festkolloquium anlässlich der 80. Geburtstage von Prof. Dr.-Ing. Heinrich Buschmann und Prof. Dr.-Ing. Bernhard Cramer verbunden. Das Tagesprogramm bestand jeweils aus Firmenpräsentation und -besichtigung, bzw. dem Festkolloquium, der Mitgliederversammlung und einem gemütlichen Zusammensein am Abend.

Neben der in der Satzung verankerten wissenschaftlichen Förderung vergibt der Verein Preise für herausragende Projektseminare, Studien- oder Diplomarbeiten an Studierende. Dabei trägt der Verein die Kosten für z. B. eine wissenschaftliche Tagung, für Fachliteratur oder sonstige Anschaffungen der Preisträger, die im engen Zusammenhang mit dem Studium stehen.

Im Jahr 2009 erhielten Frau Laura Bohne für ihre Diplomarbeit „Entwicklung und Charakterisierung eines kapazitiven Drucksensors mit porösem Silizium“; im Jahr 2010 Herr Henry Haus für seine Studienarbeit „Entwicklung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle unter Verwendung dielektrischer Elastomeraktoren“ diese Preise.



Abbildung 11.1: EMKklub-Preis 2010 für Herrn Henry Haus

Da die Nominierung nach einer Vorauswahl am Institut drei externen Gutachtern obliegt, suchen wir für diese Tätigkeit immer wieder freiwillige Absolventen, die in der Lage sind, 2 - 3 Arbeiten zu bewerten.

Der EMKklub unterstützt das Institut in unterschiedlicher Weise. Die Fördermaßnahmen betreffen die:

- Ausstattung des Instituts
- Lehre
- Nachwuchsförderung
- Forschung
- Infrastruktur sowie die
- Kommunikationsverbesserung mit den Studenten

Für diese Maßnahmen wurden in beiden Jahren zusammen ca. 14.450 € bereitgestellt.

Ein neues Projekt, das gut angekommen ist, sind die „Neuen Klubnachrichten“. Im Berichtszeitraum sind wieder drei Ausgaben erschienen, die über das Neueste aus dem Institut berichten.

Ein anderes Projekt des EMKklub ist die Herausgabe und ständige Aktualisierung eines Mitgliederverzeichnisses, das Hinweise auf das berufliche Arbeitsfeld der ehe-

maligen Studenten enthält. Es soll den oft beschworenen und schwierig zu erreichenden Synergieeffekt zwischen Fachleuten aus unterschiedlichen Arbeitsgebieten fördern. Arbeitsgebiete, wie Nachrichtentechnik, Medizintechnik, Optik, Automobiltechnik, Gebäudetechnik, Hausgerätetechnik, Automatisierungstechnik, Lichttechnik und andere finden sich im Verzeichnis.

Auch bei der Suche nach Stellen für Praktikanten und für Absolventen hilft der EMKlub mit einer Job-Börse.

Selbstverständlich investiert der Klub mit seinen Mitgliedern Arbeitszeit für die Vorbereitung und Durchführung der Veranstaltungen, z. B. der Studentenwerbung auf der HOBIT und dem TU-Day, den Kontakt mit der Heinrich-Emanuel-Schule, einem beruflichen Gymnasium, dem Sommerfest, der Weihnachtsfeier und vielem anderen mehr.

Zur Förderung der Kommunikation unter den Mitgliedern wurde 2008 ein neues elektronisches Forum auf den Webseiten des EMKlub eingerichtet, an dem alle Mitglieder teilnehmen können. Hier findet man neben allgemeinen Diskussionsrunden auf gruppenspezifische Foren für z. B. aktive Studenten oder Absolventen. Auch der Vorstand wickelt über diese Plattform dringliche Abstimmungen ab. Auf diese Weise verringern sich Fahrtzeiten und -Kosten und die Reaktionszeiten verkürzen sich.

Der Mitgliedsbeitrag beträgt 40 €/Jahr. Studierende und Mitarbeiter des Instituts sind vom Mitgliedsbeitrag befreit. Es ist fast überflüssig zu erwähnen, dass die Mitgliedschaft im EMKlub nicht an das MFT- Studium gebunden ist. Jeder, der die Arbeitsgebiete des Instituts und seiner Absolventen interessant und die Formen der EMK-Ausbildung attraktiv findet, ist herzlich eingeladen, sich an der Arbeit des Vereins zu beteiligen. Er leistet damit auch einen Beitrag zur langfristigen Sicherung der Ingenieurausbildung in der Studienrichtung Mikro- und Feinwerktechnik, die vom Institut für EMK getragen wird.

Auch Firmen können dem EMKlub beitreten und uns in unseren Zielen unterstützen.

Haben wir Ihr Interesse geweckt? Nehmen Sie einfach Kontakt mit uns auf.

Tabelle 11.1: Vorstandsmitglieder des Vereins der Freunde des Instituts für EMK an der Technischen Universität Darmstadt

Name	Tel.	Fax
Brümmer, Matthias	(06196) 522-2465 matthias.bruegger@arcor.de	(06196) 522-342465
Cramer, Bernhard	(06151) 52206 DL3XC@bernd-nan.de	(06151) 52206
Förster, Matthias	(06151) 824934 mfbida@arcor.de	(06151) 897581
Franke, Michael	(06173) 30-2277 franke.m.2@pg.com	(06173) 30-2724
Ilgen, Hans Joachim	(06151) 165296 h.ilgen@emk.tu-darmstadt.de	(06151) 164096
Röse, Andreas	(06151) 16-5486 Andreas.Roese@fmc-ag.com	(06151) 16-4096
Weißmantel, Heinz	(06154) 1808 weissmantel@emk.tu-darmstadt.de	(06154) 1808
Werthschützky, Roland	(06151) 162296 werthschuetzky@emk.tu-darmstadt.de	(06151) 164096

Noch ein Hinweis!

In den Jahren 2009 und 2010 hat ein einzelnes Mitglied 1000,- € gespendet. Ihm sei Dank und allen Anderen, die mit Rat und Tat und sehr oft mit viel Zeit, die Arbeit des Fördervereins EMKclub unterstützten.

Weitere Informationen finden Sie unter: <http://www.EMKclub.de>

11.2 Freunde des Fachgebiets Lichttechnik der TU Darmstadt e. V.



Der Verein der Freunde des Fachgebiets Lichttechnik der TU Darmstadt e. V. wurde im Jahre 1988 gegründet. Zu seinen heute über 60 Mitgliedern zählen neben ehemalige Studenten und Assistenten auch langjährige Forschungs- und Projektpartner des Fachgebietes es, sowie eng verbundene Privatpersonen.

Die Zielsetzung des Vereins ist es, das Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Darmstadt bei seiner Arbeit zu unterstützen, insbesondere durch:

- Unterstützung bei der Ausbildung und Förderung der Studenten des FG Lichttechnik
- Unterstützung der Forschungstätigkeit durch Finanzierungshilfe bei der Anschaffung moderner Messtechnik
- Durchführung von Fortbildungsveranstaltungen auf den Gebieten der Lichttechnik
- Durchführung wissenschaftlicher Veranstaltungen
- Mitarbeit von Mitgliedern in Fachgremien und Ausschüssen

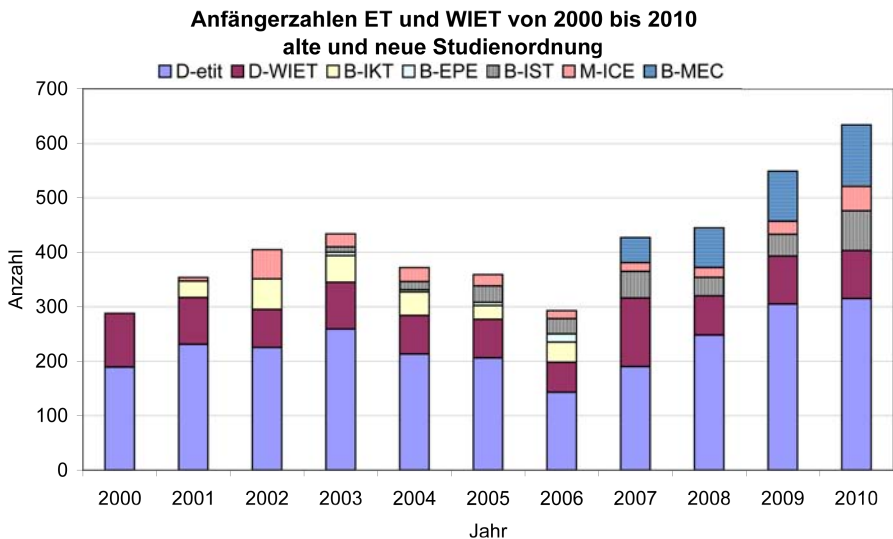
Bei der alljährlich stattfindenden Mitgliederversammlung steht die Vorstellung der Tätigkeiten am Fachgebiet Lichttechnik im Vordergrund. In diesem Zuge erhalten Diplom- und Studienarbeiter bzw. Bachelor- und Masterarbeiter die Chance, in einem familiären Rahmen über ihre Arbeit zu berichten, und fachlich hochkompetente Rückmeldung der „alten Hasen“ zu bekommen, sowie gleichzeitig Kontakte zu Vertretern der Industrie zu knüpfen. Konstruktive Gespräche zur zukünftigen Forschungsausrichtung bilden die Überleitung in den gemütlichen Abend.

Der Mitgliedsbeitrag beträgt 25 € pro Jahr.



12 Statistik

12.1 Studentenzahlen



Legende:

D-etit = Diplomstudiengang Elektrotechnik und Informationstechnik

D-WIET = Diplomstudiengang Wirtschaftsingenieur Elektrotechnik

B-IKT = Bachelor Informations- und Kommunikationstechnik

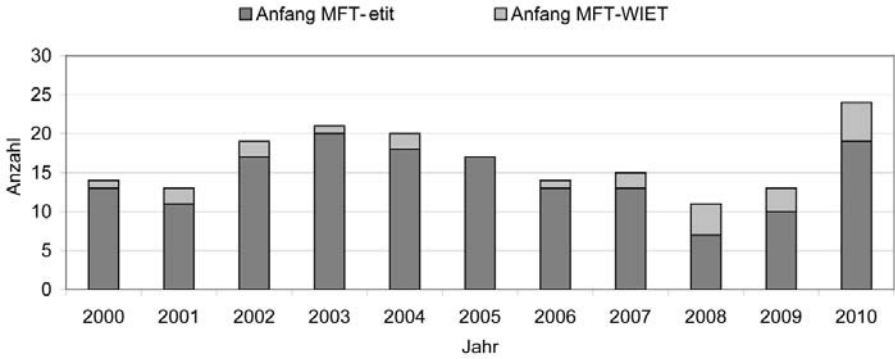
B-EPE = Bachelor Elektrische Energietechnik

B-IST = Bachelor Informationssystemtechnik

B-MEC = Bachelor Mechatronik

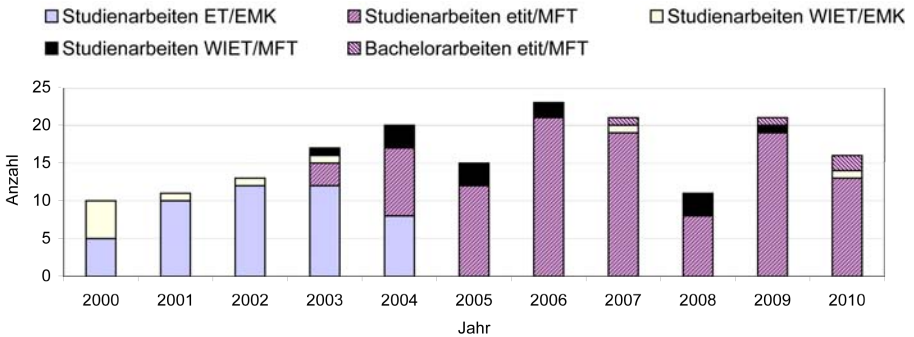
M-ICE = Master Information and Communication Engineering

Anfängerzahlen MFT-etit / MFT-WIET 2000 - 2010

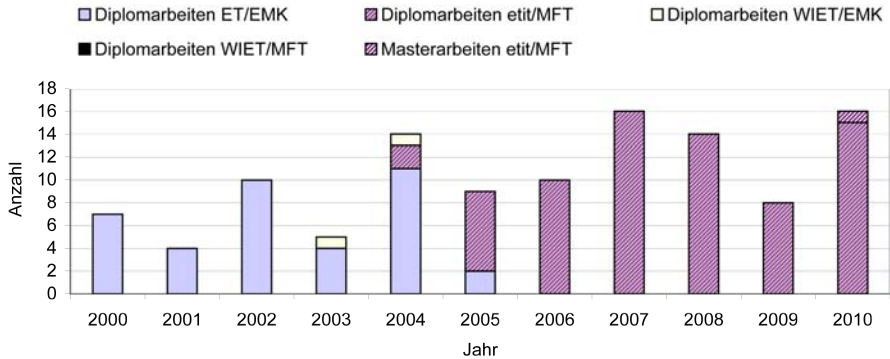


12.2 Studentische Arbeiten

Studienarbeiten / Bachelorarbeiten ET und WIET von 2000 bis 2010 alte und neue Studienrichtung



Diplomarbeiten / Masterarbeiten ET und WIET von 2000 bis 2010 alte und neue Studienrichtung



12.3 Betreuung von Praktika und Vorlesungen

Tabelle 12.1: Praktikum etit 3

	SS 05	SS 06	SS 07	SS 08	SS 10
Praktikum	227	195	176	104	206
Prüfung	215	185	168	107	193

Tabelle 12.2: Praktikum Elektrisches Messen mechanischer Größen

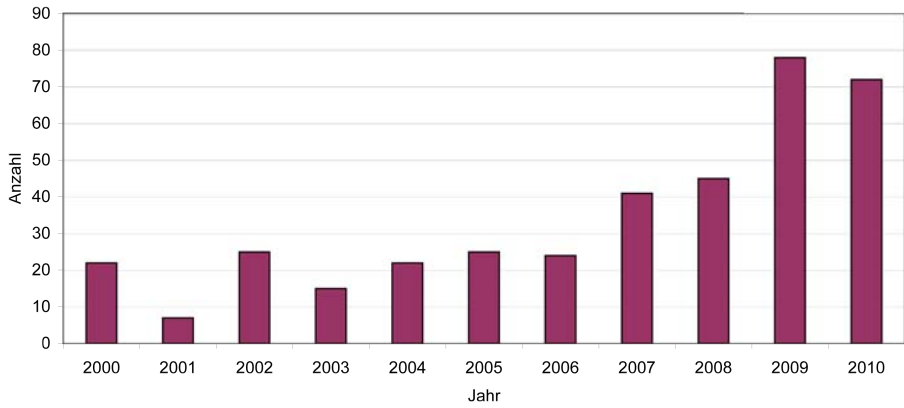
	WS 05/06	WS 06/07	WS 07/08	WS 08/09	WS 09/10	WS 10/11
Praktikum	30	36	26	20	7	0
Prüfung	26	15	10	19	6	-

Tabelle 12.3: Betreuung der Vorlesung Einführung in die Elektrotechnik für Maschinenbauer u.a.

	2006	2007	2008	2009	2010
Vorlesung	ca. 740	750	969	935	1230
Prüfung	495	670	712	829	861

12.4 Publikationen des Instituts für EMK von 2000 bis 2010

Publikationen des Instituts für EMK von 2000 bis 2010



13 Anhang

Eine detaillierte Auflistung der Lehrinhalte ist nachfolgend dargestellt.

13.1 Vorlesungen, Übungen, Praktika im Studiengang etit

- Elektrische Messtechnik (SS 2+1)
(Werthschützky, Hatzfeld)
 - Meßfehler und Messunsicherheit
 - Messgeräte für Mittel- und Effektivwerte
 - Mess- und Rechenverstärker
 - Gleichstrombrücken
 - Analoges Oszilloskop
 - Spannungsteiler und Messwandler
 - Gatter- und Zählschaltungen
 - Frequenz- und Periodendauermessung
 - Leistungsmessung im Einphasensystem

- Grundlagenpraktikum etit III: Mess- und Sensortechnik (SS 0+2)
(Kassner, Werthschützky)
 - Messung elektrischer Signale im Zeitbereich
 - Signalanalyse im Frequenzbereich
 - Analoge Sensorsignalverarbeitung
 - Signalverarbeitung mit dem PC

13.2 Vorlesungen, Übungen, Praktika der Studienrichtung MFT

13.2.1 Pflichtfächer

Vorlesungen:

- Elektromechanische Systeme I (mit Übung) (WS 2+2)
(Werthschützky, Rausch, Meiß)
 - Struktur elektromechanischer Systeme und Spezialbegriffe
 - Beschreibung mechanischer, akustischer, fluidischer und thermischer Teilsysteme durch Netzwerke
 - Beschreibung von Wandlern zwischen mechanischen sowie mechanisch - akustischen Teilnetzwerken
 - Beschreibung elektromechanischer Wandlungsmechanismen (elektrostatische, piezoelektrische, magnetische, elektrodynamische, piezomagnetische Wandler)
 - Entwurf komplexer elektromechanischer Systeme mit Netzwerken und Wandlern

- Elektromechanische Systeme II (SS 2+0)
(Werthschützky)
 - Grundlagen der technischen Optik
 - Beschreibung optoelektronischer Wandler und ausgewählte Anwendungen
 - Toleranzanalyse elektromechanischer Bauteile
 - Zuverlässigkeit von fein- und mikrotechnischen Produkten
 - Elektrische Kontakte und Schaltverhalten

- Technologie der Mikro- und Feinwerktechnik I (mit Übung) (SS 2+1)
(Schlaak, Röse, Lotz, Haus)
 - Herstellungsverfahren von Bauteilen durch Feingießen, Druckgießen, Sintern von Metall- und Keramikteilen, Spritzgießen von Kunststoffen
 - Verbundwerkstoffe
 - Umformprozesse wie Pressen, Prägen, Tiefziehen
 - Trennverfahren wie Feinschneiden, Ultraschallbearbeitung, Laserbearbeitung und Ätzen

-
- Verbindungstechnologien: Schweißen, Bonden, Lötverfahren, Kleben
 - Technologie der Mikro- und Feinwerktechnik II (mit Übung) (WS 2+1)
(Schlaak, Röse, Lotz, Haus)
 - Beschichtungsverfahren: Pulverbeschichtung, galvanische und chemische Beschichtung, Galvanoabformung, Vakuumbeschichtung (Aufdampfen, Sputtern), CVD-Verfahren
 - Fertigung optischer Bauteile, Glasfasern, Glaskeramik
 - Mikrotechnologien: Reinraumtechnik, Photolithographie, Mikrostrukturierung, Mikromechanik, LIGA-Technik, Mikroverbindungsverfahren
 - Fertigung elektronischer Baugruppen, Chipgehäuse, Packaging, SMT
 - Mess- und Sensortechnik (MT I) (SS 2+0)
(auch Pflichtfach im Studiengang Mechatronik)
(Werthschützky, Opitz)
 - Anwendungen, Struktur und Kennwerte elektromechanischer Sensoren
 - Fehlerbeschreibung elektromechanischer Sensoren
 - Messtechnische Analyse von elektromechanischen Sensoren
 - Sensoren für mechanische Größen, wie Beschleunigung, Kraft, Druck, Drehmoment, Geschwindigkeit, Durchfluss und Weg
 - Entwicklungsmethodik (PEM I) (WS 1+1)
(Staab, Schlaak, Werthschützky)
 - Pflichtenhefterarbeitung, Projektplanung
 - Funktionsstruktur, Teilprobleme, Lösungsmethoden
 - Bewerten und Entscheiden von Teillösungen
 - Konzeption der Gesamtlösung
 - Entwerfen und Gestalten, Prototypenbau und Test
 - Präsentationstechniken
 - Parallel zur Vorlesung wird in Teams eine gemeinsame praktische Themenstellung bearbeitet

Projektseminare:

- Praktische Entwicklungsmethodik (PEM II bis IV) (WS 0+2)
(Alle Lehrkräfte EMK) (SS 0+2)
Bearbeitung praktischer Themenstellungen in 4er-Gruppen
und Betreuung durch Wissenschaftliche Mitarbeiter
 - Entwickeln einer feinwerktechnischen Baugruppe oder eines Gerätes im Team
 - Projektplanung und Projektorganisation
 - Anwendung der Entwicklungsmethodik
 - Präsentation der Ergebnisse als Zwischen- oder Endvortrag sowie Abschlussbericht

Praktika:

- Elektromechanische Systeme (SS 0+3)
(Ilgen, Schlaak, Werthschützky)
Versuche zu Beispielen von elektromechanischen Systemen,
wie Aktoren, Sensoren und deren Signalverarbeitung
- Elektrisches Messen mechanischer Größen (WS 0+2)
(Ilgen, Werthschützky, gemeinsam mit FB Mechanik,
AG Dynamik, Prof. Markert)
 - Erfassung mechanischer Größen
 - Messsignalverarbeitung
 - Erfassung von Schwingungsgrößen (Markert)
- Produktentwicklung (WS 0+3)
(Schlaak, Werthschützky, Ilgen)
 - Konstruktion
 - Fertigung
 - Musterbau
 - Inbetriebnahme
 - Tests
 - Bewertung und Präzisierung
 - Dokumentation

13.2.2 Wahlpflichtfächer

Vorlesungen:

- Mikrosystemtechnik I (mit Übung) (WS 2+1)
(Schlaak, Flittner, Schlosser)
 - Einführung und Definitionen zur Mikrosystemtechnik
 - Werkstofftechnische Grundlagen: Konstruktionswerkstoffe (Silizium, Glas, Keramik) Funktionswerkstoffe
 - Grundlagen der Technologien: Schichtabscheidung, Schichtstrukturierung, Ätzverfahren
Silizium-Mikromechanik, LIGA-Verfahren, Aufbau
und Verbindungstechnik, Mechanische Mikrofertigung
 - Funktionselemente der Mikrotechnik
 - Mikroaktoren:
Grundlagen zu Mikroaktoren, Skalierung
 - Mikrosensoren
 - Mikrofluidik
 - Integrierte Sensor-Aktor-Systeme
 - Grundlage des Entwurfprozesses
 - Trends, ökonomische Aspekte

- Bauelemente der Feinwerktechnik (WS 2+0)
(Blume)
 - Wirkungsweise und vergleichende Betrachtung von Energiespeichern
 - Beschreibung von Lagern (Gleit-, Wälz- und Spitzenlager sowie Sonderformen)
 - Beschreibung von Ruhelementen und Kupplungen
 - Beschreibung von Zugmitteln, Zahnrad-, Reib- und Sondergetrieben
 - Entwicklungsprozess in der Feinwerktechnik am Beispiel Schrittmotor

-
- Biomedizinische Technik (SS 2+0)
(Kern)
 - Klassisches Röntgen
 - Röntgen-Computer-Tomographie (CT)
 - Kernspin-Tomographie
 - Ultraschalldiagnostik
 - Funktionaldiagnostik (Radiographie)
 - Druckmessung am Patienten
 - Messung der Blut-Sauerstoffsättigung
 - Erfassung elektrischer Größen, wie EKG, EEG
 - Instrumente und Methoden der Minimal-invasiven Chirurgie

 - Medizinrobotik (WS 2+0)
(Pott, Schlaak)
 - Geschichte und Begriffsdefinition
 - Medizinische Einsatzfelder
 - Bauformen und Kinematik
 - Steuerung / Regelung
 - Sensorik
 - Surgical Workflow
 - Sicherheit und Hygiene
 - Beispiele / Vorträge

 - Sensorprinzipien (MT II) (WS 2+0)
(Werthschützky)
 - Physikalische Wirkprinzipien von elektromechanischen Sensoren, wie resistiv, kapazitiv, induktiv, magnetisch, piezoelektrisch
 - Resonanzsensoren und Sensoren mit Wellenausbreitung
 - Anwendungsbeispiele von elektromechanischen Primärsensoren
 - Temperatur- und Feuchtesensoren

-
- Sensorelektronik (MT III) (SS 1+1)
(Werthschützky, Rafflenbeul)
 - Struktur- und Funktionsprinzipien analoger und digitaler Sensorelektroniken (Schaltungstopologien)
 - Komponenten der analogen und digitalen Sensorelektronik, wie Messbrücken, Messverstärker, Filter, AD-Umsetzer, Mikrocontroller
 - Kompensation systematischer und Reduzierung zufälliger Sensorfehler
 - Analoge und digitale Sensorschnittstellen

 - Elektrische Kleinantriebe (mit Übung) (WS 2+1)
(Schlaak, Hoppach)
 - Kraftwirkung und numerische Feldberechnung von Kleinantrieben
 - Rotatorische und lineare Systeme
 - Antriebe mit Ständergleich- und Wechselfeld
 - Synchronmotoren, Asynchronmotoren und Schrittmotoren
 - Mikroantriebe und integrierte Antriebssysteme
 - Getriebe für elektrische Kleinantriebe
 - Simulation und Modellierung elektrischer Kleinantriebssysteme
 - Leistungselektronik für elektrische Kleinantriebe
 - EMV- und Geräuschemission von elektrischen Kleinantrieben
 - Messen und Regeln an elektrischen Kleinantrieben

 - Lichttechnik I (WS 2+2)
(Khanh, Groh, Kuhn)
 - Einführung in die Lichttechnik
 - Bau und Wirkungsweise des Auges
 - Grundgrößen der Lichttechnik
 - Photometrie I

-
- Photometrie II
 - Lichttechnische Stoffkennzahlen
 - Lichttechnische Bauelemente Filter
 - Physiologie des Sehens
 - Farbe I
 - Farbe II
 - Grundlagen der Lichterzeugung
 - Lichterzeugung: Temperaturstrahler
 - Lichterzeugung: Entladungslampen

 - Lichttechnik II (SS 2+2)
(Khanh, Groh, Kuhn)
 - Informationsverarbeitung im visuellen System
 - Lichterzeugung: Halbleiter
 - Solarmodule - Technologien und Charakterisierung
 - Bauelemente der Optik
 - Innenraumbeleuchtung
 - Ortsfeste Straßenbeleuchtung
 - Lichtsysteme für die Kfz-Industrie
 - Displaysysteme
 - Lichtleitung
 - Polarisiertes Licht

 - Optoelektronik (WS 2+0)
(Khanh, Bodrogi, Krause)
 - Reflexion, Transmission, Brechung, Polarisation
 - Formel- und Kenngrößen der Strahlungsphysik
 - Halbleitersensoren
 - thermische Sensoren für optische Anwendungen
 - CCD- und CMOS-Sensoren
 - Aufbau und Charakterisierung von Digitalkameras
 - Grundlagen der LED-Strahlungserzeugung

-
- Beleuchtung mit weißer LED-Strahlung
 - thermisches Verhalten von LED
 - Optik für LEDs, Lichtwellenleiter
 - Grundlagen der Laserstrahlung
 - Strahlungserzeugung mit thermischen Strahlern und Entladungslampen

 - Technische Optik (SS 2+0)
(Khanh, Haferkemper)
 - Beschreibung elektromagnetischer Strahlung
 - Wellenoptik, Strahlenoptik, Abbildungsgesetze
 - Bauelemente der Optik
 - Wirkstoffe der Optik
 - optische Phänomene
 - Faseroptik
 - Bündelungsbegrenzung, Abberation
 - optische Instrumente
 - Spektralmesstechnik
 - optische Messverfahren

 - Management für Ingenieure in der Elektrotechnik (SS 2+0)
(Schlaak, Kohlstedt)
 - Organisationsformen im Unternehmen
 - Management und Führung
 - Projektmanagement
 - Geschäftsfeldplanung
 - Kostenrechnung
 - Qualitätsmanagement
 - Wertanalyse

 - Montage- und recyclinggerechtes Konstruieren (SS 1+1)
(Weißmantel)
 - Methoden der Montage
 - Regeln für das montagegerechte Entwickeln

-
- Regeln für das demontagegerechte Entwickeln
 - Umweltgerechtes Entwickeln elektronischer und feinwerktechnischer Geräte
 - Normen, Vorschriften, Gesetze
 - Einführung in das seniorengerechte und benutzerfreundliche Design¹

Seminare:

- Institutsrundgang (WS 0+2)
(Alle Lehrkräfte EMK) (SS 0+2)
Vorstellen der laufenden Studien- und Diplomarbeiten durch einen kurzen Vortrag (3 Minuten) mit anschließender Diskussion in den Laborräumen der Studenten jeweils am Donnerstag 10:00 Uhr.
Am ersten Donnerstag im Monat in englischer Sprache.
- Institutskolloquium (WS 0+2)
(Alle Lehrkräfte EMK) (SS 0+2)
Präsentation der Studien- und Diplomarbeiten durch einen Vortrag (20 Minuten) mit Diskussion sowie Fachvorträge aus der Industrie und von Institutsmitarbeitern jeweils am Donnerstag 11:00 Uhr, Raum S3|06 146.
- Mikrosystemtechnik II (Seminar) (SS 2+0)
(Schlaak, Staab)
 - Intensives Auseinandersetzen mit aktuellen Forschungsthemen der Mikrosystemtechnik.
 - Selbst erarbeiteter Fachvortrag und ein wissenschaftlicher Bericht
 - Vorträge von externen Referenten

¹ <http://www.benutzerfreundliches-design.de/>

Fachexkursionen:

- Berlin 22.06. - 26.06.2009
(Khanh / Kuhn)
Firmen: Physikalisch Technische Bundesanstalt / Braunschweig,
Zet-Optics / Braunschweig, Stadtwerke Hannover / Hannover,
Hellux GmbH / Hannover, Osram GmbH / Berlin, LMT / Berlin
Teilnehmer: 11 Personen
- Freiburg 14.06. - 18.06.2010
(Werthschützky / Ilgen)
Firmen: Faulhaber GmbH und Co KG / Schönaich,
Kistler Instrumente AG / Winterthur, Schweiz, Sick Maihak AG /
Reute, Endress + Hauser GmbH / PC-Flowtec / Reinach, Schweiz,
Endress + Hauser GmbH / PC-Füllstand und Druck / Maulburg,
Richard Wolf GmbH / Knittlingen
Teilnehmer: 12 Personen

13.3 Lehrveranstaltungen für andere Studiengänge

- Einführung in die Elektrotechnik (SS 4+2)
Grundstudium Maschinenbau, Materialwissenschaft, u. a.
(Schlaak, Greiner, Winterstein)
 - Elektrotechnische Größen und Einheiten
 - Lineare Gleichstromkreise, Ohmsches Gesetz, Zählpfeile
 - Kirchhoff'sche Sätze, Superposition
 - Elektrisches Feld, Kondensator
 - magnetisches Feld, Induktionsgesetz, Schaltvorgänge
 - Lineare Wechselstromkreise, Zeigerdiagramm, Superpositon
 - Drehstrom, Transformator
 - Halbleiter, Elektronik, integrierte Schaltungen
 - Netzgeführte Stromrichter, Digitaltechnik
 - Boolesche Algebra
 - Messen nichtelektrischer Größen
 - Sensorprinzipien