



FORSCHUNGSBERICHT 2011



Technologien für mehr Gesundheit



www.reiter-schweiger.de

Innovation = Fortschritt!

Wer nur einseitig denkt, kann nie doppelt zu guten Lösungen kommen. Für uns ist dies ein klares Prinzip. Zum einen, was unsere Wege zu perfekten, kundenorientierten technischen Lösungen angeht. Zum anderen, was die Kompetenz in zwei sehr innovativen Branchen betrifft. **Sie sind Ingenieur.** Verstehen den Beruf als Berufung. Suchen keinen kurzfristigen Job, sondern langfristige Perspektiven. Bringen Motivation und Qualifikation mit ein.

Helfen Sie uns, den Fortschritt weiter voranzutreiben und arbeiten Sie künftig mit uns in unserem Werk in Crailsheim zusammen!

Ingenieure (m/w)

für moderne High-Tech Verpackungsanlagen für die pharmazeutische und kosmetische Industrie.

Ihr Profil:

Konstruktion

- abgeschlossenes Maschinenbaustudium (Schwerpunkt Konstruktion)
- Gute CAD-Kenntnisse
- Berufserfahrung als Konstrukteur
- Team- und Kommunikationsfähigkeit

Vertrieb

- Erfahrung in der Projektarbeit, insbesondere vertriebliche Aufgaben
- Verhandlungssicheres Englisch
- Berufserfahrung im Verkauf von Sondermaschinen sind von Vorteil

Wir zählen zu den weltweit führenden Spezialisten in der Entwicklung von Spezial-Maschinen für die Pharma- und Kosmetikindustrie.

Mit über 700 Mitarbeitern im Stammwerk Crailsheim und Schnelldorf – seit 30 Jahren. **Sympathisch. Sozial. Sicher.** Dies sind die häufigsten Attribute, mit denen unsere Mitarbeiter ihren Arbeitsplatz beschreiben. Beschreiben Sie Ihren demnächst ebenso.

Lassen Sie unsere Ideen zur Realität werden!

Ihre Bewerbung richten Sie bitte an unsere Personalabteilung.

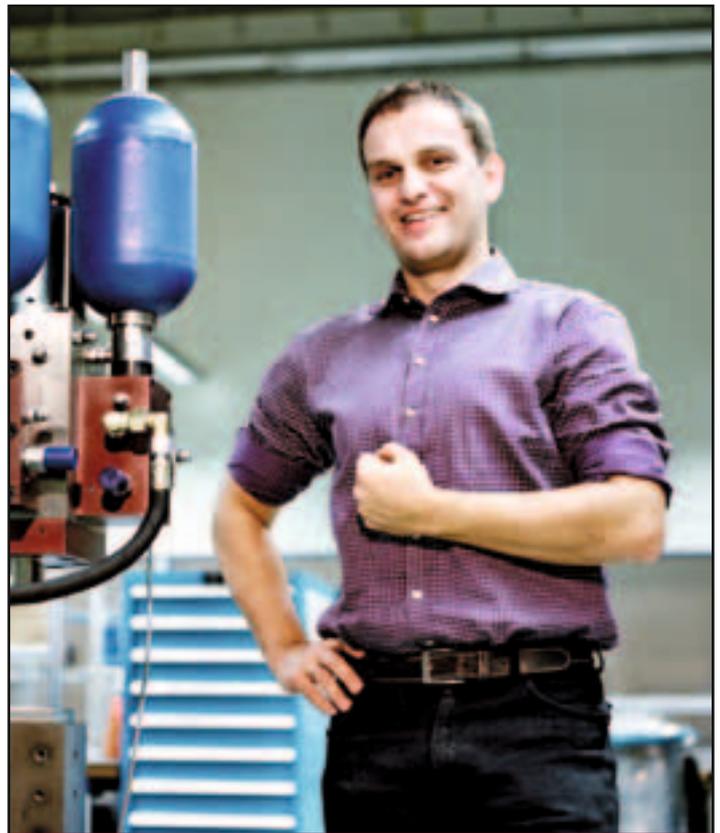
Wir vergeben laufend interessante Abschlussarbeiten!



groninger Pharma · groninger & co. gmbh · Hofäckerstr. 9 · 74564 Crailsheim
GERMANY · Tel.: +49 (0)7951/495-0 · e-mail: office@groninger.de

groninger Kosmetik · groninger GmbH & Co. KG · Birkenbergstr. 1 · 91625 Schnelldorf
GERMANY · Tel.: +49 (0)7950/800-0 · e-mail: office@groninger.de

groninger USA L.L.C. · 2520 Whitehall Park Drive · Suite 800 · Charlotte NC 28273
USA · Tel.: +1(704)295-9000 · info@groningerusa.com



PIONIERGEIST MUT FAIRNESS NÄHE

4 Werte, ein Konzern

„Ich lasse niemals locker.“

Andreas Socher, Ingenieur Hydraulik bei HOERBIGER

Du hast Biss. Du suchst die Herausforderung. In Dir schlummert ein Genie. Das ist genau das, was Dich als Mitarbeiter und uns als kundenorientiertes Technologieunternehmen weiterbringt. Willkommen bei HOERBIGER als

kreativer Ideenschmied (m/w)

Neugierig? Dann lerne uns einfach kennen: Auf www.hoerbiger.com findest Du detaillierte Informationen. Wir freuen uns auf Deine Online-Bewerbung unter www.careers.hoerbiger.com

Der HOERBIGER Konzern ist Innovations- und Technologieführer in den Geschäftsbereichen der Kompressortechnik, Automatisierungstechnik und Antriebstechnik. 6.700 Mitarbeiter erzielten 2010 einen Umsatz von rund 948 Millionen Euro.


HOERBIGER
because performance counts

FORSCHUNGSBERICHT
DER HOCHSCHULE
FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN –
FACHHOCHSCHULE REGENSBURG
2011

IMPRESSUM / VORWORT

2

IMPRESSUM

Herausgeber: Der Präsident
der Hochschule für Angewandte
Wissenschaften – Fachhochschule
Regensburg
Prof. Dr. Josef Eckstein

Redaktion: Elke Steinberger, Dipl.-Sozialpäd. (FH),
Referentin für Forschung &
Technologietransfer
IAFW, Hochschule Regensburg

Bildmaterial: Autoren der Fachbeiträge

Gesamtherstellung: mediaprint infoverlag gmbh
86415 Mering
www.mediaprint.info

Auflage: 3000

Erscheinungstermin: Oktober 2011

Für die einzelnen Projektberichte liegt die inhaltliche Verantwortung bei den jeweiligen Projektleitern.

Kontaktadresse:

Hochschule für angewandte Wissenschaften Regensburg
Institut für Angewandte Forschung
und Wirtschaftskooperationen (IAFW)
Prüfeninginger Straße 58
D-93049 Regensburg
Telefon: ++49 (0941) 943-1378/-1266
Telefax: ++49 (0941) 943-9763
E-Mail: iafw@hs-regensburg.de
Internet: www.hs-regensburg.de

Wir danken allen Autoren für die Unterstützung.

ISSN 1868-3533



Redaktion: Der vorliegende Forschungsbericht 2011 fällt in das Jubiläumsjahr der bayerischen Fachhochschulen. Wie beurteilen Sie 40 Jahre nach Gründung der Fachhochschulen die Entwicklung der Forschung an den Hochschulen für angewandte Wissenschaften?

Präsident Eckstein: Ausgesprochen positiv. Das Thema Forschung war ja bei der Gründung der Fachhochschulen sehr umstritten. Das damals zuständige Kultusministerium lehnte Forschung als Aufgabe der Fachhochschulen strikt ab. Die Universitäten waren dagegen, weil sie eigenständige Forschung auf adäquatem wissenschaftlichem Niveau den Fachhochschulen weder zutrauten noch zubilligen wollten. Angewandte Forschung und Entwicklung blieben somit auf die Schiene der Nebentätigkeit verwiesen. Erst das Bayerische Hochschulgesetz von 1998 erlaubte den Fachhochschulen, dass sie neben der Lehre auch angewandte Forschung und Entwicklung betreiben, dies aber strikt gebunden an die Verfügbarkeit von Ressourcen aus Drittmitteln. Inzwischen ist die Entwicklung noch einmal deutlich weiter gegangen. Die Hochschulen für angewandte Wissenschaften betrachten – auch vom Gesetzgeber anerkannt – Forschung als eine ihrer Pflichtaufgaben. An der Hochschule Regensburg haben wir dem Rechnung getragen, in dem wir bereits 1999 ein Institut für Angewandte Forschung und Wirtschaftskooperationen gegründet haben.

Priorität und Vorrang hat doch an den HAW auch heute noch die Lehre. Ist Forschung dem gegenüber nicht eher zweitrangig – „nice to have“, aber nicht besonders wichtig?

Präsident Eckstein: Selbstverständlich steht eine qualitätsgesicherte, anspruchsvolle Lehre nach wie vor im Mittelpunkt der Arbeit an den HAW. Aber zugleich gilt: Wer rastet, der rostet. Will sagen: Wer als Professorin oder Professor aufhört, sich mit der wissenschaftlichen Basis dessen, was er lehrt, auseinanderzusetzen, die jeweils aktuelle wissenschaftliche Diskussion aufzugreifen oder in eigenen Projekten Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten selbst zu erforschen, verliert leicht den Anschluss und kann auch in der Lehre nicht mehr aktuell bleiben. Forschung an den HAW ist also auch ein wesentliches Instrument für die Qualitätssicherung einer exzellenten Lehre.

Ist Erfolg in der Forschungsarbeit messbar; falls ja wie?

Präsident Eckstein: Ja klar – in mehrerlei Hinsicht: zum einen lässt sich das anhand der eingeworbenen Drittmittel belegen. Das gilt sowohl für Industriekooperationen wie für öffentlich geförderte Projekte. Gerade im Bereich der öffentlich geförderten Projekte haben wir in den letzten Jahren zugelegt. Allein im Jahr 2010 haben wir 13 neue öffentlich geförderte Projekte im Gesamtwert von rund 9 Millionen Euro aus Bund-, Länder- und EU-Programmen mit einer Laufzeit von 1 bis 6 Jahren erfolgreich eingeworben. Damit laufen an der Hochschule Regensburg insgesamt 25 öffentlich geförderte Projekte.

Zum anderen ist die Zahl der kooperativen Promotionen gestiegen. Insgesamt arbeiten ca. 20 Doktoranden und Doktorandinnen an der Hochschule Regensburg in verschiedenen Projekten an ihrer Doktorarbeit.

Ein weiterer Gradmesser ist die Zahl der Patente: im Jahr 2010 hatten wir 11 Erfindermeldungen zu verzeichnen. Auf Grund der Begutachtung der Bayerischen Patentallianz wurden 4 Erfindungen auf die Hochschule Regensburg übertragen; außerdem wurden 2 Schutzrechte erteilt. Damit stehen wir unter den bayerischen Hochschulen für angewandte Wissenschaften auf Platz 1.

Ein weiterer Indikator ist sicher auch die Zahl der Ausgründungen aus der Hochschule heraus. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie hat 2009 die akademische Gründungsförderung an 100 deutschen Fachhochschulen untersucht. Im bundesweiten Vergleich liegt die Hochschule Regensburg bei der Förderung der Existenzgründungen in der Spitzengruppe: Bundesweit auf Platz 16; bayernweit auf Platz 3. Ich denke, an all diesen Zahlen kann man den Erfolg der Forschungsarbeit an der Hochschule Regensburg ganz gut festmachen.

Was waren für Sie die Highlights im Jahr 2010 was Forschung betrifft?

Präsident Eckstein: Highlight war sicher die Eröffnung der Applikationszentrums Sensorik – ein Projekt in Kooperation mit der Universität Regensburg. Das Applikationszentrum wurde aus Landesmitteln sowie aus Mitteln des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung bewilligt. Bis Ende 2010 konnten bereits zahlreiche Auftragsforschungsprojekte akquiriert und sogar schon abgewickelt werden. Das SAppZ – wie wir es nennen – entwickelt sich erstaunlich schnell: Mittlerweile beschäftigt das Applikationszentrum

VORWORT

4

13 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, darunter einen Doktoranden und 2 Masterstudierende. Vor allem wird dort interdisziplinär gearbeitet: Mikrosystemtechnikingenieure, Elektroingenieure, Mathematiker, Chemiker und Informatiker arbeiten zusammen.

Ein weiteres Highlight war die Gründungsfeier für das interdisziplinäre Forschungsnetzwerk Trauma-Biomechanik: daran sind das Universitätsklinikum Regensburg, die Bundesanstalt für Straßenwesen, unsere Fakultät Maschinenbau, das Institut für Rechtsmedizin der LMU München sowie die 5 großen Automobilhersteller beteiligt. Dort wird Unfallforschung und Präventionsarbeit geleistet – also mehr Sicherheit im Verkehr, Arbeit, Sport und Freizeit.

Drittes Highlight ist das Projekt Pro Gründergeist, das wir gemeinsam mit der Universität Regensburg durchführen und das ebenfalls aus Mitteln des Europäischen Regionalfonds gefördert wird. Wir haben daraus das Startup Center ins Leben gerufen, das Beratung und Unterstützung bei Gründungsvorhaben leistet und dementsprechende Informationsveranstaltungen durchführt.

Das klingt sehr technisch und ingenieurlastig?

Präsident Eckstein: Ist es von der Quantität her auch. Die HS.R hat einen klaren Schwerpunkt in den technischen Fakultäten und dies spiegelt sich auch in diesem Forschungsbericht wieder – sie brauchen nur das Inhaltsverzeichnis zu studieren. Das heißt aber nicht, dass es in den anderen Bereichen wie Betriebswirtschaft und Soziale Arbeit keine Forschung gibt. Beispielsweise laufen an der Fakultät angewandte Sozialwissenschaften wichtige Projekte zu Themen, die von hoher gesellschaftlicher Relevanz sind. Dazu gehören Themen wie Autismus, Integration von Menschen mit Migrationshintergrund oder die Auswirkungen der demographischen Entwicklung in unserer Gesellschaft. In der Fakultät Betriebswirtschaft sind es z. B. Themen wie Marketing, Marktforschung, Entrepreneurship oder Bilanz- und Steuerrecht.

Wie sehen die Perspektiven aus? Welche Forschungsschwerpunkte zeichnen sich ab?

Präsident Eckstein: Wir haben schon seit längerem zwei Schwerpunkte, die wir weiter ausbauen werden. Das ist zum einen der Bereich Sensorik, zum anderen der Bereich IT-Security und IT-Safety. In beiden Bereichen gibt es auch

eine strategische Partnerschaft mit der Stadt und einer Reihe von Unternehmen – wir sind hier bereits hervorragend vernetzt. Als weiterer Schwerpunkt kristallisiert sich der Bereich Energie, Energieeffizienz, Regenerative Energie und Ressourcen heraus. Dazu haben wir in nahezu allen Fakultäten einschlägige Kompetenzen. Auch unsere neuen Studiengänge wie Regenerative Energien und Energieeffizienz, Gebäudeklimatik oder unser Master Elektromobilität und Energienetze gehen in diese Richtung.

Den zweiten künftigen Schwerpunkt sehe ich im Bereich der Medizintechnik. Hier haben wir sowohl im Maschinenbau als auch in der Informatik hervorragende Kompetenzen als Basis für Forschung und Lehre incl. der Studiengänge Medizinische Informatik und Biomedical Engineering. Außerdem funktioniert hier die Kooperation mit dem Universitätsklinikum Regensburg hervorragend. Daneben gibt es eine Vielzahl von Einzelthemen, die mit dem Engagement einzelner Professorinnen und Professoren verbunden sind. Ich denke da z. B. an die Historische Bauforschung, zu der ein DFG-Projekt läuft oder an das Forschungsfeld Migration und Integration.

Kurzum: Wir sind gut aufgestellt. Vor allem haben wir uns gezielt mit einer ganzen Reihe von neuen Professorinnen und Professoren verstärkt, die Forschungserfahrung und ein gutes Netzwerk mit Industrie- und Forschungskontakten mitbringen. Diese Strategie werden wir weiter verfolgen. Hinzu kommt, dass das Bayerische Wissenschaftsministerium den Hochschulen für angewandte Wissenschaften nun auch die Möglichkeit der Berufung von Forschungsprofessuren einräumt. Auch das werden wir nutzen, um Forschung an der HS.R zu stärken. Dazu gehört schließlich auch, dass wir mit einem aus Eigenmitteln finanzierten Sonderprogramm kooperative Promotionen, bei denen in unseren Laboren geforscht wird, fördern.

Sehr geehrter Herr Prof. Dr. Eckstein vielen Dank für das Interview.

Jede vierte Flasche weltweit

wurde von einer KRONES Anlage befüllt, etikettiert oder verpackt. Denn clevere Ideen und technische Visionen haben uns längst zum Weltmarktführer für Getränketechnologie gemacht. Damit das auch in Zukunft so bleibt, suchen wir Menschen, die ihr Talent, ihre Neugier und ihren Tatendrang mit uns teilen. Als Gegenleistung bieten wir: spannende Karrierewege, attraktive Sozialleistungen und ein einmaliges Betriebsklima.

Mehr über Ihre Möglichkeiten bei uns erfahren Sie auf www.krones.com sowie auf Facebook oder Xing.

Die KRONES AG

- Mehr als 10.000 Mitarbeiter
- Im M-Dax notierte Aktiengesellschaft
- Stammsitz: Neutraubling bei Regensburg
- Globales Vertriebs- und Servicenetz
- Kunden: namhafte Unternehmen aus der internationalen Getränke-, Lebensmittel-, Chemie-, Pharma- und Kosmetik-Industrie



www.krones.com

 **KRONES**

WWW.HANDWERK.DE

Die kurze Geschichte des Handwerks: Rad erfunden, Pyramiden gebaut, Mars erkundet, Abfluss repariert.

Alles begann vor ca. 2,4 Millionen Jahren mit der Herstellung und Anwendung der ersten Werkzeuge in der Steinzeit. Heute ist das Handwerk mit mehr als 4,8 Millionen Beschäftigten einer der größten Wirtschaftsbereiche Deutschlands. Jedes Jahr werden über 450.000 Lehrlinge in 151 Berufen ausgebildet. Denn handwerkliches Know-how ist gefragter denn je, selbst in der modernen Raumfahrt-technik. Aber keine Sorge, um irdische Probleme kümmern wir uns auch weiterhin. Überzeugen Sie sich selbst: www.handwerk.de

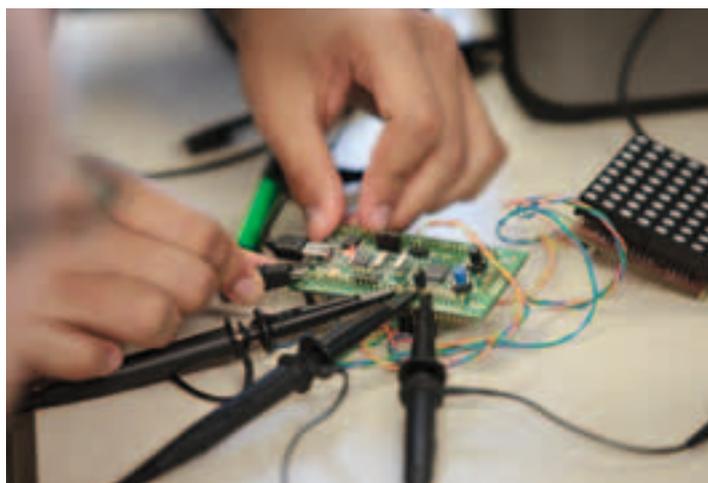
DAS HANDWERK
DIE WIRTSCHAFTSMACHT. VON NEBENAN.



INTENCE
LEBENSWEISE ENERGIE

Bruderwöhrdstraße 29
93055 Regensburg

Tel.: 09 41/280 460 0
Fax: 09 41/280 460 60
E-Mail: info@intence.de



 **Fraunhofer**
IIS



ZIEL: FRAUNHOFER!

Ein Navi für Fußgänger – das wär doch was! Am besten eines, das auch in engen Gassen, Gebäuden oder in der U-Bahn den Weg findet. Da sind wir schon nahe dran. Derzeit testet das Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS eine neue WLAN-Lokalisierung, die all das können soll.

Mit vielen anderen Ideen stehen wir erst am Anfang. Deshalb brauchen wir weiterhin zielstrebige Absolventen und Praktikanten (m/w) in den Bereichen Audio und Multimedia, Bildsysteme, digitaler Rundfunk, Kommunikationstechnik, Lokalisierung, IC-Entwicklung sowie Medizin- und Röntgentechnik.

WWW.IIS.FRAUNHOFER.DE

ALLGEMEINWISSENSCHAFTEN/MIKROSYSTEMTECHNIK

Photoakustische Detektion von Stickstoffdioxid (NO₂) im Sub-PPM Bereich 11
Dipl. Chem. Thomas Rück, Prof. Dr. Rudolf Bierl

Reinigungseffektivität bei eWLB-Wafern in Abhängigkeit der Wechselwirkung
 zwischen Lösemittel und Substrat..... 18
Prof. Dr. Alfred Lechner, Dipl.-Ing. (FH) Antonia Graf

Theoretische und experimentelle Untersuchungen des Radiometereffekts
 anhand einer Lichtmühle 22
Florian Dams M.Eng., Prof. Dr. Rupert Schreiner

BETRIEBSWIRTSCHAFT

Evaluation des bundesweiten EXIST-priME-Cups-ein planspielbasierter Wettbewerb
 zur Entrepreneurship Education..... 29
Prof. Dr. Eberhard Auchter, Prof. Dr. Willy Kriz

ELEKTRO- UND INFORMATIONSTECHNIK

Effizientes Multicore-Scheduling in Eingebetteten Systemen
 Teil 1: Algorithmen für zuverlässige Echtzeitsysteme 37
 Teil 2: Ein Simulationsbasierter Ansatz zum Vergleich von Scheduling-Algorithmen 46
*Dipl. Ing. (FH) Michael Deubzer, Prof. Dr. Frank Schiller, Prof. Dr. Jürgen Mottok, Prof. Dr. Michael Niemetz,
 Dr. Ulrich Margull*

Konstruktivistische Didaktik – ein Rezept für eine bessere Software Engineering Ausbildung? 56
Prof. Dr. Jürgen Mottok, Prof. Dr. Georg Hagel, Prof. Dr. Matthias Utesch, Prof. Dr. Franz Waldherr

„Regensburger Modell zu den P-Seminaren“ – Ein Konzept zur Gestaltung der Schnittstelle
 Gymnasium – Hochschule und zur Praxis einer kooperativen Lehr-Lern-Didaktik 63
*Prof. Dr. Rudolf Bierl, Dipl.-Inf. (FH) Matthias Böhm, Judith Fraunhofer, Dipl.-Päd. Armin Gardeia,
 Prof. Dr. Jürgen Mottok, Prof. Dr. Ralph Schneider, Janet Streubel*

Software Engineering Lernen für die berufliche Praxis
 – Erfahrungen mit dem konstruktivistischen Methodenbaukasten 72
*Prof. Dr. Georg Hagel, Prof. Dr. Jürgen Mottok, Prof. Dr. Matthias Utesch, Prof. Dr. Dieter Landes,
 Prof. Dr. Reimer Studt*

Feature Selection for the Detection of Fine Motor Movement Disorders in Parkinson’s Patients..... 75
Dipl.-Ing. Dominik Peuker, Prof. Georg Scharfenberg, Prof. Dr. Christian Hook

INHALTSVERZEICHNIS

8

INFORMATIK/MATHEMATIK

Bildfusion und Dekonvolution in der Mikroskopie	81
<i>Prof. Dr. Dietwald Schuster</i>	

MASCHINENBAU

Materialverhalten von Strukturbauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen mit fertigungsbedingten Anomalien unter erschwerten (militärischen) Einsatzbedingungen	86
<i>Prof. Dr.-Ing. Ingo Ehrlich, Dipl.-Ing. Univ. Heinrich Dinnebieer</i>	
Der aerodynamische Widerstand von Seilen	99
<i>Prof. Dr.-Ing. Ulrich Briem, Prof. Dr.-Ing. Stephan Lämmlein</i>	
Entwicklung und Konstruktion einer Vorrichtung zur 2-dimensionalen Ermittlung des Konzentrationsprofils im Abgasstrang	93
<i>Dipl. Ing.(FH) Alexander Koder, Dipl. Ing.(FH) Adam Bialek, Dipl. Ing.(FH) Axel Genewsky, Dipl. Ing.(FH) Michael Neumeier, Dipl. Ing.(FH) Philipp Schlosser, Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Rabl</i>	
Vergleich mehrerer MKS-Programme im Bereich der Fahrdynamik	97
<i>Dipl.-Ing. (FH) Matthias Paule, Dipl.-Ing. (FH) Christoph Galster, Dipl.-Ing. (FH) Michael Schiedermeier, Andreas Zwickel B.Eng. (DHBW), Christoph Hobmeier B.Eng. (DHBW), Dipl.-Ing. (FH) Tobias Bischoff, Prof. Dr.-Ing. Georg Rill, Prof. Dr.-Ing. Thomas Schaeffer</i>	
Entwicklung eines Assistenzroboters für eine Anlage zur Kultivierung menschlicher Zellen in industriellem Maßstab	107
<i>Martin Arbesmeier B.Sc., Andreas Goß B.Sc., Prof. Dr.-Ing. Thomas Schlegl</i>	
Entwicklung experimenteller Methoden zur Evaluierung des biomechanischen Gelenkverhaltens unter hoch variablen Belastungssituationen	112
<i>Mark Becke M.Eng., Prof. Dr.-Ing. Thomas Schlegl</i>	
HF-Simulation zur Optimierung eines Hohlraumresonators für die Preformerwärmung mittels Mikrowellen	118
<i>Dipl.-Ing. (FH) Adam Bialek M. Sc., Dipl.-Phys. Konrad Senn, Prof. Dr.-Ing. Claus Schliekmann</i>	
Simulation des Schwingungsverhaltens eines gekoppelten 3-Walzen-Systems zur Wellpappenherstellung	125
<i>Peter Scholz B.Eng., Prof. Dr.-Ing. Claus Schliekmann</i>	
Simulation zur Dynamik einer Leporellofaltmaschine	133
<i>Dipl.-Ing. (FH) Christian Sippl M. Sc., Prof. Dr.-Ing. Claus Schliekmann</i>	

Sie begeistern sich für **smart solutions**?
Kommen Sie in unser Team!



Wir sind weltweit erfolgreich mit Komponenten für den modernen Haushalt.



Gestalten Sie gemeinsam mit uns die Zukunft.

werner.schwarz@emz-hanauer.com
www.emz-hanauer.com

bayme vbm /

Die bayerischen Metall- und Elektro-Arbeitgeber

ServiceCenter Technologietransfer

Gebündelte Kompetenz für M+E Unternehmen
www.baymevbm.de/sc/technologietransfer

Unterstützung in Ihrer Region und vor Ort

Wir unterstützen unsere Mitgliedsbetriebe in sechs regionalen Geschäftsstellen und bei Ihnen vor Ort. Nehmen Sie Kontakt mit uns auf – die Verbände der bayerischen Metall- und Elektro-Arbeitgeber freuen sich auf Sie!

www.bayme.de/niederbayern-oberpfalz
www.vbm.de/niederbayern-oberpfalz

Innovationen sind wesentlich für den Erfolg von Unternehmen – die Zusammenarbeit mit der Wissenschaft ist dabei von zentraler Bedeutung. Unsere Mitglieder profitieren vom Zugang zu Hochschulen und Forschung und regionalen Plattformen für den anwendungsorientierten Wissenstransfer. Mit unseren Kooperationen unterstützen wir Sie beim Erwerb von Patenten und Lizenzen, unternehmensübergreifender Auftragsforschung und Kontakten zu Geschäftspartnern.

Im ServiceCenter Technologietransfer von bayme vbm erhalten Sie Beratung, Informationen, Schulungen und Networking zu den Handlungsfeldern Patente und Lizenzen, Forschung und Entwicklung, Finanzierung und Fördermittelberatung sowie Informationstechnologie.

bayme vbm – kompetenter beraten, schneller informiert, besser geschult, effektiver vernetzt

INSERENTENVERZEICHNIS

10



MICRO-EPSILON

Mehr Präzision.

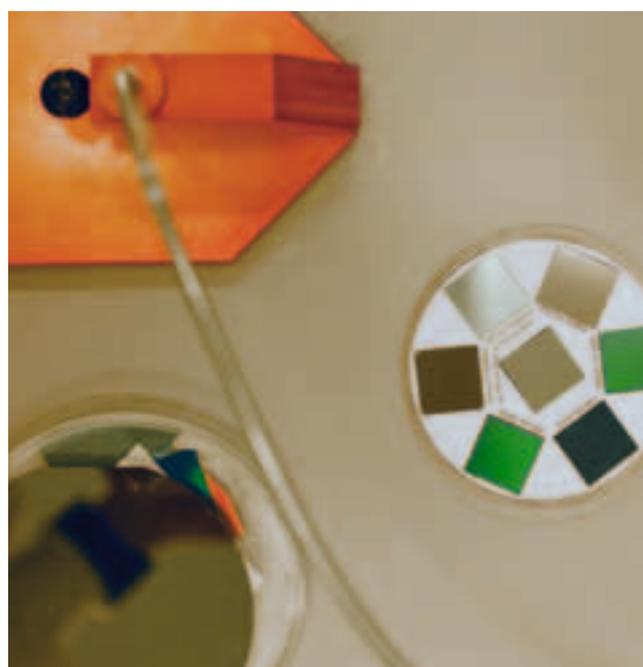
Weltweit führend in der Messtechnik durch mehr Präzision.

- Weg- und Positionsmessung
- IR-Temperatursensoren
- Farbmessetechnik
- Bildverarbeitung
- Prüfanlagen und Systeme

MICRO-EPSILON Messtechnik
 Königbacher Str. 15 | 94496 Ortenburg
 Tel. 08542/168-0 | www.micro-epsilon.de

Liebe Leser! Hier finden Sie eine wertvolle Einkaufshilfe, einen Querschnitt leistungsfähiger Betriebe aus Handel, Gewerbe und Industrie, alphabetisch geordnet. Alle diese Betriebe haben die kostenlose Verteilung Ihrer Broschüre ermöglicht. Weitere Informationen finden Sie im Internet unter www.total-lokal.de.

Groninger	U 2
Hoerbiger	U 2
Krones	5
Das Handwerk	6
Intence	6
Frauenhofer	6
emz	9
bayme vbm	9
Micor-Epsilon	10
REWAG	140
Max Bögl	U 3
e-on Bayern	U 4



PHOTOAKUSTISCHE DETEKTION VON STICKSTOFFDIOXID (NO₂) IM SUB-PPM BEREICH

1 EINLEITUNG

Vor dem Hintergrund der kontinuierlichen Erderwärmung und der wachsenden Belastung für Mensch und Umwelt durch Produkte industrieller Verbrennungsprozesse, sowie den Anstieg atmosphärischer Abgaskonzentrationen, verursacht durch eine vermehrt mobile Gesellschaft, ist es Aufgabe der Europäischen Union, die Freisetzung von Luftschadstoffen zu reglementieren. Seit knapp zwanzig Jahren dekretiert die EU daher unter anderem Grenzwerte hinsichtlich des Ausstoßes von Autoabgasen, die als Euro – Normen bezeichnet werden. Gegenwärtig sieht der Gesetzgeber im Rahmen der Euro – V – Norm für Benzinmotoren beispielsweise eine maximale Stickoxidemission (NO_x) von 60 mg pro gefahrenem Kilometer vor. [1]

Ausgehend von einem Treibstoffverbrauch von 8 Litern pro 100 km entspricht dies als Volumenkonzentration einer durchschnittlichen Emission von maximal 42 ppm (*parts per million*, 10⁶). [2] Verständlicherweise beeinflussen derartig niedrig konzentrierte Schadstoffemissionen die Luftzusammensetzung nur minimal. Um Aussagen darüber treffen zu können, inwiefern sich verschärfte Restriktionen hinsichtlich des Ausstoßes von Schadstoffen auf Veränderungen des Luftanteils von durchschnittlich nur 100 ppb NO_x (*parts per billion*, 10⁹) auswirken [3], sind Messgeräte notwendig, deren Sensitivität eine Detektion solch niedrig konzentrierter Spurengase gewährleisten.

2 PROJEKTBECHREIBUNG

Um dieser Aufgabe gerecht zu werden, entwickelte das Sensorik – ApplikationsZentrum (SappZ) der Hochschule

Regensburg in Kooperation mit der Continental Automotive GmbH Regensburg einen Prüfstand zur Messung von *Stickstoffdioxid* im sub-ppm Bereich. Diesem Prüfstand liegt das physikalische Messprinzip der photoakustischen Spektroskopie zu Grunde, dessen theoretischer Hintergrund im Folgenden dargestellt ist.

3 THEORIE

Die Geschichte der photoakustischen Spektroskopie (PAS) reicht in etwa genauso lang zurück, wie die der bekannten, rein optischen Absorptionsspektroskopie. Der optoakustische Effekt wurde im Jahre 1881 von Alexander Graham Bell entdeckt und untersucht.

3.1 Das Funktionsprinzip

Alle photothermale Techniken beruhen auf einer Photonenanregung des Analyten und anschließender Detektion einer Temperaturänderung oder der Änderung einer anderen thermodynamischen Größe, die ihrerseits mit der Temperatur korreliert. Die direkte Temperaturmessung in der Thermometrie hat im Hinblick auf die Spurenanalytik allerdings einen entscheidenden Nachteil. Gängige Thermolemente sind nicht in der Lage, derart kleine Temperaturschwankungen, wie sie durch Schwingungsspektroskopie von Spurengasen erzeugt werden, zu detektieren. Ein entscheidender Vorteil der modulierten Photoakustik liegt hingegen darin, dass jene lokalen Temperaturschwankungen repetierend initiiert werden, wodurch eine periodische Druckwelle entsteht, die als Schallwelle mit einem Mikrofon nachgewiesen werden kann. Das Funktionsprinzip der photoakustischen Spektroskopie ist im Folgenden schematisch dargestellt.

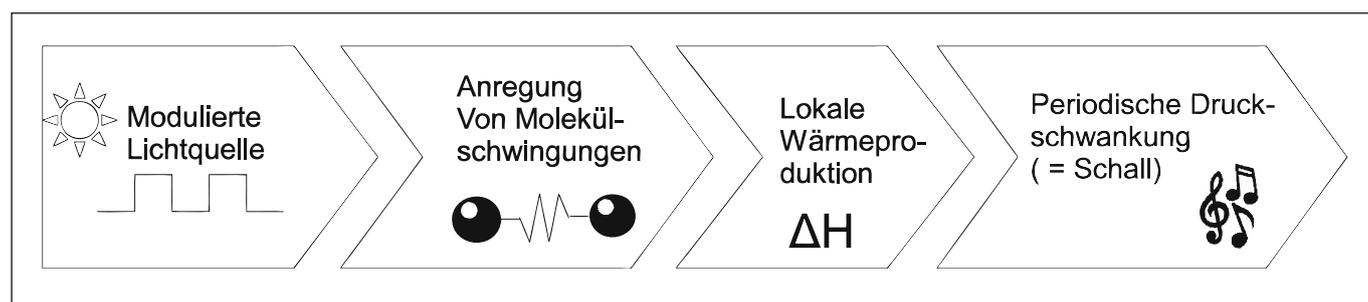


Abb. 1: Schematische Darstellung des Photoakustischen Effekts.

Als Anregungsquellen werden heute meist Lasersysteme oder für miniaturisierte Anwendungen Diodenlaser verwendet. Diese werden entweder mechanisch, durch Einsatz einer rotierenden Lochblende (engl.: *chopper*) moduliert oder elektronisch durch eine Rechteckfunktion angesteuert. Die Frequenz der elektromagnetischen Strahlung wird so gewählt, dass direkt oder indirekt über Relaxation aus einem angeregten elektronischen Zustand Molekülschwingungen im Analyten angeregt werden. Diese vibronischen Zustände werden ihrerseits durch inelastische Stöße mit umgebenden Molekülen entvölkert. Dabei wird ein Teil der inneren Energie der Analytmoleküle in Bewegungsenergie der benachbarten Moleküle umgewandelt, was zu einer lokalen Wärmeproduktion führt. Dieser Wärmeeintrag in das System löst, von dessen Ursprung ausgehend, eine Druckwelle aus. Mit der Modulationsfrequenz der Lichtquelle wiederholt sich dieser exotherme Vorgang und es entsteht eine periodische Druckschwankung, die als Schallwelle detektiert werden kann.

3.2 Das Signal / Rausch – Verhältnis (S/R)

Eine effektive Möglichkeit, das S/R – Verhältnis zu steigern ist die Verwendung eines akustischen Resonators. Ähnlich dem Prinzip einer Orgelpfeife wird als Resonator ein beidseitig offener Zylinder verwendet, in dem sich eine stehende Schallwelle (1. Longitudinalmode) ausbildet. Entsprechend dem allgemeinen Prinzip der Resonanz bewirkt dies eine Verstärkung des Schallsignals durch konstruktive Interferenz. Die Modulationsfrequenz der Lichtquelle, die der Frequenz des Schallsignals entspricht, ist dann festgelegt durch die Abmessungen des Resonators.

Es gilt
$$L = \frac{\lambda}{2}$$

und
$$v_s = f \cdot \lambda$$

Für die Modulationsfrequenz folgt
$$f = \frac{v_s}{\lambda} = \frac{v_s}{2L}$$

Darin ist L die Länge des Resonators, λ die Wellenlänge des Schallsignals, v_s die Schallgeschwindigkeit und f die Modulationsfrequenz.

Diese Longitudinalmode wird durch einen mittig durch den Resonator strahlenden Laser ebenso angeregt, wie durch einen seitlich angebrachten, sich periodisch bewegenden

Kolben. Da der zweite Prozess jedoch anschaulicher ist, ist er im Folgenden bildlich dargestellt.

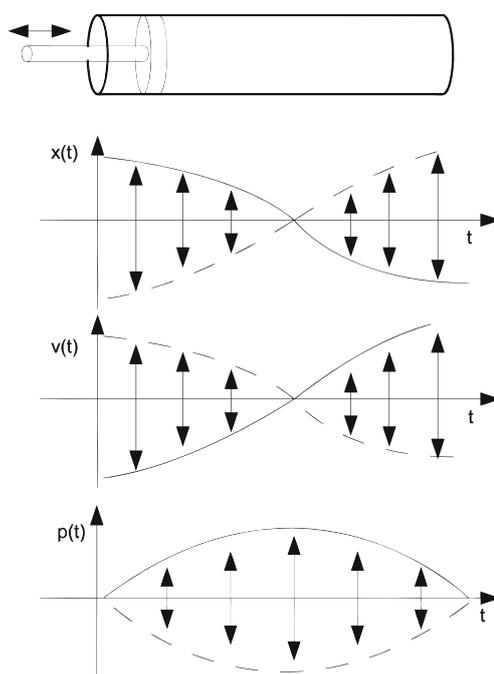


Abb. 5: Stehende Schallwellen in einem Zylinder.

Darin ist das zeitliche Verhalten der relativen Auslenkung $x(t)$ bzw. Geschwindigkeit $v(t)$ der Teilchen, sowie das der lokalen Druckschwankung $p(t)$ veranschaulicht.

Eine weitere Steigerung des S/R – Verhältnisses wird durch die Verwendung eines Lock – In Verstärkers in der Signalverarbeitung erreicht. Ohne genauer auf dessen Funktionsweise einzugehen, sei erwähnt, dass er als sehr schmalbandiger Bandpass fungiert. Lock – In Verstärker ermöglichen die Verwertung von Wechselspannungen bis in den Nanovoltbereich, während das elektronische Rauschen einige Größenordnungen darüber liegen kann, vorausgesetzt es existieren keine zum Messsignal äquifrequenten Störanteile.

Für die Amplitude des photoakustischen Signals $|p(r,t)|$ gilt

$$|p(r,t)| = N \sigma I_0 \frac{\gamma}{C_p} |Z(r,t)|$$

mit der Zellkonstante

$$|Z(r,t)| = \frac{L}{V} \cdot F \cdot \rho(r) \cdot \frac{Q}{\omega}$$

(Darin ist N die Teilchendichte und σ der Absorptionsquerschnitt der betreffenden Spezies, I_0 die Intensität der verwendeten Lichtquelle, γ der thermische Volumenausdehnungskoeffizient, C_p die isobare Wärmekapazität, L bzw. V die Länge bzw. das Volumen des Resonators und ω die Kreisfrequenz der Modulation. Der Term F umfasst das Strahlprofil und die Modulationsfunktion, $p(r)$ beschreibt die Verteilungsfunktion der entsprechenden Eigenmode und Q ist der Qualitätsfaktor der Resonanzverstärkung.

4 EXPERIMENTELLES

4.1 Der Messaufbau

Der Versuchsaufbau kann schematisch unterteilt werden in Gaslauf, optischen Pfad und Elektronik. Die folgende Abbildung zeigt ein vollständiges Blockschema, in dem diese

drei Bereiche farblich voneinander abgegrenzt werden. Der Gaslauf ist braun, der optische Pfad blau und der Verlauf elektronischer Signale rot dargestellt. Die drei Komplexe sind selbstverständlich nicht als autark zu verstehen, sondern die Farbcodierung dient lediglich der Übersicht.

Als Testgas wird eine Mischung von 192 ppm NO_2 in synthetischer Luft verwendet, die mit Hilfe eines Nadelventils weiter verdünnt werden kann. Anschließend passiert das Gas einige Sekundärsensoren, die in der Reihenfolge ihrer Aufzählung den Gasfluss, die Temperatur, den Druck und die relative Feuchte des Gases detektieren, bevor dieses zur photoakustischen Detektion in die Messzelle gelangt. Im Anschluss an die Zelle ist ein Referenzsensor zur Bestimmung der tatsächlichen NO_x – Konzentration in den Gaslauf integriert, ehe dieses den Messaufbau schließlich als Abluft verlässt.

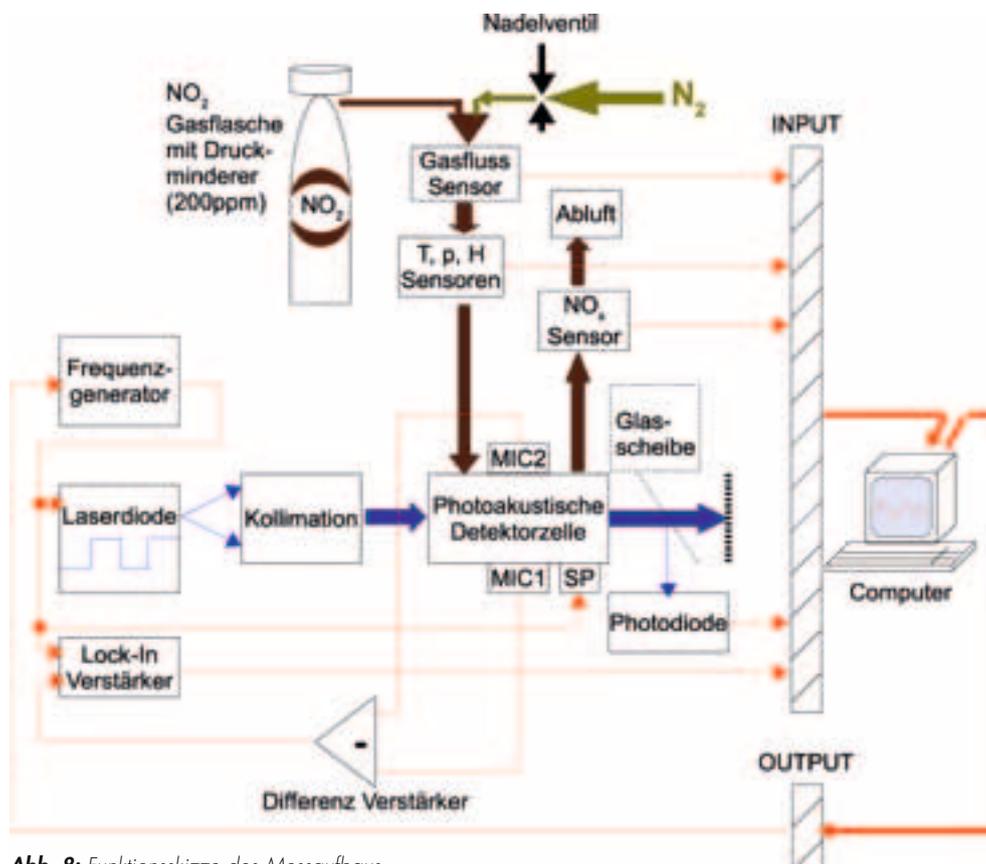


Abb. 8: Funktions-skizze des Messaufbaus.

14

Der optische Pfad beginnt mit einem blauen Diodenlaser, der bei einer Wellenlänge von $\lambda = 450 \text{ nm}$ mit einer maximalen optischen Ausgangsleistung von $P = 80 \text{ mW}$ emittiert. Auf Grund der bei Laserdioden üblichen hohen Divergenz der emittierten Strahlung ist es notwendig, diese vor Eintritt in die Messzelle zu kollimieren. Nach Passieren der optoakustischen Detektorzelle wird ein Teil der Strahlung (ca. 4 %) an einem Mikroskopierglas reflektiert und dessen Intensität mit Hilfe einer Photodiode gemessen.

Während alle elektronischen Signale der Sekundärsensoren über verschiedene Schnittstellen direkt an den Messcomputer übergeben und mit Hilfe eines in LabVIEW geschriebenen Messprogramms verarbeitet werden, wird das eigentliche akustische Messsignal von einem Mikrofon, wie es in handelsüblichen Hörgeräten verwendet wird, detektiert und als analoges Spannungssignal an einen externen Lock-In-Verstärker übermittelt.

4.2 Die Detektorzelle

Der eigentliche photoakustische Effekt findet in der Detektorzelle statt, die im Folgenden als Funktionsskizze dargestellt ist.

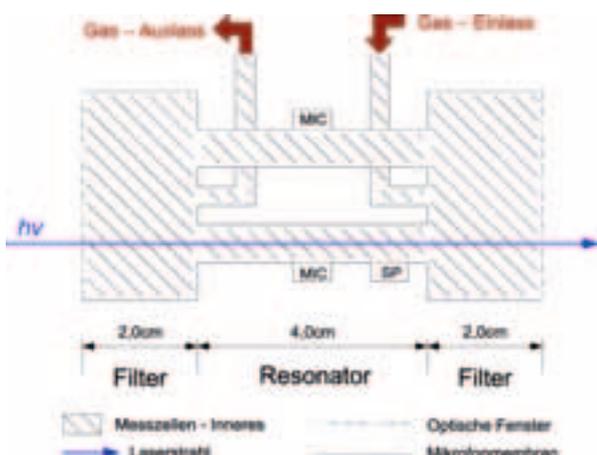


Abb. 9: Skizze der Messzelle.

Die Messzelle ist aus Edelstahl gefertigt, wobei in beide Enden optische Fenster eingepasst sind, um Transparenz gegenüber dem einfallenden Laserstrahl zu gewährleisten. Sie besteht aus zwei Puffervolumina (Filter), zwei Resonatoren, sowie einem Gaseinlass und einem Gasauslass.

Bedingt durch die Länge des Resonators von $L = 4 \text{ cm}$ und einer Schallgeschwindigkeit bei Raumtemperatur ($T = 25 \text{ °C}$) von $v_s = 346 \text{ m/s}$ ergibt sich die Resonanzfrequenz der Messzelle zu $f = 4329 \text{ Hz}$.

Die Filterlängen der Messzelle sind justierbar und dienen dazu, eventuelle Störgeräusche, die durch den Gasfluss verursacht werden und äquifrequent zum Messsignal sind, mittels destruktiver Interferenz zu eliminieren.

Während der Laserstrahl ausschließlich den unteren abgebildeten Resonator passiert und dort einen optoakustischen Effekt initiiert, dient der obere Resonator lediglich der Aufnahme von Störgeräuschen, die anschließend mit Hilfe eines Differenzverstärkers vom eigentlichen Messsignal subtrahiert werden können. Der zusätzlich integrierte Lautsprecher (Sp) ist kein notwendiger Bestandteil der photoakustischen Messung. Er wird dazu verwendet, das Resonanzspektrum der Zelle durch ausschließlich akustische Anregung spezifizieren zu können.

5 SPEZIFIKATIONEN

5.1 Resonanzprofil der Messzelle

Zur Bestimmung der Güte des Resonators wurden dessen Enden mit Aluminiumplättchen verschlossen und mit Hilfe des integrierten Lautsprechers das Frequenzspektrum von 2 kHz bis 5 kHz bestimmt. Die Resonanzbedingung für einen beidseitig geschlossenen Resonator entsprechen denen eines beidseitig offenen Systems.

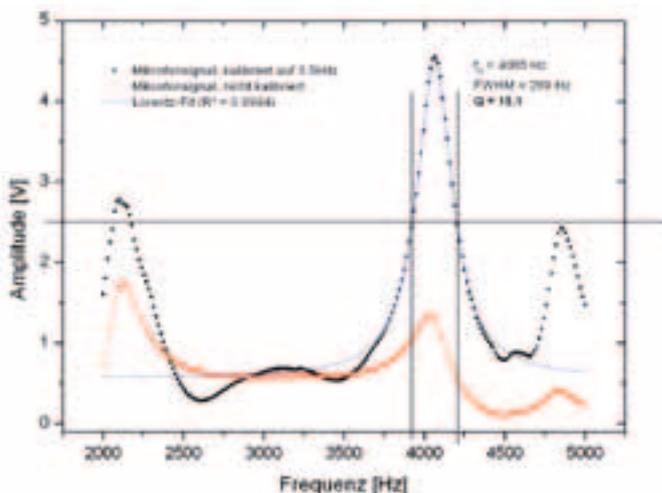


Abb. 10: Resonanzprofil der Messzelle.

Mit der gemessenen Resonanzfrequenz von $f = 4065$ Hz und einer Halbwertsbreite von $FWHM = 269$ Hz wird gemäß

$$Q = \frac{f}{FWHM}$$

ein Qualitätsfaktor von $Q = 15,1$ berechnet.

Des Weiteren wurde eine Testreihe zur Einflussanalyse der Filterlängen durchgeführt.

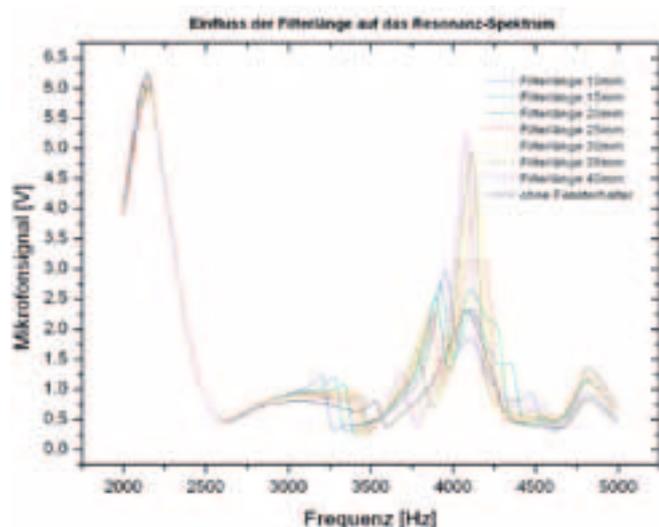


Abb. 12: Einfluss der akustischen Filterlängen auf das Resonanzprofil der Messzelle.

Erwartungsgemäß ändert sich die Frequenz der Longitudinalschwingung durch Variation der Filterlänge kaum, während die Amplitude mit der Größe der Puffervolumina zunimmt. Alle weiteren Resonanzen in obiger Abbildung sind anderen Ursprungs und sollen in diesem Kontext nicht weiter diskutiert werden.

5.2 Ansprechzeit vs. Streuung

Die Ansprechzeiten des Sensorsystems und die Konstanz der Messwerte verhalten sich gegenläufig und werden maßgeblich durch einen Konfigurationsparameter am Lock-In Verstärker, die Integrationszeit t_C , determiniert. Kürzere Integrationszeiten bewirken schnellere Ansprechzeiten des Sensors, jedoch auf Kosten stärker streuender Messwerte. Vor dem Hintergrund, die ideale Integrationszeit zu bestimmen werden in den folgenden Abbildungen drei Messreihen für $t_C = 0,3$ s, $t_C = 1$ s und $t_C = 3$ s verglichen.

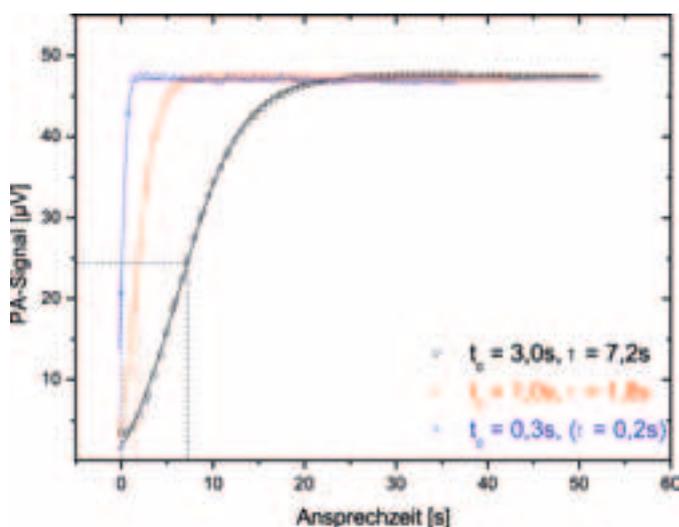


Abb. 13: Ansprechzeiten des Sensorsystems für drei unterschiedliche Integrationszeiten am Lock-in Verstärker.

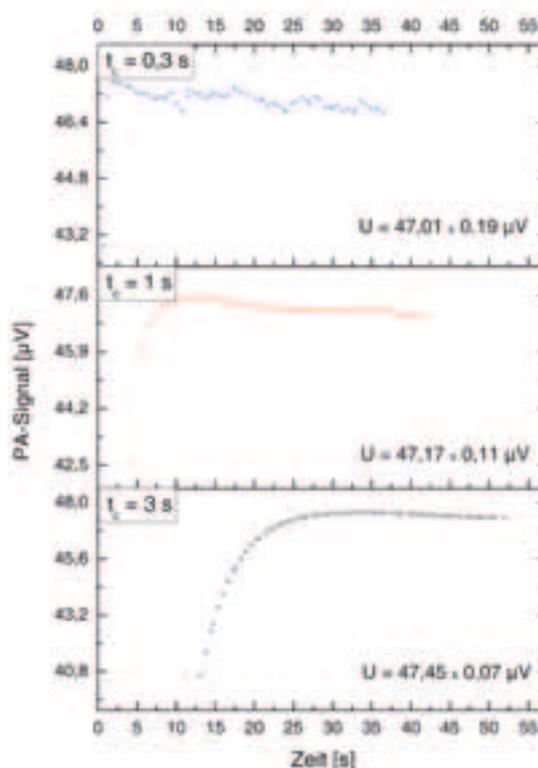


Abb. 14: Steuerung der Messwerte für drei unterschiedliche Integrationszeiten am Lock-in Verstärker.

Die Ansprechzeiten, Mittelwerte und Standardabweichungen sind den obigen Auftragsungen zu entnehmen. Als Fazit der Testreihe wurde eine Integrationszeit von $t_C = 1\text{ s}$ als guter Kompromiss bezüglich Ansprechzeit und Streuung erachtet und im Hinblick auf weitere Messungen beibehalten.

5.3 Einfluss der Laserleistung

Wie bereits erwähnt, ist die Amplitude des photoakustischen Signals direkt proportional zur Intensität der verwendeten Lichtquelle. Da die Intensität das Verhältnis der Leistung der Lichtquelle zum Querschnitt des Laserstrahls beschreibt, ist auch der funktionale Zusammenhang zwischen Schallamplitude und Laserleistung linearer Natur. Diese Linearität wurde mittels eines optischen Filters nachgewiesen, auf Grund dessen Gradienten – Beschichtung nur ein gewisser Anteil der Strahlung transmittiert, und der Rest reflektiert wird. Je nachdem, wie dieser Filter in den Strahlengang montiert wird, kann das Verhältnis von Transmission zu Reflexion variiert werden.

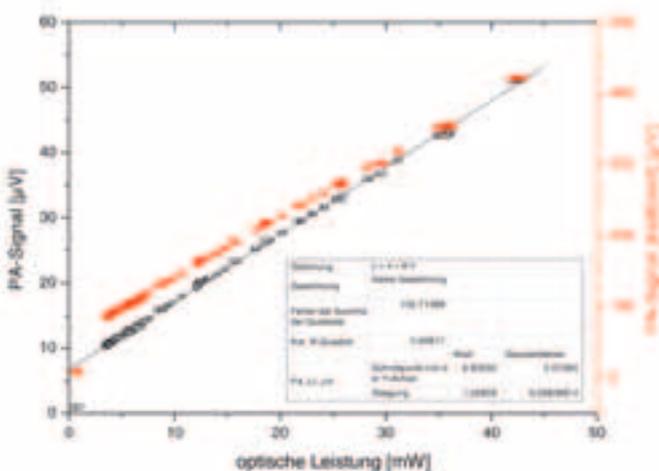


Abb. 15: Das photoakustische Signal als Funktion der optischen Leistung der Lichtquelle.

Die graphische Darstellung des photoakustischen Signals als Funktion der Laserleistung verifiziert dessen linearen Zusammenhang.

5.4 Detektionslimit

Um eine konzentrationsabhängige Messung des photoakustischen Signals zu ermöglichen, wurde das verwendete Spurengas von 192 ppm NO_2 in synthetischer Luft weiter verdünnt. Zu diesem Zweck wurde reiner Stickstoff über ein Nadelventil dosiert beigemischt.

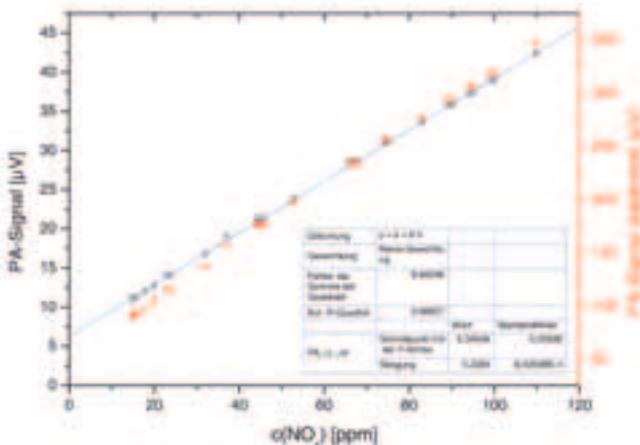


Abb. 16: Das photoakustische Signal als Funktion der Stickstoffdioxid Konzentration.

Das Resultat der Messreihe ist eine lineare Ausgleichsgerade, die durch eine Güte von $R^2 = 0,99927$ und eine Steigung von 328 nV pro ppm NO_2 gekennzeichnet ist. Ein exaktes Detektionslimit kann in diesem Kontext allerdings nicht angegeben werden, da das Hintergrundsignal in Abwesenheit der absorbierenden Spezies NO_2 6,11 μV beträgt, während die Extrapolation der Ausgleichsgerade für eine Konzentration von 0 ppm ein Signal von 6,35 μV liefert. Demzufolge wird ein negatives Detektionslimit des Sensorsystems berechnet, welches aus physikalischer Sicht nicht sinnvoll ist und der mangelnden Sensitivität des Referenzsensors zuzuschreiben ist. Es kann jedoch zumindest ein minimal detektierbarer Volumenanteil an NO_2 von $c_{\min} < 1$ ppm angegeben werden, der hinsichtlich des Einsatzes photoakustischer Messsysteme durchaus realistisch ist. [4 – 10]

Prof. Dr. rer. nat. Rudolf Bierl

Tel.: 0941 943-9761

Fax: 0941 943-1252

rudolf.bierl@hs-regensburg.de / www.sappz.de

6 FAZIT

Die Analyse der Messreihen identifiziert die photoakustische Spektroskopie als vielversprechende Methode zur Detektion von *Stickstoffdioxid* im sub-ppm Bereich. Ein wesentlicher Vorteil gegenüber der gängigeren rein optischen Absorptionsspektroskopie besteht darin, dass die Photoakustik eine direkte Messmethode darstellt, weswegen sie nicht auf lange Absorptionswege in dementsprechend großen Messzellen oder komplexe Spiegelsysteme angewiesen ist. Außerdem bietet sich die PAS zur simultanen Detektion unterschiedlicher Analyte an, da lediglich die Lichtquelle entsprechend variiert werden muss, während Elektronik, Messzelle und Detektor von der Wahl der zu detektierenden Spezies nicht betroffen sind.

LITERATUR

- [1] Stefan Schultz, *EU-Parlament beschließt strengere Abgasnormen*, Der Spiegel, 13.12.2006
- [2] Thomas Rück, *Diplomarbeit*, Universität Regensburg, 2010
- [3] A.F. Holleman, E. Wiberg, *Lehrbuch der Anorganischen Chemie*, 1995, 101. Auflage, S. 518
- [4] G.D. Santiago, M.G. Gonzalez, A.L. Peiriot et al., *Blue light-emitting diode-based, enhanced resonant excitation of longitudinal acoustic modes in a closed pipe with application to NO₂*, Review of Scientific Instruments, 77, 2006
- [5] M.G. Da Silva, H. Vargas, A. Miklos, P. Hess, *Photoacoustic detection of ozone using a Quantum Cascade Laser*, Appl. Phys. B 00, 1–4 (2004)
- [6] A. Schmohl, A. Miklos, P. Hess, *Detection of ammonia by photoacoustic spectroscopy with semiconductor lasers*, Appl. Opt., 41, 9, 2002, 1815-1825
- [7] A. Miklos, C.H. Lim, W.W. Hsiang, *Photoacoustic measurement of methane concentrations with a compact pulsed optical parametric oscillator*, Appl. Opt., 41, 15, 2002, 2985-2994
- [8] V.B. Slezak, A.L. Peuriot, M.G. Gonzalez, G.D. Santiago, *Background subtraction in pulsed photoacoustics through neural-network processing*, Appl. Opt., 46, 23, 2007, 6042-6047
- [9] D. Costopoulos, A. Miklos, P. Hess, *Detection of N₂O by photoacoustic spectroscopy with a compact, pulsed optical parametric oscillator*, Appl. Phys. B, 75, 2002, 385-389
- [10] G. Santiago, V. Slezak, A.L. Peuriot, *Resonant photoacoustic gas sensing by PC-based audio detection*, Appl. Phys. B, 77, 463-465, 2003

ALLGEMEINWISSENSCHAFTEN / MIKROSYSTEMTECHNIK

A. LECHNER, A. GRAF

REINIGUNGSEFFEKTIVITÄT BEI EWLB-WAFERN IN ABHÄNGIGKEIT DER WECHSELWIRKUNG ZWISCHEN LÖSEMITTEL UND SUBSTRAT

EINLEITUNG

Die Halbleiterindustrie steht vor der großen Herausforderung die Gehäusegrößen zu reduzieren, die Zulieferkette zu vereinfachen und die Gesamtkosten zu senken. Um dies zu erreichen, investiert die Industrie in die Entwicklung neuer Technologien. Eine dieser Technologien ist die embedded-Wafer-Level-Ball-Grid-Array-Technologie (eWLB-Technologie). Hierbei wird ein fertig prozessierter Wafer gesägt und die einzelnen Chips mittels eines Pick and Place Tools auf einem „Thermo Release Tape“ befestigt. Die Zwischenräume und der Randbereich werden nun mit flüssiger Moldmasse, die hauptsächlich aus SiO₂-Fillern, Epoxidharz und Härter besteht, aufgefüllt. Nach dem Aushärten ist dann ein neuer Wafer entstanden. Bei der Herstellung des Wafers entstehen z. B. beim Ablösen des Tapes Moldpartikel, die sich auf dem Wafer ablagern.

An der Hochschule Regensburg sollte eine geeignete Reinigungschemikalie für die Entfernung der Moldpartikel gefunden werden.

THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Hamaker-Konstante:

Für Reinigungsversuche ist die van-der-Waals-Kraft von großer Bedeutung. Die Hamaker-Konstante A_{132} bestimmt die Höhe der Kraft. Diese berechnet sich aus den Dielektrizitätskonstanten der Feststoffe ϵ_1 und ϵ_2 sowie der Flüssigkeit ϵ_3 und deren Brechungsindizes n_1 , n_2 und n_3 (siehe Gleichung 1) [1]:

$$A_{132} \approx \frac{3}{4} \cdot k_B \cdot T \cdot \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_3) \cdot (\epsilon_2 - \epsilon_3)}{(\epsilon_1 + \epsilon_3) \cdot (\epsilon_2 + \epsilon_3)} + \frac{3}{8 \cdot \sqrt{2}} \cdot h \cdot v_e \cdot \frac{(n_1^2 - n_3^2) \cdot (n_2^2 - n_3^2)}{\sqrt{n_1^2 + n_3^2} \cdot \sqrt{n_2^2 + n_3^2} \cdot (\sqrt{n_1^2 + n_3^2} + \sqrt{n_2^2 + n_3^2})} \quad (1)$$

Ist die Hamaker-Konstante A_{132} des Systems kleiner Null, so findet eine Abstoßung der Feststoffe aufgrund der van-der-Waals-Kräfte statt. Bei Werten gleich Null treten keine van-der-Waals-Kräfte auf und ist sie größer Null, so kommt es zur Anziehung [1].

Gleichung (1) definiert die Abhängigkeit der van-der-Waals-Kräfte von der Dielektrizitätskonstante. Dies hat später bei der Versuchsbeschreibung eine große Bedeutung.

Hansen Solubility Parameter:

Die Hansen Solubility Parameter bieten eine andere Möglichkeit das Verhalten von Chemikalien vorherzusagen. Diese Parameter sagen aus, ob ein Material ein anderes lösen kann, basierend auf dem Grundsatz „Ähnliches löst sich in Ähnlichem“ [2].

Hildebrand definierte den Löslichkeitsparameter δ als die Quadratwurzel der Kohäsionsenergiedichte C [3]:

$$\delta = \sqrt{C} \quad (2)$$

Hansen entwickelte daraus ein System mit drei Parametern. Dabei erfolgt eine Unterteilung der Kohäsionsenergie in drei Teilparameter, d.h. jedes Molekül erhält drei Hansen Parameter [3].

$$\delta^2 = \delta_d^2 + \delta_p^2 + \delta_h^2 \quad (3)$$

δ_d beschreibt die Energie der Dispersionskräfte zwischen den Molekülen, δ_p die Energie der dipolaren, intermolekularen Kräfte und δ_h die Energie der Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Molekülen [3].

Mit dieser Theorie konnte die Reinigungswirkung der Chemikalien erklärt werden.

VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Chemikalienauswahl:

Die Chemikalienauswahl erfolgte unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten ϵ . Diese wurden mit dem TDR-5000 der Firma Zadow Electronics bestimmt. Das Messgerät ist speziell für die Messung der Dielektrizitätskonstante von Flüssigkeiten geeignet. Die Messergebnisse werden in Tabelle 1 dargestellt.

Chemikalie	Reinigungs-wirkung in %	Dielektrizitäts-konstante ϵ	δ_d	δ_p	δ_h
Aceton	6,7	23,6	15,5	10,4	7,00
Methanol	6,9	32,8	15,1	12,3	22,3
ProTech 5	7,3	18,9	-	-	-
Acetaldehyd	9,7	27,2	14,7	12,5	7,90
Ethylenglycol	10,1	42,8	17,0	11,0	26,0
NMP	10,7	34,6	18,0	12,3	7,20
Dimethyldiketon	10,9	3,80	15,7	5,30	11,7
DMSO	13,6	47,2	18,4	16,4	10,2
Tetrachlorkohlenstoff	15,4	1,99	16,1	8,30	0
Benzol	16,6	1,99	18,4	0	2,00
Chloroform	22,9	4,28	17,8	3,10	5,70
Xylol	23,4	1,99	17,7	1,00	3,10
IGEPAL	26,0	4,70	-	-	-
Naphthalin	29,0	2,16	19,2	2,00	5,90
Octylamin	33,2	2,82	-	-	-
Toluol	37,4	2,16	18,0	1,40	2,00

Tabelle 1: Reinigungswirkung mit zusätzlicher Angabe der Dielektrizitätskonstanten und den Hansen Parametern [2]

Versuchsaufbau:

Abbildung 1 enthält den Versuchsaufbau. Ein Becherglas mit Magnetrührstab befand sich auf einer Magnetrührplatte. Der zu reinigende Chip wurde mit der Oberfläche nach unten in die Halterung eingelegt. Die Chiporientierung soll die Wahrscheinlichkeit, dass sich bereits gelöste Partikel erneut auf der Oberfläche ablagern, verringern.



Abb. 1: Versuchsaufbau

Versuchsbeschreibung:

Zu Beginn jedes Versuches erfolgte eine Betrachtung des Chips unter dem Lichtmikroskop und die Erstellung von Mikroskopaufnahmen. Anschließend wurde der Chip in die Halterung eingesetzt und diese in ein Becherglas, in dem sich das zu untersuchende Lösemittel befand, eingehängt. Die Reinigungszeit betrug 30 Minuten. Während dieser Zeit bewegte sich der Magnetrührstab mit maximaler Geschwindigkeit (ca. 300 rpm). Nach Ablauf der Reinigungszeit wurde die Halterung vom Becherglas entfernt und diese mit

VE-Wasser abgespült, um die Chemikalienreste zu entfernen. Nach Entnahme des Chips aus der Halterung erfolgte eine Trocknung mit Isopropanol. Abschließend fand wiederum eine Betrachtung des Chips unter dem Lichtmikroskop und die Aufnahme der Bilder an den gleichen Positionen statt.

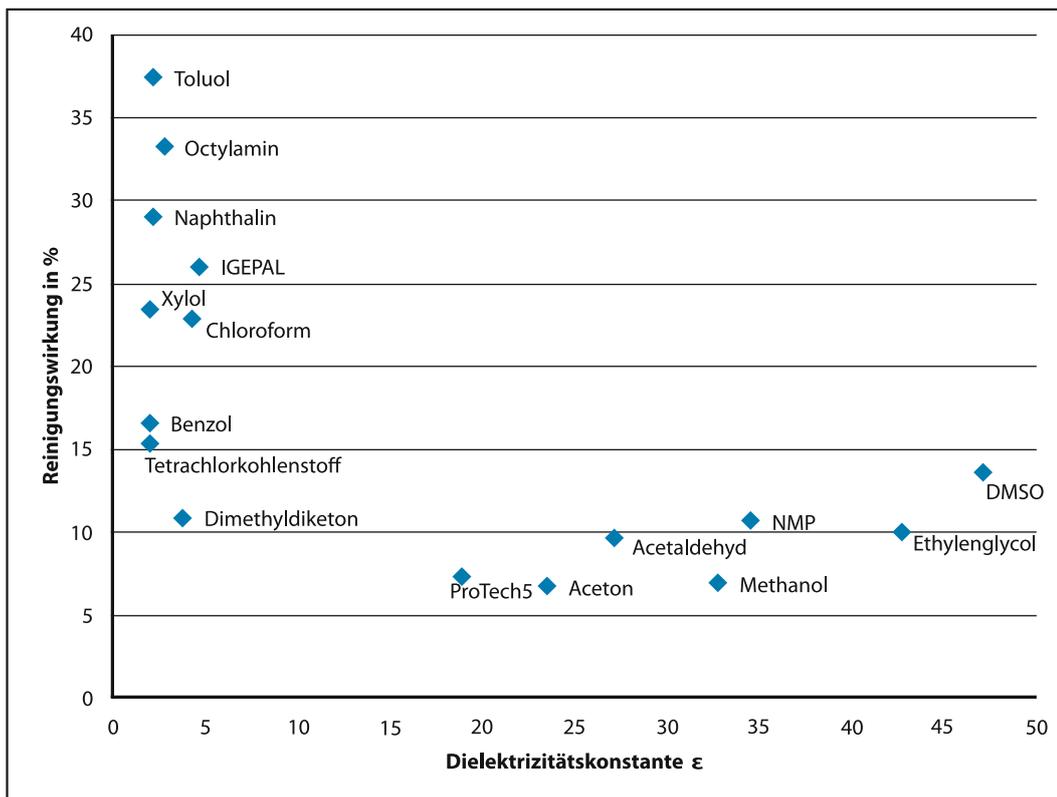


Abb. 2: Reinigungswirkung der verschiedenen Lösemittel in Abhängigkeit von der Dielektrizitätskonstante.

Versuchsauswertung:

In die Vorher-/Nachheraufnahmen wurden Quadrate eingefügt, die sich in dem Bild vor und nach der Reinigung an der gleichen Position befinden. In diesen Bereichen erfolgte die manuelle Auszählung der Partikel, um daraus die prozentuale Reinigungswirkung jeder Chemikalie zu berechnen.

Ergebnis:

Abbildung 2 veranschaulicht den Vergleich der Reinigungswirkung (Anzahl der Partikel nach der Reinigung : Anzahl der Partikel vor der Reinigung * 100%) aller verwendeten Lösemittel. Daraus geht hervor, dass eine bessere prozentuale Reinigungswirkung auftritt, wenn sich die Dielektrizitätskonstante der Chemikalie zwischen 1 und 5 befindet.

Tabelle 1 enthält die Hansen Parameter der Chemikalien. Die Werte für Octylamin, IGEPAL und ProTech 5

sind nicht bekannt. Betrachtet man die Hansen Parameter, fällt auf, dass eine bessere Reinigungswirkung erfolgte, wenn der polare und der wasserstoffbrückenbildende Anteil des Löslichkeitsparameters im unteren Bereich liegt. Dies erklärt auch, warum Tetrachlorkohlenstoff und Dimethyldiketon eine schlechtere Reinigungswirkung zeigten, obwohl sich ihre Dielektrizitätskonstanten im Bereich zwischen 1 und 5, d.h. in der Nähe der Dielektrizitätskonstante von 3,2 der Moldpartikel befanden.

In einer weiteren Versuchsreihe, erfolgte eine Überprüfung der Aussagekraft der in Abbildung 2 erhaltenen Reinigungswirkungen. Dazu erfolgte eine mehrmalige Wiederholung des Versuchs pro Chemikalie und eine Erhöhung der Anzahl der auszuwertenden Quadrate. Dadurch konnte gezeigt werden, dass die Moldpartikel mit Octylamin am Besten entfernt werden können. Unterstützt man die Reinigung mit Megasonic, verdreifacht sich die Reinigungseffizienz. Dies zeigt Abbildung 3.

Prof. Dr. rer. nat., Dipl.-Chem. Alfred Lechner

Tel.: 0941 943-1271

Fax: 0941 943-1252

alfred.lechner@hs-regensburg.de

www.nanochem.de

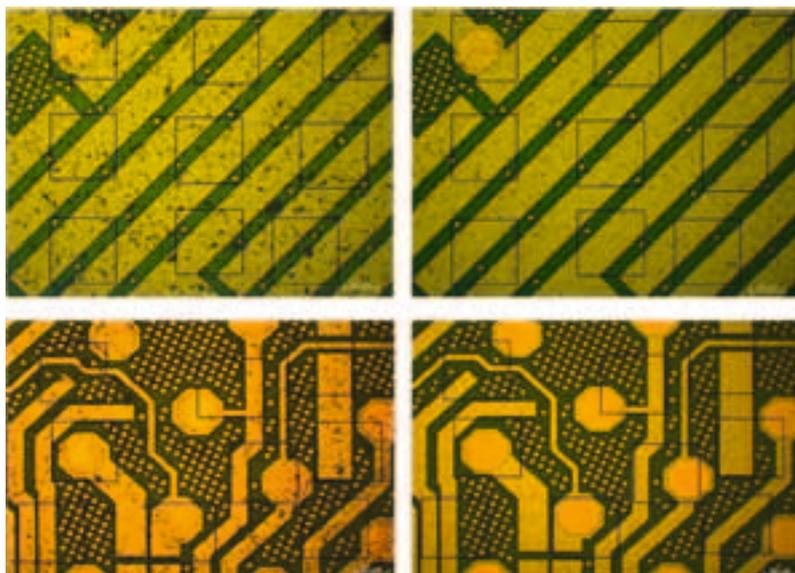


Abb. 3: Dargestellt ist ein Chipausschnitt vor (links im Bild) und nach (rechts im Bild) der Reinigung. Durch manuelle Auswertung der Quadrate ergibt sich die Reinigungswirkung. Oben: Reinigung mit Octylamin. Unten: Reinigung mit Octylamin unterstützt durch Megasonic. Die Reinigungswirkung konnte mit Hilfe von Megasonic deutlich verbessert werden

ZUSAMMENFASSUNG

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Dielektrizitätskonstante des Lösemittels eine wichtige Größe darstellt, welche die Effizienz des Entfernens der Partikel ($\epsilon=3,2$) von der Substratoberfläche wiedergibt. Eine genauere Aussage über die Reinigungswirkung liefert der Vergleich der Hansen Solubility Parameter. Besonders effektiv bei der Partikelenfernung zeigte sich Octylamin mit einer Dielektrizitätskonstante von 2,82. Durch Unterstützung der Reinigung von Octylamin mit Megasonic, konnte die Reinigungswirkung nahezu verdreifacht werden.

LITERATURVERZEICHNIS

[1] G. Lagaly, O. Schulz, R. Zimehl, *Dispersionen und Emulsionen*. Dr. Dietrich Steinkopff Verlag GmbH & Co. KG Darmstadt, 1997

- [2] Hansen, Charles M. Hansen Solubility Parameters: A User's Handbook. CRC Press. 2nd edition. 2007
- [3] [Online] Gourianova, Svetlana. Strukturelle und thermodynamische Parameter der Phasenmorphologie ultradünner Diblocksopolymerschichten untersucht mittels Rasterkraftmikroskopie. 17. Januar 2003. 16 März 2010]. http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=966515994&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=966515994.pdf

F. DAMS, R. SCHREINER

THEORETISCHE UND EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN DES RADIOMETEREFFEKTS ANHAND EINER LICHTMÜHLE

KURZFASSUNG

Die Lichtmühle ist einer der bekanntesten physikalischen Dekorationsgegenstände. Die Ursache der Kraft, die das Flügelrad bewegt, ist ein druckabhängiger Effekt, der durch die unterschiedlichen Oberflächentemperaturen der Flügel-seiten zustande kommt: der Radiometereffekt. Der Temperaturunterschied und die somit entstehende Kraft sind jedoch messtechnisch nicht direkt zugänglich. Sie sollen, im Rahmen dieser Arbeit, indirekt, zerstörungsfrei experimentell untersucht und bestimmt werden. Mit Hilfe der Auslaufkurven des Flügelrades bei unterschiedlichen Drücken lassen sich Daten über die Reibungskräfte, welche in einer Lichtmühle wirken, gewinnen. Diese müssen bei konstanter Drehzahl mit der antreibenden, durch den Radiometereffekt verursachten Kraft im Gleichgewicht stehen. Die Ergebnisse sollen die theoretischen Vorhersagen über den Radiometereffekt bestätigen können.

1 LICHTMÜHLE UND RADIOMETEREFFEKT

Die Lichtmühle, welche heute vor allem als Dekorationsgegenstand bekannt ist, wurde von William Crookes konstruiert, um den von A.J. Fresnel entdeckten Radiometereffekt genauer zu untersuchen. Sie besteht aus einem Flügelrad, dessen Oberflächen einseitig geschwärzt sind. Dieses ist reibungsarm in einem evakuierten Glaskolben aufgehängt (Abb. 1). Bei Bestrahlung mit Licht dreht sich das Rädchen mit der ungeschwärzten Seite voran.

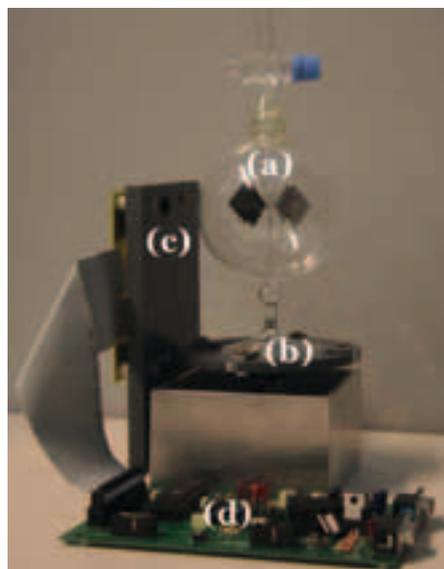


Abb. 1: Versuchsaufbau Drehtellerexperiment mit Lichtmühle (a), Drehteller (b), Sensoren (c), Mikrocontroller (d)

Die Ursache der Kraft, die das Flügelrad bewegt, wurde von namhaften Wissenschaftlern zu Beginn des 20. Jahrhunderts kontrovers diskutiert. Eine noch heute weit verbreitete, aber falsche These besagt, dass der Strahlungsdruck der Photonen für die Bewegung verantwortlich ist. Durch Anwendung des Impulserhaltungssatzes lässt sich zeigen, dass sich das Flügelrad genau in die entgegengesetzte Richtung bewegen müsste. Weiterhin kann mit dieser Theorie der beobachtete Drehzahlverlauf in Abhängigkeit vom Kolbeninnendruck nicht erklärt werden.

Die richtige Erklärung stammt von Martin Knudsen aus dem Jahr 1910 [2]: Wenn der Druck im Inneren so gering ist, dass sich die Restgasmoleküle wechselwirkungsfrei zwischen Kolbenwand und Flügelrad bewegen können (man spricht hierbei von molekularer Strömung), so kann die Radiometerkraft im statischen Zustand über den Impulserhaltungssatz beschrieben werden. Die Moleküle erreichen die geschwärzte, durch den Lichteinfall erwärmte Seite der Flügel mit einer Geschwindigkeit, die von der Wandtemperatur abhängt. Dort nehmen Sie beim Zusammenstoß Energie auf, und werden folglich mit höherer Geschwindigkeit reemittiert. Die Differenz der beiden Impulse wird auf das Flügelrad übertragen, und treibt dieses an. Der Impulsübertrag geschieht also direkt zwischen Behälterwand und Flügelrad. Dies kann demonstriert werden, indem die Lichtmühle selbst drehbar gelagert wird. Der Kolben dreht sich dann in genau die entgegengesetzte Richtung, wie das Flügelrad.

Dieser Mechanismus kommt bei höheren Drücken zum Erliegen, da der Impuls nicht mehr direkt zwischen Wand und Flügel ausgetauscht werden kann, sondern durch die Zusammenstöße der Gasmoleküle untereinander stark behindert wird. Trotzdem ist bei höheren Drücken eine Drehung des Rädchens beobachtbar. Die Ursachen hierfür liegen in Effekten, die an den Flügelrändern wirken [4]. Dies soll aber des Weiteren nicht betrachtet werden.

2 KRÄFTE IN EINER LICHTMÜHLE

2.1 Radiometerkraft

Bei konstanter Drehzahl kann die Radiometerkraft, welche das Flügelrad antreibt, unter Annahme molekularer Strömungsverhältnisse wie folgt beschrieben werden. Die relevanten Temperaturen und Geschwindigkeiten sind in Abb.2 dargestellt.

Die Gasmoleküle erreichen die Flügel von beiden Seiten mit einer Geschwindigkeit v_0 , die durch die Wandtemper-

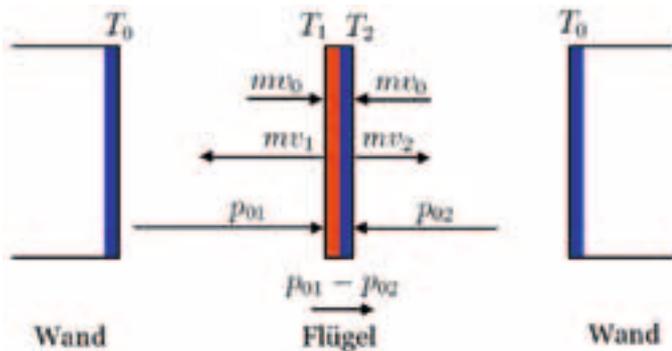


Abb. 2: Relevante Teilchengeschwindigkeiten, Impulsüberträge und Oberflächentemperaturen in einer Lichtmühle (rot: warm, blau: kalt)

atur des Kolbens bestimmt wird. Nach dem Zusammenstoß bewegen sie sich mit der Geschwindigkeit v_1 bzw. v_2 , welche durch die Oberflächentemperatur der Flügelseiten bestimmt wird. Nach dem Impulserhaltungssatz ergeben sich die Impulsüberträge p_{01} und p_{02} , wobei m der Teilchenmasse entspricht:

$$p_{01} = m(v_0 + v_1) \quad p_{02} = m(v_0 + v_2) \quad (1)$$

Nimmt man an, dass sich im Mittel $1/6$ der Teilchen in Richtung des Flügels mit der Fläche A bewegen (gleichmäßige Verteilung der Geschwindigkeitsvektoren in alle Raumrichtungen), so ergibt sich für die Radiometerkraft F_{RM} im zeitlichen Mittel:

$$F_{RM} = \frac{\partial p_{01}}{\partial t} - \frac{\partial p_{02}}{\partial t} = \frac{1}{6} A m (\overline{v_1^2} n_1 - \overline{v_2^2} n_2) \quad (2)$$

Die Produkte $n_1 v_1$ entsprechen einer Teilchenstromdichte. Da keine Anhäufung von Teilchen entstehen kann, müssen diese gleich groß sein. Nimmt man in erster Näherung an, dass die Temperatur der kalten Flügelseite gleich der Umgebungstemperatur T_0 ist, so ergibt sich über die Gaskinetik die Radiometerkraft auf einen Flügel zu:

$$F_{RM} = \frac{1}{2} A p \left(\sqrt{\frac{T_1}{T_0}} - 1 \right) \quad (3)$$

Sie ist direkt proportional zum Druck p und zur Flügeloberfläche A . Für eine Kraft ungleich null ist ein Temperaturunterschied zwischen den Flügeloberflächen und der Behälterwand notwendig.

Das Antriebsmoment M_{RM} , das auf das Flügelrad wirkt berechnet sich somit zu:

$$M_{RM} = 4 \cdot F_{RM} \cdot r = 2 A p r \left(\sqrt{\frac{T_1}{T_0}} - 1 \right) \quad (4)$$

mit r : Abstand von Flügelschwerpunkt zur Drehachse (siehe Abb.3).

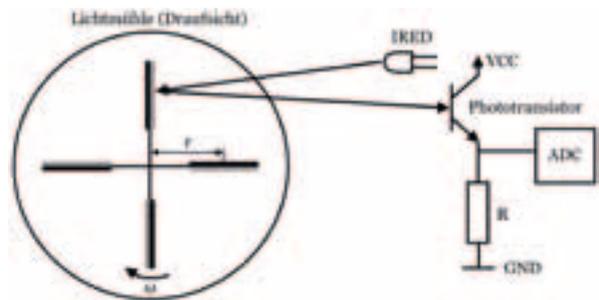


Abb. 3: Strahlengang und Prinzipschaltung zur Drehzahlmessung des Flügelrades mit einer Reflexionslichtschranke

Die Kraft nimmt im molekularen Strömungsbereich proportional zum Druck zu. Im Knudsenströmungsbereich existiert ein Maximum (typischer Literaturwert[2]: $5 \cdot 10^{-2} \text{ mbar}$). Dies ist dadurch begründet, dass der Radiometereffekt nach Knudsen bei höheren Drücken nicht mehr (ausgeprägt) auftreten kann. Die beobachtbare Bewegung wird durch Randeffekte hervorgerufen. Diese geht aber spätestens im viskos-laminaren Strömungsbereich gegen null. Der Verlauf der Radiometerkraft über den Druck ist Abb.4 qualitativ dargestellt.

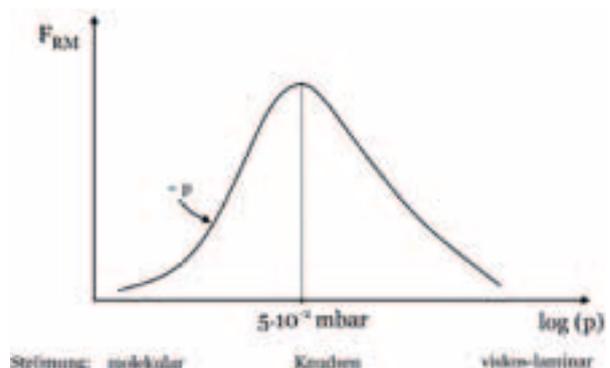


Abb. 4: Theoretischer Verlauf der Radiometerkraft F_{RM} auf einen Flügel als Funktion des Kolbeninnendrucks p bei konstanter Beleuchtungsstärke

2.2 Lagerreibung

Als bremsende Kraft in einer Lichtmühle wirkt zum einen die Reibungskraft im Lager des Flügelrades. Dieses besteht aus einer gläsernen Kuppel, die auf einer stählernen Spitze ruht (vgl. Abb.5).

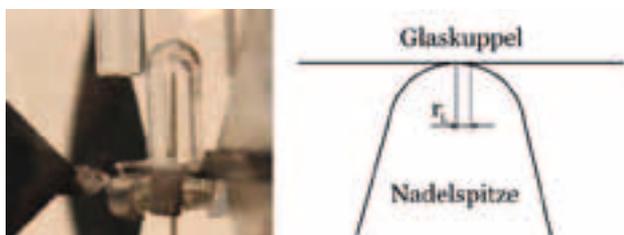


Abb. 5: Spitzenlager einer Lichtmühle

In guter Näherung kann die Reibungskraft als trockene, Coulombsche Reibung angenommen werden, da die Relativgeschwindigkeit beider Reibflächen zueinander klein ist und sich kein Schmiermittel zwischen ihnen befindet. Das infinitesimale Reibungsmoment dM_R , welches auf einer ringförmigen Fläche der Breite dr und dem Radius r wirkt, berechnet sich zu:

$$dM_R = \mu mg \frac{2\pi r dr}{\pi r^2} r \quad (5)$$

mit μ : Gleitreibungszahl, m : Masse des Flügelrades, g : Fallbeschleunigung, r_L : Radius Auflagefläche

Das gesamte Reibungsmoment ergibt sich durch Integration von Gl.5 von $r = 0$ bis $r = r_L$ über r :

$$M_R = \int_0^{r_L} dM_R = \frac{2}{3} \mu m g r_L \quad (6)$$

2.3 Gasreibung

Bremsend auf das Flügelrad wirkt zum zweiten die Reibung zwischen dem Restgas und den Flügeln. Sie ist wegen der vergleichsweise großen Fläche der Flügel ein nicht vernachlässigbarer Anteil.

Für einfache Geometrien kann der Luftwiderstand, welcher ein senkrecht zur Strömungsrichtung stehender Körper mit der angeströmten Fläche A erfährt, wie folgt beschrieben werden [3]:

$$F_w = \frac{1}{2} c_w \rho A v^2 \quad (7)$$

mit ρ : Gasdichte, v : Relativgeschwindigkeit Gas - Körper, c_w : Strömungswiderstandsbeiwert

Der Strömungswiderstandsbeiwert c_w kann allgemein nicht analytisch angegeben werden und muss experimentell ermittelt werden. Es muss zwischen verschiedenen Strömungsbereichen unterschieden werden. Im viskos-laminaren Strömungsbereich ist er indirekt proportional zur Reynoldszahl. Somit gilt:

$$c_w \propto \frac{1}{\rho v a} \quad (8)$$

mit a : Seitenlänge eines Paddels

Wegen dieses Zusammenhangs kann Gl.7 umformuliert werden, was die Lösung der Bewegungsgleichung des Flügelrades wesentlich vereinfacht.

$$F_w = \frac{1}{2} c'_w \rho A v \quad (9)$$

Wobei gilt:

$$c'_w = c_w \cdot v \quad (10)$$

Dieser Zusammenhang gilt genau genommen nur im viskos-laminaren Strömungsbereich. Die experimentell ermittelten Daten zeigen, dass diese Gleichung die Gasreibung empirisch auch bei Knudsen- und molekularer Strömung beschreibt.

Aus den Experimenten muss der Wert für c'_w für die verschiedenen Strömungsarten (und somit bei verschiedenen Drücken) ermittelt werden. Hieraus kann die Gasreibung berechnet werden. Zu erwarten ist der in Abb.6 dargestellte Verlauf.

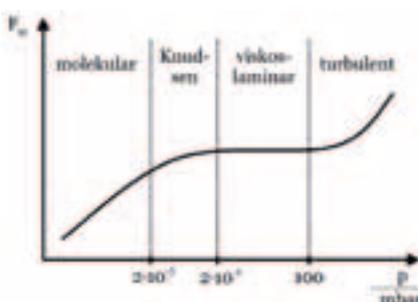


Abb. 6: Gasreibungskraft F_w in Abhängigkeit des Drucks p (qualitativ) mit Strömungsbereichen und deren Grenzen für die Geometrie der Lichtmühle

- Im turbulenten Strömungsbereich ist der Wert für c_w eine Konstante. Die Gasreibungskraft nimmt folglich proportional zum Druck ab.
- Bei viskos-laminarer Strömung gilt Gl.8. Die Reibungskraft ist konstant und somit unabhängig vom Druck.
- Im Bereich der Knudsenströmung ist ein Übergang zwischen den Gesetzmäßigkeiten der viskos-laminaren und der molekularen Strömung zu erwarten.
- Bei molekularen Strömungsverhältnissen kann die Newtonsche Stoßtheorie angewandt werden. Diese sagt für c_w einen konstanten Wert von 2 voraus [5]. Somit verhält sich die Gasreibung proportional zum Druck.

Das Gasreibungsmoment, welches auf das Flügelrad wirkt, kann mit Gl.9 angegeben werden zu:

$$M_w = 4F_w \cdot r = 2c'_w \rho A r^2 \omega \quad (11)$$

mit ω : Kreisfrequenz des Flügelrades.

3 EXPERIMENTELLE BESTIMMUNG DER RADIOMETERKRAFT

Die Radiometerkraft, welche das Flügelrad antreibt, ist einer direkten Messung nicht zugänglich. Im statischen Zustand, bei konstanter Drehzahl, wirkt jedoch keine Beschleunigung auf das Flügelrad. Die Summe aller Momente muss folglich null sein.

$$M_{RM} = M_k + M_w \quad (12)$$

Wenn durch den Radiometereffekt das Rad auf eine bestimmte Drehzahl gebracht worden ist, und für diese Drehzahl die Reibungsmomente bekannt sind, ist über Gl.12 auch das Radiometermoment bekannt. Liegt der Kolbeninnendruck ferner in einem Bereich, bei dem molekulare Strömungsverhältnisse vorherrschen, so kann über Gl.4 die Temperaturdifferenz zwischen den Flügeloberflächen berechnet werden.

Das Experiment gliedert sich somit in zwei Phasen:

- Bestimmung der Lager- und Gasreibung am auslaufenden Flügelrad (Drehtellerexperiment) bei verschiedenen Drücken
- Bestimmung der, durch den Radiometereffekt hervorgerufenen Drehzahl bei verschiedenen Drücken (Beleuchten der Lichtmühle)

3.1 Drehtellerexperiment

Zur Bestimmung der Reibungskräfte wird der Drehzahlverlauf des Flügelrades beim Auslaufen, d.h. nach vorheriger Beschleunigung auf konstante Drehzahl und nach Abstellen des Antriebs, untersucht. Als Antrieb sollte nicht der Radiometereffekt dienen, um Verfälschungen des Messergebnisses durch evtl. langsame Abkühlung der Flügel zu verhindern.

3.1.1 Versuchsaufbau

Für das Experiment wurde die Lichtmühle auf einen Drehteller montiert, und dieser in Rotation versetzt. Die Reibungskräfte in der Lichtmühle versetzen somit auch das Flügelrad in Bewegung. Nachdem sich eine konstante Drehzahl eingestellt hat, wird der Antrieb des Drehtellers abgeschaltet. Der Drehzahlverlauf des Rädchens wird dann nur noch durch die wirkenden Reibungskräfte bestimmt.

Der gesamte Versuchsaufbau basiert auf einem mikrocontroller-gesteuertem System, welches die Drehzahlregelung des Motors, die Messung der Kreisfrequenz des Flügelrades und die Übertragung der Messwerte an einen Host-PC übernimmt. Dort können die Rohdaten dann weiter ausgewertet werden. Abb.1 und Abb.7 zeigen den Aufbau des Systems.

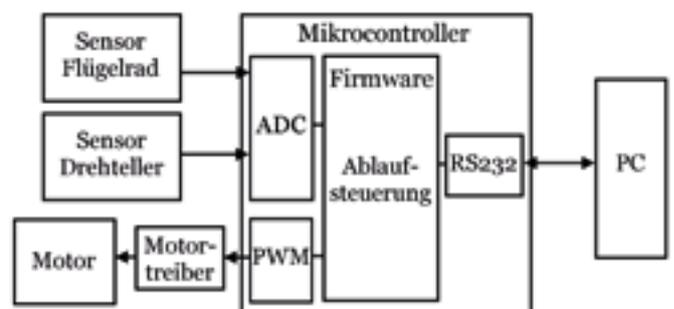


Abb. 7: Prinzipskizze des Gesamtsystems

Zur Messung der Drehzahl wird eine Reflexionslichtschranke verwendet. Eine Infrarot-LED und ein Phototransistor befinden sich nebeneinander auf einem gemeinsamen Substrat. Der Lichtkegel der IRED wird entgegen der Bewegungsrichtung auf die spiegelnde Seite der Flügel gerichtet. Bei jedem Durchgang durch den Lichtstrahl ergibt sich eine Reflexion in den Phototransistor. Dieser wird vom Mikrocontroller registriert, und die Zeit zwischen zwei Durchgängen bestimmt. Hieraus kann die Kreisfrequenz des Flügelrades berechnet werden.

3.1.2 Bewegungsgleichung

Der Drehzahlverlauf $\omega(t)$ kann über die Bewegungsgleichung des Flügelrades beschrieben werden.

$$J \frac{\partial}{\partial t} \omega = -M_w - M_R \quad (13)$$

Zur Bestimmung des Massenträgheitsmomentes J wird angenommen, dass je ein Viertel der Gesamtmasse m in den Schwerpunkten der Flügel (Abstand r zur Drehachse) konzentriert ist. Zusammen mit Gl.6 und Gl.11 ergibt sich folgende Differentialgleichung:

$$\gamma \frac{\partial}{\partial t} \omega + \delta \omega = -\varepsilon \quad (14)$$

Mit den Parametern:

$$\gamma = mr^2 \quad (15)$$

$$\delta = 2c'_w \rho A r^2 \quad (16)$$

$$\varepsilon = \frac{2}{3} mg \mu r_L \quad (17)$$

Diese Differentialgleichung ist über einen Exponentialansatz lösbar. Unter Beachtung der Randbedingung $\omega(t=0)=\omega_0$ ergibt sich für den zeitlichen Verlauf der Kreisfrequenz:

$$\omega(t) = \omega_0 e^{-t/\tau} + k(1 - e^{-t/\tau}) \quad (18)$$

mit den Konstanten

$$\tau = \frac{\delta}{\gamma} = \frac{2c'_w \rho A}{m} \quad (19)$$

$$k = -\frac{\varepsilon}{\delta} = -\frac{mg \mu r_L}{c'_w \rho A r^2} = -\frac{2g \mu r_L}{3\tau r^2} \quad (20)$$

Treten beide Reibungen auf, ergibt sich somit ein exponentieller Abfall der Kreisfrequenz, deren Zeitkonstante durch

die Luftreibung dominiert wird. Durch die Lagerreibung wird ω jedoch schon nach endlicher Zeit null.

Aus der Zeitkonstante τ der Exponentialfunktion des ermittelten Drehzahlverlaufs kann der Wert für c'_w bestimmt und das Gasreibungsmoment M_w berechnet werden. Die Konstante k lässt sich über den Zeitpunkt des Stillstandes des Flügelrades ermitteln und aus ihr der Radius der Auflagefläche im Lager r_L bestimmen. Hieraus kann das Lagerreibungsmoment M_R berechnet werden.

3.1.3 Messergebnisse

Durch Messung des Drehzahlverlaufs an der unveränderten Lichtmühle kann der Radius der Auflagefläche im Lager bestimmt werden. Die Kreisfrequenz folgt einer Exponentialfunktion mit der Zeitkonstante $\tau=0,0773s^{-1}$. Die dominante Reibungskraft muss somit bei diesem Druck die Gasreibung sein.

Unmittelbar vor dem Stillstand des Flügelrades weicht der Drehzahlverlauf vom Exponentialgesetz ab. Der Drehzahlbereich liegt jedoch nahe an der Auflösungsgrenze der Messapparatur. Es ist allerdings noch ein linearer Abfall erkennbar. Folglich dominiert bei sehr niedrigen Drehzahlen die Lagerreibung.

Der Funktionsparameter k kann aus der Messkurve bestimmt werden. Zur Berechnung wird der letzte Messpunkt verwendet. Einsetzen des Wertepaares in Gl.18 ergibt einen Wert von $k=0,1319$. Mit einer Gleitreibungszahl von $\mu=0,25$ (Stahl auf Glas, trocken) und einem Wert für den Abstand von Flügelschwerpunkt zur Drehachse von $r=17mm$ errechnet sich r_L zu $1,8\mu m$. Der Spitzenradius der Nadel liegt schätzungsweise in einem Bereich von wenigen μm (vgl. hierzu Abb.5). Der Radius der effektiven Auflagefläche ist somit etwa ein zehntel so groß. Deshalb kann der errechnete Wert durchaus als realistisch angesehen werden.

Für das Lagerreibungsmoment ergibt sich daraus ein konstanter Wert von:

$$M_R = 5,150 \cdot 10^{-9} Nm$$

Zur Bestimmung der Wertes für c'_w ist Kenntnis über die Gasdichte ρ bzw. den Kolbeninnendruck p nötig. Die Lichtmühle wurde hierzu mit einem Vakuumhahn versehen, auf definierten Druck evakuiert, verschlossen und die Auslaufkurven gemessen (siehe Abb.8).

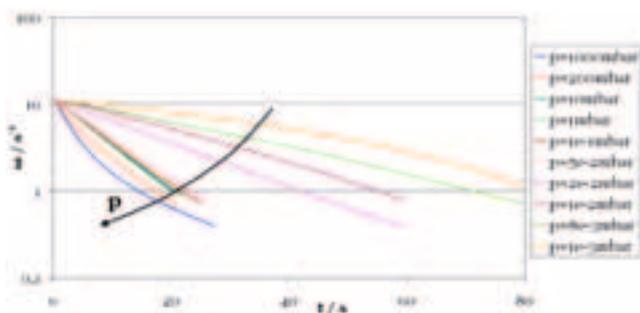


Abb. 8: Auslaufkurven des Flügelrades in einem Druckbereich von $1 \cdot 10^{-3} \text{ mbar} < p < 1000 \text{ mbar}$

Die Kurven folgen alle, mit Ausnahme des Druckbereichs nahe dem Atmosphärendruck, in einem weiten Drehzahlbereich einem Exponentialgesetz. Die Rechtskrümmung der Kurven nahe der unteren Messbereichsgrenze sind durch die Leckrate des Vakuumsahnes bedingt, welche während der Messzeit zu einem nicht zu vernachlässigenden Druckanstieg bei diesen Drücken führt. Nur bei sehr niedrigen Drehzahlen ist eine Abweichung in Richtung eines linearen Verlaufes erkennbar. Hieraus ist ersichtlich, dass die dominante Reibungskraft in dieser Lichtmühle im untersuchten Druckbereich die Gasreibung sein muss. Lager- und Gasreibung erreichen erst kurz vor Stillstand des Flügelrades die gleiche Größenordnung.

Der funktionelle Zusammenhang zwischen Kreisfrequenz und Zeit rechtfertigt die Anwendung der Bewegungsgleichung aus 3.1.2, welche genau genommen nur im viskos-laminaren Strömungsbereich gilt, bei Knudsen- und Molekularströmung. Von Atmosphärendruck bis 100 mbar ist dieser Zusammenhang nicht mehr gegeben. Hier herrschen turbulente Strömungsverhältnisse vor.

Im Druckbereich $1 \cdot 10^{-1} \text{ mbar} < p < 100 \text{ mbar}$ ist der Drehzahlverlauf und somit auch die Zeitkonstante τ unabhängig vom Druck. Dies ist charakteristisch für eine viskos-laminare Strömung. Für das Gasreibungsmoment errechnet sich über die Zeitkonstante $\tau = 0,11958 \text{ s}^{-1}$ in diesem Bereich, wenn man eine Flügelfläche von $A = 89 \text{ mm}^2$ und eine Flügelradmasse von $m = 1,75 \text{ g}$ zugrunde legt, ein Wert von:

$$M_w(\omega) = 6,05 \cdot 10^{-8} \cdot \omega \cdot N \cdot m \cdot s$$

Die Lagerreibung ist also erst bei Kreisfrequenzen deutlich unter 1 s^{-1} in der gleichen Größenordnung wie die Gasreibung und beeinflusst erst dann den Drehzahlverlauf signifikant.

Für einen Druck unter $1 \cdot 10^{-1} \text{ mbar}$, also im Knudsen- und molekularen Strömungsbereich, flachen die Kurven druckabhängig immer weiter ab. Die Gasreibung nimmt folglich auch abhängig vom Druck ab. Sie dominiert allerdings auch am Ende des Messbereichs noch die Bewegung.

In Abb.9 ist das errechnete Gasreibungsmoment über den Druck aufgetragen. Der Verlauf entspricht dem eingangs theoretisch Vermuteten (Abb.6).

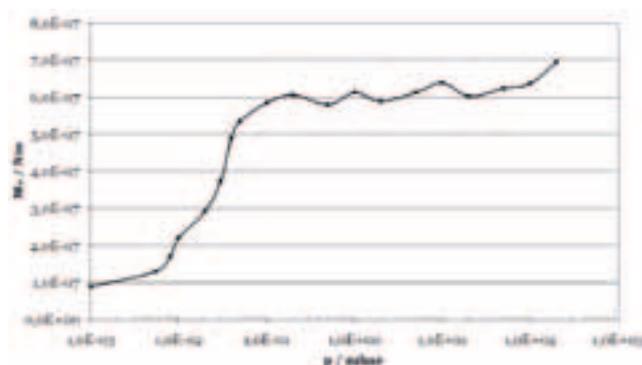


Abb. 9: Verlauf des Gasreibungsmomentes über den Druck für $\omega = 10 \text{ s}^{-1}$

3.2 Beleuchtete Lichtmühle

Um die Größe der Radiometerkraft zu bestimmen, wurde die Lichtmühle bei unterschiedlichen Drücken mit konstanter Intensität beleuchtet und die Kreisfrequenz ω des Flügelrades ermittelt, die sich im Gleichgewicht einstellt. Für diese Drehzahl ist aus vorangegangenem Experiment das gesamte Reibungsmoment ($M_w + M_R$) bestimmbar, welches dann dem Antriebsmoment durch den Radiometereffekt M_{RM} entspricht. Der Verlauf der Kreisfrequenz und der daraus bestimmten Radiometerkraft sind in Abb.10 und Abb.11 dargestellt.

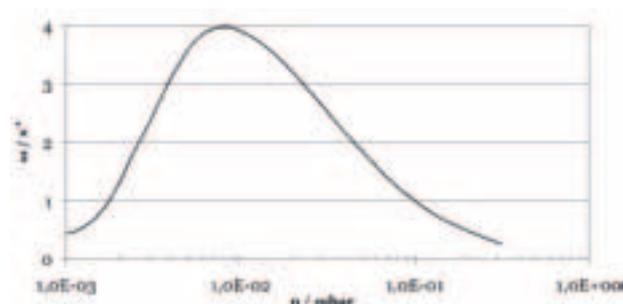


Abb. 10: Kreisfrequenz des Flügelrades in Abhängigkeit des Kolbeninnendruckes bei konstanter Beleuchtungsstärke

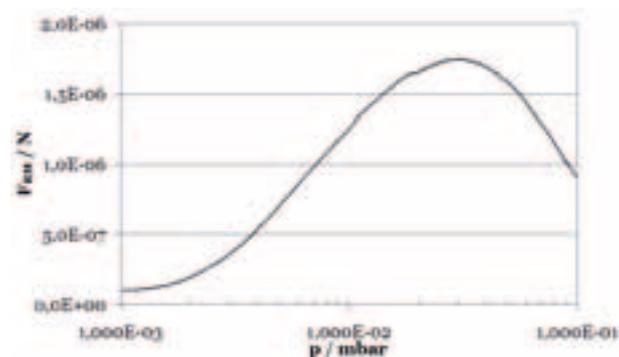


Abb. 11: Radiometerkraft auf ein Paddel in Abhängigkeit des Kolbeninnendruckes bei konstanter Beleuchtungsstärke

Der Verlauf der Radiometerkraft, insbesondere der Anstieg proportional zum Druck im molekularen Strömungsbereich, entspricht den theoretischen Vorhersagen aus 2.1, was die Richtigkeit des Modells bestätigt. Das Maximum der Kurve liegt bei einem Druck von $3 \cdot 10^{-2} \text{ mbar}$, was in etwa dem theoretischen Wert entspricht.

Für molekulare Strömungsverhältnisse ist über Gl.3 mit diesen Daten die Temperatur der schwarzen Flügeloberfläche bestimmbar. Legt man eine Umgebungstemperatur von $T_0 = 293 \text{ K}$ zu Grunde, so ergibt sich eine Temperaturdifferenz von $0,545 \text{ K}$ zwischen den beiden Seiten. Dies scheint, aufgrund der Abmessungen und wegen der geringen eingestrahlten Leistung (Bruchteile von Watt), plausibel.

4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Experimente haben gezeigt, dass im molekularen Strömungsbereich der Radiometereffekt nach Knudsen die dominante Ursache für die Bewegung sein muss. Der Maximaldruck, bei dem der Effekt weitestgehend unbeeinflusst auftritt (mittlere freie Weglänge gleich den Behälterdimensionen) ist in den Kurven erkennbar, und entspricht den theoretischen Erwartungen.

Durch Vergleich der Auslaufkurve der unveränderten Lichtmühle mit den Kurven der modifizierten Lichtmühle bei unterschiedlichen Drücken ergibt sich, dass der Kolbeninnendruck ursprünglich bei etwa $3 \cdot 10^{-2} \text{ mbar}$ gelegen haben muss. Dies ist zwar der Druck der maximalen Kraft für diese Lichtmühle, jedoch liegt der Druck der maximalen Drehzahl tiefer bei ca. $8 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$. Das bedeutet, dass bei dieser Geometrie der Lichtmühle durch Absenken des Druckes auf den Ideal-

Prof. Dr. rer. nat., Dipl.-Phys. Rupert Scheiner

Tel.: 0941 943-1277

Fax: 0941 943-1252

rupert.schreiner@hs-regensburg.de

wert eine Drehzahlsteigerung von gut **30%** möglich wäre. In einschlägiger Literatur wird meist nicht zwischen diesen beiden Drücken unterschieden, obwohl maximale Kraft nicht zwangsläufig maximale Drehzahl bedeuten muss.

Aus den Auslaufkurven ist ersichtlich, dass die dominante Reibungskraft in einer Lichtmühle im normalen Betrieb klar die Gasreibung ist. Die Lagerreibung ist erst bei äußerst niedrigen Drehzahlen (unmittelbar vor dem Stillstand) bzw. bei Drücken im Hochvakuum über die Gasreibung dominant. Diese Reibungsart kann bei entsprechender Geometrie folglich nicht ohne Prüfung mit dem Argument „niedriger Druck“ vernachlässigt werden.

LITERATUR

- [1] BÜRGER Wolfgang: Die Lichtmühle. In: Spektrum der Wissenschaft (02/2001)
- [2] KNUDSEN Martin: Ein absolutes Manometer. In: Annalen der Physik 32. 1911, S. 809–842
- [3] KUYPERS Friedhelm: Physik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. 2. Wiley-VCH Verlag, 2002
- [4] SCANDURRA Marco: Enhanced radiometric forces. <http://www.citebase.org/abstract?id=oai:arXiv.org:physics/0402011>. Version: 2004
- [5] SIEKMANN Helmut, THAMSEN Paul: Strömungslehre: Grundlagen. Springer, 2007

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 17N0108 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

EVALUATION DES BUNDESWEITEN EXIST-PRIME-CUPS-EIN PLANSPIELBASIERTER WETTBEWERB ZUR ENTREPRENEURSHIP EDUCATION*

1 EINFÜHRUNG UND ZIELSETZUNG

Das Lehren und Trainieren von unternehmerischem Denken und Handeln - mittlerweile auch im deutschsprachigen Raum als Entrepreneurship Education bezeichnet - hat in Deutschland in den letzten Jahren einen starken Aufschwung erlebt. In den letzten 15 Jahren entstanden über 80 Entrepreneurship Lehrstühle/Professuren in Deutschland.

Der Einsatz von Planspielen – insbesondere von Gründungsplanspielen - als Teil des curricularen Konzeptes zur Entrepreneurship Education ist dabei sehr verbreitet.

Seit 2005 führen wir eine Reihe von Studien zum Nutzen von Gründungsplanspielen in der Gründungsausbildung durch (z.B. Auchter & Kriz, 2006; Kriz, Auchter & Wittenzellner, 2008). Ein Teil dieser Studien untersucht die Lerneffekte und das Feedback von Studierenden des bundesweiten Wettbewerbs EXIST-priME-Cup. Dieses Programm wird mit etwa 140 deutschen Hochschulen und circa 30 renommierten Unternehmen im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie durchgeführt. Der EXIST-PriME-Cup ist Teil des Förderprogrammes EXIST, eine Maßnahme mit der Zielsetzung, das Gründungsklima und die Verbreitung von Unternehmergeist an Hochschulen zu verbessern. Die Teilnahme an diesem Programm ist freiwillig und steht Studierenden aller Fakultäten offen. Unserer Evaluation zielte darauf ab abzuklären, inwieweit dieses Programm und die damit verbundenen Aktivitäten, Gründungs - bzw. unternehmerische Kompetenzen fördern und in welchem Ausmaß diese Aktivitäten zu einer Veränderung der Gründungsmotivation führen.

Das Konzept des EXIST-PriME-Cup besteht aus zweitägigen Seminaren, bei denen Planspiele als Methode im Mittelpunkt stehen. Studentische Teams - die jeweils ein Unternehmen repräsentieren - stehen dabei miteinander im Wettbewerb. Der jährlich organisierte EXIST-priME-Cup hat vier Ebenen: Im Campus Cup erfolgt zunächst ein Wettbewerb innerhalb einer Hochschule; die besten beiden Teams jeder teilnehmenden Hochschule qualifizieren sich für die nächste Ebene, dem Master Cup, ein Wettbewerb zwischen den Hochschulen, dessen Siegerteams wiederum in den Professional Cup aufsteigen. Gastgeber für diese Cups sind in der Regel renommierte Unternehmen und Institutionen. Der finale Ausscheidungswettbewerb erfolgt mit 18 Teams im Champions Cup, der traditionell in Berlin stattfindet (siehe Abbildung 1).

In jedem Cup Level kommen konzeptionell vergleichbare Planspielmethoden zum Einsatz, jedoch mit ansteigender Komplexität der Szenarios und der simulierten Variablen. In

den zweitägigen Seminaren konkurrieren 4-12 Teams, mit jeweils 3-6 Mitgliedern, gegeneinander. Sie erstellen Businesspläne, starten ein Geschäft, führen dann, je nach Cup-Ebene, größere (simulierte) Firmen, indem eine Reihe komplexer unternehmerischer Entscheidungen für alle betrieblichen Bereiche, wie Absatz, Produktion, Personal, Finanzierung, etc., getroffen werden müssen. Erfolgsentscheidend für das Weiterkommen in einer Cuprunde ist nicht nur der betriebswirtschaftliche Erfolg eines Unternehmens im Sinne von Gewinn oder Aktienkurs, sondern auch eine Reihe weiterer Aktivitäten. Hierzu zählen Fallstudien und Spezialaufgaben, aber insbesondere die Präsentation der Unternehmensstrategie und der Unternehmensergebnisse vor einer Jury. Führungskräfte der gastgebenden Firmen sind in der Regel auch dort vertreten.



Abb. 1: Die Struktur des EXIST-priME-Cup

Die zentralen Zielsetzungen des PriME-Cup sind die

- Förderung der Kompetenzen von Studierenden zur Gründung und Führung eines Unternehmens im Team. Im Mittelpunkt steht hierbei das Lernen und Üben von unternehmerischem Denken und Handeln.
- Sensibilisierung und Förderung des Interesses an einer Unternehmensgründung.

2 THEORETISCHER HINTERGRUND

Fachwissen alleine reicht nicht aus, um der komplexen handlungsorientierten Aufgabenstellung einer Unternehmensgründung bzw. der Führung eines Unternehmens gerecht zu werden. Braukmann (2001) postuliert eine ganzheitlich anzulegende Qualifizierung, um potenzielle Unternehmer zu einer „Handlungsmündigkeit“ zu führen. Hierzu fordert er eine parallele

* Dieser Beitrag basiert auf einem Vortrag, gehalten auf der 14. interdisziplinären Jahreskonferenz zur Gründungsforschung (Gforum) 2010 in Köln.

BETRIEBSWIRTSCHAFT

30

Förderung von Fach-, Methoden- und Sozialkompetenz. Auch das Modell von Brinckmann, Salomo & Gemünden (2006) beschreibt, auf der Basis einer Untersuchung von 180 deutschen Start-Up-Unternehmen in 2005, fachliche, methodische, soziale und unternehmerische Kompetenzen als Schlüsselfaktoren, die zu Profit und Markterfolg führen.

In der Gründungsforschung ist in den letzten Jahren das unternehmerische Verhalten als Erfolgsfaktor intensiv diskutiert worden (Gemünden & Konrad, 2000; Frank, Korunka & Lueger, 2002). Verbreitet ist die Auffassung, dass unternehmerische Aktivitäten u.a. auf spezifische Kompetenz- und Motivationsbündel zurückzuführen sind, die wiederum von Persönlichkeitsmerkmalen beeinflusst werden (Gemünden, 2003; Walter & Walter, 2009).

Basierend auf diesen Erkenntnissen untersuchen wir den Zusammenhang zwischen unternehmerischen Prädispositionen und Persönlichkeitsfaktoren mit den von den Teilnehmern bewerteten Lern- und Motivationseffekten durch die Planspielseminare. (Auchter, 2001; Klandt, 1994; Kriz & Auchter, 2006)

Die Ziele der Evaluation konzentrieren sich nicht nur auf die Untersuchung der hier beschriebenen Zusammenhänge, sondern umfassen auch die Aufgabe der Qualitätssicherung der PriMECup-Veranstaltungen. Sie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Analyse der Zufriedenheit und der Akzeptanz des EXIST-PriMECup durch die Teilnehmer und Sponsoren

- Qualitätssicherung und Grundlage für Verbesserungsmaßnahmen
- Erfassung der Veränderung von gründungsrelevanter Kompetenzen durch die PriMECup-Veranstaltungen
- Erfassung der Sensibilisierung für das Gründungsthema und Veränderung der Gründungsmotivation der Teilnehmer durch die PriMECup-Veranstaltungen.

3 EVALUATIONSMETHODE UND STICHPROBE

Die summative Evaluationsmethode besteht aus der Ausgabe eines Fragebogens am Ende jeder PriMECup-Veranstaltung an die Teilnehmer. Er umfasst 35 Items mit einer sechsstufigen Likertskala (1: sehr gut; 6: sehr schlecht) mit Fragen zu soziodemografischen Daten und Persönlichkeitsaspekten sowie zu Vorkenntnissen, Erfahrungen und Einstellungen zu Planspielen, Teamarbeit und unternehmerischen Themen. Darüber hinaus erfolgten qualitative Interviews mit ausgewählten Teilnehmern, Spielleitern und Juroren.

Ein spezielles Codierungssystem sorgt dafür, dass Daten einer Person aus verschiedenen Cup Levels für gepaarte Stichproben erfasst werden konnten.

In den letzten drei Jahren wurden über 4000 Teilnehmer von EXIST-PriMECup-Veranstaltungen befragt. Die durchschnittliche Evaluationsquote betrug über 80%. Der Umfang der Stichprobe ist der Tabelle 1 zu entnehmen.

Jahr	Cup Veranstaltungen	Teilnehmer lt. Anmeldesystem	Evaluierte Teilnehmer	Evaluations- quote
2007	43	1006	815	81%
2008	76	2000	1706	85%
2009	80	2045	1624	79%
Summe	199	5051	4145	82%

Tab. 1: Anzahl der Cups und evaluierte Teilnehmer

Ausgewählte demographische Aspekte der Stichproben zeigen, dass z.B. bei 70,5 % männlichen Teilnehmern, der Anteil weiblicher Studierender mit 29,5 % deutlich geringer ist. Hinsichtlich der Teilnehmerstruktur bezogen auf den Hochschultyp dominieren, wie Abbildung 2 zeigt, deutlich die Hochschulen/Fachhochschulen vor den Universitäten.

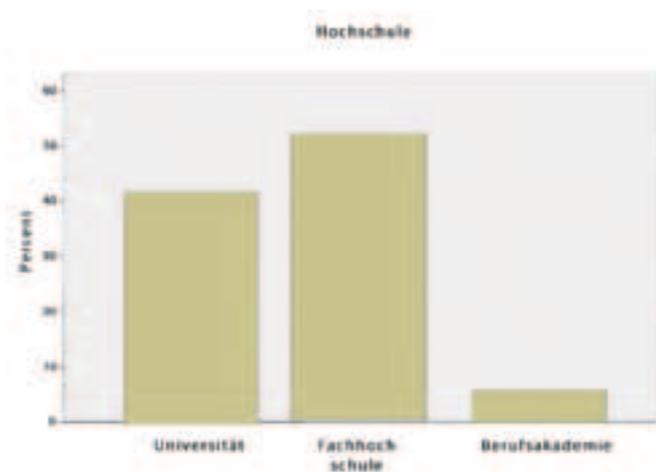


Abb. 2: Teilnehmer nach Hochschultyp (alle Teilnehmer)

Auffällig ist auch der sehr hohe Anteil von Gründern bzw. Selbstständigen im Familienumfeld der Teilnehmer: bis nahezu 50 % der Teilnehmer haben, je nach Cup Ebene, im familiären Umfeld Personen die unternehmerisch aktiv sind. Im Hinblick auf die Studienrichtungen dominieren klar - wie Abbildung 3 zeigt - die Wirtschaftswissenschaften und dabei insbesondere die betriebswirtschaftlich ausgerichteten Fachrichtungen. Interessant ist allerdings auch der hohe - und im Verlauf der drei Jahre stetig gestiegene - Anteil an Ingenieuren und Informatikern beim Prime Cup.



Abb. 3: Studienrichtung im PrimeCup (alle 2006-2009)

4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Auf der Basis der Daten aller Teilnehmer auf dem Master Cup Level von 2007 (N =501), unter Verwendung von 35 Items, die auf allen vier Fragebogen der vier verschiedenen Cupebenen zum Einsatz kamen, wurde eine Faktorenanalyse durchgeführt (Eigenvalue >1; Varimax – Rotation). Es entstanden sieben Faktoren – die Reliabilitätsanalyse ergab hohe Cronbach Alphas >.86 – die mehr als 82 % der Gesamtvarianz erklären. Die 7 Subskalen/Faktoren sind im Folgenden kurz skizziert:

- Skala 1: „Organisation und Information“ (6 Items) Organisation im Vorfeld und bei den Cups; Unterlagen, Auswertung des Planspiels, aber auch Bewertung des Dozenten und des Debriefing
- Skala 2: „Räumlichkeit und Zeitdauer“ (2 Items) Angemessenheit der Räumlichkeit und Zeitdauer des Seminars
- Skala 3: „Soziale und personale Kompetenz“ (8 Items) Erwerb u.a. von Team- und Kommunikationsfähigkeiten, Selbsteinschätzung
- Skala 4: „ Erleben von Wettbewerb und Teamarbeit beim Planspiel “ (4 Items)
- Skala 5: „Rückmeldungen der Juroren und dessen Nutzen“ (2 Items)
- Skala 6: „Erwerb von fachlicher Kompetenz“ (8 Items) Verständnis für die Probleme und Erfolgsfaktoren einer Unternehmensgründung, -führung und - nachfolge, unternehmerisches Denken und Handeln
- Skala 7: „Gesamtzufriedenheit mit der Veranstaltung“ (5 Items)

Gesamtzufriedenheit, Praxisbezug, Weiterempfehlungswert. Der Faktor „Fachliche Kompetenz und Gesamtzufriedenheit“ erklärt den größten Anteil an Varianz (14,7 %). Die Gesamtzufriedenheit aus Teilnehmersicht hängt am stärksten mit dem Erreichen fachlicher Lernziele zusammen; die anderen Faktoren sind für die Gesamtzufriedenheit demgegenüber wesentlich weniger wichtig.

Die Ergebnisse der Tabellen 2 und 3 zeigen eine sehr positive Bewertung auf allen Cup - Ebenen (Campus – Master – Professional – Champions Cup). Zusätzlich wurden Durchschnittswerte für jede Veranstaltung ermittelt. Betrachtet man alle 199 Prime-Cup Veranstaltung, so erfuhr keine Veranstaltung eine Bewertung schlechter als 2,5 auf der 6 stufigen Likert-Skala (1 = sehr gut, 6= sehr schlecht).

BETRIEBSWIRTSCHAFT

32

Ebene 1 Campus Cup	2009 N=590	2008 N=431	2007. N=65
Organisation and Information	2,16	1,98	1,91
Räumlichkeit und Zeitdauer	1,85	2,04	2,02
Soziale und Personale Kompetenz	1,91	2,72	2,96
Erleben v. Wettbewerb u. Teamarbeit	1,77	1,58	1,51
Erwerb von Fachliche Kompetenz	1,63	2,31	2,25
Gesamtzufriedenheit m. d. Veranstalt.	2,22	2,23	2,21
Ebene 2 Master Cup	2009 N=708	2008 N=913	2007 N=501
Organisation and Information	1,74	1,8	1,77
Räumlichkeit und Zeitdauer	1,86	1,94	1,79
Soziale und Personale Kompetenz	2,44	2,53	2,54
Erleben v. Wettbewerb u. Teamarbeit	1,51	1,47	1,41
Rückmeldungen der Juroren	1,78	1,75	1,82
Erwerb von Fachliche Kompetenz	2,03	2,04	1,99
Gesamtzufriedenheit m. d. Veranstalt.	1,97	2	1,98

Tabelle 2: Faktorenvergleich Ebene 1 u. 2, 2007 - 2009

Auf der Master Cup - Ebene war auch die Veränderung der Einstellung zu den gastgebenden Unternehmen durch die Teilnehmer Gegenstand der Befragung. Der Master Cup wird i. d. R. bei Firmen oder Institutionen durchgeführt, die die Räumlichkeiten und das Catering zur Verfügung stellen. Zusätzlich werden häufig Vorträge, Firmenpräsentationen und Betriebsführungen angeboten; Vertreter der Firmen sind dann auch in der Regel Mitglieder der Jury. Bei allen Master Cups hat das Firmenimage des gastgebenden Unternehmens bei den Teilnehmern eine enorme Steigerung erfahren. Die teilnehmenden Studierenden sehen diese Unternehmen nach der Veranstaltung als erheblich attraktiveren potentiellen Arbeitgeber, als es zuvor der Fall war. Noch wichtiger in Bezug auf die Zielsetzungen des EXIST- PriMECups ist: Die Teilnehmer schätzen durch die Veranstaltungen ihre unternehmerischen Kompetenzen höher ein und geben an, ein erhöhtes unternehmerisches Interesse, im Sinne einer Unternehmensgründung, zu haben.

Gesamtvergleich der Cuprunden

Betrachtet man den aggregierten Vergleich der vier Cuprunden (Tab. 4) sind die Mittelwerte über alle Skalen und Cup-ebenen insgesamt sehr hoch. Am „schlechtesten“ schneidet die Skala „Soziale und personale Kompetenz“ ab. Dies ist unter anderem auf die geringe „Teamkonstanz“ zurückzuführen: die Zusammensetzung der einzelnen Teams im Verlauf der verschiedenen Cuprunden ändert sich im Durchschnitt relativ oft.

Darüber hinaus ist ein Absinken der Bewertung „Fachliche Kompetenz“ über die vier Cuprunden festzustellen. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die Lerneffekte, die in Bezug auf das Fachwissen am Anfang stärker ausgeprägt sind, im Verlauf der Cuprunden abnehmen.

Generell ist ein Absinken fast aller Werte von der Master Cup zur Professional Cup Ebene festzustellen, wobei die Bewertungen im Champions Cup wieder ansteigen. Dieser

Ebene 3 Professional Cup	2009 N=281	2008 N=302	2007 N=200
Organisation and Information	2,06	2,07	2,03
Räumlichkeit und Zeitdauer	2,15	2,21	2,07
Soziale und Personale Kompetenz	2,64	2,61	2,45
Erleben v. Wettbewerb u. Teamarbeit	1,43	1,47	1,43
Rückmeldungen der Juroren	2,29	2,21	1,94
Erwerb von fachlicher Kompetenz	2,37	2,4	2,13
Gesamtzufriedenheit m. d. Veranstaltung	2,27	2,26	2,03
Ebene 4 Champions Cup (Final)	2009 N=45	2008 N=60	2007 N=49
Organisation and Information	1,89	1,82	1,66
Räumlichkeit und Zeitdauer	2,02	1,58	1,54
Soziale und Personale Kompetenz	2,11	2,24	2,03
Erleben v. Wettbewerb u. Teamarbeit	1,2	1,34	1,38
Rückmeldungen der Juroren	2	2,13	1,81
Erwerb von fachlicher Kompetenz	2,09	2,14	2,84
Gesamtzufriedenheit m. d. Veranstaltung	1,95	1,96	1,66

Tabelle 3: Faktorenvergleich Ebene 3 u 4, 2007 - 2009

„Doppelknick-Effekt“ ist über alle drei Jahre der Evaluation zu beobachten und ist signifikant (T - Test mit gepaarten Stichproben). Wichtige Erklärungen hierfür sind: die Teilnehmer erkennen im Professional Cup den geringsten Zuwachs an Nutzen und Kompetenzen. Zudem ist die positive Ausstrahlung der Firmenumgebung im Master Cup auf dieser Cup Ebene in der Form nicht mehr gegeben.

Von besonderer Bedeutung für die Verschlechterung der Bewertungen im Professional Cup muss die drastisch verringerte „Aufstiegsquote“ in die nächste Cup Ebene – den Champions Cup – gesehen werden: auf der Master Cup Ebene qualifizieren sich 2 von 4 - 6 Teams für den Professional Cup. Von diesem Level qualifizieren sich nur 2 von 12 Teams für die finale Runde, dem Champions Cup. D.h. die Mehrheit der Teams scheidet auf dem Professi-

onal Cup – Level aus. Die Enttäuschung der Teilnehmer mag eine Ursache für die schlechteren Bewertungen sein. Eine weitere Erklärung für diesen „Doppelknick“ ist darin zu sehen, dass im Professional Cup bis zu 30 % der Teammitglieder neu sind. Neue Teammitglieder bewerten tendenziell schlechter, als diejenigen die schon über mehrere Cuprunden aufgestiegen sind. („Sprung - ins - kalte - Wasser - Effekt“).

Ausgewählte (signifikante) Ergebnisse aus den Teilstichproben

Weitere Analysen, basierend auf T – Tests und Varianzanalysen, zeigen eine leichte Steigerung des Interesses an einer Unternehmensgründung über alle Teilnehmer (M=2,6), wobei es interessanterweise keine signifikanten Unterschiede

BETRIEBSWIRTSCHAFT

34

EXIST-PrimeCup 2007-2009	Campus Cup	Master Cup	Profess. Cup	Champ. Cup
Organisation	2,07	1,77	2,06	1,79
Raum und Zeitdauer	1,94	1,88	2,15	1,70
Soziale und personale Kompetenz	2,29	2,50	2,58	2,14
Erleben v. Wettbewerb und Teamarbeit	1,68	1,47	1,45	1,31
Jury	-	1,78	2,17	1,99
Fachliche Kompetenz	1,94	2,02	2,32	2,35
Gesamtzufriedenheit	2,22	1,99	2,20	1,86

Tabelle 4: Gesamtvergleich der Cuprunden

bezüglich Studienrichtung, Hochschultyp, etc. gibt. Teilnehmer mit ausgeprägten unternehmerischen Kompetenzen, Einstellungen und Prädispositionen (wie Risikoneigung, Führungsorientierung, internale Kontrollüberzeugung und Leistungsmotivation) bewerten die Cups deutlich besser. Dies drückt sich durch eine höhere Zufriedenheit mit den Veranstaltungen, höhere Lerneffekte und durch eine stärkere Übernahme der Unternehmerrolle aus.

Die weit verbreitete Annahme, dass ein unternehmerorientierter familiärer Hintergrund eine positive Einstellung zum unternehmerischen Denken und Handeln fördert, kann durch unsere Untersuchung nicht bestätigt werden: es gibt keine signifikanten Bewertungsunterschiede zwischen Personen

mit Gründern und/oder Selbstständigen in der Familie und denjenigen, die keinen einschlägigen unternehmerischen familiären Hintergrund haben.

Weiterhin ist anzumerken, dass der Einfluss der Seminarleiter auf die Befragungsergebnisse nicht signifikant ist. D. h. es gibt keine systematischen Unterschiede zwischen den Seminarleitern.

Gendereffekte

Die Analyse der Teilstichproben zeigt ausgeprägte Gendereffekte. Während das Interesse an einer Unternehmensgründung – über alle Teilnehmer gesehen – eine Steigerung

Master Cup		N	Mittelwert	Standardabw.
Zufriedenheit mit Wettbewerb und	Frauen	564	1,53	0,66
Teamarbeit	Männer	1546	1,45	0,58
Professional Cup		N	Mittelwert	Standardabw.
Zufriedenheit mit Wettbewerb und	Frauen	82	1,62	0,74
Teamarbeit	Männer	268	1,38	0,55

Tabelle 5: Gendaspekte – Zufriedenheit, Wettbewerb und Teamarbeit

Professional Cup		N	Mittelwert	Standardabw.
Zufriedenheit mit der Entscheidung und Reflexion im Team	Frauen	82	2,02	1,17
	Männer	267	1,74	0,9
Risikoneigung	Frauen	81	3,33	1,22
	Männer	268	2,97	1,24
Führungsbereitschaft	Frauen	82	2,44	0,94
	Männer	268	2,14	0,9

Tabelle 6: Genderaspekte – Teamentscheidung, Risikoneigung, Führungsbereitschaft

EXIST-PrimeCup 2007-2009	männliche Teilnehmer %	weibliche Teilnehmer %	N
Campus Cup	72,3	27,7	1202
Master Cup	73,3	26,7	2261
Professional Cup	76,4	23,4	818
Champions Cup	81,3	18,7	157

Tabelle 7: Genderaspekte – Frauenanteil und Cup Ebene

erfuhr, verzeichneten die Frauen eine signifikante Abnahme des Interesses an Gründungsaktivitäten. Insgesamt profitierten die weiblichen Studierenden auch weniger von den Cup Veranstaltungen als die männlichen Kollegen. Betrachtet man allerdings Teilaspekte der Bewertungen, ergeben sich differenziertere Einsichten: Frauen schätzen die Förderung ihrer sozialen und personalen Kompetenzen durch die Seminare höher ein als Männer. Man kann dies auch verkürzt wie folgt zusammenfassen: Frauen wollen eher am Planspiel teilnehmen, Männer es eher gewinnen. Die aus der Genderliteratur zum Entrepreneurship beschriebenen Unterschiede in Bezug auf Risikoneigung und Führungsbereitschaft zeigen sich auch in unserer Studie wie Tab. 5 und 6 verdeutlichen.

Die hier genannten Einflussfaktoren und erfassten Bewertungen durch die weiblichen Teilnehmer können auch als Erklärung

für den stetig sinkenden Frauenanteil mit zunehmendem Cup Level – wie in Tab. 7 zu sehen – herangezogen werden.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Der EXIST - PriMECup und die dabei verwendeten Planspiele sind im Rahmen der Evaluation sehr gut bewertet worden. Die Prime - Cup Seminare führen insgesamt aus Sicht der Teilnehmer zu einer Verbesserung der fachlichen, sozialen und unternehmerischen Kompetenzen sowie zu einer Steigerung des Interesses an einer Unternehmensgründung. Weiterhin genießt der Prime - Cup eine außergewöhnlich hohe Akzeptanz sowohl bei den Teilnehmern und Seminarleitern als auch bei den Verantwortlichen der gastgebenden Firmen. Sehr hoch ist auch die Weiterempfehlungsquote ($M=1,9$) der Seminare durch die Teilnehmer.

Prof. Dr. Eberhard Auchter

Tel.: 0941 943-1397

Fax: 0941 943-1425

eberhard.auchter@hs-regensburg.de

Viele Ergebnisse aus den Fragebögen der hier präsentierten Evaluation in Kombination mit qualitativen Erhebungen in Form von Interviews führten zu einer Liste von mehr als 30 konkreten Maßnahmen zur Qualitätsverbesserung. Diese Empfehlungen wurden im Rahmen von Workshops mit der Projektleitung und den beteiligten Trainern und Organisatoren diskutiert und sind die Grundlage zu einer permanenten Justierung des Konzepts.

Der Erfolg des EXIST - PriMECups als Instrument der Entrepreneurship Education basiert stark auf dem Planspiel als zentrales didaktisches Konzept dieser Veranstaltungen. Weitere empirische Forschung durch Vergleiche mit anderen Lernformen ist notwendig, um den Vorteil der Planspielmethode zu verifizieren. Die Studien von Walter & Walter (2008) weisen darauf hin, dass nur von einer anwendungsorientierten Gründungsausbildung handlungsrelevante Impulse ausgehen. Genau diese Anwendungsorientierung zeichnen planspielbasierte Veranstaltungskonzepte aus.

Unser zukünftiger Forschungsschwerpunkt wird sich auch auf die weitere Untersuchung der Genderaspekte in diesem Zusammenhang konzentrieren, um auch das Programm für Frauen zu optimieren.

LITERATUR

Auchter, E. (2006). Das Gründungsplanspiel TOPSIM - Startup! in der Entrepreneurship - Ausbildung - Konzept, Einsatz und Nutzenbewertung, in: Holzbauer, U., Liesegang, E., Müller - Markmann, B.(Hrsg.), Planspiele in der Hochschullehre, Karlsruhe, S.109 - 125

Auchter, E., Kriz, W.C. (2006). The Benefits of Simulations in Entrepreneurship Education: Presentation of a Start - Up Simulation. Approach and Evaluation Results"; in: Proceedings of the 3th AGSE International Entrepreneurship - Exchange Conference, Auckland, New Zealand, 8 - 11. February 2006

Braukmann, U. (2001). Wirtschaftsdidaktische Förderung der Handlungskompetenz von Unternehmensgründerinnen und -gründern, in: Koch, L., T., Zacharias, C., (Hrsg.) Gründungsmanagement, München/Wien, S. 79 - 94

Brinckmann, J., Salomo, S. & Gemünden, H. - G. (2006). Managementkompetenz in jungen Technologieunternehmen. In: Jahrbuch Entrepreneurship 2005/06. Berlin, S.15 - 32

Cooper, S. Y., Lucas, W. A. (2006). Enhancing Self - Efficacy for Entrepreneurship and Innovation: An Educational

Approach, Proceedings of the 4th AGSE International Entrepreneurship Research Exchange Conference, Brisbane, Australia.

Covin J. G., Slevin, D. P. (1991). A Conceptual Model of Entrepreneurship as Firm Behavior. In: Entrepreneurship Theory and Practice, 16/1, S. 7 - 25

Frank, H., Korunka, Ch., Lueger, M.(2002). Entrepreneurial Spirit, Unternehmerische Orientierung und Gründungsneigung von Studierenden, Wien

Gemünden H. - G.; Konrad,E.(2000). Unternehmerisches Verhalten als ein bedeutender Erfolgsfaktor von technologieorientierten Unternehmensgründungen. In: Die Unternehmung, 54,4, S.247 - 272

Gemünden H. - G. (2003). Personale Einflussfaktoren von Unternehmensgründungen, in: Achleitner, A. - K., Klandt, H., Koch, L.T., Voigt, K. - I. In: Jahrbuch Entrepreneurship 2003/04, Berlin, S.93 - 120

Klandt, H. (1994). Methods of Teaching: What is Useful for Entrepreneurial Education? In: Klandt, H., Mugler,J., Müller - Böling, D., IntEnt93, Internationalizing Entrepreneurship Education and Training, Dortmund 1994, S.34 - 43

Kriz, W.C., Auchter, E. & Wittenzellner, H. (2008). Theory - Based Evaluation of Entrepreneurship Education with Simulation Games. In: Indian Journal of Economics and Business, 2008, S. 19 - 33

Kriz, W.C. & Hense, J. (2005). Evaluation und Qualitätssicherung von Planspielen. In: U. Blötz, Bundesinstitut für Berufsbildung, BIBB Bonn (Hrsg.), Planspiele in der beruflichen Bildung, 4. erweiterte Auflage. Bielefeld.

Walter, S.G. , Walter, A. (2009). Personenbezogene Determinanten von Unternehmensgründungen: Stand der Forschung und Perspektiven des Fortschritts. In: zfbf, Zeitschrift für Betriebswirtschaftliche Forschung 61, S. 57 - 89

EFFIZIENTES MULTICORE-SCHEDULING IN EINGEBETTETEN SYSTEMEN TEIL 1: ALGORITHMEN FÜR ZUVERLÄSSIGE ECHTZEITSYSTEME

Eingebettete Systeme unterliegen neben den funktionalen Anforderungen besonders nichtfunktionalen Qualitätsanforderungen wie Effizienz, Zuverlässigkeit und Echtzeitfähigkeit. Einprozessorsysteme werden diesbezüglich in hoher Qualität entwickelt und entsprechende Scheduling-Algorithmen zur Einhaltung aller Echtzeitanforderungen bei maximaler Systemauslastung existieren. Mit steigendem Bedarf an Rechenkapazität können bisherige Konzepte zur Leistungssteigerung von Singlecore-Systemen jedoch nicht mehr eingesetzt werden – der Umstieg auf Multicore-Systeme wird erforderlich. Im ersten Teil dieser Arbeit stellen wir eine mögliche Prozessorarchitektur für zukünftige Automotive Multicore-Systeme vor sowie die Abstraktion der Software für diese Systeme. Nach einer Klassifikation von Multicore-Scheduling-Algorithmen präsentieren wir exemplarisch einen Algorithmus mit statischer Taskallokation und einen Algorithmus mit dynamischer Taskallokation. Bei beiden Algorithmen handelt es sich um eine Überführung theoretisch behandelter Algorithmen auf Automotive Systeme.

Keywords:

Software-intensive Echtzeitsysteme / Multicore / Scheduling / EDF / Pfair / P-ERfair

Efficient Usage of Multicore Systems

Embedded Systems have to fulfill both, functional requirements and non-functional quality requirements like efficiency, reliability and real-time. For today's uniprocessor systems, scheduling algorithms exist that fulfill all real-time requirements and allow a maximal system utilization. But with the advent of further processing power, today's mechanisms of performance improvement at uniprocessor systems breakdown. A new branch of embedded systems is required to achieve more processing power – Embedded Multicore systems.

In the first part of this work, we discuss the benefits of SMP hardware architectures for upcoming embedded multicore systems and describe a software abstraction for these systems. Following a classification of multicore scheduling algorithms, we introduce two algorithms, one with static task allocation, the other with dynamic task allocation. Both algorithms are described in theory and then applied to automotive systems.

Keywords:

Softwareintensive Real-Time Systems / Multicore / Scheduling / EDF / Pfair / P-ERfair

1 EINLEITUNG

Eingebettete Systeme, wie sie in Steuergeräten der Automobilelektronik realisiert sind, zeichnen sich durch eine hohe Anforderung an die Effizienz bzgl. der Nutzung von Ressourcen wie Speicher und Rechenzeit aus. Dies ist maßgeblich durch die auf diesem Markt üblichen hohen Stückzahlen begründet, wodurch wirtschaftliche Aspekte für die Wahl der Bauteile entscheidend sind.

Zudem sind diese Systeme stark in das menschliche Umfeld integriert und erfordern somit eine hohe Zuverlässigkeit in der Erfüllung der Funktionalität. Zuverlässigkeit bedeutet jedoch, dass ausreichend freie Ressourcen für Ausnahmefälle zur Verfügung stehen, was im Widerspruch zur Effizienzanforderung steht.

Dies bedeutet beispielsweise für die Wahl des Prozessors, dass dieser so zu wählen ist, dass die Software gerade noch zuverlässig ausgeführt werden kann.

Zur Bewertung der Zuverlässigkeit bezüglich der Echtzeitanforderungen von Einprozessorsystemen, d.h. der Einhaltung von *Task Deadlines*, wurden in der Vergangenheit verschiedene formale [1, 2] und simulationsbasierte [3] Analysetechniken vorgestellt, wodurch es möglich ist, diese Systeme zu analysieren und deren Effizienz zu verbessern.

Einhergehend mit dem stetigen Anstieg der Softwarefunktionalität wachsen jedoch ebenfalls die Anforderungen an die Rechenleistung der Prozessoren. Bisher wurde diese durch eine Erhöhung der Taktfrequenz gedeckt. Diesem Vorgehen sind jedoch früher als im Desktop Computing Bereich die Grenzen gesetzt. Umgebungstemperaturen von bis zu 130 °C, z.B. im Automotive Powertrain (dt. Antriebstrang) Bereich, verursachen Probleme in der Abführung der Verlustleistung, da diese überproportional mit der Taktfrequenz ansteigt [4].

Multicore-Systeme bieten eine Alternative zur Leistungssteigerung – bei gleichbleibender Taktfrequenz. Sie erfordern jedoch neue Mechanismen für das effiziente Aufteilen der Software-Prozesse auf die Prozessorkerne unter Einhaltung aller Echtzeitanforderungen, das *Scheduling von Tasks*.

Die Arbeit ist folgendermaßen aufgebaut: In Kapitel 2 beschreiben wir die zugrundeliegende Hardware-Architektur und die abstrahierte Software. Nach einer Klassifizierung von Multicore-Scheduling-Algorithmen in Kapitel 3 stellen wir einen statischen (BinPacking-EDF) und einen dynamischen (P-ERfair-PD²) Algorithmus vor. Beide sind in vorherigen Arbeiten für die Anwendung in Automotiven Powertrain-Systemen erweitert worden.

¹ HS.R, LaS³

² TU München

³ 1 mal 1 Software GmbH

2 BESCHREIBUNG DER UNTERSUCHTEN SYSTEME

Im folgendem Kapitel werden zunächst die Annahmen der zugrundeliegenden Hardware- und Softwarearchitektur beschrieben. Diese dienen als Grundlage für die Betrachtung des Multicore-Scheduling-Problems.

2.1 Hardwarearchitektur

Derzeit werden im Bereich eingebetteter Systeme bereits *Mehrkernprozessoren*, wie z.B. der Infineon Tricore Prozessor, eingesetzt. Diese Art von Prozessoren unterscheidet sich jedoch grundlegend von Multicore-Prozessoren. Mehrkernprozessoren bestehen aus einer Menge an spezifischen Einzelprozessoren, die auf einem Chip integriert sind. Die Software ist für jeden Prozessorkern spezifisch, da diese sogenannten heterogenen Systeme verschiedenartige Prozessorkerne wie z.B. eine DSP¹ Einheit oder einen RISC² Prozessor besitzen.

Der Trend bei den Konzepten für der nächsten Generation geht in eine ähnliche Richtung wie im Desktop Computer Bereich - hin zum Einsatz homogener *Multicore*-Prozessoren, auch SMP-Systeme (Symmetric Multi Processing) genannt. Dies bedeutet, dass identische Prozessorkerne mit enger Speicheranbindung und der Möglichkeit zur Migration von Tasks auf einem Chip platziert werden.

Der Vorteil liegt maßgeblich in der Flexibilität. In früheren Generationen von Automotive-Software wurde die Software für den gesamten Lebenszyklus entwickelt. Heutzutage werden in regelmäßigen Abständen Aktualisierungen

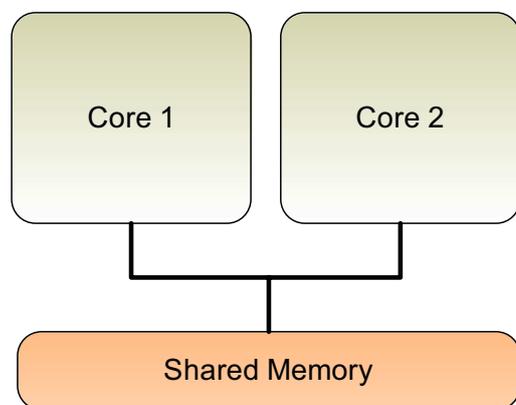


Abb. 1: Schematische Darstellung eines Dualcore-Prozessors mit SMP-Architektur und geteiltem Speicher

¹ Definition: Digital Signal Processing

² Definition: Reduced Instruction Set Computer

vorgenommen, welche die Zeit-Eigenschaften der Software grundlegend verändern können. Daher ist es von großem entwicklungstechnischem Interesse einen hohen Freiheitsgrad bei der Aufteilung der Software auf die Menge an Prozessorkernen zu haben. Dies ermöglichen Multicore-Systeme.

Im Folgenden behandeln wir ausschließlich Multicore-Prozessoren mit SMP-Architektur, wie den in Bild 1 schematisch dargestellte Dualcore-Prozessor. Wir gehen davon aus, dass die Prozessorkerne (Core 1,2) identisch sind und Tasks über geteilten Speicher Daten austauschen können¹. Zudem treffen wir die Annahme, dass es aus funktionaler Sicht unerheblich ist, auf welchem Prozessorkern eine Task ausgeführt wird. Wir definieren diese Art von Prozessoren als Multicore-Prozessor, für die folgende Festlegung gilt:

Defintion Multicore-Prozessor: Ein Multicore-Prozessor besteht aus m Prozessorkernen die jeweils eine Kapazität von 1 haben. Bei gleicher Taktfrequenz hat ein Dualcore-Prozessor theoretisch die doppelte Kapazität wie ein Singlecore-Prozessor. Ein Multicore-System ist ein eingebettetes System, welches einen Multicore-Prozessor enthält.

2.2 Softwarearchitektur

Für diese Arbeit schließen wir uns den Vereinfachungen zugrundeliegender Arbeiten [5,6,7,8] an und betrachten keine funktionalen Aspekte. Damit vernachlässigen wir Einflüsse auf das Zeitverhalten durch funktionsabhängige Kosten wie z.B. Task-Allokations-, Task-Migrations- und Inter-Task-Kommunikations-Zeiten². Zudem sind keine sequentiellen Datenflussabhängigkeiten zwischen Tasks zulässig.

Unter dem Ausschluss dieser funktionalen Aspekte wird die Software eines eingebetteten Systems als *Taskset* bezeichnet und besteht aus einer Anzahl an *Tasks* T_i ($i=1, \dots, n; n \in \mathbb{N}$). Das Taskset dient der Abstraktion Scheduling-relevanter Software-Eigenschaften. Diese sind für jede Task T_i durch die Eigenschaften Aktivierungsabstand (*Periodizität*), Aktivierungsverschiebung (*Offset*) σ_i , Ausführungszeit (*Laufzeit*) e_i und Echtzeitanforderung (*Deadline*) d_i beschrieben. Die Periodizität entspricht dem Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Aktivierungen; die Laufzeit entspricht der maximalen Ausführungszeit einer Task (engl. Worst-Case Execution Time), welche aus einer konkreten Hardwarearchitektur und den Instruktionen der Task mittels entsprechenden Analysetechniken bestimmt werden kann; die Deadline ent-

¹ Durch eine enge Speicheranbindung verringern sich Speicher-Zugriffszeiten und der Zeitaufwand für Inter-Task-Kommunikationen wird vernachlässigbar, sofern man annimmt, es handle sich um einen nicht-blockierende Kommunikation mit gepufferten Speicherzugriffen.

² Eine Untersuchung dieser Einflüsse ist Bestandteil aktueller Forschungsarbeit.

spricht schließlich der relativen Zeit, gemessen ab der Taskaktivierung, nach deren Überschreitung die Echtzeitanforderung verletzt wurde. In Bild 2 sind diese Größen für zwei Instanzen ($Job T_{i,j}; j=1, \dots, g; g \in \mathbb{N}$) einer Task dargestellt. Der j -te Job der i -ten Task wird mit $T_{i,j}$ bezeichnet.

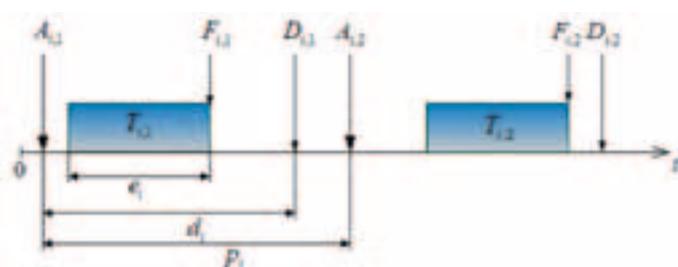


Abb. 2: Darstellung der Eigenschaften von Task T_i : Periodizität p_i , Laufzeit e_i und Deadline d_i ; sowie der Zeitpunkte zweier ausgeführter Jobs $T_{i,j}$, $j=\{1,2\}$ der Task T_i : Aktivierung $A_{i,j}$, Fertigstellung $F_{i,j}$ und Deadline $D_{i,j}$

Die Einschränkung des gültigen Parameterraums dieser Task-Eigenschaften wird als *Tasksystem* bezeichnet. Das Tasksystem limitiert damit die Gültigkeit der Aussagen einer Untersuchung, bspw. die Einsetzbarkeit eines speziellen Scheduling-Algorithmus.

Periodische Taskssysteme, wie diese durch Liu and Layland [8] definiert wurden, stellen die größte Einschränkung dar. Die Periodizität ist konstant; die Deadline entspricht der Periodizität und die Laufzeit ist ebenfalls konstant. Zusätzlich muss die Taskaktivierung synchron² erfolgen.

Die starke Eingrenzung des Parameterraumes der Task-Eigenschaften ist jedoch für ereignisbasierte Systeme, in denen Tasks über sporadische Ereignisse aktiviert werden und die Deadline der Problemstellung entsprechend vergeben wird, nicht mehr zutreffend.

Daher wurden verschiedene Taskssysteme vorgestellt, wie z.B. sporadische Taskssysteme [9], welche die Beschreibung ereignisorientierter Systeme ermöglichen, oder Taskbeschreibungen mittels direkter gerichteter Graphen [10], welche die Abfolge von Aktivierungen und variierenden Laufzeiten mit Hilfe von Graphen modellieren. Den interessierten Leser sei hier auf [11] verwiesen.

In dieser Arbeit definieren wir das Multiple-Zeitbasen Taskssystem.

Dieses Taskssystem besteht aus Tasks und Zeitbasen. Unter der Annahme einer fiktiven globalen Zeit kann eine Zeitbasis zu dieser Zeit in Frequenz oder Phase verschoben sein. Ein Taskset besteht demnach aus einer Anzahl an Tasks, die neben den obigen Eigenschaften zusätzlich einer Zeitbasis zugeordnet sind. Dabei ist es möglich, dass mehrere Tasks der gleichen Zeitbasis angehören³. Die restlichen Taskset-Eigenschaften folgen dem Modell nach Liu & Layland für asynchrone periodische Taskssysteme mit expliziter Deadline. Der Vorteil dieser Modellierung liegt in der Beschreibung von Abhängigkeiten zwischen den Aktivierungen von Tasks. So ist es möglich, Tasksets zu beschreiben, in denen mehrere Tasks innerhalb ihrer Zeitbasis eine konstante Lage haben, jedoch zu Tasks anderer Zeitbasen eine variable Phasenlage aufweisen. Dadurch wird die mögliche Lage von Aktivierungen von Tasks (nämlich die innerhalb der gleichen Zeitbasis) eingeschränkt und es ist möglich (entgegen z.B. sporadischen Taskssystemen) exaktere, weniger pessimistische Aussagen zu treffen.

3 MULTICORE-SCHEDULING

Multicore-Scheduling unterscheidet sich aufgrund der trivialen Tatsache, dass mehrere Ressourcen zur Verfügung stehen grundlegend vom Singlecore-Scheduling. Algorithmen wie EDF (Earliest Deadline First) sind nicht mehr optimal.

Zu Beginn dieses Kapitels klassifizieren wir daher Scheduling-Algorithmen für Multicore-Systeme, woraufhin exemplarisch ein Algorithmus mit statischer Taskallokation und ein Algorithmus mit dynamischer Taskallokation vorgestellt wird. Beide Algorithmen wurden für die Verwendung in Automotive Systemen angepasst.

3.1 Klassifizierung, Definitionen

In einigen theoretisch angelegten Arbeiten zur Klassifikation von Multicore-Scheduling-Algorithmen [12] werden die Eigenschaften Migrationsfähigkeit und Prioritätsvariation einer Task als Klassifizierungskriterien von Algorithmen verwendet.

Da mit dem simulativen Ansatz die Möglichkeit besteht, die Systeme detaillierter zu untersuchen als dies bei formalen Ansätzen der Fall ist, haben wir diese Klassifizierung entsprechend Tabelle 1 erweitert. Im Folgenden werden die Eigenschaften der Klassen genauer beschrieben.

¹ Auch wenn der Begriff Periodizität für Ereignisbasierte Systeme irreführend ist, hat sich dieser historisch entwickelt und soll zur Konsistenz in dieser Arbeit auch weiter verwendet werden.

² Synchron bedeutet in diesem Fall, dass die erste Aktivierung aller Tasks zum Zeitpunkt 0 stattfindet.

³ Dadurch ist es möglich sowohl periodische, als auch sporadische (Ereignisorientierte) Taskaktivierungen durch entsprechende Beschreibung der Zeitbasis zu modellieren. Im Gegensatz zu den Ansätzen aus [14] wird es jedoch möglich, Tasks zu modellieren, deren Aktivierung zu einer Untermenge des Tasksets eine konstante Lage (wie bei periodischen Taskssystemen), hingegen zu anderen Tasks eine freie Lage (wie bei sporadischen Taskssystemen) hat. Dies macht die Analyseergebnisse exakter.

ELEKTRO- UND INFORMATIONSTECHNIK

		I		II	III
Migration	M	keine	Job-	Sektions -	volle
Priorität	P	Task-fix	Job-fix	Sektions -fix	dynamisch
Unterbrechungsart	U	Nicht-preemptiv	kooperativ	preemptiv	
Work- Conserving	W	nicht aufsparend	aufsparend		

Tabelle 1: Klassifizierung von Scheduling-Algorithmen nach den Eigenschaften: Task-Migration, Prioritätsvergabe, mögliche Taskunterbrechung und Arbeitsaufsparend

Die Eigenschaft **Migration (M)** bezeichnet die Fähigkeit, den Prozessorkern wechseln zu können auf dem eine Task ausgeführt wird. Keine Migration bedeutet, der Prozessor ist für die Ausführung aller Jobs einer Task derselbe. *Job Migration* bedeutet, dass die Jobs einer Task auf verschiedenen Prozessorkernen ausgeführt werden dürfen, wobei ein Job jedoch nach einer Unterbrechung auf dem gleichen Prozessorkern fortgesetzt werden muss. *Sektions Migration* bedeutet, dass ein Job an definierten Stellen die Möglichkeit zur Migration hat, wie dies bspw. bei Pfair Algorithmen der Fall sein kann.¹ *Volle Migration* bedeutet, dass ein Job nach jeder Unterbrechung auf einem beliebigen Prozessorkern fortgesetzt werden kann.

Die Eigenschaft **Prioritätsvergabe (P)** bezeichnet die Variation der Priorität einer Task. Entsprechend der Priorität wird einer Task gegenüber einer anderen Task bei der Ausführung Vorzug gegeben. Die verschiedenen Klassen der Prioritätsvergabe sind analog zu denen der Migration. Eine *Task-fixe* Priorität² bedeutet, dass diese für jeden Job einer Task gleich ist. Eine *Job-Fixe Priorität*³ bedeutet, dass die Priorität für einen Job gleich bleibt, zwischen Jobs einer Task jedoch variieren kann. *Sektions-fixe Priorität* bedeutet, dass

diese innerhalb von definierten Stellen eines Jobs konstant ist. *Dynamische Priorität* bedeutet, dass diese zu jedem Entscheidungszeitpunkt unterschiedlich sein kann.

Die Eigenschaft **Unterbrechung (U)** bezeichnet die Stelle(n), zu welcher eine Task unterbrochen werden darf. *Nicht-preemptiv* bedeutet, dass ein Job, der einmal gestartet wurde bis zum Ende ausgeführt werden muss. *Kooperativ* bedeutet, dass ein Job nur an definierten Stellen unterbrochen werden darf. *Preemptiv* bedeutet, dass ein Job an jeder Stelle unterbrochen werden darf.

Die Eigenschaft **Arbeit aufsparend (W)** bezeichnet die Art und Weise des Verfahrens des Scheduling-Algorithmus mit zu verarbeitenden Tasks. *Work-Conserving* [13] bedeutet, dass der Prozessor erst in den IDLE Zustand wechselt, wenn alle anstehenden Tasks abgearbeitet wurden. *Non-Work-Conserving* bedeutet, dass der Scheduler eine zur Verarbeitung anstehende Task nicht ausführen muss, obwohl freie Prozessorkerne zur Verfügung stehen. Dieser Mechanismus wird unter anderem bei den optimalen Multicore-Scheduling-Algorithmen Pfair-PD² und LLREF [5, 14] eingesetzt. Der Algorithmus LLREF wurde durch Krämer et. al. [15] für die Verwendung in Automotive Systemen angepasst.

¹ Dies ist nicht implizit, da Pfair kooperativ (Unterbrechung nur an definierten Stellen) oder preemptiv (Unterbrechung nach festen Zeiten) implementiert werden kann.

² Durch in der Praxis häufig eingesetzte Mechanismen zur Ressourcenverwaltung, wie das Priority Ceiling Protokoll, ist es trotz statischer Priorität möglich, dass eine niedrigprioritäre Task einer höherprioritären bevorzugt wird.

³ Aus der englischen Literatur „fix-priority scheduling“ übernommen.

Es lässt sich – ohne weitere Beweisführung an dieser Stelle – für die Tabelle 1 die These aufstellen, dass die Komplexität und damit der Ressourcen- bzw. der Rechenaufwand von I nach IV steigt.

So entsteht bei der Migration beispielsweise ein Mehraufwand, der auf der Verwendung von Stacks beruht. Dieser ist bei der Job Migration nahe Null, bei Sektions Migration größer¹ und bei voller Migration am größten. Bezogen auf die Prioritätsvergabe entsteht dann mehr Rechenaufwand, wenn diese variabler ist und somit öfters berechnet werden muss. Bei der Unterbrechung entsteht durch Taskwechsel ein zusätzlicher Zeitaufwand für Kontextwechselzeiten. Die Anzahl der Preemtionen ist in preemptiven Systemen höher als in kooperativen Systemen [16]. Bei Non-Work-Conserving Algorithmen muss zusätzlich der Zeitpunkt berechnet werden, ab dem der Scheduler wieder ausgeführt wird, um die aktivierten Tasks abzuarbeiten.

Im nächsten Abschnitt werden nun zwei Algorithmen vorgestellt, die in Bild 3 schematisch dargestellt sind.

Bei BinPacking-EDF handelt es sich um einen Algorithmus ohne Migration, mit Job-fixer Priorität, der preemptiv ist und nach dem Work-Conserving Prinzip arbeitet (Klasse MI-PII-UIII-WI). Auf jedem Prozessorkern des dargestellten Dualcore-Systems wird eine Instanz des Scheduling-Algorithmus EDF ausgeführt (auch als *Local-EDF* bezeichnet). Jeder Scheduler verteilt dabei eine Anzahl an Tasks, die vor der Laufzeit mittels einer BinPacking Heuristik auf diesen Prozessorkern alloziert wurden.

Bei P-ERfair-PD² handelt es sich um einen Algorithmus mit Sektions-Migration und Sektions-fixer Priorität, der kooperativ ist und ebenfalls nach dem Work-Conserving Prinzip arbeitet (Klasse MIII-PIII-UII-WI). Bei P-ERfair-PD² existiert nur eine Scheduler-Instanz für alle Tasks. Der Kern auf dem der Scheduler ausgeführt wird, variiert².

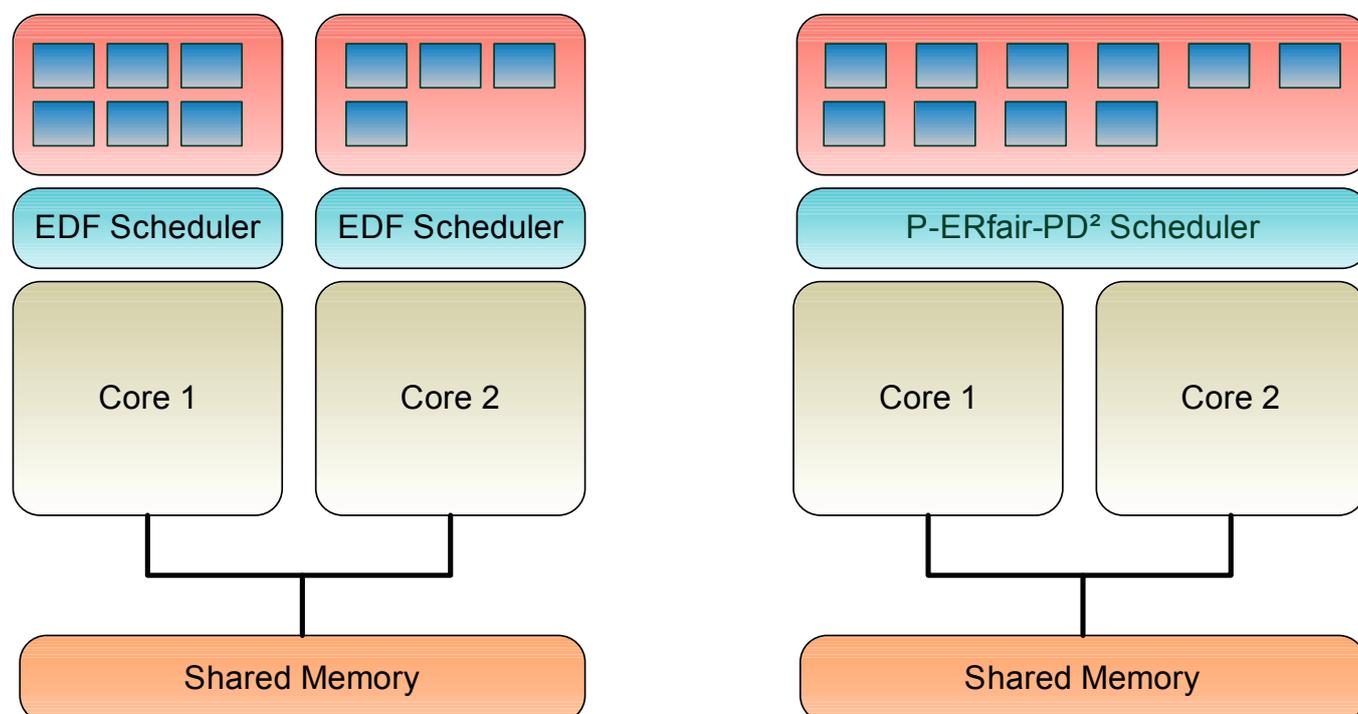


Abb. 3: Schematische Darstellung der Hardware- und Software-Komponenten (Tasks in blau) eines Dualcore-Systems. Links: BinPacking-EDF - Statische Taskallokation (keine Migration) und lokale EDF-Scheduler-Instanzen; Rechts: P-ERfair-PD² - dynamische Taskallokation (volle Migration) durch eine globale Scheduler-Instanz

¹ Die definierten Stellen einer Migration werden aus effizienztechnischer Sicht zwischen Funktionsaufrufen gelegt. Dadurch liegen weniger Daten auf dem Stack, die migriert werden müssen, als bei einer Unterbrechung innerhalb einer Funktion.

² Der Scheduler wird auf dem Prozessorkern ausgeführt, auf dem zuletzt eine Task-Terminierung stattgefunden hat. Bei anderen Scheduling-Aufrufen wird dieser entweder auf einem freien Prozessorkern oder, wenn nicht vorhanden, auf einem beliebigen Prozessorkern ausgeführt.

3.2 Algorithmus BinPacking-EDF

Bei BinPacking-EDF (Earliest Deadline First) handelt es sich um einen Algorithmus mit statischer Taskallokation. Da die Taskallokation für Algorithmen mit statischer Taskallokation (Klasse M1) ein Problem mit NP-Härte¹ darstellt, müssen hierzu geeignete Heuristiken angewandt werden. Hierzu eignet sich die BinPacking Heuristik. Nach der Allokation wird der Algorithmus EDF [16] eingesetzt, wie dieser in derzeitigen Singlecore-Prozessoren Verwendung findet, da EDF (für die erfolgreich allozierten Tasks) optimal ist.

Beim klassischen BinPacking werden Objekte einer definierten Größe in sog. Kisten mit einer freien Kapazität, entsprechend der Größe der bereits zugewiesenen Objekte, einsortiert. Die BinPacking Varianten unterscheiden sich dabei zum Einen in der Reihenfolge der Vorsortierung der Objekte. Diese sind:

- der Größe nach absteigend (engl. *Decreasing*)
- der Größe nach aufsteigend (engl. *Increasing*).

Zum Anderen unterscheiden sie sich in der Wahl der Kiste, soweit mehrere Kisten mit ausreichend freier Kapazität für ein Objekt vorhanden sind, z.B.:

- die Kiste mit der größten freien Kapazität (engl. *Worst Fit*)
- die Kiste mit der geringsten freien Kapazität (engl. *Best Fit*)
- die erste Kiste einer Anzahl durchnummerierter Kisten (engl. *First Fit*)

- beliebige Kiste mit freier Kapazität (engl. *Any Fit*).

Diese effizienten Heuristiken lassen sich auf die Taskallokation übertragen, wie dies in Bild 4 für Worst Fit Decreasing (WFD) dargestellt ist.

Bei der Anwendung der BinPacking Heuristik auf die Taskpartitionierung entsprechen Tasks Objekten und Prozessorkerne Kisten. Die Objektgröße entspricht der Task-Auslastung:

$$U(T_i) = \frac{c_i}{p_i} \tag{2.1}$$

Die verbleibende Kapazität entspricht der freien Kapazität $K(P_q)$ auf dem Prozessorkern:

$$P_q: K(P_q) = 1 - (U(S) + \sum_i U(T_i)) \quad [i \in \{1, \dots, n\} \wedge T_i \in P_q] \tag{2.2}$$

Diese entspricht 1 abzüglich der Auslastung für das Scheduling $U(S)$ und der bereits zugewiesenen Tasks. Der interessierte Leser sei auf [17] verwiesen.

Nach erfolgreicher Allokation auf die Prozessorkerne kann lokales EDF Scheduling angewendet werden, wie dies in Singlecore-Prozessoren eingesetzt wird.

Dieser Algorithmus hat den Vorteil, dass bestehende Singlecore-Systeme sehr einfach auf Multicore-Systeme portiert werden können, da keine Mechanismen zur Migrationsunterstützung nötig sind.

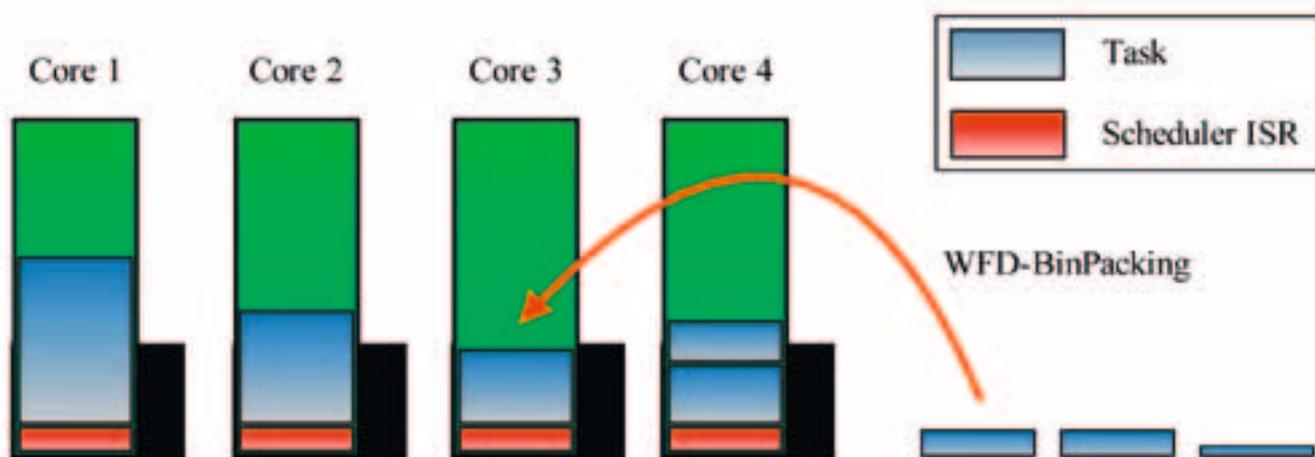


Abb. 4: Grafische Darstellung der Anwendung der BinPacking Heuristik WFD (WorstFit Decreasing) für einen Quadcore-Prozessor nach [18]. Bei WFD werden Tasks (blau) zuerst der Größe nach absteigend (Decreasing) sortiert und dann nach der Reihe dem Core mit der größten verbleibenden freien Kapazität (WorstFit; freie Kapazität in grün dargestellt) zugewiesen. Die freie Kapazität errechnet sich aus 1 abzüglich der Auslastung für die ISR des Schedulers (Da beim lokalen EDF auf jedem Core eine ISR ausgeführt; in rot dargestellt) und der Auslastung der bereits zugewiesenen Tasks

¹ Ein Problem wird nach der Komplexitätstheorie als NP-hart beschrieben, wenn das Entscheidungsproblem in nichtdeterministisch polynomieller Zeit gelöst werden kann. Ein Problem wird nach der Komplexitätstheorie als NP-hart beschrieben, wenn das Entscheidungsproblem in nichtdeterministisch polynomieller Zeit gelöst werden kann.

3.3 Algorithmus P-ERfair-PD²

Bei P-ERfair-PD² (Partly Early Release Fairness – earliest Pseudo Deadline first with 2 Tie-breaking rules) [18] handelt es sich um einen Algorithmus mit dynamischer Task-Allokation, bei dem Tasks während der Ausführung migrieren können. P-ERfair-PD² ist eine Erweiterung des Algorithmus ERfair-PD² [19], welcher wiederum auf Pfair basiert.

Pfair (def. proportionale Fairness) Scheduling ist ein Scheduling-Modell, bei dem die Laufzeit von Tasks in quantisierte Task-Sektionen unterteilt wird und den Task-Sektionen entsprechend dem Fluid-Scheduling-Modell, Prozessorzeit zugeordnet wird.

Das Fluid-Scheduling-Modell gilt für periodische Tasksysteme mit impliziter Deadline und basiert auf folgender These:

„Wenn jede Task mit einer fiktiven Taskauslastungs-abhängigen Prozessorgeschwindigkeit ausgeführt wird, sind alle Tasks beim Erreichen ihrer Deadline fertiggestellt.“

Dieser Satz ist gültig, solange die Auslastung eines Tasksets die maximale Kapazität eines Multicore-Systems nicht überschreitet. Die direkte Umsetzung ist in heutigen Systemen jedoch physikalisch nicht möglich.

Pfair Scheduling [5] nähert sich dem Fluid-Scheduling-Modell an, indem die einzelnen Task-Sektionen so gestartet werden, dass diese maximal um ± 1 Quant vom Fluid-Scheduling-Modell abweichen. Die Abweichung wird als Lag bezeichnet.

Zum Zwecke der Annäherung und der formalen Beweisbarkeit wird die Zeit quantisiert. Die Laufzeit der Task-Sektionen entspricht exakt einem Quant und die Periodizität muss ein Vielfaches eines Quant sein.

Damit eine Task-Sektion die Lag-Grenze nicht überschreitet, gibt es ein Fenster, innerhalb dessen eine Task-Sektion ausgeführt werden muss. Der Start (Pseudo-Aktivierung) und das Ende (Pseudo-Deadline) des Fensters lassen sich aus der Auslastung der Task bestimmen [5]. Die Pseudo-Aktivierung und die Pseudo-Deadline sind ebenfalls quantisiert. In Bild 5 ist der Fluid-Scheduling Graph für die Jobs $T_{1,1}, T_{1,2}, T_{2,1}, T_{2,2}$ der Tasks T_1 und T_2 mit der Auslastung $U(T_1)=(6/10)$ und $U(T_2)=(3/7)$ dargestellt, sowie die Tasksektionen, für den Job $T_{1,1}=\{V^1, \dots, V^6\}$, $T_{1,2}=\{V^7, V^8, V^9\}$, $T_{2,1}=\{W^1, W^2, W^3\}$, und $T_{2,2}=\{W^4, W^5, W^6\}$.

So muss die Task-Sektion T^2 des Jobs $T_{1,1}$ der Task T_1 innerhalb des Zeitintervalls $[1, 3[$ gestartet werden, damit sie innerhalb des Fensters $[2, 4[$ fertiggestellt ist, und die Pfair Anforderung erfüllt ist. Zwischen den Task-Sektionen bestehen sequenzielle Abhängigkeiten.

Die Priorisierung der Task-Sektionen erfolgt über die Pseudo-Deadline, dem Ende jenes Task-Sektions-Fensters. Sollte die Pseudo-Deadline für mehrere Task-Sektionen von zur Verarbeitung anstehenden Task-Sektionen identisch sein, werden sogenannte Tie-Breaking-Rules benötigt. Beim Algorithmus PD² [5] sind dies zwei zusätzliche Parameter, die aus der Konstellation der Fenster einer Task ermittelt werden.

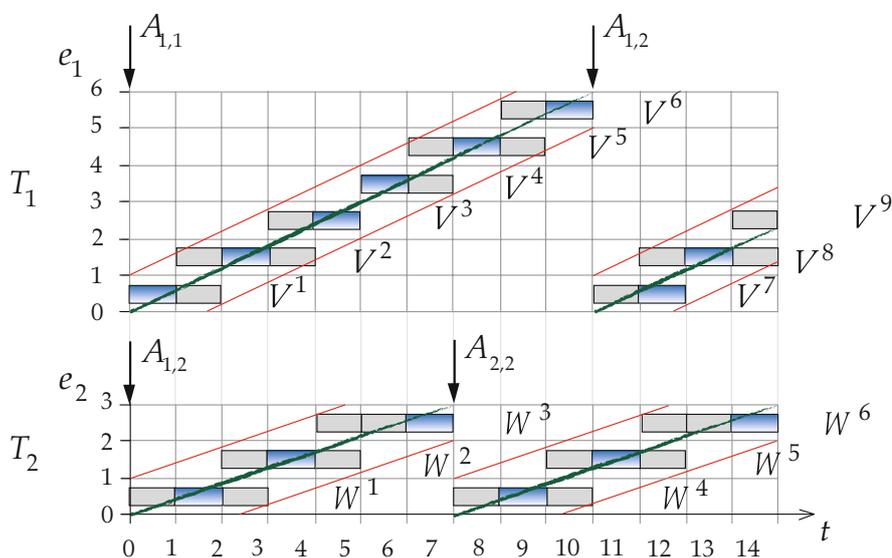


Abb. 5: Darstellung der Fluid-Scheduling-Modells (grün) für jeweils zwei Jobs der Tasks T_1 und T_2 , zusammen mit der oberen und unteren (rot) Lag-Grenze des Pfair Scheduling-Modells, der daraus resultierenden quantisierten Fenster (grau) und der nach Pfair-PD² ausgeführten Tasksektionen (blau). Die Auslastung der Task T_1 ist $U(T_1)=(6/10)$ und die Auslastung der Task T_2 ist $U(T_2)=(3/7)$

Da eine Task-Sektion nie vor ihrem Fenster-Beginn starten darf, ist der Pfair Algorithmus Non-Work-Conserving (Klasse WII).

Die Erweiterung ERfair [19] ignoriert diese Anforderung und ist somit Work-Conserving (Klasse WI).

Beide Algorithmen sind allerdings nur für periodische Taskssysteme mit quantisierter Laufzeit und quantisierter Periodizität optimal¹. Um diese Algorithmen für die hier verwendeten Taskssysteme anzuwenden sind diverse Erweiterungen nötig. Diese sind in [18] beschrieben. Der daraus resultierende Algorithmus wird als P-ERfair-PD² bezeichnet.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im ersten Teil dieser Arbeit wurde eine praktisch orientierte Klassifikation von Multicore-Scheduling-Algorithmen vorgestellt. Für die statische Taskallokation wurde der Algorithmus BinPacking-EDF und für die dynamische Taskallokation der Algorithmus P-ERfair-PD² beschrieben.

Im zweiten Teil dieser Arbeit [20] wird ein Verfahren zur simulationsbasierten Scheduling-Analyse vorgestellt werden. Nach unserem Kenntnisstand ist dieses Verfahren derzeit das Einzige, welches es erlaubt alle Scheduling-Algorithmen der Tabelle 1 zu untersuchen. In einer Fallstudie an Automotive Powertrain Systemen wird gezeigt, wie sich dieses Verfahren zum Vergleich von Scheduling-Algorithmen für eine Menge an eingebetteten Systemen einsetzen lässt.

REFERENZEN

- [1] Künzli, S. und Thiele, L. und Zitzler, E. „Modular Design Space Exploration Framework for Embedded Systems“, IEE Proceedings Computers & Digital Techniques, Vol. 152, Nr. 2, S. 183-192, 2005
- [2] Hamann, A. und Jersak, M. und Richter, K. und Ernst, R. „A Framework for Modular Analysis and Exploration of Heterogeneous Embedded Systems“, Kluwer/Springer Journal on Real-Time Systems, Vol. 33, Nr. 1-3, 2006
- [3] Samii, S. und Rafiliu, S. und Eles, P. und Peng, Z. „A simulation methodology for worst-case response time estimation of distributed real-time systems“, Proceedings of the conference on Design, automation and test in Europe, S. 556-561, 2009
- [4] Christian Simers. „Grundlagen des zeitbasierten Software Engineerings“, 2. Embedded Software Engineering Kongress, Unterlagen Kompaktseminar, S. 24, 2009
- [5] Baruah, S. und Cohen, N. und Plaxton, C. und Varvel, D. „Proportionate progress: a notion of fairness in resource allocation“, Algorithmica, Vol. 15, S. 600-625, 1996
- [6] Lopez, J. M. und Diaz, J. L. und Garcia, D. F. „Utilization bounds for edf scheduling on real-time multiprocessor systems“, Real-Time Systems, vol. 28, no. 1, S. 39-68, 2004
- [7] Cirinei, M. und Baker, T.P. „Edzl scheduling analysis“, Proceedings of the 19th Euromicro Conference on Real-Time Systems, S. 9-18, 2007
- [8] Liu, CL and Layland, J.W. „Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard-real-time environment“, Journal of the ACM, Vol. 20-1, S. 61, 1973
- [9] Mok, A. K. „Fundamental Design Problems of Distributed Systems for The Hard-Real-Time Environment“, PhD thesis, Laboratory for Computer Science, Massachusetts Institute of Technology. Available as Technical Report No. MIT/LCS/TR-297. 1983
- [10] Baruah, S. „Dynamic- and static-priority scheduling of recurring real-time tasks“. Real-Time Systems: The International Journal of Time-Critical Computing, Vol. 24, S. 99-128. 2003
- [11] Fisher, N.W. „The multiprocessor real-time scheduling of general task systems“, PhD thesis, Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill, 2007
- [12] Carpenter, J. und Funk, S. und Holman, P. und Srinivasan, A. und Anderson, J. und Baruah, J. „Categorization of Real-time Multiprocessor Scheduling Problems and Algorithms“, Handbook on Scheduling Algorithms, Methods, and Models, 2004
- [13] Fall, K. „Introduction to Communication Networks“, <http://www.cs.berkeley.edu/~kfall/EE122/lec26/sld033.htm>, EECS 122, Lecture 26, 23. März 2010
- [14] Cho, H. und Ravindran, B. und Jensen, E. D. „An Optimal Real-Time Scheduling Algorithm for Multiprocessors“. Proceedings of the 27th IEEE Real-Time Systems Symposium, S. 101-110, 2006.

¹ Definition von **Optimalität** im Bezug auf Scheduling nach Buttazzo [19, S. 33]: “[...] an algorithm is said to be optimal if it always finds a feasible schedule whenever there exists one.”; [wobei feasible schedule bei Buttazzo folgendermaßen definiert wird:] Definition von **feasible schedule** nach Buttazzo [19, S. 23]: “A schedule is said to be feasible, if all tasks can be completed according to a set of specified constraints.”

- [15] Krämer, S. und Mottok, J. und Maier, H. „OSEK-basierende Implementierung des LLREF-Scheduling-Algorithmus für eine Dual-Core-Architektur“, 2. Landshuter Symposium Mikrosystemtechnik, S.343-349, 2010
- [16] Buttazzo, G. C. „Rate Monotonic vs. EDF Judgment Day“, Real-Time Systems Volume 29, S. 5-26, 2005
- [17] Deubzer, M. und Mottok, J. und Margull, U. und Niemetz, M. und Wirrer, G. „Partitionierungs-Scheduling von heterogenen Tasksystemen auf Multiprozessoren in Automotive Steuergeräten“, 2. Embedded Software Engineering Kongress; Vogel Business Media GmbH; S. 536–543, 2009
- [18] Deubzer, M. und Mottok, J. und Margull, U. und Niemetz, M. und Wirrer, G. „Efficient Scheduling of Reliable Automotive Multi-core Systems with PD² by Weakening ERfair Task System Requirements“, Automotive – Safe & Security (Accepted for Publishing); 2010
- [19] Anderson, J.H. and Srinivasan, A. „Early-release fair scheduling“, Proceedings of the 12th Euromicro Conference on Real-Time Systems, S. 35-43, 2000
- [20] Deubzer, M. und Schiller, F. und Mottok, J. und Niemetz, M. und Margull, U. „Effizientes Multicore-Scheduling in Eingebetteten Systemen – Teil 2: Ein simulationsbasierter Ansatz zum Vergleich von Scheduling-Algorithmen“, atp, 2010

Dipl.-Ing. (FH) Michael Deubzer arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter am LaS³ (www.LaS3.de) im Forschungsprojekt DynaS³ und ist Promotionsstudent an der Technischen Universität München.

Adresse: Hochschule Regensburg, LaS³, Seybothstraße 3, 93053 Regensburg, 0941 943-9713, Michael.Deubzer@hs-regensburg.de

Prof. Dr. Frank Schiller (geb. 1966) leitet am Lehrstuhl für Informationstechnik im Maschinenwesen der TU München seit 2004 als Extraordinarius das Fachgebiet Automatisierungstechnik. Adresse: TU München, Fakultät Maschinenwesen, Lehrstuhl für Informationstechnik im Maschinenwesen, Boltzmannstraße 15, 85748 Garching bei München, 089 289-16402, schiller@itm.tum.de

Prof. Dr. Jürgen Mottok lehrt Software Engineering, Programmiersprachen, Betriebssysteme und Safety an der Regensburger Hochschule für Angewandte Wissenschaften. Er leitet das Software-Engineering-Labor „Laboratory for Safe and Secure Systems“ (www.LaS3.de).

Adresse: Hochschule Regensburg, LaS³, Seybothstraße 3, 93053 Regensburg, 0941 943-1120, Juergen.Mottok@hs-regensburg.de

Dr. Ulrich Margull ist Geschäftsführer der 1 mal 1 Software GmbH. Er berät Firmen in den Bereichen Softwarearchitektur und Echtzeitverhalten.

Adresse: 1 mal 1 Software GmbH, Maxstraße 31, 90762 Fürth, ulrich.margull@1mal1.com

Dr. Michael Niemetz arbeitet als Experte für Softwarearchitektur bei der Continental Automotive GmbH in Regensburg im Bereich Powertrain Engine Systems Engineering.

Adresse: Continental Automotive GmbH, Siemensstraße 12, 93055 Regensburg, Michael.Niemetz@continental-corporation.com

ELEKTRO- UND INFORMATIONSTECHNIK

EFFIZIENTES MULTICORE-SCHEDULING IN EINGEBETTETEN SYSTEMEN
TEIL 2: EIN SIMULATIONSBASIERTER ANSATZ ZUM VERGLEICH VON
SCHEDULING-ALGORITHMEN

Eingebettete Systeme unterliegen neben den funktionalen Anforderungen besonders nichtfunktionalen Qualitätsanforderungen wie Effizienz, Zuverlässigkeit und Echtzeitfähigkeit. Einprozessorsysteme werden diesbezüglich in hoher Qualität entwickelt; Scheduling-Algorithmen zur Einhaltung aller Echtzeitanforderungen bei maximaler Systemauslastung existieren. Mit steigendem Bedarf an Rechenkapazität können bisherige Konzepte zur Leistungssteigerung jedoch nicht mehr eingesetzt werden – der Umstieg auf Multicore-Systeme erfolgt.

Im zweiten Teil dieser Arbeit wird ein simulationsbasierter Ansatz zum Vergleich von Multicore-Scheduling-Algorithmen vorgestellt. Durch diesen Ansatz können Algorithmen für Multicore-Systeme mit voller Migration und dynamischer Task-Priorität untersucht werden. Wir erweitern diesen Ansatz um ein Verfahren zur Untersuchung einer Tasksetmenge, deren Task-Eigenschaften stochastisch beschrieben sind. Anschließend wird die Kenngröße mNL für die Bewertung der Echtzeitfähigkeit eines kompletten Tasksets präsentiert. Zum Schluss vergleichen wir mit diesem Ansatz die im Teil 1 beschriebenen Algorithmen BinPacking-EDF und P-ERfair-PD² für eine Gruppe von Automotive Powertrain Systemen.

Software intensive-Echtzeitsysteme / Multicore / Scheduling / Simulation

Efficient Usage of Multicore Systems

Embedded Systems have to fulfill both, functional requirements and non-functional quality requirements like efficiency, reliability and real-time. For today's uniprocessor systems, scheduling algorithms exist that fulfill all real-time requirements and allow a maximal system utilization. But with the advent of further processing power, today's mechanisms of performance improvement at uniprocessor systems breakdown. A new branch of embedded systems is required to achieve more processing power – Embedded Multicore systems.

In the second part of this work, we present a simulation based approach to compare multicore scheduling algorithms. The approach can be applied to both, dynamic and static scheduling algorithms. Additionally we extend this approach for the analysis of stochastically described tasksets. With the presented metric mNL , it's possible to evaluate the real-time compliance of a complete taskset. Finally we use our approach to compare two algorithm which were introduced in the first part of this work (BinPacking+EDF and P-ERfair-PD²) for a group of automotive power train systems. Softwareintensive Real-Time Systems / Multicore / Scheduling / Simulation

1 EINLEITUNG

Im ersten Teil dieser Arbeit [8] wurde gezeigt, in welche Gruppen sich Scheduling-Algorithmen für Multicore-Systeme einteilen lassen. Die vorgestellten Algorithmen BinPacking-EDF und P-ERfair-PD² sind zwei Algorithmen der grundlegenden Unterteilungen: statische Aufteilung (ohne Migration) und dynamische Aufteilung (Sektions-Migration).

In dieser Arbeit präsentieren wir einen simulationsbasierten Ansatz zur Untersuchung von Scheduling-Algorithmen für Multicore-Systeme bzgl. der Einhaltung von Echtzeitanforderungen sowie zum Vergleich ihrer Effizienz. Dieser Ansatz ist nach unserem Wissen bisher der einzige generische Ansatz zur Analyse von Multicore-Scheduling-Algorithmen mit voller Migration, dynamischer Prioritätsvergabe, preemptiver Unterbrechungsart und Non-Work-Conserving Prinzip bei gleichzeitiger Möglichkeit zur Untersuchung von Algorithmen geringerer Komplexität¹.

Da sich die Taskset-Eigenschaften einer Software über den Entwicklungszeitraum und häufig auch nach Auslieferung der Software über Software-Updates ändern, z.B. aufgrund von variierenden maximalen Task-Laufzeiten durch zusätzliche Funktionalitäten, ist dies bei der Beurteilung und der Auswahl des am besten geeigneten Algorithmus für ein System zu berücksichtigen.

Um diese Eigenschaft beim Vergleich von Scheduling-Algorithmen berücksichtigen zu können, stellen wir eine Analyse für stochastisch beschriebene Tasksetmengen vor, die auf dem Monte-Carlo-Prinzip basiert, ähnlich dem Ansatz von [7].

Die Arbeit ist folgendermaßen aufgebaut: In Kapitel 2 geben wir zunächst einen Überblick über die Echtzeitanalyse. In Kapitel 3 stellen wir unseren Ansatz zur Analyse von Multicore-Scheduling-Algorithmen entsprechend der Klassifikation aus Teil 1 vor - die simulationsbasierte Echtzeitanalyse von Multicore-Scheduling-Algorithmen. In Kapitel 4 beschreiben wir die Berechnung der Vergleichsgröße mNL , um anschließend in Kapitel 5 eine Erweiterung des Echtzeitanalyse-Ansatzes einzuführen, mittels dessen stochastisch beschriebene Tasksetmengen nach dem Monte-Carlo-Prinzip untersucht werden können. In Kapitel 6 beschreiben wir die technische Realisierung. Schließlich vergleichen wir in Kapitel 7 die vorgestellten Algorithmen des ersten Teils mittels unseres Ansatzes. Ein kurzes Fazit rundet diese Arbeit ab.

¹ Die Definition dieser Begriffe: siehe Teil 1 - Kapitel 3 [8].

2 ECHTZEITANALYSE

Die formale Scheduling-Analyse wie [1,2], bestimmt die Response-Time (dt. Ansprechzeit) unter Vereinfachungen des Tasksystems, um die Analysen durchzuführen zu können. Diese Vereinfachungen können dazu führen, dass der ermittelte Worst-Case schlechter ist als in der Realität. Daher werden diese Analysen auch als pessimistisch bezeichnet. Simulationsbasierte Analysen wie [3] bestimmen die Response-Zeit empirisch durch systematische Durchsuchung des Parameterraums, z.B. mittels Optimierungsalgorithmen. Dies wird auch als optimistische Analyse bezeichnet.

Beide Analysen haben ihre Daseinsberechtigung. Der formale Ansatz wird in Systemen mit höchsten Sicherheitsanforderungen angewandt, in denen es nicht möglich ist, die Echtzeit-kritischen Komponenten in Hardware zu realisieren und in denen eine vielfache Überdimensionierung wirtschaftlich ist. Der simulationsbasierte Ansatz wird in Systemen eingesetzt in denen zwar hohe Sicherheitsanforderungen bestehen, die zeitkritischen Funktionen jedoch in Hardware realisiert werden können oder Deadline-Verletzungen nur zu mehr Rechenaufwand oder Qualitätsverlusten führen. Dafür sind diese Systeme äußerst effektiv nutzbar, wie in der Fallstudie gezeigt wird.

Zudem existieren für Scheduling-Algorithmen der Klasse MII (Job-Migration) oder MIII (Sektions-Migration) nur Algorithmus-spezifische Lösungen für die formale Echtzeitanalyse, welche einen Vergleich verschiedener Algorithmen erschweren. Für Algorithmen der Klasse MIV-PIV (volle Migration und dynamische Priorität) existieren nach unserem Wissen² derzeit keine formalen Ansätze.

Aus diesem Grund haben wir uns bei der Echtzeitanalyse von Multicore Scheduling-Algorithmen für einen simulationsbasierten Ansatz entschieden, der einen einheitlichen Ansatz zum Vergleich aller Arten von Algorithmen nach Tabelle 2 aus dem ersten Teil dieser Arbeit [8] ermöglicht. Gleichzeitig jedoch unterliegt dieser Ansatz Einschränkungen in der Exaktheit, da er den Worst-Case der Echtzeiteinhaltung empirisch bestimmt und nicht garantieren kann. Diese Einschränkungen sind für die untersuchten Systeme akzeptabel.

3 EREIGNISORIENTIERTE SIMULATION ZUR ECHTZEITANALYSE

Im Folgenden wird erklärt, wie sich die ereignisorientierte Hardware-Software Co-Simulation zur Echtzeitanalyse einsetzen lässt und aus welchen Komponenten diese aufgebaut ist.

Die benötigten *Komponenten* eines eingebetteten Systems werden in der ereignisorientierten Simulation durch Zustandsautomaten modelliert. Die Zustandsänderungen geschehen durch das Auslösen von *Signalen*. Dabei kann sowohl die Zustandstransition als auch der Verbleib in einem Zustand mit einer Zeit behaftet sein. Damit diese Übergänge und das Auslösen von Signalen kausal korrekt verläuft, gibt es einen *Event Master* sowie Events, die sich beim Event Master registrieren können, wie dies in Bild 1 dargestellt ist.

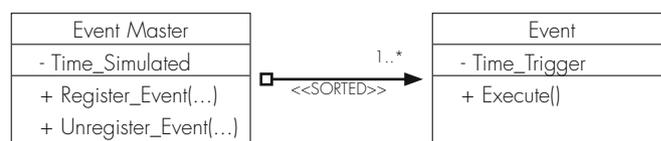


Abb. 1: UML-Modell des Simulationskerns einer ereignisorientierten Simulation. Komponenten (nicht dargestellt) können Events registrieren oder entfernen. Die Events werden entsprechend der Auslöse-Zeit ausgeführt

Beim Event Master ist es möglich, Events mit einem globalen Zeitstempel zu registrieren. Der Event Master sortiert alle Events dem Zeitpunkt nach und löst den nächsten Event aus. Daraufhin können die mit dem Event verbundenen Komponenten Signale an andere Komponenten senden oder neue Events registrieren. Wenn die mit dem Event verbundene Komponente fertig ist, beginnt der Ablauf von vorne. Die globale Zeit springt dabei zum Zeitpunkt des nächsten Events (Bild 2).

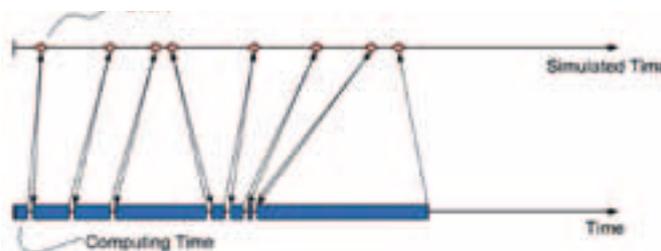


Abb. 2: Gegenüberstellung der realen Zeit mit der simulierten Zeit. In der simulierten Zeit wird zu den Zeitpunkten gesprungen; der Fortschritt in der realen Zeit resultiert aus der Rechenzeit der simulierten Funktionalitäten, Zustandsübergängen usw. der Komponenten, die mit einem Event verbunden sind

Zudem ist es in einer Komponente möglich, bereits registrierte und in der Zukunft liegende Events zu manipulieren oder zu entfernen. Die Simulation endet, sobald die globale Zeit einen vorher definierten Wert erreicht.

² Siehe auch R.I. Davis und A. Burns [11].

Die kommunizierten Signale werden mit dem globalen Zeitstempel aufgezeichnet. Dadurch ist es anschließend möglich das Verhalten des simulierten Systems mittels geeigneter Kenngrößen (siehe Kapitel 4 und [10]) zu analysieren und zu bewerten.

Nun werden die Komponenten, die zur Simulation eines Multicore-Systems notwendig sind, genauer beschrieben. Sie werden in die Gruppen Hardware, Software und Betriebssystem gegliedert.

Die **Hardware** wird durch einen Prozessor beschrieben, der sich aus einer Reihe an Prozessorkernen und einem Quarz zusammensetzt. Der Quarz gibt die Taktrate vor, mit der die Instruktionen auf einem Prozessorkern verarbeitet werden. Jeder Prozessorkern ist dabei eindeutig zuordenbar, ist aber mit allen anderen Prozessorkernen bzgl. der Eigenschaften identisch. Zusätzlich werden in der Hardware die Stimuli für die Aktivierung der Prozesse modelliert¹.

Die **Software** wird durch Prozesse beschrieben, die als Tasks oder Interrupt Service Routinen (ISR) realisiert sind und entsprechend durch den Scheduler oder die Interruptverwaltung einem Prozessorkern zugeordnet werden. Ein Prozess besteht aus einer Reihe an Prozess-Sektionen, die in einer geordneten Liste aufgeführt sind. Dies dient der Modellierung von Kooperation, wie dies in der Scheduling Klasse Ull (kooperativ) der Fall ist. Eine Prozess-Sektion wiederum untergliedert sich in eine Reihe von Funktionen, die wiederum gleichermaßen in einer geordneten Liste aufgeführt sind². Eine Funktion ist durch eine Anzahl von Instruktionen und durch funktionellen Code beschrieben.

Die Instruktionen werden mittels der Instruktionsdauer, die durch den Prozessorkern und dessen bestimmt wird, in eine Laufzeit umgerechnet. Durch die Summe aller Funktionslaufzeiten innerhalb einer Task-Sektion entsteht die Task-Sektions-Laufzeit, durch die Summe aller Task-Sektions-Laufzeiten entsteht die Task-Laufzeit.

Der funktionale Code dient dazu, die Simulation um die Nachbildung von Funktionalität zu ergänzen. Da, wie einleitend erwähnt, der Fokus bei diesen Untersuchungen auf den Zeit-Eigenschaften liegt, ist diese Funktionalität jedoch nur für eine Komponente umgesetzt – für den Scheduling-Algorithmus³.

Das **Betriebssystem** besteht aus den Komponenten Scheduler und Interruptverwaltung. Der Scheduler dient der Zuweisung der Tasks zu den Prozessorkernen. Die Interruptverwaltung dient der Zuweisung von ISRs. Die Entscheidungen der Interruptverwaltung haben immer höhere Priorität als die des Schedulers, wodurch ISRs gegenüber den Tasks bei der Ausführung immer bevorzugt werden.

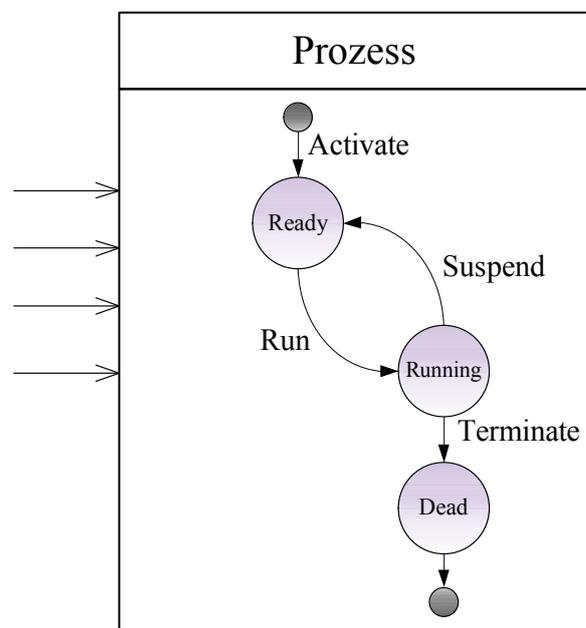


Abb. 3: State-Diagramm der Komponente Prozess. Ein Prozess (realisiert durch eine Task oder ISR und instanziiert durch einen Job) wird durch einen Stimulus aktiviert, wodurch er in den Zustand Ready wechselt; Wenn der Scheduler (im Falle einer ISR die Interruptverwaltung) den Task einem Prozessor-Kern zur Ausführung zuordnet, geht dieser in den Zustand Running; Wird ein Prozess durch einen anderen Prozess unterbrochen (Task oder ISR), geht dieser wieder in den Zustand Ready; Ist ein Prozess ausgeführt geht dieser in den Zustand Dead über

Zur Veranschaulichung des Prinzips der Simulation wird nun das Prozess-Zustandsmodell (in Spezialisierung einer Task) mit den betreffenden Signalen genauer erläutert (Bild 3). Das Zustandsmodell orientiert sich an dem OSEK Task-Zustandsmodell [4]. Eine Task hat die Zustände Ready, Running und Dead. Der Ablauf einer Ausführung ist folgendermaßen:

¹ Zur Modellierung von Stimuli gibt es verschiedene Möglichkeiten. Wir verwenden in dieser Arbeit, entsprechend dem definierten Tasksystem, periodische Stimulierungen, die einer Zeitbasis zugeordnet sind. Diese Zeitbasis kann, im Vergleich mit der globalen simulierten Zeit, mit einer Phase belegt werden oder zu speziellen Zeitpunkten mit Faktoren ≥ 1 skaliert werden. Über entsprechende Faktoren ist es möglich sporadische Aktivierungen zu modellieren. Die angegebene Periodizität eines Stimulus (für eine Task oder ISR) entspricht dadurch immer dem minimalen Abstand zwischen zwei Aktivierungen, im Bezug auf die globale Zeit.

² Diese Modellierung hat einen entwicklungstechnisch-analytischen Grund, da es damit möglich ist, Funktionen mit Laufzeiten zu modellieren und die Position innerhalb einer Task (oder Task-Sektion) oder auch die Zuweisung auf eine Task zu optimieren.

³ Da der Scheduler selbst als ISR, nach der beschriebenen Modellierungsart, realisiert ist, kann die Laufzeit für das Scheduling in die Untersuchung mit eingebracht werden.

Zu Beginn wird eine Task über einen Stimulus aktiviert, wodurch das Signal $Activate(A_{i,j})$ entsteht und die Task in den Zustand *Ready* geht; Anschließend wird die ISR des Scheduling-Algorithmus ausgeführt und -sollte diese Task die höchste Priorität aller Tasks, die zur Verarbeitung auf dem entsprechenden Prozessorkern anstehen, besitzen (und keine ISRs zur Verarbeitung anstehen) – das Signal $Run(R_{i,j})$ (bei erster Ausführung Start (S^2_j)) wird ausgelöst – die Task wird ausgeführt und geht in den Zustand *Running*. Sollte während der Ausführung eine höherprioritäre Task oder eine ISR aktiviert werden und auf diesen Prozessorkern alloziert werden, wird das Signal *Suspend* ausgelöst, die Task wird unterbrochen und geht wieder in den Zustand *Ready*. Ist die Task mit der Ausführung fertig, wird das Signal $Terminate(F_{i,j})$ ausgelöst und die Task geht in den Zustand *Dead* über. In Bild 11 sind die Signale (jedoch ohne Unterbrechung) für zwei Jobs einer Task zeitlich dargestellt.

In ähnlicher Weise sind auch die Komponenten Interruptverwaltung und Prozessorkernmodell aufgebaut, diese sollen

jedoch aus Platzgründen an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt werden.

Im Folgenden wird auf die Modellierung des Schedulers näher eingegangen, sowohl auf die hierfür benötigten Komponenten als auch anschließend auf die Phasen des Scheduling. Das Phasenmodell dient der generischen Modellierung von Scheduling-Modellen und bildet alle möglichen Algorithmen nach Tabelle 2 ab.

Die Schedulerkomponente besitzt eine Reihe an Prozessorkernen, die von ihr verwaltet werden. Dadurch ist es möglich, sowohl globale Scheduler zu modellieren, die alle Prozessorkerne verwalten, als auch lokale Algorithmen, die nur einen Prozessorkern verwalten. Desweiteren sind auch Mischformen möglich.

Das Scheduling-Modell besteht aus fünf Phasen: Ressourcenanalyse, Task-Nominierung, Task-Sortierung, Ausführung und Vorbereitung. Im Folgenden werden diese Phasen näher beschrieben (Bild 4).

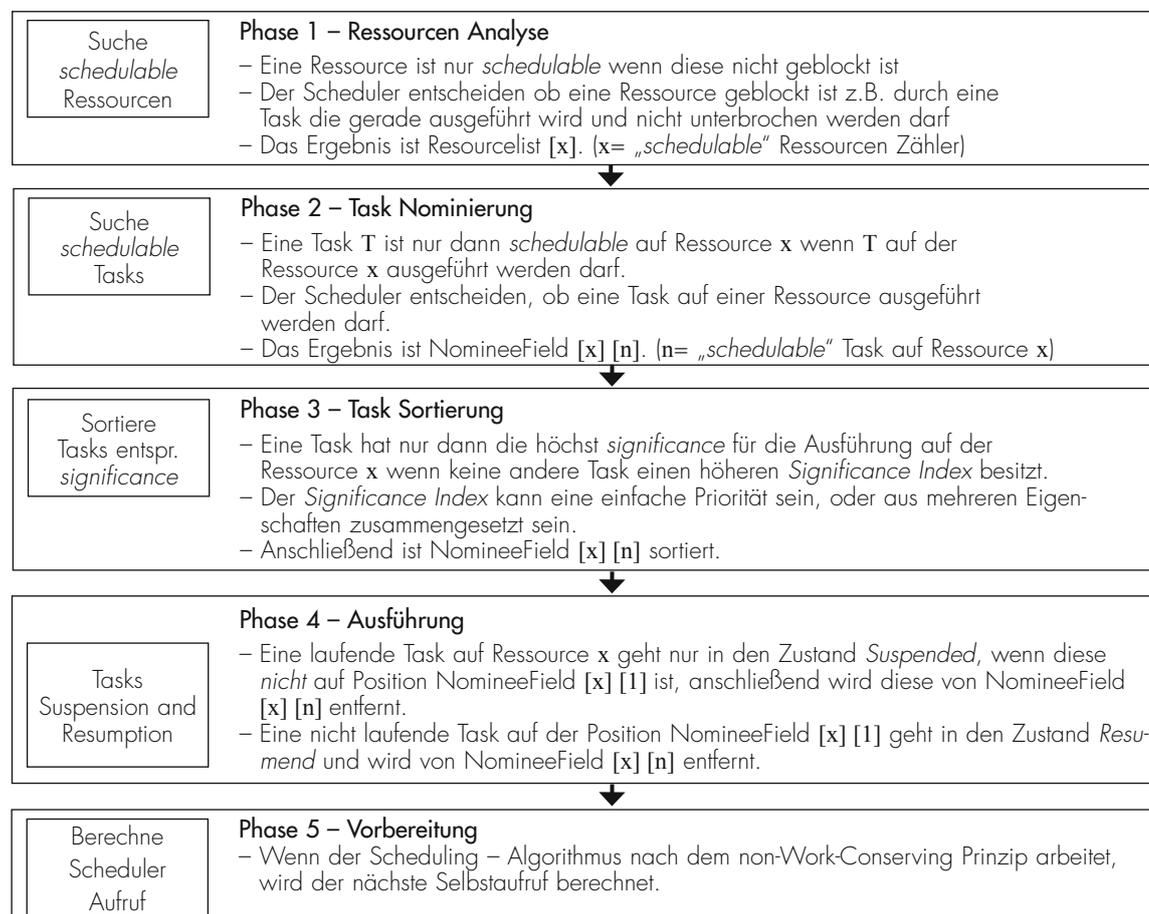


Abb. 4: Darstellung des Phasenmodells für einen Multicore-Scheduling-Algorithmus zur Modellierung aller Scheduling-Algorithmen nach Tabelle 2

In der Phase der **Analyse** wird bestimmt, welche der vom Scheduler verwalteten Prozessorkerne für die Allokation von Tasks zu Verfügung stehen. So kann es bei der Klasse UI (nicht-preemptiv) und UII (kooperativ) der Fall sein, dass eine Task nicht unterbrochen werden darf und dadurch der Prozessorkern blockiert ist, während dies bei der Klasse UIII (preemptiv), also bei preemptiven Algorithmen, nicht der Fall sein kann.

In der Phase der **Nominierung** wird bestimmt, ob eine Task momentan ausgeführt werden darf. Es ist nämlich bei Algorithmen der Klasse VII (non-work-conserving) möglich, dass eine nicht ausgeführte Task blockiert ist, wie z.B. bei Algorithmen der Klasse Pfair. Verwaltet ein Algorithmus mehr als einen Prozessorkern und handelt es sich um einen Algorithmus der Klasse MI, MII oder MIII, muss diese Nominierung für jeden Prozessorkern durchgeführt werden, da es möglich ist, dass sich eine Task innerhalb einer nicht migrierbaren Sektion befindet und somit eine Beschränkung der Ausführung auf den aktuellen Prozessorkern vorliegt.

In der Phase der **Sortierung** wird bestimmt, welche der nominierten Tasks Anspruch auf den Prozessorkern haben. Bei Algorithmen der Klasse PIII¹ (Sektions-fixe Priorität) und PIV (dynamische Priorität) muss hier die Priorität erneut berechnet werden.

In der Phase der **Fertigstellung** werden die Tasks auf die Prozessorkerne alloziert und evtl. ausführende Tasks unterbrochen.

In der Phase **Vorbereitung** werden für Algorithmen der Klasse VII (non-work-conserving) die Zeitpunkte für die nächste Ausführung ermittelt und ein Stimulus für diesen Zeitstempel gesetzt.

Nach der Beschreibung der Komponenten soll nun dargelegt werden, wie mithilfe der aufgezeichneten Signale der Komponenten die Echtzeitanalyse durchgeführt werden kann.

4 VERGLEICHSGRÖSSE ^{mNL}

Zur Bewertung eines Tasksets hinsichtlich der Einhaltung einer Deadline wird eine Größe benötigt, die dies beschreibt und zudem im Falle einer Über- oder Unterschreitung ein Maß für die Abweichung angibt. Aus diesem Grund haben wir uns für die normierte Lateness (dt. Verspätung) entschieden.

4.1 Berechnung ^{mNL}

Die *Lateness* entspricht der Zeitspanne, um die eine Task ihre Deadline bei der Fertigstellung überschreitet. Die Lateness lässt sich folgendermaßen bestimmen.

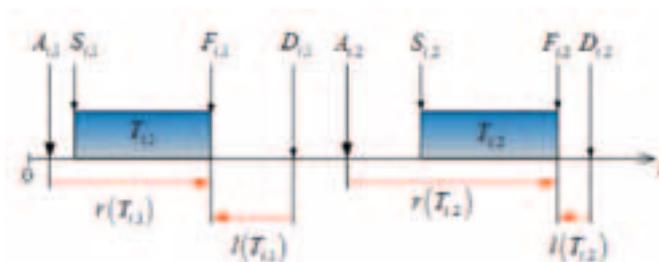


Abb. 5: Darstellung der Vergleichsgrößen Responsezeit $r(T_{i,j})$ und Lateness $l(T_{i,j})$ von zwei ausgeführte Jobs $j=\{1,2\}$ der Task T_i sowie den Zeitpunkte jedes Jobs $T_{i,j}$ Aktivierung: $A_{i,j}$ Start $S_{i,j}$, Fertigstellung $F_{i,j}$ und Deadline $D_{i,j}$

Durch die Simulation werden, wie oben beschrieben und in Bild 5 dargestellt, für jeden Job j einer Task i die Zeitpunkte für Aktivierung $A_{i,j}$, Fertigstellung $F_{i,j}$ und Deadline $D_{i,j}$ ermittelt. Die Job-Lateness $l(T_{i,j})$ eines Jobs errechnet sich nach folgender Formel:

$$l(T_{i,j}) = F_{i,j} - D_{i,j} \tag{4.1}$$

Da für die Echtzeitanalyse die Einhaltung der Deadline für alle Jobs einer Task relevant ist, wird die Lateness $L(T_i)$ (sog. Task-Lateness) für alle Jobs $j=\{1,\dots,g\}$ einer Task T_i bestimmt:

$$L(T_i) = \max_{j=\{1,\dots,g\}} (l(T_{i,j})) \tag{4.2}$$

Soll ein ganzes Taskset bewertet werden, sind zwei weitere Schritte nötig. Im ersten Schritt wird $L(T_i)$ mittels der Deadline d_i normiert¹. Im zweiten Schritt wird das Maximum dieses Wertes für alle Tasks T_i für $i=\{1,\dots,n\}$ ermittelt.

$$mNL = \max_{i=\{1,\dots,n\}} \left(\frac{L(T_i)}{d_i} \right) \tag{4.3}$$

Die Kenngröße *maximale normierte Lateness* mNL beschreibt nach dieser Definition die größte prozentuale Verspätung aller Jobs aller Tasks des untersuchten Tasksets. Ein mNL Wert von 0.1 entspricht einer Überschreitung der Deadline um 10% der Deadline, ein Wert von -0.2 entspricht einer Unterschreitung der Deadline um 20%.

4.2 Bezug zur Response-Time Analyse

Die Kenngröße mNL lässt sich ebenfalls aus der Response Time $R(T_i)$ (dt. Ansprechzeit) ableiten.

In Bild 5 ist die Job-Response Time $r(T_{i,j})$ für zwei Jobs dargestellt. Mittels formalen Analysen kann die Response-Time

¹ Bei der Gruppe PIII gibt es jedoch die Optimierung, nur zu Beginn einer Taskphase die Priorität neu zu berechnen

$R(T_i)$ (sog. Task-Response Time) ermittelt werden (z.B. [2]). Zur Berechnung der Lateness $L(T_i)$ wird die Formel 4.4 angewendet. Die restliche Berechnung von mNL erfolgt analog.

$$L(T_i) = R(T_i) - d_i \quad (4.4)$$

5 ANALYSE EINER TASKSETMENGE

Mit der oben beschriebenen Methode ist es möglich, Echtzeitanalysen für ein Taskset und einen Scheduling-Algorithmus durchzuführen.

Unterschiede in den Task-Eigenschaften innerhalb des Tasksets können dabei allerdings selbst beim Einsatz des gleichen Scheduling-Algorithmus zu erheblich, voneinander abweichenden Ergebnissen führen. Innerhalb eines Softwareprojektes sind die Task-Eigenschaften aufgrund von sich änderndem Funktionsumfangs nicht konstant, worauf bereits in der Einleitung hingewiesen wurde. Soll nun für ein Softwareprojekt eine Aussage über die Verwendung eines Scheduling Algorithmus getroffen werden, so kann eine einzelne Analyse keine hinreichende Aussage liefern.

Aus diesem Grund bedienen wir uns eines stochastischen Ansatzes zum Vergleich von Scheduling-Algorithmen, indem wir eine Tasksetmenge stochastisch beschreiben. Zur Untersuchung dieser Tasksets verwenden wir das in der Physik für aufwendige, hochdimensionale Problemstellungen häufig eingesetzte Prinzip der Monte-Carlo-Analyse. In Bild 6 ist der Ablauf unseres Ansatzes schematisch dargestellt.

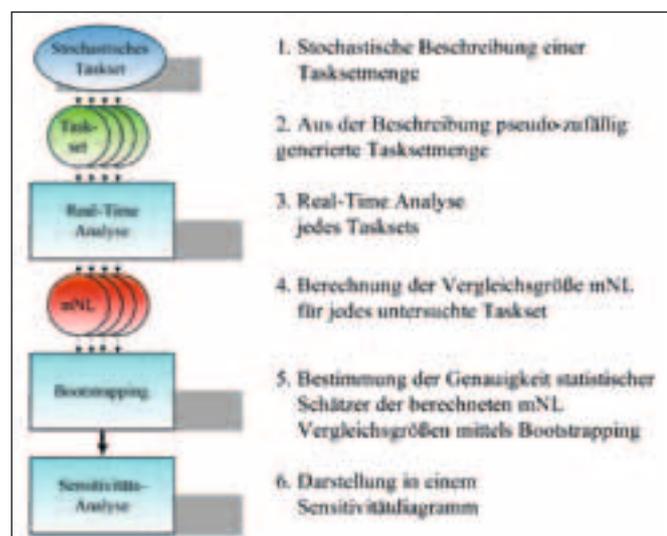


Abb. 6: Darstellung des Monte-Carlo-Prinzips zur Untersuchung einer stochastisch beschriebenen Tasksetmenge

Im ersten Schritt wird das System mit den sich ändernden Eigenschaften oder einer Menge an Einzelsystemen stochastisch beschrieben. Dazu werden entweder Task-Eigenschaften mit Verteilungen wie z.B. Gleichverteilung, Weibullverteilung, oder Normalverteilung belegt¹.

Im zweiten Schritt werden dann entsprechend dieser Verteilungen pseudo-zufällig Tasksets generiert.

Im dritten Schritt werden diese Systeme simuliert und im darauffolgenden Schritt die Kenngröße mNL berechnet.

Ab dieser Stelle können nun verschiedene Analysen durchgeführt werden, um die Abhängigkeit der Kenngröße mNL von verschiedenen System-Charakteristiken zu untersuchen. *System-Charakteristiken* sind in diesem Zusammenhang Kenngrößen für ein Taskset. Eine *System-Charakteristik* ist z.B. die Systemauslastung eines Tasksets², die im Folgenden weiter behandelt werden soll.

Eine der interessantesten Fragestellungen ist hierbei, bis zu welcher Systemauslastung ein Scheduling-Algorithmus für eine Tasksetmenge eingesetzt werden kann. Die Systemauslastung errechnet sich aus der Laufzeit e_i und der Periodizität p_i einer Task T_i nach der folgenden Formel.

$$U_{SYS} = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{p_i} \quad (5.1)$$

Um die Auslastungsgrenze festzustellen, werden die Tasks in Cluster gruppiert und diese Cluster mit stochastischen Schätzern bewertet. Die Clusterbreite wird dabei durch eine äquidistante Aufteilung des resultierenden Bereichs der Systemauslastung der Tasksetmenge in eine definierte Anzahl an Clustern ermittelt. Für jeden Cluster können nun statistische Schätzer wie Median, 1%-Quantil und 99%-Quantil gebildet werden. Diese sind in der Fallstudie in Bild 8 & 9 durch Boxplots dargestellt. Durch Anwendung des Bootstrapping-Verfahrens [5] ist es möglich, die Genauigkeit für diese Schätzer zu bestimmen. Dies ist notwendig, da mit der Monte-Carlo-Analyse nur eine Stichprobe gebildet wird. Mit dieser Darstellung können verschiedene Scheduling-Algorithmen miteinander verglichen werden.

6 TECHNISCHE UMSETZUNG

Die Simulation der nach dem Monte-Carlo-Prinzip generierten Tasksets ist sehr rechenintensiv. Daher haben wir eine Simulationsumgebung auf C++ Basis entwickelt, die für mehrere Tasksets in einem Cluster-Computing-Netzwerk parallel abgearbeitet wird.

¹ Dies wird so vorgenommen, damit sich Tasks unterschiedlicher Deadline vergleichen lassen.

² Der Ansatz kann so weit verallgemeinert werden, dass selbst die Anzahl der Tasks mit Verteilungen beschrieben wird.
² Eine andere System-Charakteristik wäre z.B. die Anzahl der Tasks eines Tasksets, wenn diese probabilistisch beschrieben wäre.

Durch das *Condor Cluster-Computing Network* [6] ist es möglich, die Simulationen im Batch-Betrieb auf mehrere Rechner zu verteilen. Mittels des Computer Pools unseres Labors (bestehend aus 10 Rechner, ausgestattet mit 2.0 Ghz Intel Core 2 Duo Prozessoren und 1 GB Arbeitsspeicher), ist es möglich, 10.000 Tasksets gemäß der Fallstudie mit 100 sek. Simulationsdauer innerhalb von 13,6 h zu analysieren¹.

7 FALLSTUDIE

Als Beispiel für die Anwendung der simulationsbasierten Echtzeitanalyse und der Untersuchung einer Tasksetmenge portieren wir eine bestehende Software für ein Automotive Powertrain System, die derzeit auf einem Singlecore-Prozessor eingesetzt wird, auf einen Dualcore-Prozessor. Bei dieser simulativen Portierung wurde die Frequenz des Dualcore-Prozessors halbiert, so dass beide Systeme eine vergleichbare Leistung besitzen.

Typischerweise ist die Software für Automotive Systeme wiederverwendbar, d.h. die Systeme können – durch entsprechende Konfiguration – in verschiedenen Projekten und sogar für verschiedene Automobilhersteller eingesetzt werden. Dadurch variieren diese Systeme in diversen Task-Eigenschaften. Ziel dieser Untersuchung ist es, einen möglichst effizienten Algorithmus zu finden, mittels dessen alle Varianten der Systeme abgedeckt werden können. Aus diesem Grund untersuchen wir nicht nur ein Taskset, sondern verallgemeinern die verschiedenen Varianten und untersuchen diese unter der Verwendung unseres Ansatzes. Hierzu untersuchen wir exemplarisch die Algorithmen aus dem ersten Teil, Kapitel 3.2 und 3.3. Das stochastisch beschriebene Automotive Powertrain Taskset für alle Varianten bezeichnen wir im Weiteren als *Powertrain Taskset*.

7.1 Tasksetmenge für Powertrain Systeme

Das Powertrain Taskset zeichnet sich durch zwei Zeitbasen für die Tasks aus. Die erste Zeitbasis (konstante Zeitbasis) wird für periodische Tasks verwendet, die in festen Zeitabständen aktiviert werden müssen, wie z.B. die Task für das Senden von CAN Nachrichten. Die Frequenz dieser Zeitbasis ist konstant.

Die andere Zeitbasis (drehzahlabhängige Zeitbasis) richtet sich nach der Drehzahl des Motors. Ausgelöst durch die Position der Kurbelwelle werden Tasks zur Berechnung der

Treibstoffeinspritzung und zur Drosselklappenregelung aktiviert. Die Frequenz dieser Zeitbasis variiert mit der Drehzahl des Motors. Der Frequenzbereich ist durch den technisch möglichen Drehzahlbereich definiert.

In Tabelle 1 sind die Tasks und deren Eigenschaften für das Powertrain Taskset aufgelistet. Bei den Drehzahlabhängigen Tasks ist die Periodizität bei maximal möglicher Drehzahl angegeben und entspricht dem geringsten Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Aktivierungen einer Task. Die Deadline und die Anzahl der Task-Sektionen ist für eine Task konstant.

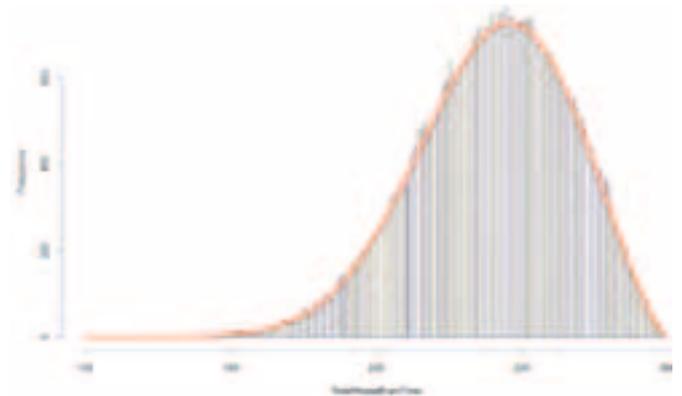


Abb. 7: Histogramm über die Laufzeiten der Task-Sektionen des Powertrain Tasksets, die nach dem Monte-Carlo-Prinzip entsprechend einer Weibull Verteilung (rot) gezogen wurde

Die Laufzeit der Task-Sektionen wird entsprechend Bild 7 probabilistisch beschrieben. Hierfür eignet sich besonders die Weibull-Verteilung, da diese im Gegensatz zur der Gauss-Verteilung einen variablen Mittelwert und einen definierten minimalen Extremwert besitzt. Der maximale Extremwert lässt sich mit einer Restwahrscheinlichkeit angeben. Diese Eigenschaften sprechen für die Verwendung zur Modellierung der Task-Sektions-Laufzeit, die einen Mittelwert bei 230 µs besitzen, einen Minimalwert bei 100µs und einen Maximalwert bei 300 µs. Da die Weibull-Verteilung auf der einen Seite asymptotisch gegen 0 konvergiert, wird für diese Stelle eine Restwahrscheinlichkeit von 1% angegeben. Werte die größer oder kleiner¹ als der angegebene Wert sind (in Bild 7 kleiner als 100µs) werden verworfen.

¹ Durch Performance-Optimierungen kann diese Zeit noch weiter verkürzt werden.

¹ Wenn der Mittelwert der Weibullverteilung größer als der Wert $(\text{Maximum-Minimum})/2$ ist, wird die Weibullverteilung gespiegelt. Die im Standardfall gegen ∞ laufende Seite spiegelt sich dadurch auf 0 . Daher ist es möglich, dass, entsprechend der konfigurierten Funktionsparameter, Werte resultieren, die kleiner als 0 sind. Dies ist bei der Standard-Weibullverteilung theoretisch nicht möglich.

Taskname	Periodizität	Aktivierungsverschiebung	Deadline	Anzahl Task-Sektionen	Zeitbasis
TO0_RPM	2.5	0	2.5	6	1
TO1_RPM	8.8	2.5	5.0	1	1
TO2_RPM	2.9	0	1.3	1	1
TO3_RPM	2.9	0.6	1.3	1	1
TO4_RPM	2.9	1.2	1.3	1	1
TO5_RPM	2.9	1.8	1.3	1	1
TO6_1MS	1.0	0.5	0.6	1	2
TO7_5MS	5.0	0	5.0	1	2
TO8_5MS	5.0	7.5	10.0	1	2
TO9_10MS	10.0	5.0	2.5	3	2
T10_10MS	10.0	0	10.0	3	2
T11_10MS	10.0	5.0	10.0	2	2
T12_20MS	20.0	0	20.0	3	2
T13_40MS	40.0	0	80.0	1	2
T14_100MS	100.0	0	100.0	10	2
T15_1000MS	1000.0	0	500.0	6	2

Tabelle 1: Abstrahiertes Automotive Powertrain Taskset mit zwei Zeitbasen. Tasks mit der Zeitbasis 1 werden abhängig von der Kurbelwellenposition des Motors aktiviert. Dadurch ist die Periodizität abhängig von der Drehzahl (Dargestellt sind die Periodizitäten bei maximaler Motordrehzahl). Tasks mit der Zeitbasis 2 werden von Hardware-Timern in festen Zeitabständen aktiviert. Die Laufzeit der Tasks errechnet sich aus der Anzahl der Task-Sektion, multipliziert mit der Verteilung der Task-Sektionen-Laufzeit. Diese wird durch eine Weibull-Verteilung modelliert (im Fließtext beschrieben).

Die Laufzeit des Scheduling Algorithmus P-ERfair-PD² wurde bei jedem Aufruf mit 2µs berücksichtigt.

7.2 Experimentdurchführung

Entsprechend der Definition des Powertrain Tasksets wurden nach dem Zufallsprinzip 25.000 Tasksets generiert und anschließend sowohl mit dem Algorithmus WFD-EDF wie auch P-ERfair-PD² nach dem oben beschriebenen Monte-Carlo-Prinzip analysiert. Das Ergebnis ist in den Bildern 8 und 9 präsentiert.

Auf der x-Achse der beiden Bilder ist die Systemauslastung (Formel 5.1) aufgetragen, auf der primären y-Achse (links) die Kenngröße *mNL* (Formel 4.3). Jeder Punkt entspricht dabei dem *mNL* Wert von jedem der 25.000 generierten Tasksets. Die *mNL* Werte wurden in 15 Auslastungs-Cluster entsprechend der Systemauslastung des betreffenden Tasksets eingegliedert. Auf der sekundären y-Achse (rechts) ist die Anzahl der generierten Tasksets aufgetragen, die in einen Auslastungs-Cluster fallen. Für einen Cluster zeigt die

Kastengrafik folgende Schätzer (von oben nach unten): oberes Konfidenzintervall des 1%-Quantil, oberes Konfidenzintervall des Median, Median, unteres Konfidenzintervall des Median und unteres Konfidenzintervall des 99%-Quantil.

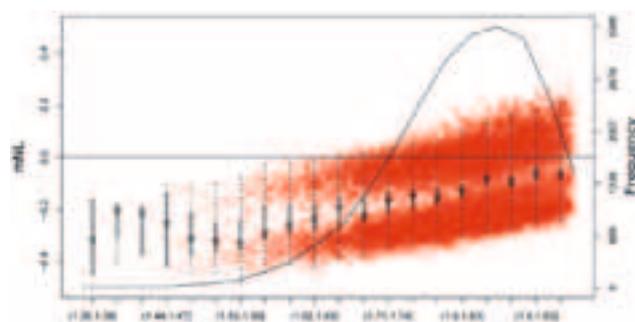


Abb. 8: Algorithmus WFD-EDF - Ergebnis der Simulationsbasierten Echtzeitanalyse für ein Dualcore-System. Punkte entsprechen der Kenngröße *mNL* für 25.000 generierte Tasksets die über die Systemauslastung aufgetragen sind. Die Line stellt die Anzahl der generierten Tasksets dar

Die Untersuchung des BinPacking+EDF Algorithmus zeigt (Bild 8), dass für das Powertrain Taskset erste Deadlineverletzungen bereits bei einer Auslastung von 1.65 auftreten.

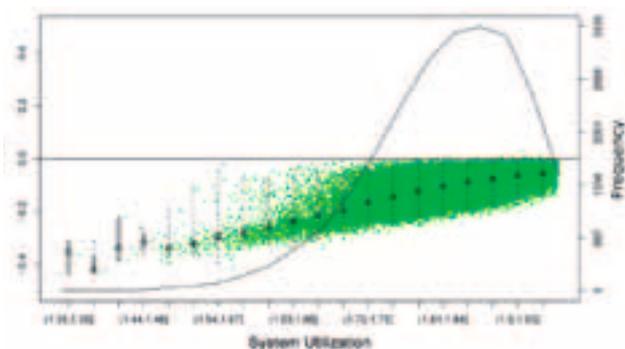


Abb. 9: Algorithmus P-ERfair-PD² - Ergebnis der Simulationsbasierten Echtzeitanalyse für ein Dualcore-System. Punkte entsprechen der Kenngröße mNL für 25.000 generierte Tasksets, die über die Systemauslastung aufgetragen sind. Die Line stellt die Anzahl der generierten Tasksets dar

Die Untersuchungen des P-ERfair-PD² Algorithmus dagegen zeigen (Bild 9), dass sich das System (bis auf wenige Werte) bis zu 1.96 auslasten lässt¹.

7.3 Diskussion

Ein wesentliches Ergebnis der Untersuchungen ist, dass sich Powertrain Systeme, die durch das stochastische Powertrain Taskset beschrieben werden, auf Dual-Core Hardware Architekturen deutlich effizienter mit dem Algorithmus P-ERfair-PD² betreiben lassen als mit WFD-EDF. Mit dem dynamischen Verfahren P-ERfair-PD² sind Auslastungen bis ca. 1.95 möglich.

Als Vergleichsalgorithmus wurde WFD-EDF ausgewählt, der sich in der Familie der beschriebenen BinPacking-Algorithmen als bester Algorithmus bei statischer Partitionierung erwiesen hat. Er erreicht jedoch nur eine Auslastung von 1.65, bevor die ersten Deadline-Verletzungen auftreten.

Zudem sind nicht alle generierten Tasksets nach WFD partitionierbar, so dass ggfs. noch andere Partitionierungseuristiken verwendet werden müssen oder Tasksets abgelehnt werden müssen. P-ERfair-PD² kann dagegen alle generierten Tasksets einwandfrei bearbeiten. Im experimentellen Ver-

gleich wurden deshalb nur diejenigen Tasksets berücksichtigt, die bei beiden Algorithmen einsetzbar waren.

Die Schwankungsbreite der mNL -Verteilung bei P-ERfair-PD² und WFD-EDF liegen in derselben Größenordnung (im Bereich -0.4...0 bzw. -0.45...0.2). Klassische Pfair-Verfahren dagegen führen – aufgrund der „non-work-conserving“ Eigenschaften – zu sehr engen Verteilungen (typischerweise -0.05..0) [9]. Hier erkennt man die „early-release“ Variante des P-ERfair-PD², die aufgrund der vorgezogenen Aktivierungen („work-conserving“) oftmals zu kürzeren Antwortzeiten und damit niedrigeren mNL führt.

Eine genauere Betrachtung der mNL Schwankungen bei WFD-EDF zeigt, dass die Verteilung in zwei Gruppen zerfällt. In Bild 8 ist ein oberer und ein unterer „Streifen“ zu sehen. Analysiert man die Tasksets, so stellt man fest, dass die Deadline-Verletzung nur bei einer bestimmten Gruppe von Tasksets auftreten. Anscheinend führt in dem Powertrain Taskset die Kombination bestimmter Tasks auf einem Core zu schlechteren Scheduling-Ergebnissen, die jedoch von WFD nicht ausreichend berücksichtigt werden. Hier besteht noch Optimierungspotential bei den statischen Partitionierungsverfahren, was durch weitere Untersuchungen gestützt werden soll.

Bisher nicht untersucht wurden Task-Laufzeitschwankungen, wie sie bei Automotive Powertrain Systemen typischerweise auftreten. Solche Schwankungen können bei einer statischen Partitionierung nicht berücksichtigt werden, da die Partitionierung im Vorfeld vorgenommen werden muss, und spätere Schwankungen dann zu einer ungünstigen Lastverteilung und ggfs. Deadline-Verletzungen führen können. P-ERfair-PD² dagegen ist unabhängig von der exakten Task-Sektionslaufzeit, da für dessen Berechnungen nur die Anzahl an Task-Sektionen und die Einhaltung der maximale Task-Sektionslaufzeit relevant sind, was für Powertrain Systeme immer der Fall ist.

Bei P-ERfair-PD² treten im höheren Auslastungsbereich vereinzelt Deadlineverletzungen auf. Ursache dafür ist im wesentlichen der Laufzeit-Zusatzaufwand beim Scheduling selbst, der im Algorithmus zur Zeit nicht berücksichtigt ist. Zum besseren Verständnis dieses Effektes sowie des Einflusses von Migrations-Mehraufwand führen wir momentan Untersuchungen durch und planen hier noch Verbesserungen am Algorithmus einzuführen.

¹ Der aufmerksame Leser wird bemerkt haben, dass die über die Sekundärachse aufgetragene Anzahl an Tasksets, die in einen Auslastungsbereich fallen, variiert, obwohl beide Scheduling-Algorithmen mit der gleichen Menge an Tasksets untersucht wurden. Die Erklärung liegt in der zusätzlichen Auslastung für das Scheduling. Dies ist bei P-ERfair-PD² aufgrund der größeren Anzahl von Scheduling-Aufrufen höher.

Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Mottok

Tel.: 0941 943-1120

Fax: 0941 943-1424

juegen.mottok@hs-regensburg.de

8 FAZIT

Multicore-Scheduling, wie in dieser Arbeit beschrieben, war in den letzten zwei Jahrzehnten Bestandteil zahlreicher Forschungsarbeiten. Es wurden diverse Algorithmen zum effizienten Scheduling vorgestellt.

Die Anwendung in der Praxis wirft jedoch neue Fragen auf und stellt die Forschung vor neue Herausforderungen. Eine dieser Fragen ist wie sich die theoretisch als optimal bewiesenen Algorithmen in realen Systemen verhalten.

Mittels unseres in dieser Arbeit vorgestellten Ansatzes zur simulationsbasierten Echtzeitanalyse ist es möglich, solche Fragestellungen zu untersuchen. Durch das vorgestellte Verfahren zur Untersuchung einer Tasksetmenge können stochastisch beschriebene Systeme für die Auswahl eines Scheduling-Algorithmus betrachtet werden. An einer Fallstudie, der fiktiven Portierung einer Menge an Automotive Powertrain Systemen auf ein Dualcore-System, wurde die Anwendbarkeit dieses Verfahren gezeigt.

Es stellte sich dabei heraus, dass mittels des dynamischen Algorithmus P-ERfair-PD² eine deutlich höhere Auslastung zu erzielen ist als mit statischer Aufteilung nach VFD Heuristik und klassischem EDF Singlecore Scheduling.

In zukünftigen Arbeiten wollen wir Overhead-Einflüsse sowie deren Verringerung für statische und dynamische Algorithmen untersuchen, wie diese bspw. durch Task-Migration und Scheduling Laufzeiten resultieren.

DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit ist durch das vom BMBF finanzierte Forschungsprojekt DynaS³ gefördert („Dynamische SW-Architekturen in Steuergeräten in Fahrzeugsystemen unter Berücksichtigung von Anforderungen zur Funktionalen Sicherheit“); Förderkennzeichen FHprofUnd2006 FKZ1752X07. Weitere Informationen unter www.laS3.de.

REFERENZEN

[1] Künzli, S. und Thiele, L. und Zitzler, E. „Modular Design Space Exploration Framework for Embedded Systems“, IEE Proceedings Computers & Digital Techniques, Vol. 152, Nr. 2, S. 183-192, 2005

- [2] Hamann, A. und Jersak, M. und Richter, K. und Ernst, R. „A Framework for Modular Analysis and Exploration of Heterogeneous Embedded Systems“, Kluwer/Springer Journal on Real-Time Systems, Vol. 33, Nr. 1-3, 2006
- [3] Samii, S. und Rafiliu, S. und Eles, P. und Peng, Z. „A simulation methodology for worst-case response time estimation of distributed real-time systems“, Proceedings of the conference on Design, automation and test in Europe, S. 556-561, 2008
- [4] Spezifikation OSEK OS Version 2.2.3, <http://portal.osek-vdx.org/>, 24. März 2010
- [5] Stine, R. „An introduction to bootstrap methods“, Sociological Methods and Research, Vol. 18, Nr. 2, S. 243-291, 1989
- [6] Miron, L. und Basney, J. und Raman, R. Tannenbaum, T. „Mechanisms for High Throughput Computing“, SPEEDUP Journal, 1997
- [7] Axelsson, J., „A method for evaluating uncertainties in the early development phases of embedded real-time systems“, Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, S. 72 – 75, 2005
- [8] Deubzer, M. und Schiller, F. und Mottok, J. und Niemetz, M. und Margull, U. „Effizientes Multicore-Scheduling in Eingebetteten Systemen – Teil 1: Algorithmen für zuverlässige Echtzeitsysteme“, atp, 2010
- [9] Deubzer, M. und Margull, U. und Mottok, J. und Niemetz, M. und Wirrer, G., „Partly Proportionate Fair Multiprocessor Scheduling of Heterogeneous Task Systems“, Proceedings of the 5th Embedded Real Time Software and Systems Conference, 2010
- [10] Deubzer, M. und Mottok, J. und Flug, C. und Zeitler, T., „Profiling Performance Analyse von Embedded Real-Time System Architekturen“, Proceedings of the 1th Embedded Software Engineering Kongress, 2008
- [11] R.I. Davis and A. Burns, A Survey of Hard Real-Time Scheduling Algorithms and Schedulability Analysis Techniques for Multiprocessor Systems, University of York Technical Report, YCS-2009-443, 2009

ELEKTRO- UND INFORMATIONSTECHNIK

J. MOTTOK¹, G. HAGEL², M. UTESCH³, F. WALDHERR⁴

KONSTRUKTIVISTISCHE DIDAKTIK – EIN REZEPT FÜR EINE BESSERE SOFTWARE ENGINEERING AUSBILDUNG?

ABSTRACT

Der Konstruktivismus ist eine Theorie über den Erwerb von Wissen, das Lernen und Lehren. Kernaussage ist, dass jeder Mensch durch die Kommunikation mit seiner Umgebung seine eigene persönliche Wirklichkeit erschafft; diese unterscheidet sich von der Wirklichkeit anderer Menschen. Lernen wird als die Konstruktion von Bedeutung und damit als das dynamische Weiterentwickeln der persönlichen Wirklichkeit gesehen.

Das Zusammenspiel von Lehren und Lernen mit dem Ansatz einer konstruktivistischen Didaktik wird mit einem Beispiel aus dem Software Engineering aus einem erprobten Konzept der Vortragenden unterlegt.

1 EINLEITUNG

Didaktik ist die Theorie des Lernens. Sie ist die Vermittlung zwischen der Sachlogik der Inhalte und der Psycho-Logik des Lernenden. Insbesondere werden dabei alle Prozesse betrachtet, die auf ein absichtsvoll herbeigeführtes Lernen zielen.

Die Theorie des Konstruktivismus stützt ihre Argumentation auf verschiedenste Disziplinen, wie Philosophie, Psychologie, Soziologie, Anthropologie, Pädagogik und Neuropsychologie.

In seiner reinsten Form besagt der Konstruktivismus, dass es kein objektives Wissen über die Welt, sondern ausschließlich subjektiv konstruiertes gibt [Glaserfeld 1995]

Gemäß Watzlawick ist Wirklichkeit das Ergebnis von Kommunikation [Watzlawick 1976]. Daraus wird im Konstruktivismus gefolgert: Jeder Mensch hat seine eigene subjektive Wirklichkeit, die er ständig durch Wahrnehmen mit allen seinen Sinnen, seinem Denken und Erinnern weiterentwickelt: Die Wirklichkeit eines Menschen ist also sein Wissen und Lernen ist seine Konstruktion von Bedeutung. Im Gegensatz dazu betrachtet die Theorie des Kognitivismus das Wissen als objektiv.

Dieser Artikel ist wie folgt gegliedert: Einen Einblick in eine Didaktik, die sich auf die Theorie des Konstruktivismus stützt – die Konstruktivistische Didaktik - gibt Kapitel 2. In Kapitel 3 wird die Sichtweise der Neuro-Didaktik dargestellt. Exemplarisch wird die didaktische Methode ‚Rollenspiel‘ zur Aneignung eines Entwurfsmusters aus dem Software Engineering

in Kapitel 4 gezeigt. Kapitel 5 schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

2 KONSTRUKTIVISTISCHE DIDAKTIK

Getrieben durch die Theorie des Konstruktivismus vollzieht sich in der Didaktik ein Wechsel vom „Lehren zum Lernen“ [Welbers2005].

Wenn Lernen die Weiterentwicklung einer subjektiven Wirklichkeit ist, dann impliziert dies eine Selbststeuerung des Lernprozesses: der Lernende findet seinen Weg (und muss finden), um möglichst effektiv sein Wissen zu erweitern [Waldherr2009].

Der konstruktivistische Bildungsansatz spricht sich dagegen aus, dass Wissen von einem Lehrer an Lernende übertragen werden kann. Konstruktivismus setzt auf die Schaffung optimaler Bedingungen für Lernende, der Art, dass sie Wissen selbst für sich konstruieren können. Anstatt Lernenden Informationen sowie verschiedene Skills zur Verfügung zu stellen, bevorzugt der Konstruktivismus es, ein Umfeld zu fördern, in dem Lernende Wissen erwerben durch Erforschen und Untersuchen sogenannter Authentischer Fragen, entweder alleine oder in Gruppen [Aviram2000].

Der konstruktivistische Lehrer wird dargestellt als einer, der fähig ist, den traditionell autoritären, allwissenden Idealtypus eines Lehrers zu überwinden. Er oder sie werden dargestellt als „guidance provider“, ein Lehrer, der die Lernenden „empowered“ und damit ihre intrinsische Motivation steigert und damit ihre Fähigkeit steigert zu lernen und sich weiter zu entwickeln durch „questioning“ und „objection“. Dabei lernt ein Lerner das Lernen: es gilt von einem anfänglichen „random picking“ von Information zur Weiterentwicklung der eigenen Wirklichkeit zu „mindful choice“ zu kommen – Basis ist das Wertesystem des soziokulturellen Umfeldes – Lehrmethode ist Planen, Fragen und Reflektieren – Werkzeuge, die aus dem Coaching und Mentoring stammen. [Aviram2000]

Eine konstruktivistische Lernumgebung wird charakterisiert als eine, die es Lernenden ermöglicht, zusammen in einer Lerngruppe der „Gemeinschaft von Entdeckern“ zu denken, zu erforschen und zu diskutieren [Harpaz 1996].

Kommunikations- und Informationstechnologie, wie Computer, das Internet oder Multimedia-Geräte, werden häufig als

¹ HS_Z_LaS³
² HS Kempten
³ HS München
⁴ DiZ, Ingolstadt

nützlicher Bestandteil einer solchen Lernumgebung gesehen [Perkins1992, Perkins1995].

Das Lernen im didaktisch konstruktivistischen Kontext unterscheidet:

1. Konstruktion („Wir sind Erfinder unserer Wirklichkeit“),
2. Rekonstruktion („Wir sind die Entdecker unserer Wirklichkeit“) und
3. Dekonstruktion („Es könnte auch anders sein! Wir sind die Ent-Tarner unserer Wirklichkeit!“).

Die grundsätzliche Ausrichtung ist: „Selbst erfahren, ausprobieren, untersuchen, experimentieren, immer in eigene Konstruktion ideeller oder materieller Art überführen und in den Bedeutungen für die individuelle Interessen-, Motivations- und Gefühlslage thematisieren.“ [Reich2008]

In der Perspektive der Rekonstruktion lautet die Frage: „Wer hat es damals so und wer hat es anders gesehen? Welche Handlungsmöglichkeiten haben Beobachter damals festgestellt und welche fallen uns hierzu ein? Welche unterschiedlichen Experten kommen zu welcher Aussage und wie stehen wir dazu?“ In dieser Perspektive wird gefragt, welche Motive der damalige Beobachter hatte, um seine Festlegungen zu treffen. Faktenwissen steht dabei nicht im Vordergrund.

Die Dekonstruktion stellt sich die Frage der selbst vollzogenen Auslassungen, die möglichen anderen Blickwinkel, die sich im Nachentdecken der Erfindungen anderer oder in der Selbstgefälligkeit der eigenen Erfindung so gerne einstellen. In dieser Perspektive will der Ent-Tarner kritisch gegenüber den eigenen blinden Flecken sein.

Als idealtypischer Grundsatz für die konstruktivistische Didaktik gilt somit (nach [Reich2008]):

„Jeder Sinn, den ich selbst für mich einsehe, jede Regel, die ich aus Einsicht selbst aufgestellt habe, treibt mich mehr an, überzeugt mich stärker und motiviert mich höher, als von außen gesetzter Sinn, den ich nicht oder kaum durchschaue und der nur durch Autorität oder Nicht-Hinterfragen oder äußerlich bleibende Belohnungssysteme gesetzt ist.“

Einer der Vorläufer der heutigen konstruktivistischen Didaktik ist John Dewey [Dewey1910], der ‚Vater‘ des Projektlernens. Menschliche Erfahrungen entstehen dabei als ein Wechselspiel von erfahrenen und erzeugten Handlungen. Im Handeln wird somit Wissen konstruiert. Der Lernende

zeigt ein interaktives Verhalten und experimentiert neugierig. Dies wird als Interaktions-Pädagogik bezeichnet. Die in Kapitel 4 vorgestellte didaktische Methode ‚Rollenspiel‘ greift auf das Konzept der fünf Stufen des erziehenden Unterrichts von John Dewey zu.

Die fünf Stufen sind: praktische Tätigkeit und primäre Erfahrung (Stufe 1), das Problem und das reflektierende Denken (Stufe 2), Tatsachen-Material entdecken (Stufe 3), die Hypothese und die vorgeschlagene Lösung des Problems (Stufe 4) und die Erprobung und Überprüfung durch praktische Handlungen (Stufe 5).

Im folgenden Kapitel wird nun auf die Sichtweise der Neuro-Didaktik eingegangen.

3 SICHTWEISE DER NEURO-DIDAKTIK

Die Ergebnisse der Gehirnforschung lassen sich in einer integrierten Interpretation darstellen [Herrmann2009]. Dabei wird die ganzheitliche Informationsverarbeitung im Gehirn den konstruktivistisch didaktischen Ansatz in der Lehrmethodik bestätigen [Spitzer2008]. Abbildung 1 stellt die zwölf Lehr-Lern-Prinzipien basierend auf [Caine2004] dar.

Die folgenden Prinzipien sind bei der Auswahl einer geeigneten Lehr- und Lernmethodik zu berücksichtigen:

Prinzip 1: Lernen ist ein physiologischer Vorgang.

- Erfahrungen die vielfältig die Sinne ansprechen, führen zu effektivem Lernen.
(Theorieaneignung mit Kopf, Herz, Händen und allen Sinnen [Jank2008])
- Lehre und Lernen müssen mehrkanalig sein [Capser2008].

Prinzip 2: Das Gehirn ist sozial.

- Ein Lernprozess mit sozialen Interaktionen ist effektiv.

Prinzip 3: Die Suche nach dem Sinn ist angeboren.

- Wenn das Interesse geweckt ist und eigene Ideen eingebracht werden, ist effektives Lernen möglich (siehe Kapitel 2: Konstruktion, Rekonstruktion, Destruktion).

Prinzip 4: Sinnsuche geschieht durch die Bildung von (neuronalen) Mustern.

- Unterschiede sind wichtig zum Lernen, da neue mit alten Mustern kombiniert werden.

ELEKTRO- UND INFORMATIONSTECHNIK

58

Prinzip 5: Emotionen sind wichtig für die Musterbildung.

- Bei der Aneignung neuen Wissens sind Erfahrungen, die von positiven Emotionen begleitet werden, unterstützend für effektives Lernen.

Prinzip 6: Das Gehirn verarbeitet Informationen in Teilen und als Ganzes gleichzeitig.

- Ein Verständnis für das Ganze unterstützt das Lernen des Details.

Prinzip 7: Lernen erfolgt sowohl durch gerichtete Aufmerksamkeit als auch durch periphere Wahrnehmung.

- Vertiefte Aufmerksamkeit für effektives Lernen wird erreicht, wenn die Lernumgebung geeignet ist.

Prinzip 8: Lernen geschieht sowohl bewusst als auch unbewusst.

- Eine Reflektion über das eigene Lernen ist wichtig. Es schafft eine Metaebene des Wissens (siehe auch Bloom'sche Taxonomie [Azama2003]).

Prinzip 9: Es gibt mindestens zwei Arten von Gedächtnis: Die eine ist die Speicherung und Archivierung von isolierten

Fakten, Fertigkeiten und Abläufen, die andere ist die gleichzeitige Aktivierung vielfältiger Systeme, um Erfahrungen sinnvoll zu verarbeiten.

- Effektives Lernen ist möglich, wenn Verknüpfungen von Informationen und Erfahrungen über verschiedene Erinnerungswege stattfindet.

Prinzip 10: Lernen ist entwicklungsabhängig.

- Effektives Lernen ist möglich, wenn in der Planung des Lernprozesses der Entwicklungsstand, die Reife, Kenntnisse, Fertigkeiten und Fähigkeiten des Lernenden berücksichtigt werden.

Prinzip 11: Komplexes Lernen wird durch Herausforderungen gefördert, durch Angst und Bedrohung verhindert, was von Hilflosigkeit und Erschöpfung begleitet ist.

- Motivation und Herausforderungen unterstützen das Lernen (z.B. problem based learning).

Prinzip 12: Jedes Gehirn ist einzigartig.

- Die einzigartigen, individuellen Talente, Fähigkeiten und Fertigkeiten eines jeden Einzelnen werden beim Lernen angesprochen.

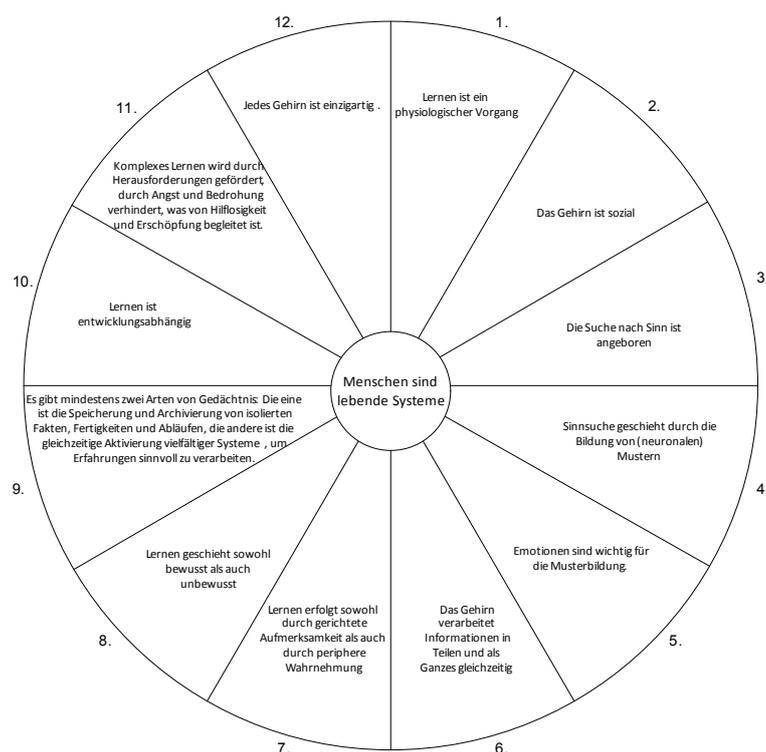


Abb. 1: Die zwölf Lehr-Lern-Prinzipien der ganzheitlichen Informationsverarbeitung im Gehirn als integrierte Interpretation unterschiedlicher Ergebnisse der Gehirnforschung übersetzt aus dem Englischen basierend auf [Caine2004].

4 ENTWURFSMUSTER ALS ROLLENSPIEL

Ziel der Vorlesung war es, das Entwurfsmuster „Beobachter“ (Observer) aus Abbildung 2 mit den Studierenden gemeinsam durch ein Rollenspiel nach [Reich2008] zu erarbeiten. Es ging also nicht darum, Problem und Lösung gleich frontal zu präsentieren, sondern darum, zunächst nur das Problem zu erfassen (siehe auch problem based learning). Dann sollten die Studierenden gemeinsam die Lösung erarbeiten. Die gewählte aktivierende Methode ermöglichte, dass sich die Studierenden mit dem Lernstoff auseinandersetzen und miteinander über die Inhalte diskutieren konnten [Waldherr2009].

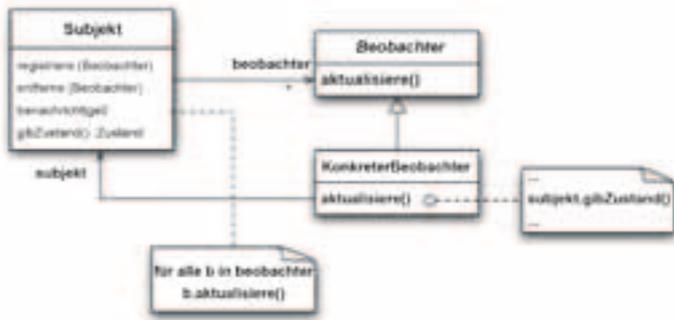


Abb. 2: Entwurfsmuster „Beobachter“ aus [Observer2009].

Bei der Lösung ging es um eine technische Lösung und nicht um zwischenmenschliche Beziehungen. Im letzteren Kontext werden Rollenspiele häufig eingesetzt. Umso mehr war der Dozierende gespannt, ob sich diese Methode auch für technische Fragestellungen eignet. Auf die Nutzung eines Rollenspiels (mit nachträglichen Übungen) für das Lernen in den 5 Stufen nach John Dewey wird auf [Dewey1910] hingewiesen.

Die Vorbereitung einer solchen Lernveranstaltung läuft nicht wie gewohnt für Frontalunterricht ab. Es müssen einige Fragen geklärt werden, damit am Ende die Studierenden neben einer locker wirkenden Lernveranstaltung auch den Stoff verinnerlicht haben:

- Eignet sich die Gruppe für ein Rollenspiel? Die Gruppe darf nicht zu groß sein. Auch eine gewisse Offenheit, Kooperationsbereitschaft und kollegiales Verhalten der Studierenden untereinander ist notwendig.
- Eignet sich das Entwurfsmuster (allgemein das Thema) für ein Rollenspiel?

- Welche Rollen möchte ich als Dozierender vergeben? Diese Frage kann auch zu Beginn von den Studierenden erarbeitet werden.
- Welche Inhalte sollen re-/konstruiert, welche vorgegeben werden?
- Wie soll das Ergebnis zusammengefasst werden?
- Wie viele Studierenden werden benötigt?
- Wie wählt der Dozierende die Freiwilligen aus (immer nur Durchzählen ist langweilig)?

Damit läuft die Lehrveranstaltung offener als im Frontalunterricht ab. Das Feedback der Studierenden bestätigt, dass sich die Mühen gelohnt haben.

EINLEITUNG FÜR DAS ROLLENSPIEL:

Das Beispiel für das „Beobachter“-Muster war die Klima-Messstation aus [Freeman2008]. Dabei geht es darum, die Software für eine Klima-Messstation und ihre angeschlossenen Anzeigegeräte zu entwickeln. Die ganze Anlage soll flexibel gestaltet werden, d.h.

- Anzeigegeräte können im laufenden Betrieb hinzugefügt und entfernt werden.
- Anzeigegeräte zeigen unterschiedliche Messwerte an.
- Die Zahl der Messwerte an der Messstation soll erweiterbar sein.
- Die Flexibilität soll möglichst lokal implementierbar sein, d.h. nur die direkt betroffenen Geräte sollen verändert werden müssen.

Diese Problemstellung wurde zunächst den Studierenden präsentiert und mit ihnen besprochen (siehe Stufe 1 und 2 nach [Dewey1910]). Dann wurden vom Dozierenden zufällig 5 freiwillige Studierende bestimmt (Prinzip 2 aus Kapitel 3).

Den Studierenden wurden einzelne Rollen in obigem Beispiel zugewiesen. Ein Studierender hatte die Rolle der Klima-Messstation, die anderen Studierenden die Rollen verschiedener Anzeigegeräte: Ein Studierender konnte in seiner Rolle lediglich die Temperatur anzeigen, ein anderer Luftdruck und Windgeschwindigkeit, ein dritter Temperatur und Luftdruck und ein vierter Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck und Windgeschwindigkeit.

Der Studierende in der Rolle Messstation erhielt in regelmäßigen Zeitabständen neue Werte für die zu messenden Größen vom Dozierenden. Die Studierenden in den Rollen der Anzeigegeräte waren so weit von dem Studierenden in

ELEKTRO- UND INFORMATIONSTECHNIK

60

der Rolle Messstation entfernt, dass sie die Änderungen nicht hören konnten.

Die Studierenden hatten die Aufgabe, die Kommunikation (letztlich die Methoden und deren Parameter) zwischen Messstation und Anzeigegeräten herauszufinden, unter der Annahme, dass diese Geräte untereinander kommunizieren können. Die Anzeigegeräte sollten möglichst zeitnah ihre Anzeige aktualisieren, wenn sich die für sie interessante(n) Größe(n) geändert hat.

Der Dozierende hatte die Aufgabe, die Lösungsvorschläge zu dokumentieren und Albernheiten zu unterbinden.

Die übrigen Studierenden sollten nicht nur nach der „Fischteich“-Methode vom Ufer aus die schwimmenden Teilnehmer im See beobachten. Sie wurden aufgefordert, sich an der Lösungsfindung unterstützend zu beteiligen.

DURCHFÜHRUNG DES ROLLENSPIELS:

Bis jeder sich in seiner Rolle gefunden hatte, dauerte es einige Zeit. Dann entwickelte sich jedoch eine lebhafte Diskussion (Prinzip 3 und Prinzip 4 aus Kapitel 3), in der folgende Fragen von den Studierenden gefunden und durch teils mehrere Lösungsvorschläge beantwortet wurden:

- Fragt die Anzeige die Station, oder informiert die Station die Anzeigen?
- Geschieht die Informationsverteilung eventgetrieben oder in Zeitintervallen?
- Werden immer alle Messwerte als Parameter mitgegeben, oder nur einzelne?
- Woher kennt die Messstation die Anzeigegeräte?
- Was passiert, wenn Anzeigegeräte abgeschaltet werden?
- Was passiert, wenn Anzeigegeräte hinzukommen?
- Was passiert, wenn die Messstation andere Messwerte liefern kann (z.B. noch zusätzlich die Windrichtung misst)?

Dabei war zu beobachten, dass sich fast alle Studierenden an der Diskussion beteiligten, was die Veranstaltung sehr lebhaft gestaltete (Stufen 3 und 4 nach [Dewey1910], Prinzip 2 aus Kapitel 3). Die Ergebnisse der Diskussion wurden vom Dozierenden an der Tafel anhand mehrerer UML-Klassendiagramme skizziert. Dadurch konnte die Diskussion sich an diesen Zeichnungen orientieren. Der Dozierende musste kaum durch unterstützende Fragen eingreifen. Eine Möglichkeit, als Dozierender ins Geschehen einzugreifen wäre, ebenfalls eine Rolle einzunehmen, um die Akteure zu unterstützen. Dieses Mittel musste in unserem Fall jedoch nicht herangezogen werden. Als es keine neuen Beiträge

mehr gab, wurden die Rollenspieler aus ihrer Rolle entlassen. Dabei mussten diese nicht extra behutsam aus ihren Rollen herausgeführt werden, um eine reflektierende Ebene einnehmen zu können. Dies wird mehr bei Rollenspielen mit Beziehungs- und Inhaltsebene benötigt; Reflexion über die erworbenen Inhalte und die Art des Erwerbens ist jedoch auch hier durchaus sinnvoll, um auf einer Metaebene darüber nachzudenken, wie man bei technischen Problemen die richtigen Fragen zu stellen lernt.

BEENDIGUNG DER LEHRVERANSTALTUNG:

Am Ende der Lehrveranstaltung stellte der Dozierende das Entwurfsmuster aus dem Lehrbuch vor und die Studierenden verglichen es mit ihren Ergebnissen. Die Unterschiede waren marginal.

Die Evaluation im Nachhinein zeigte, dass die Studierenden viel Spaß an der Lösungssuche und -findung hatten. Die Teilnehmer lernten, sich auch in die Rolle eines technischen Systems hineinzusetzen, um die Kommunikation zwischen technischen Komponenten zu erforschen. Dadurch, dass auch die Betrachter mitgewirkt haben und nicht nur die Akteure, kamen sich die in die Rollen geschlüpfen Studierenden nicht „vorgeführt“ vor.

Ein weiterer Effekt davon war, dass alle Studierenden beschäftigt waren und sich in die Problemstellung eingedacht haben.

Natürlich darf man bei der Vermittlung des Entwurfsmusters durch das Rollenspiel nicht stehen bleiben. Durch intensive Übungen mit weiteren Beispielen, an denen die Studierenden das Gelernte rekonstruieren konnten, hat der Dozierende erkannt, dass viel vom Entwurfsmuster „Beobachter“ bei den Studierenden „hängen geblieben“ ist (Stufe 5 bei [Dewey1910]).

Interessant war für den Dozierenden, dass das Rollenspiel so gut aufgenommen wurde, dass die dadurch transportierten Bilder auch weiterhin von den Studierenden verwendet wurden. Beispielsweise gab es in einem Studierenden-Forum, zu dem der Dozierende ebenfalls Zugang hat, zu einer Übungsaufgabe zum Entwurfsmuster ‚Beobachter‘ eine Frage eines Studierenden. Die Antwort eines Kommilitonen: „Erinnere Dich an das Wetterstationsspiel. ...“ Dann wurden die Rollen nochmals aufgezählt, mehr nicht. Die Antwort hat genügt, d.h. das Rollenspiel und seine Ergebnisse waren auch noch nach einiger Zeit bestens im Gedächtnis und haben den Studierenden bei der Rekonstruktion geholfen.

Die in [Reich2008] nach [Warm1981] zitierten positiven Wirkungen des Rollenspiels können auch beim Einsatz im technischen Umfeld auftreten:

- Flexibilität und Kreativität werden durch freies Improvisieren im Rollenspiel gefördert.
- Wissen kommt zum Vorschein und wird vergrößert.
- Fähigkeiten zum Problemlösen werden erweitert.
- Die Sprachtätigkeit wird erweitert.
- Die Motivation und das Interesse an Unterrichtsgegenständen wird verbessert.
- Meinungsänderungen werden bewirkt.
- Einstellungsänderungen werden bewirkt.
- Selbstsicheres Verhalten kann aufgebaut werden.

Es wurde beobachtet, dass die Methode ‚Rollenspiel‘ im Software Engineering konstruktivistisches Lernen durch Rekonstruktion, Konstruktion und Dekonstruktion bei den Studierenden fördert. Im Rahmen der Lösungsfindung müssen dabei immer wieder Lösungsansätze neu konstruiert (rekonstruiert), oder verworfen (dekonstruiert) werden. Das Entscheidende sind selbständige flexible Entscheidungen der Lernenden, die von ihren eigenen Intentionen, Bedürfnissen und Interessen ausgehen und sich auf das beziehen, was unmittelbar um sie herum abläuft.

Der Dozierende freut sich, dass das Experiment von den Studierenden gut angenommen wurde und kann alle, die in der Lehre von Entwurfsmustern tätig sind, nur ermutigen, die Lehrinhalte spielerisch mit Methoden des Konstruktivismus mit den Studierenden zusammen zu erarbeiten.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Sowohl die Konstruktivistische Didaktik, als auch die Neurodidaktik, gibt den Dozierenden im Software Engineering ein Rezept an die Hand, die Ausbildung in Software Engineering den Bedürfnissen der Lernenden besser anzupassen und sie damit gleichzeitig besser auf die Erfordernisse des Berufslebens vorzubereiten als die klassische Lehre. Die Eigenbeteiligung der Lernenden lässt sich mit der industriellen Situation bei der Entwicklung neuer Produkte vergleichen. Auch hier müssen sich die Mitarbeiter mit einem hohen Grad an Eigenbeteiligung neues Wissen in konstruktivistisch gestaltetem beruflichen Lernen aneignen.

REFERENZEN

- [Aviram2000] Aviram, A.: *Beyond Constructivism: Autonomy-Oriented Education*. Studies in Philosophy and Education, 19: 465-489. Kluwer Academic Publishers, 2000
- [Azama2003] Azuma, Motoei; Coallier, François; Garbajosa, Juan: *How to Apply the Bloom Taxonomy to Software Engineering*. In: Proceedings of the Eleventh Annual International Workshop on Software Technology and Engineering Practice. 2003. S. 117 – 122.
- [Caine2004] Caine, et.al., *12 Brain/Mind Learning Principles in Action*, Thousand Oaks, Corwin Press, 2004
- [Caspary2008] Caspary, R., *Lernen und Gehirn*, Herder, Freiburg, 2008
- [Dewey1910] Dewey, John: *How we think*, 1910 (deutsch: *Wie wir denken*, Zürich 1951).
- [Freeman2008] Freeman, Eric and Freeman, Elisabeth: *Entwurfsmuster von Kopf bis Fuß*, O'Reilly, 2008
- [Glaserfeld1995] Glaserfeld, E.: *A Constructivist Approach to Teaching*, in L.P. Steffe and J. Gale (eds.), *Constructivism in Education*, Lawrence Erlbaum Assoc, Hillsdale, NJ., 1995
- [Harpaz1996] Harpaz, Y.: Editorial (Hebrew), *The Education of Thinking 8*, 1003, 1996
- [Herrmann2009] Herrmann, U., *Neurodidaktik*, Beltz Verlag, Weinheim, 2009
- [Jank2008] Jank, W., Meyer, H. *Didaktische Modelle*, Cornelson, Berlin, 2008
- [Observer2009] [http://de.wikipedia.org/wiki/Observer_\(Entwurfsmuster\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Observer_(Entwurfsmuster))
- [Perkins1992] Perkins, D.N.: 'Technology Meets Constructivism: Do They Make a Marriage?' in T.M. Duffy and H. Jonassen (eds.), *Costructivism and the Technology of Instruction: A Conservation*, Hillsdale, Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey, Chap. 4, pp. 45–55. 1992
- [Perkins1995] Perkins, D.N.: *Software Goes to School: Researching for Understanding with New Technologies*, Oxford University Press, New York, 1995
- [Reich2008] Reich, Kersten: *Konstruktivistische Didaktik – Lehr- und Studienbuch mit Methodenpool*, 4. Auflage, Beltz Verlag, 2008 url: <http://methodenpool.uni-koeln.de>
- [Spitzer2008] Spitzer, M., *Geist im Netz, Modelle für Lernen, Denken und Handeln*, Spektrum Verlag, Heidelberg, 2008
- [Waldherr2009] Waldherr, F, Walter, C., *didaktisch und praktisch, Ideen und Methoden für die Hochschullehre*, Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2009

Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Mottok
Tel.: 0941 943-1120
Fax: 0941 943-1424
juegen.mottok@hs-regensburg.de

[Warm1981] Warm, Ute: Rollenspiel in der Schule, Tübingen 1981

[Watzlawick 1976] Watzlawick, P.: Wie wirklich ist die Wirklichkeit – Wahn, Täuschung, Verstehen, R. Piper, 1976

[Welbers2005] Welbers, U., Gaus, O., The Shift from Teaching to Learning, Bertelsmann, Bielefeld, 2005

DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit ist gefördert durch das vom BMBF finanzierte Forschungsprojekt DynaS³, „Dynamische SW-Architekturen in Steuergeräten in Fahrzeugsystemen unter Berücksichtigung von Anforderungen zur Funktionalen Sicherheit“, Förderkennzeichen FHprofUnd2006 FKZ1752X07, weitere Informationen unter www.las3.de

Der vorliegende Fachartikel wurde in der Session „Fachdidaktik Software Engineering“ am Embedded Software Engineering Kongress 2009 (ESE 2009) in Sindelfingen vorgestellt. Besonderer Dank gilt dem Vogel Verlag, München für die Abdruckrechte. Dieser Fachartikel ist im Tagungsband des ESE 2009 veröffentlicht, ISBN 978-3-8343-2402-3.

R. BIERL¹, M. BÖHM², J. FRAUNHOFFER³, A. GARDEIA³,
J. MOTTOK², R. SCHNEIDER⁴, J. STREUBEL³

„REGENSBURGER MODELL ZU DEN P-SEMINAREN“ – EIN KONZEPT ZUR GESTALTUNG DER SCHNITTSTELLE GYMNASIUM – HOCHSCHULE UND ZUR PRAXIS EINER KOOPERATIVEN LEHR-LERN-DIDAKTIK -

ABSTRACT

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Hintergründe und die Theorie des Lernarrangements „Regensburger Modell zu den P-Seminaren“ und dessen mögliche Einsatzgebiete. Das Regensburger Modell ist ein Konzept, welches auf die unterschiedlichen, im Bologna-Prozess und in der Neustrukturierung der gymnasialen Oberstufe entstandenen Anforderungen reagiert und gleichzeitig für die gerade in Deutschland akute Problematik des Mangels an Studienabsolvent/innen mit MINT-Qualifikationen Lösungsansätze liefert.

Die Kooperation zwischen Hochschulen und Schulen steht hierbei im Mittelpunkt, sodass eine Ausgestaltung des P-Seminars der gymnasialen Oberstufe vorgenommen und in einer Pilotphase bereits getestet und evaluiert wurde. Die gewonnenen Erfahrungen dienen als Grundlage für die Erstellung eines Modellplans, der es ermöglicht, das Konzept des Regensburger Modells in Zukunft auf ähnliche Projekte zu übertragen.

Im Folgenden wird weiterhin auf Schlagworte eingegangen, die sich im Wortfeld des Regensburger Modells Anwendung finden, hierunter z.B. das „praktive Lernen“, ein Zusammenspiel aus praktischem und aktivem Lernen.

Schlagworte: Regensburger Modell, praktives Lernen, P-Seminar, MINT-Studienwahlorientierung, Berufswahlorientierung

1 EINLEITUNG: DIE VISION VON BOLOGNA , ZIELE DER NEUGESTALTETEN GYMNASIALEN OBERSTUFE UND DER MINT-ASPEKT

Alle drei in der Überschrift genannten Schlagworte – Bologna, neue gymnasiale Oberstufe und der Begriff MINT – werden zurzeit immer dann strapaziert, wenn es zum Einen um die Studien- und Berufswahlorientierung bei Schülerinnen und Schülern geht, zum Anderen sich um die Qualifizierung der Studierenden handelt und zum Weiteren der Fachkräftemangel und die Auswirkungen auf den Wirtschaftsstandort Deutschland kolportiert wird. Im Folgenden sollen diese drei Begrifflichkeiten zur Einführung in das Thema und zur besseren Einordnung in den Gesamtzusammenhang näher betrachtet werden.

1.1 Die Vision von Bologna und die Ziele der Projekt-Seminare der gymnasialen Oberstufe

Die Bologna-Erklärung definiert, dass in den Studiengängen „arbeitsmarktrelevante Inhalte“ gelehrt und gelernt werden sollen. Von den Hochschulen wird dementsprechend verlangt, dass sie für ihre Absolventinnen und Absolventen ein Qualifikationsprofil definieren, auf das Inhalte, Strukturen und Methoden diesbezüglich ausgerichtet werden. Sie definieren sich also nicht über traditionelle Lehr- und Lerninhalte, sondern über die Frage, welche Kompetenzen ein Absolvent oder eine Absolventin nach Ende des Studiums vorweisen muss, um im Berufsleben erfolgreich zu sein. Demzufolge soll auch ein Perspektivwechsel von der Input- hin zur Output-Orientierung erreicht werden. Das bedeutet konkret, dass sich die Qualifikationsziele der einzelnen Studiengänge nicht mehr an der Vermittlung von Wissen, sondern an den Kompetenzen orientieren, die die Absolventen nach erfolgreichem Studium haben sollen [1]. Ebenso wird die Schaffung von neuen und flexiblen lernorientierten Angeboten im Hochschulbereich gefordert. Dabei spielen Methoden- und Schlüsselkompetenzen, aber auch fachübergreifende Kompetenzen eine wichtige Rolle. In der Akkreditierung der Studiengänge wird ein solcher Ansatz ebenso nachdrücklich genannt [2].

Dabei korrespondieren diese Forderungen sehr stark mit den Anforderungen und Zielsetzungen der neugestalteten gymnasialen Oberstufe und der damit einhergehenden neuen Projektseminare (P-Seminare). Ein wesentliches Ziel der gymnasialen Oberstufe ist die Vorbereitung der Schülerinnen und Schüler auf die Ansprüche in Hochschule und Arbeitswelt. Das P-Seminar zur Studien- und Berufsorientierung hat seinen Schwerpunkt in der Vermittlung einer umfassenden Handlungskompetenz zur Studien- und Berufswahl. Neben der Vermittlung von Sach- und Methodenkompetenz ist die Förderung der Selbst- und Sozialkompetenz der Schülerinnen und Schüler eine zentrale Zielsetzung um ihnen die Erwartungen der Berufswelt nahe zu bringen.

Im P-Seminar durchlaufen die Schülerinnen und Schüler einen individuellen Lernprozess in Begleitung der Lehrenden, mit dem Ziel die eigene Berufswahl- und Bildungsweg-Entscheidung der Lernenden zu unterstützen. Die Schülerinnen und Schüler arbeiten in einem umfangreichen Projekt mit, das durch Kontakte mit außerschulischen Partnern (Firmen, Organisationen, Hochschulen etc.) ein

¹ HS.R, Fak. AM

² HS.R, IaS³

³ HS.R, Projektbüro

⁴ HS.R, Fak. M

möglichst praxisnahes Lernen ermöglicht. Kleine Kursgrößen erlauben eine individuelle Begleitung und Förderung. Auf Grund der Erfahrungen im Schulversuch wird eine Gruppengröße von 15 bis 18 Schülerinnen und Schülern empfohlen [3].

Mit der Vernetzung von Lehrenden und Lernenden der Gymnasien und Hochschulen entsteht ein Spannungsfeld aus dem heraus es gelingt mit Methoden konstruktivistischer Didaktik auf allen beteiligten Seiten sowohl inhaltliche, als auch methodische Erkenntnisse zu gewinnen und praktisch und aktiv zu lernen. Dieses Zusammenwirken verschiedener Akteure, die sich in der Kombination gegenseitig verstärken (Synergieeffekt), führt zu nachhaltigem Nutzen, sowohl auf Seiten der Schulen wie auch der Hochschulen („Win-Win-Synergie“).

1.2 Der MINT-Aspekt: Zahlen und Fakten zur aktuellen Lage

Der Wirtschaftsstandort Deutschland ist gefährdet durch den Mangel an Nachwuchs in den MINT-Qualifikationen (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik). Der Engpass an diesen Fachkräften ist ein strukturelles Problem, das heute schon als Wachstums- und Innovationsbremse einen hohen Wertschöpfungsverlust für die deutsche Volkswirtschaft verursacht [4].

Fakt 1: Aktuelle Studien des Staatsinstituts für Schulqualität und Bildungsforschung in Bayern (ISB) belegen, dass derzeit ca. 75 % der Schüler/innen in den Jahrgangsstufen 12 und 13 nicht wissen, „was sie nach dem Abitur machen werden“ und haben wenig konkrete Vorstellungen und Ideen über ihre berufliche Zukunft (für K 13: sechs Monate vor dem Abitur [5]).

Fakt 2: Im OECD-Durchschnitt kommen auf 100.000 Erwerbspersonen im Alter von 25 – 34 Jahren 1.150 MINT-Absolventen, in Deutschland dagegen nur 850. Die Zahl der MINT-Absolventen deckt nicht den Bedarf an Fachkräften laut Institut der deutschen Wirtschaft. Demnach lag im Jahr 2007 die „Ingenieurslücke“ bei rund 70.000 [6].

Fakt 3: Die MINT-Studienanfängerzahlen stagnieren seit 2005 bei 36 Prozent aller Studienanfänger, in der Informatik liegt die Zahl seit 2000 sogar bei 25 Prozent. Zudem liegt die Abbrecherquote in den neuen MINT-Bachelor-Studiengängen bei 40 Prozent [6].

Das Regensburger Modell der P-Seminare möchte diesen Fakten entgegenwirken und richtet sich an Schüler/innen und Lehrer/innen an Gymnasien, Studierende und Lehrende der Hochschule mit dem Ziel, gemeinsam an Projekten zu arbeiten umso (1) die Schüler/innen in der Studien- und Berufswahl (besonders in den MINT-Fächern) zu unterstützen und (2) die Studierenden, vor allem aus nicht pädagogischen Fächern, wichtige Erkenntnisse in Lehr-Lern-Situationen zu vermitteln. Die Regensburger Didaktik nutzt ein konstruktivistisches Lernarrangement und bildet eine Lernplattform für Lernende (Schüler/innen und Studierende) und Lehrende (Lehrerinnen und Lehrer, sowie Lehrende der Hochschule).

2 PRAKTISCHES UND AKTIVES LERNEN MIT DEM REGENSBURGER MODELL

Mit dem Regensburger Modell wurde ein neuartiges Konzept auf dem Hintergrund der Schnittstelle Gymnasium – Hochschule geschaffen, das sowohl zur Studien- wie auch zur Berufsorientierung beiträgt. Die neugeschaffenen P-Seminare in der gymnasialen Oberstufe in Bayern verpflichten die Schulen, gemeinsam mit externen Partnern, an realen Projekten zu arbeiten, um so einen Einblick in die Studien- und Arbeitswelt zu erlangen.

Das Regensburger Modell versteht sich als integratives Angebot wie in Tabelle 1 dargestellt. Den Schülerinnen und Schülern werden der Studienalltag näher gebracht (Phase 1), konkrete Projekte in den einzelnen Studiengängen angeboten (Phase 2), sowie ein berufsorientierter Einblick in Firmen und Organisationen gegeben (Phase 3).

Phase	Jgst.	Inhalt
1	11 / 1	<ul style="list-style-type: none"> Die Schülerinnen und Schüler setzen sich aktiv mit verschiedenen Studiengängen und Studienbedingungen auseinander. Die Schülerinnen und Schüler besuchen den Regensburger Hochschultag. Die Lehrkräfte sind Gast an der Hochschule um sich ein Bild über die spezifischen Anforderungen eines Studiums an einer Hochschule für angewandte Wissenschaften zu machen.
2	11 / 2	<ul style="list-style-type: none"> Die Schülerinnen und Schüler besuchen die Hochschule zur Durchführung eines realitätsnahen Projekts, z.B. <ul style="list-style-type: none"> Seminar „Unternehmensgründung“, Projekt „Sozialer Stadtplan Regensburg“, Programmierung des Lego Mindstorms NXT mit NXC. Bei der Gestaltung der Lernumgebungen sollten die folgenden grundlegenden Prinzipien, die allen Ansätzen des situierten Lernens gemeinsam sind, beachtet werden: Komplexe Ausgangsprobleme, Authentizität und Situirtheit, Multiple Perspektiven, Artikulation und Reflexion sowie Lernen im sozialen Austausch.
3	12 / 1	<ul style="list-style-type: none"> Die Schülerinnen und Schüler erlangen berufsfeldspezifische Kenntnisse in den Bereichen Wirtschaft, Technik und angewandte Sozialwissenschaften. Verschiedene Kooperationspartner der Hochschule, wie IHK, Firmen und soziale Organisationen, ermöglichen einen Einblick in das spezifische Berufsfeld. Dabei handelt es sich nicht um ein Praktikum im traditionellen Sinne, sondern um eine Hospitation im jeweiligen Tätigkeitsfeld.

Tabelle 1: Auflistung der Inhalte in den jeweiligen Jahrgangsstufen und Phasen der P-Seminare

Dieser umfassende und integrative Ansatz ist unserer Kenntnis nach einmalig an bayerischen Hochschulen.

Lernende im Sinne des Regensburger Modells sind Schüler und Studierende, sowie die traditionell Lehrenden - Professoren und Gymnasiallehrer.

Der Lernende muss zur selbstgesteuerten Aneignung von Wissen, Fähigkeiten und Fertigkeiten angeregt werden. Nach Arnolds Katalog [7] ist Lernen auch immer die Entwicklung einer Selbstkompetenz. Dabei soll der Lernende eine Eigenmotivation zum lebenslangen Lernen entfalten.

Die Nachhaltigkeit der Kompetenzentwicklung des Lernenden im P-Seminar wird durch folgende Kriterien belegt:

- Der Lernende verfügt über Bearbeitungsstrategien bzw. Grundkompetenzen **aktiver** Gestaltung seiner Rolle unter Nutzung der Lernumgebung:
Angebot verschiedener Problemlösungsstrategien.
- Der Lernende ist **selbstgesteuert** und kann den Lernprozess aktiv gestalten. Wissen wird vom Lernenden aktiv

geschaffen (Übungen in Teamarbeit, individuelle Quellenarbeit, Interview des Lehrenden, Projektarbeit mit den Lernenden ...)

Der Lernende erschafft sich **konstruktiv** die Lerngegenstände in seinem Denken selbst. Anwendungen und Musterlösungen [7] werden konstruiert.

Der Konstruktivismus ist eine Theorie über den Erwerb von Wissen, das Lernen und Lehren [8]. Kernaussage ist, dass jeder Mensch durch die Kommunikation mit seiner Umgebung seine eigene persönliche Wirklichkeit erschafft; diese unterscheidet sich von der Wirklichkeit anderer Menschen. Lernen wird als die Konstruktion von Bedeutung und damit als das dynamische Weiterentwickeln der persönlichen Wirklichkeit gesehen.

Der konstruktivistische Bildungsansatz spricht sich damit dagegen aus, dass Wissen von einem Lehrer an Lernende übertragen werden kann. Konstruktivismus setzt auf die Schaffung optimaler Bedingungen für Lernende, der Art, dass sie Wissen selbst für sich konstruieren können. Anstatt Lernenden Informationen sowie verschiedene Skills zur Verfügung zu stellen, bevorzugt der Konstruktivismus es, ein

ELEKTRO- UND INFORMATIONSTECHNIK

66

Umfeld zu fördern, in dem Lernende Wissen erwerben durch Erforschen und Untersuchen sogenannter Authentischer Fragen, entweder alleine oder in Gruppen.

Eine konstruktivistische Lernumgebung wird charakterisiert als eine, die es Lernenden ermöglicht, zusammen in einer Lerngruppe der „Gemeinschaft von Entdeckern“ zu denken, zu erforschen und zu diskutieren.

- Das Lernen erfolgt **situativ**. Der Lernende verbleibt im P-Seminar an einer realitätsnahen Situation, indem er eine konkrete authentische Aufgabe löst. Anwendbares Wissen entsteht bei den Lernenden in einer der Lebens- und Berufswelt nahen Situation, so dass träges Wissen des Frontalunterrichts vermieden wird (Siehe Kiviatdiagramm in Abbildung 1).
- Aus der **praktischen** Aufgabenstellung erfolgt eine Reflexion und Vertiefung der angebotenen theoretischen Grundlagen (Hier eine Projektaufgabe aus dem Software Engineering einer Roboterapplikation im Team).

John Dewey [9], der ‚Vater‘ des Projektlernens formuliert: Menschliche Erfahrungen entstehen dabei als ein Wechselspiel von erfahrenen und erzeugten Handlungen. Im Handeln wird somit Wissen konstruiert. Der Lernende zeigt ein interaktives Verhalten und experimentiert neugierig. Dies wird als Interaktions-Pädagogik bezeichnet.

Die fünf Stufen sind:

1. praktische Tätigkeit und primäre Erfahrung,
2. das Problem und das reflektierende Denken,
3. Tatsachen-Material entdecken,
4. die Hypothese und die vorgeschlagene Lösung des Problems und
5. die Erprobung und Überprüfung durch praktische Handlungen.

- Das Lernen erfolgt in **sozialer Interaktion**: Die Ergebnisse der Gehirnforschung lassen sich in einer integrierten Interpretation darstellen [10]. Dabei wird die ganzheitliche Informationsverarbeitung im Gehirn den konstruktivistisch didaktischen Ansatz in der Lehrmethodik bestätigen [11]. Caine stellt zwölf Lehr-Lern-Prinzipien auf [12] dar. Prinzip 2 formuliert: „Das Gehirn ist sozial.“ Ein Lernprozess mit sozialen Interaktionen ist effektiv. Die Zusammenarbeit der Lernenden in kleinen Gruppen als Lerngemeinschaften, ist einem Lernwettbewerb individuell Lernender überlegen.

Immer wenn Lernende und Lehrende über einen längeren Zeitraum miteinander arbeiten, kommt es nicht nur zu zwischenmenschlicher Kommunikation auf der Inhaltsebene, sondern auch zur Begegnung auf der Beziehungsebene. „Neurologisch gesehen ist die Herausbildung einer (...) Beziehungsebene zwischen Lehrenden und Lernenden nicht nur eine unvermeidliche Tatsache, sondern eine Chance, Zugang zur Motivation der Lernenden zu finden (...). Das interpersonelle Beziehungsgeschehen – und seine immer wieder neue Reflexion und Konzeptualisierung – bleibt eine immerwährende Herausforderung professioneller Pädagogik“ [13].

- Das Lernen ist **handlungsorientiert**. Dies bedeutet körperliche Bewegung beim Lernen, das Einsetzen möglichst vieler Sinne und das Beteiligen des ganzen Körper-Geistes am Lernprozess. Dieses S-A-V-I-Lernen ist gekennzeichnet durch:
 - o Somatisch: Lernen durch Bewegung und Tun
 - o Auditiv: Lernen durch Sprechen und Hören
 - o Visuell: lernen durch Beobachten und Vorstellungskraft
 - o Intellektuell: Lernen durch Problemlösen und Beobachten

Alle vier Formen müssen präsent sein, wenn optimales Lernen stattfinden soll.

Für S-A-V-I-Lernen eignet sich eine vom Lehrenden begleitete Projektarbeit hervorragend.

Das Kiviatdiagramm in Abbildung 1 zeigt unterschiedliche Kriterien der Nachhaltigkeit in der Kompetenzentwicklung. Die Gewichtung ist durch Umfrage bei den Lehrenden (Professoren, Gymnasiallehrer, Mentoren) entstanden. Neben den Aspekten handlungsorientiert, selbstgesteuert, sozial, konstruktiv und situativ fällt auf sind das aktive und das praktische Lernen besonders wirksam. Dieser Ansatz im Regensburger Modell wird als „Praktives Lernen“ (praktisches und aktives Lernen) bezeichnet.

INWIEWEIT KANN BLENDED LEARNING DAS PRINZIP DES PROAKTIVEN LERNENS UNTERSTÜTZEN?

Das Wort Blended Learning kann als vermischtes Lernen aufgefasst werden. Es werden Elemente der online- und offline stattfindenden Lehre bzw. der computerunterstützten und Präsenzlehre vermischt.

Beim P-Seminar bekommen alle Teilnehmenden die Möglichkeit die Funktionen eines kurseigenen Moodles zu nutzen. Hierbei handelt es sich um eine internetbasierte Plattform, die über unterschiedliche interaktive Web 2.0-Dienste ver-

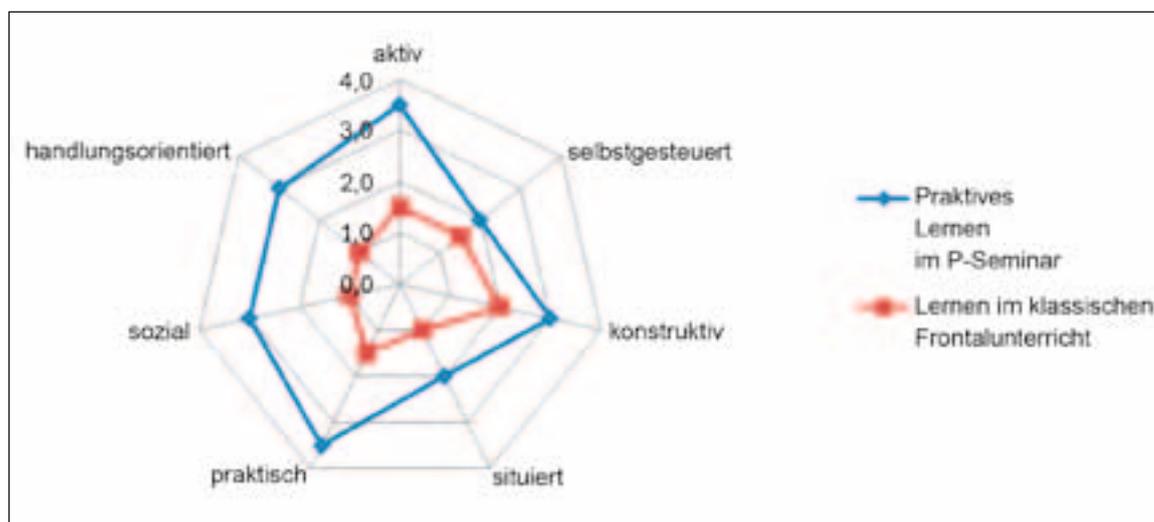


Abb. 1: Kriterien der Kompetenzentwicklung bei aktivem Lernen. Die Gewichtung ist durch Umfrage der Lehrenden und studentischen Mentoren entwickelt

fügt, welche angemeldete Nutzer für ihre Zwecke verwenden können (z.B. Email, Forum, Chat, gemeinsamer Kalender, Datenbankstrukturen etc.).

Auf diese Weise werden den Lernenden unterrichtsbegleitende Materialien, sowie Sekundärliteratur bereitgestellt, wichtige Informationen oder Probleme über die Plattform abgehandelt und den Teilnehmern moderne Kommunikationsmittel zum regelmäßigen Austausch und kooperativen Lernen geboten.

Das P-Seminar unterstützt auf diese Weise nicht nur den schnellen Informationsaustausch, welcher sichert, dass die Lernenden auf dem aktuellen Wissensstand bleiben, sondern erfüllt auch einige andere Anforderungen der Bildung:

- Ausbildung von Soft-Skills
Aufbereitung von Unterrichtsmaterialien, Präsentationstechniken, Verantwortung für das eigene Lernen und die Arbeit in Gruppen etc.
- Medienkompetenz fördern
Ausbildung bzw. Förderung eines sicheren Umgangs mit dem Computer, neuen Medien, dem Internet und seinen Anwendungen. Recherche-Strategien entwickeln und Anwendungen des Angebots aus Web 2.0-Diensten sinnvoll nutzen.

- Medienerziehung / Medienbildung
Erlernen eines verantwortungsvollen Umgangs mit dem Computer, neuen Medien, dem Internet und seinen Anwendungen.
- Lebenslanges Lernen (Lifelong Learning oder auch L³)
Nach anthropologischer Sichtweise ist der Mensch ein lernbedürftiges Wesen. Er ist demnach wissbegierig und ist auf lebenslanges Lernen angewiesen. Diese elementare Aufgabe der Bildung und somit auch der Bildungsinstitutionen, diesen Wissenshunger zu unterstützen und Lernenden Strategien zu lehren, die ihnen ein lebenslanges Lernen ermöglichen, ohne dabei auf fremde Hilfe angewiesen zu sein.

Diese Aspekte sind nur einige, die aktuell als Anforderung des allgemeinen Bildungsaspektes gelten. Dennoch werden diese aufgegriffen, da sie durch das neuartige Regensburger Modell der P-Seminare mit Blended Learning gezielt gefördert werden.

Das P-Seminar bewegt sich somit auf einem neuen Gebiet der Weiterentwicklung der Lehr- und Lerngestaltung und richtet sich an die Lernenden von Morgen, statt auf derzeitigen Lehrarrangements zu verharren.

ELEKTRO- UND INFORMATIONSTECHNIK

68

3 DAS KONZEPT DER REGENSBURGER DIDAKTIK: DARSTELLUNG PRAKTIVER LEHR-LERN-DIDAKTIK

Die P-Seminare werden auf Hochschulseite mit Studierenden vorbereitet und anschließend mit den Schülerinnen und Schülern durchgeführt. Die Studierenden qualifizieren sich mit einem fachwissenschaftlichen Wahlpflichtfach „Embedded Roboter Didaktik (ERD)“.

Die Veranstaltung lässt sich in zwei Seminareinheiten gliedern:

- Einheit 1 (nur Studierende):
Den Studierenden werden grundlegende Kenntnisse der Pädagogik (Didaktik und Methodik der Seminarge-

staltung) sowie der Technik (Programmierung des LEGO Mindstorms NXT mit NXC) näher gebracht.

- Einheit 2 (Studierende und Schüler/innen):
Die Studierenden vermitteln den Schüler/innen Kenntnisse in der Programmierung des LEGO Mindstorms NXT.

Dieses Seminar wurde bereits im Sommersemester 2010 mit Schülerinnen und Schülern des Pindl-Gymnasiums Regensburg durchgeführt. Aufgrund der Erfahrungen und der Evaluationsergebnisse konnte ein Konzept erstellt werden, das als Modell für Projekte in weiteren Studiengängen dienen kann. In Tabelle 2 wird das Konzept verdeutlicht.

Sitzung	Inhalt	Methodik/Didaktik
1 nur Studierende	<p><u>Pädagogik:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Einführung • Kennenlernen • Anfangssituationen (Gruppenphasen) • Lernen und Lerntheorien im Überblick • Einführung in Moodle • Arbeitsauftrag: Selbststudium Lerntheorien <p><u>Technik:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Einführung in LEGO Mindstorms NXT mit NXC 	<ul style="list-style-type: none"> • Lehrgespräch • Steckbriefmethode • Lehrgespräch • Seminaristischer Unterricht • Präsentation <ul style="list-style-type: none"> • Seminaristischer Unterricht
2 nur Studierende	<p><u>Pädagogik:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Schaubilder/Poster zu Lerntheorien erstellen • Theorieaustausch über Schaubilder/Poster • Theorie zu Jigsaw-Methode • Traditionelles vs. Konstruktivistisches Lernen • Konstruktivistische Methoden u. Methodenpool • Arbeitsauftrag: Selbststudium der konstruktiv. Methoden <p><u>Technik:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Montage der Roboter 	<ul style="list-style-type: none"> • Gruppenarbeit • Stationenarbeit • Theorie-Input • Diskussion • Lehrgespräch <ul style="list-style-type: none"> • Einzel- oder Gruppenarbeit und Coaching
3 nur Studierende	<p><u>Pädagogik:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Vorstellung der konstruktivistischen Methoden (aus Arbeitsauftrag) • Theorie der Unterrichtsplanung • Planung des Ablaufs der ersten Stunde mit Schülerinnen und Schülern <p><u>Technik:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Bearbeitung der Einführungs-aufgaben für die Schülersitzung 	<ul style="list-style-type: none"> • Präsentation durch Studierende • Theorie-Input • Erarbeitung und Diskussion <ul style="list-style-type: none"> • Gruppenarbeit
4 mit Schüler	<p><u>Mögliche Variante:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Begrüßung und Vorstellung • Kennenlernen • Einführung in Thematik • Einführung in Lego Mindstorms <ul style="list-style-type: none"> • Montage der Roboter • Einführung in plab (Moodle als virtuelle Lehr-Lern-Plattform) • Abschluss 	<ul style="list-style-type: none"> • Lebende Statistik • Kurzvortrag, Brainstorming • Lehrgespräch, Vorstellung von Plakaten • Gruppenarbeit • Präsentation <ul style="list-style-type: none"> • Blitzlicht

Sitzung	Inhalt	Methodik/Didaktik
5 nur Studierende	<p><u>Pädagogik:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Reflexion der letzten Schülersitzung • Konstruktivistische Theorien (POL, situiertes Lernen, Blended Learning) • Planung der nächsten Schülersitzung <p><u>Technik:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Programmierung der Roboter zur Lösung verschiedener Aufgaben (authentische Problemstellung: Selbstständiges Verlassen eines Labyrinths) 	<ul style="list-style-type: none"> • Diskussion • Lehrgespräch • Diskussion • Pair-Programming
6 mit Schüler	<p><u>Mögliche Variante:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Begrüßung, Rückblick auf letzte Stunde • Theorie zu Pair-Programming • Aufgabenstellung und -bearbeitung zum Kennenlernen der Sensoren • Abschluss 	<ul style="list-style-type: none"> • Reflexion • Lehrgespräch • Pair-Programming • Blitzlicht
7 nur Studierende	<p><u>Pädagogik:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Reflexion der letzten Schülersitzung • Theorie zu Konfliktsituationen im Seminar • Planung der nächsten Schülersitzung <p><u>Technik:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Entwurf und Implementierung des Labyrinths 	<ul style="list-style-type: none"> • Diskussion • Lehrgespräch • Diskussion • Pair-Programming
8 mit Schüler	<p><u>Mögliche Variante:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Begrüßung, Rückblick auf letzte Stunde • Theorie zu Struktogrammen • Aufgabenstellung und -bearbeitung zum Labyrinth • Abschluss 	<ul style="list-style-type: none"> • Reflexion • Lehrgespräch • Pair-Programming • Blitzlicht
9 nur Studierende	<p><u>Pädagogik:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Reflexion der letzten Schülersitzung • Planung der nächsten Schülersitzung <p><u>Technik:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Entwurf und Implementierung des Labyrinths 	<ul style="list-style-type: none"> • Diskussion • Diskussion • Pair-Programming
10 mit Schüler	<p><u>Mögliche Variante:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Begrüßung, Rückblick auf letzte Stunde • Labyrinth-Algorithmen • Aufgabenstellung und -bearbeitung zum Labyrinth • Abschluss 	<ul style="list-style-type: none"> • Reflexion • Lehrgespräch • Pair-Programming • Blitzlicht
11 nur Studierende	<p><u>Pädagogik:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Reflexion der letzten Schülersitzung • Theorie zu Abschluss-situationen in Gruppenphasen • Planung einer Roboter-Olympiade in der nächsten Schülersitzung <p><u>Technik:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Entwurf und Implementierung des Labyrinths 	<ul style="list-style-type: none"> • Diskussion • Lehrgespräch • Diskussion • Pair-Programming
12 mit Schüler Abschluss	<p><u>Mögliche Variante:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Begrüßung, Rückblick auf letzte Stunde • Abschluss der Bearbeitung der Aufgabenstellung zum Labyrinth • Durchführung der Roboter-Olympiade • Siegerehrung • Abschluss 	<ul style="list-style-type: none"> • Reflexion • Pair-Programming • Blitzlicht
13 nur Studierende	<p><u>Pädagogik:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Reflexion der Schüler- Abschluss-sitzung • Theorie zu Evaluation • Durchführung einer Seminar-Evaluation • Abschluss <p><u>Technik:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Demontage der Roboter 	<ul style="list-style-type: none"> • Diskussion • Theorie-Input • Evaluation • Diskussion, Feedback • Gruppenarbeit

GESTALTUNG DER RAHMENBEDINGUNGEN FÜR SITZUNGEN:

Für jede Lerneinheit mit den Schülerinnen und Schülern ist es notwendig, dass die spezifischen Rahmenbedingungen angepasst werden. Diese situative Anpassung der Lerninhalte ermöglicht eine schülergerechte Lernsituation bereitzustellen. Hierunter fallen z.B.:

- Raumgestaltung: Sitzordnung und Ausstattung der Arbeitsplätze
- Technische Ausstattung: BricxCC-Software und NXT-Treiber, Präsentationsmedien

4 EVALUATION UND ERFAHRUNGEN

Nach einem ersten Seminarsdurchlauf des P-Seminars im Sommersemester 2010 wurde eine summative Evaluation durchgeführt. Hierbei stand vor allem die Zufriedenheit der Beteiligten im Mittelpunkt:

- Gruppe I : Lehrer und Dozenten
- Gruppe II : Lernende A (Studierende)
- Gruppe III : Lernende B (Schülerinnen und Schüler)

Mithilfe eines standardisierten Fragebogens konnten Werte für die Zufriedenheit ermittelt werden, die es folgend ermöglichen die Zufriedenheit der einzelnen Gruppierungen zu vergleichen. Bei der Zufriedenheit handelt es sich um Einschätzungen der Beteiligten selbst, d.h. die relativen Werte für die Zufriedenheit sind sehr repräsentativ und spiegeln die Stimmungen angemessen wieder. An der Umfrage nahmen 80% aller Lehrenden und Lernenden Teilnehmenden teil, sodass die Ergebnisse für den ganzen Kurs geltend gemacht werden können.

Es ist festzustellen, dass die Beteiligten, hierunter sowohl die Lehrenden, als auch die Lernenden insgesamt zufrieden bis sehr zufrieden mit dem P-Seminar waren. Die Resonanz ist also äußerst positiv und kann grundlegend als Anstoß für die Weiterentwicklung und fortlaufende Implementierung des vorgestellten Regensburger Modells angesehen werden.

Stellt man die Mittelwerte von den Lehrenden und Lernenden zur Zufriedenheit in den jeweiligen Dimensionen gegenüber, lassen sich keine signifikanten Unterschiede feststellen. Die Werte differieren nur geringfügig, daher wird an dieser

Stelle eine kurze Abhandlung der wichtigsten Ergebnisse vorgenommen.

Die Fragen der Evaluation können in 6 Dimensionen untergliedert werden: (1) Pädagogik, (2) Technik, (3) Allgemein, (4) Schülersitzungen, (5) Dozenten und (6) plab. Hieraus sollen einige Ergebnisse vorgestellt werden, die wichtig als Einschätzungsgrundlage der Kurszufriedenheit und als Ansatzpunkte zur Optimierung dienen. Diese Dimensionen wurden mit statistischen Verfahren in Verbindung mit der Zufriedenheit der Beteiligten gesetzt. Auf diese Weise lässt sich feststellen, ob eine der Dimensionen in Zusammenhang mit dieser steht und diese positiv oder negativ beeinflusst.

DIMENSION - PÄDAGOGIK:

Insgesamt wurde der pädagogische Inhalt des P-Seminars anhand von Beispielen anschaulich vermittelt und der Medieneinsatz trug zur Veranschaulichung der Lernthemen bei (93%). Weiterhin wurde die Wichtigkeit der Themen gut vermittelt (93%), sodass die Beteiligten angaben, das Seminarangebot interessant zu finden (77%). Obwohl sie ihr Vorwissen eher gering einschätzten (15%), sehen sie das P-Seminar als Anstoß, sich auch weiterhin mit den Themen der konstruktivistischen Lehr- Lern-Didaktik zu beschäftigen (54%).

DIMENSION – TECHNIK:

Die Technikeinheiten konnten den Bezug zwischen Praxis und Theorie herstellen (93%) und der Medieneinsatz trug zur Veranschaulichung der Inhalte bei (100%). Die Sitzungen regten weiterhin zum Mitdenken an (77%), sodass die Wichtigkeit der Lerninhalte in den Technikeinheiten gut verdeutlicht wurde (92%).

DIMENSION – ALLGEMEIN:

Die Dauer (77%) und das Tempo (85%) des P-Seminars wurden als angemessen empfunden, sodass die Teilnehmenden nicht über- oder unterfordert wurden. Sie lobten zusätzlich die gute Organisation (64%) bzw. den inhaltlichen Aufbau der Sitzungen (93%). Die Lerneinheiten über Technik- und Pädagogikthemen befanden sich im Gleichgewicht (69%). Abschließend kann festgehalten werden: Der Wissenszuwachs der Studierenden wird durch alle Beteiligten sehr hoch eingeschätzt (92%) und der Besuch dieser Veranstaltung lohnte sich (100%).

Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Mottok

Tel.: 0941 943-1120

Fax: 0941 943-1424

juergen.mottok@hs-regensburg.de**DIMENSION – SCHÜLERSITZUNG:**

Die Schülersitzungen machten Spaß (100%), es bereitete den Schülern und Schülerinnen Freude Neues über LEGO Mindstorms zu lernen (100%) und sie konnten für Technik begeistern werden (92%). Weiterhin fanden die Schülersitzungen mit einer umfangreichen Betreuung und Instruktion durch die Studierenden besonderen Anklang (96%), da sich die Schüler und Schülerinnen gut begleitet (100%) und mit den anspruchsvollen Programmierungsaufgaben nicht überfordert fühlten (80%).

Alles in Allem kann aus den Evaluationsergebnissen herausgelesen werden, dass sie sehr zufrieden mit den einzelnen Aspekten und dem Gesamtkonzept des P-Seminars waren. Somit wird der erste Seminaredurchlauf als sehr erfolgreich bewertet.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das Regensburger Modell gestaltet die Schnittstelle Gymnasium-Hochschule mit aktivierenden Methoden aus und nutzt konstruktivistische Methodenbaukästen. Lernende Studierende vollziehen dabei einen Rollenwechsel, indem Sie Lehrende für Lernende anderer Alterstufe und Reife, Gymnasialschüler, werden. Die Lehrenden aus Gymnasium und Hochschule unterstützen die Lernenden dabei, dass diese Ihren Lernprozess in einer gemeinsamen Projektarbeit eigenverantwortlich steuern.

Das Regensburger Modell wurde erstmals für das Themengebiet Informationstechnik mit LEGO Mindstorm NXT Robotern erprobt. Eine Übertragung auf P-Seminare mit einem anderen Lehrangebot ist angestrebt. Auch kann das Konzept auf „Lebenslanges Lernen“ im beruflichen Umfeld übertragen werden, wenn Mitarbeitergruppen unterschiedlicher Erfahrung und Kompetenz beispielsweise in einem Planspiel miteinander agierend lernen.

REFERENZEN:

- [1] Welbers, U.; Gaus, O.: The Shift from Teaching to Learning, Bertelsmann, Bielefeld, 2009.
- [2] Service-Stelle Bologna: Hochschulrektorenkonferenz – Texte und Hilfestellungen zur Umsetzung der Ziele des Bologna-Prozesses an deutschen Hochschulen, Beiträge zur Hochschulpolitik, 2004.
- [3] Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung (Hrsg.): Die Seminare in der gymnasialen Oberstufe, 2. Aufl., München, 2008.
- [4] Initiative MINT Zukunft schaffen <http://www.mintzukunftschaffen.de>
- [5] Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung (Hrsg.) Berufs- und Studienorientierung im P-Seminar der gymnasialen Oberstufe 2009.
- [6] Nachhaltige Hochschulstrategien für mehr MINT-Absolventen. Hrsg. vom Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft und von der Heinz Nixdorf Stiftung 2009.
- [7] Arnold, Rolf, Siebert, Horst: Konstruktivistische Erwachsenenbildung - Von der Deutung zur Konstruktion von Wirklichkeit; Schneider Verlag: Hohengehren, 2003.
- [8] Reich, Kersten: Konstruktivistische Didaktik – Lehr- und Studienbuch mit Methodenpool, 4. Auflage, Beltz Verlag, 2008.
- [9] Dewey, John: How we think, 1910 (deutsch: Wie wir denken, Zürich 1951).
- [10] Herrmann, U., Neurodidaktik, Beltz Verlag, Weinheim, 2009
- [11] Spitzer, M., Geist im Netz, Modelle für Lernen, Denken und Handeln, Spektrum Verlag, Heidelberg, 2008
- [12] Caine, et.al., 12 Brain/Mind Learning Principles in Action, Thousand Oaks, Corwin Press, 2004
- [13] Bauer, Joachim: Lob der Schule. Sieben Perspektiven für Schüler, Lehrer und Eltern. Hoffmann und Campe, Hamburg, 2007.
- [14] Mandl, H.; Gruber, H.; Renkl, A.: Neue Wege des Lernens mit Multimedia. In: Grundlagen der Weiterbildung, 1996, S. 285-287.

ELEKTRO- UND INFORMATIONSTECHNIK

G. HAGEL¹, J. MOTTOK², M. UTESCH³, D. LANDES⁴, R. STUDT⁵SOFTWARE ENGINEERING LERNEN FÜR DIE BERUFLICHE PRAXIS
– ERFAHRUNGEN MIT DEM KONSTRUKTIVISTISCHEN METHODENBAUKASTEN

ABSTRACT

Mit der Umsetzung des Bologna-Prozesses und der Einführung der Bachelor- und Masterstudiengänge an den Hochschulen wird studentisches Lernen neu thematisiert. „The Shift from Teaching to Learning“ fördert einen Perspektivwechsel der akademischen Lehre hin zu einer Lerner- und Lernprozesszentrierung. Im Rampenlicht steht jetzt der Lernaufwand und Lernprozess. Der Lehrende wird zum Unterstützer der Lernenden: „Lernen lehren“.

Das Zusammenspiel von Lehren und Lernen mit dem Ansatz einer konstruktivistischen Didaktik wird mit Beispielen erprobter Lernkonzepte der Software Engineering Ausbildung der Autoren unterlegt: „Problemorientiertes Lernen“ und „Projektarbeit“ werden exemplarisch diskutiert.

Die gezeigten konstruktivistischen Methoden lassen sich auf lebenslanges Lernen des Software Engineering im Berufsumfeld übertragen.

1 EINFÜHRUNG – DER PROZESS VON BOLOGNA

Der Prozess von Bologna umfasst derzeit 10 Punkte (<http://www.bmbf.de/de/3336.php>). Einer dieser Punkte ist die stärkere Fokussierung von Studiengängen auf „Berufsqualifizierung/ Beschäftigungsfähigkeit der Absolventinnen und Absolventen“. Ein Studiengang definiert sich also nicht mehr traditionell über Lehrinhalte, sondern über die Kompetenzen, die die Studierenden nach Ende des Studiums vorweisen müssen, um im Berufsleben erfolgreich zu sein [1]. Demzufolge soll auch ein Perspektivwechsel von der Input hin zur Output-Orientierung erreicht werden. Der Bologna-Prozess führt zu neuen und flexiblen lernorientierten Angeboten im Hochschullbereich. Dabei spielen Methoden- und Schlüsselkompetenzen, aber auch fachübergreifende Kompetenzen eine wichtige Rolle. In der Akkreditierung der Studiengänge wird ein solcher Ansatz ebenso nachdrücklich genannt [2].

2 DER KONSTRUKTIVISTISCHE
METHODENBAUKASTEN IN DER SOFTWARE
ENGINEERING AUSBILDUNG

In der Software Engineering Ausbildung wird die Output-Orientierung durch den Einsatz geeigneter fachdidaktischer Methoden unterstützt: Die Lernenden sollen weitestgehend durch Selbststeuerung ihren Lernprozess aktiv gestalten. Den Lehrenden stehen mit den konstruktivistischen Methodenbaukasten „Methodenpool“ von K. Reich [3] und der „Methodensammlung“ von G. Macke [4] Ideenquellen zur Ausgestaltung eines selbstgesteuerten Lernprozesses zur Verfügung. Erste positive Versuche im Einsatz dieser Methoden findet man beispielsweise in [5]. Im Folgenden werden unsere Erfahrungen mit ausgewählten Methoden vorgestellt.

2.1 Problemorientiertes Lernen

Die Ursprünge des Problemorientierten Lernens (POL) sind in Shoemaker [9] zu finden. Im POL geht es an Hand von Fallskizzen darum, eigene Strategien zur Problemlösung zu entwickeln und zwar als Teil einer Arbeitsgruppe. POL als praxisorientierte Methodik basiert auf der Erkenntnis, dass sich im Sinnzusammenhang Gelerntes und Verstandenes besser einprägt. Wir setzen dazu die Methodik des 7-Sprunges ein, erweitert um eine Reflexionsphase.

2.1 Problemorientiertes Lernen

Das Wissen von heute zu lehren, kann in einer so volatilen Disziplin wie Software Engineering, deren Wissen sich so rasant weiter entwickelt, kein zielführender didaktischer Ansatz sein: „Hence, students should be able to determine ‚what they know‘, identify ‚what needs to be known‘ and how to ‚gain the knowledge‘ to solve a problem or task. Learning how to acquire and apply these skills is part of the *Problem Based Learning approach*“ [10].

POL wird an der Hochschule Regensburg in der Software Engineering Ausbildung mit Erfolg eingesetzt. Während der Kursvorbereitung ordnet der Lehrende die Lernziele gemäß der Bloom’schen Taxonomie ein. Basierend darauf erstellt er eine Fallskizze (Beispiel in Abbildung 1). Der Lehrende erklärt den Studierenden die Struktur der POL-Methodik.

Im Einzelnen lässt sich POL in acht Schritten darstellen:

1. **Klärung grundsätzlicher Verständnisfragen:**
Inhaltliche Unklarheiten werden in einer offenen Diskussionsrunde geklärt.
2. **Sammlung der Problemaspekte und Definition des Problems:**
Teilprobleme erkennen, unterschiedliche Perspektiven, Ziel ist die Übereinstimmung in der Gruppe
3. **Sammlung von Hypothesen und Ideen:**
Vorkenntnisse, Ideen, Vermutungen auf Karteikarten, Tafel und/oder Flipchart sammeln
4. **Systematische Ordnung der Hypothesen und Ideen:**
Auswahl der relevanten Aspekte
5. **Formulierung der Lernziele:**
Zur systematischen Erweiterung des Wissens klären, was noch erarbeitet werden muss

¹ HS Kempten
² HS.R. LaS³
³ HS Münschen
⁴ HS Coburg,
⁵ HS Landshut

6. **Erarbeitung der Lerninhalte, je nach Absprache Einzeln oder in Untergruppen:**
Nutzung von Bibliotheken und anderen Ressourcen
7. **Synthese und Diskussion der zusammengetragenen Lerninhalte:**
Schriftlich festgehaltene Ergebnisse werden präsentiert
8. **Evaluation der Inhalte sowie der Gruppenprozesse:**
Reflexion über den eigenen Lernprozess und die Interaktionen in der Gruppe

Softwarekrise bei Minocroft

Die Minocroft AG ist als Softwarehaus seit 2007 auf dem Markt tätig. Trotz innovativer Produkte scheitern ca. 10% aller Softwareprojekte bei Minocroft. Mit Zeitverzögerungen werden ca. 25% aller Produkte fertig. Das Unternehmen hat 70 Softwareentwickler. Die Aktionäre der Minocroft AG haben bei der letzten Jahreshauptversammlung eine Verbesserung der Erfolgsquote der Softwareprojekte bei Minocroft gefordert. Inzwischen ist die Unternehmensberatung McClick im Haus. Der Vorschlag ist entstanden mit einem attraktiven Brettspiel zum V-Modell XT den Mitarbeitern dieses Vorgehensmodell mit allen notwendigen Phasen und Meilensteinen nahezulegen. Die Aktivitäten, Rollen und technischen Standards einer jeden Phase sind dabei zu vermitteln...

Werden Sie Mitarbeiter von McClick und gestalten Sie das Vorhaben.

Abb. 1: POL-Fallskizze für Studierende



Abb. 2: In Schritt 7 des Problemorientierten Lernens stellen die Studierenden das Brettspiel V-Modell XT vor (Kurs Software Engineering im WS 2009/2010)

Die POL-Schritte sollten bewusst von allen Studierenden durchlaufen werden. In Abbildung 2 stellen die Studierenden die zusammengetragenen Lerninhalte in Form eines Brettspiels vor. Es empfiehlt sich unter den Studierenden die Rolle eines POL-Taktgebers zu besetzen. Der Lehrende unterstützt als POL-Moderator den Lernprozess der Studierenden und beteiligt sich aktiv durch die Interventionen Analyse-, Meta- oder Strategiegespräch, sowie der Unterstützung einer Visualisierung von Zwischenergebnissen. Der Einsatz der POL-Methodik erfordert zudem die Bereitstellung von Seminarräumen für die Gruppenarbeiten und geeigneter Literatur in den Bibliotheken der Hochschulen.

2.2 Projektarbeit

In unseren Hochschulen wird schon seit Jahren in den Studiengängen der Informatik die Projektmethode aus [3] mit Erfolg eingesetzt. Unter Projektarbeit versteht Reich „das selbstständige Bearbeiten einer Aufgabe oder eines Problems durch eine Gruppe von der Planung über die Durchführung bis zur Präsentation der Ergebnisse“. Die Methode Projektarbeit geht auf eine Arbeit von W. H. Kilpatrick [6] zurück. Wir verfolgen mit den Projektarbeiten drei Ziele: Die Studierenden lernen praxisnah die projekthafte Durchführung einer Aufgabe nach einem selbst gewählten Vorgehensmodell, die Anwendung der im bisherigen Studium erworbenen Fähigkeiten und das Lernen neuer Techniken der Softwareentwicklung und des Software Engineering. Gelernt wird an realen Handlungsabläufen und tatsächlichen Problemsituationen.

Diese in starkem Maße aktivierende Methode fordert, dass sich die Studierenden mit dem Lernstoff auseinandersetzen und miteinander über die Inhalte diskutieren[7]. Die Projektmethode basiert auf den 5 Stufen für das Lernen nach Dewey [8] und läuft meist nach einem von Reich als VEPRAPA bezeichneten Schema ab:

Vorbereitung seitens des Dozierenden: Im Vorfeld werden Aufgaben für eine Bearbeitung in Projekten seitens des Dozierenden zusammengestellt. Haben Studierende Ideen für Themen, können sie diese einfließen lassen, um eine höchstmögliche Identifikation mit der Aufgabe zu erwirken. Der Dozierende bietet für die verschiedenen Aufgaben Informationsquellen und Lernhilfen, damit den Studierenden das Projektlernen vereinfacht wird.

Einstieg: Nach Veröffentlichung der Aufgabenstellungen können sich Studierende selbst zu Projektgruppen zusammenfinden, um diejenige Projektarbeit zu bearbeiten, mit der sie sich am meisten identifizieren.

Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Mottok

Tel.: 0941 943-1120

Fax: 0941 943-1424

juergen.mottok@hs-regensburg.de

Planung seitens der Studierenden: Die Studierenden verteilen entsprechend ihrer individuellen Kenntnisse und Fähigkeiten, oder der Kenntnisse und Fähigkeiten, die sie erlernen möchten, alle Rollen, die das selbst gewählte Vorgehensmodell für die Bearbeitung vorsieht. Möchten die Studierenden Neues erlernen, haben sie bei dieser Methode ein Maximum an Verantwortung für den eigenen Lernprozess. Resultat dieser Phase ist ein Projektplan, der dem Dozierenden präsentiert wird.

Realisierung: Die Studierenden präsentieren regelmäßig die Ergebnisse ihrer Realisierung. Dabei wird darauf geachtet, dass alle Gruppenmitglieder ihre Ergebnisse selbst vorstellen. Bei diesen Treffen unterstützt der Dozierende bei auftretenden Problemen, auf die die Studierenden keine Lösung finden durch entsprechende Hinweise. Er wird vom „Fachvermittler“ zum „Lernberater“.

Auswertung: In gemeinsamen Treffen und in Einzelgesprächen mit dem Dozierenden werden die von jedem einzelnen erbrachten Leistungen erhoben und bewertet.

Präsentation: Am Ende der Projektarbeit werden die Ergebnisse öffentlich im Rahmen einer Veranstaltung an der Hochschule präsentiert.

Abschluss: Hat man so lange zusammen ein Produkt erstellt, wachsen die Teilnehmer ein Stück zusammen. Zum Abschluss gibt es daher meist ein Zusammentreffen, bei dem nochmals das Projekt, das Vorgehen und die Interaktionen der Teilnehmer, sowie das Gelernte reflektiert werden. In einzelnen Fällen führen die erstellten Produkte zu Erfindungen mit Eintragung als Patent.

Bei Projektarbeiten hat der Dozierende bislang bis auf wenige Ausnahmen eine starke Identifikation mit dem Projekt, ein hohes Maß an eigenverantwortlichem Lernen und ein sehr großes Engagement der Studierenden erlebt.

3 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Problemorientiertes Lernen und Projektarbeit sind nach Meinung der Autoren sehr gut für die Erwachsenenbildung geeignet. Beim Problemorientierten Lernen entsteht mit Verlassen des 45-Minutenrhythmus Raum, Zeit und Gelassenheit für aktives und selbstgesteuertes Lernen. Eine konsequente Anwendung der POL-Methodik hätte deren Verankerung im Curriculum der Studiengänge zur Folge. Die Projektarbeit bietet sehr viele Facetten des eigenbestimmten Lernens. Allerdings erfordern beide Methoden ein Umdenken der Lehrenden vom Fachwissen-Vermittler zum Lernberater. Nach den positiven Erfahrungen mit dem konstruktivistischen Methodenpool und der Methodensammlung für den Einsatz

in der Software Engineering-Ausbildung werden die Autoren sicherlich in der Zukunft weitere Schätze aus diesen Quellen konstruktivistischer Didaktik heben, um den Studierenden das Lernen zu erleichtern.

REFERENZEN

- [1] Welbers, U.; Gaus, O.: The Shift from Teaching to Learning, Bertelsmann, Bielefeld, 2009.
- [2] Service-Stelle Bologna: Hochschulrektorenkonferenz - Texte und Hilfestellungen zur Umsetzung der Ziele des Bologna-Prozesses an deutschen Hochschulen, Beiträge zur Hochschulpolitik, 2004.
- [3] Reich, K.: Konstruktivistische Didaktik – Lehr- und Studienbuch mit Methodenpool, 4. Auflage, Beltz Verlag, 2008 url: <http://methodenpool.uni-koeln.de>
- [4] Macke, G., Hanke, U., Viehmann, P., Hochschuldidaktik, Lehren, vortragen, prüfen, Beltz Verlag, Weinheim, 2009.
- [5] Mottok, J., Hagel, G., Utesch, M., Waldherr, F.: Konstruktivistische Didaktik - Ein Rezept für eine bessere Softwareengineering Ausbildung?, im Tagungsband des Embedded Software Engineering Kongress', S. 601-610, 2009.
- [6] Kilpatrick, W. H.: The project method. Teachers College Record, 19, 319-335, 1918
- [7] Waldherr, F, Walter, C., didaktisch und praktisch, Ideen und Methoden für die Hochschullehre, Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2009.
- [8] Dewey, J.: How we think, 1910.
- [9] Shoemaker H., "The functional context method of instruction". Human Resources Research Office, George Washington University. IRE Transactions and Education, V-E-3(2), 52-57. Alexandria, VA, 1960.
- [10] Bentley, J.F.; Lowry, G.R. et. al, "Problem Based Learning in Information Systems Education: Preparing Students for Professional Practice in a Project Environment". Proc. 10th Australasian Conference on Information Systems, 1999.

DANKSAGUNG

Der vorliegende Fachartikel wurde in der Session „Fachdidaktik Software Engineering“ am Embedded Software Engineering Kongress 2010 (ESE 2010) in Sindelfingen vorgestellt. Besonderer Dank gilt dem Vogel Verlag, München für die Abdruckrechte. Dieser Fachartikel ist im Tagungsband des ESE 2010 veröffentlicht, ISBN 978-3-8343-2404-7.

D. PEUKER¹, K. MAERTENS³, G. SCHICKHUBER¹, G. SCHARFENBERG¹, J. WINKLER³, J. KLUCKEN³,
C. HOOK²

FEATURE SELECTION FOR THE DETECTION OF FINE MOTOR MOVEMENT DISORDERS IN PARKINSON'S PATIENTS

ABSTRACT

Parkinson's disease (PD) is a widespread neurological disorder which is difficult to detect in its initial phase. Presently, there is no diagnostic test which can reliably confirm the disease. A promising approach to identify early signs of PD is the analysis of fine motor hand movements using the BiSP technology (Biometric Smart Pen). The BiSP system can assess fine motor dysfunctions of the upper extremities from captured sensor data which are digitized and mapped to a high-dimensional feature space. Respective templates of patients and of healthy control persons can safely be distinguished through linear or nonlinear separation of feature vectors embedded in this high dimensional space. A correct separation of up to 89 percent could be achieved using a classifier based on Fisher's linear discriminant analysis. The results indicate that our method may become an appropriate screening test to uncover early stages of Parkinson's disease.

Index Terms

feature reduction, fine motor movement, hand movement analysis, Parkinson's disease

INTRODUCTION

Parkinson's disease (PD) is a chronic and progressively developing neurological disorder for which currently no sustained cure exists. Because there is no diagnostic test which can reliably confirm Parkinson's disease yet, the estimated number of people affected worldwide varies considerably, i.e. from 4 million up to 10 million. Because the progressive worsening of symptoms in PD patients can at least be slowed down by timely therapeutic measures, it is very important to detect signs of the disease as early as possible. This task is difficult because in the initial stage, signs of Parkinson's are usually noticeable only by small movement disorders. Indeed, the most frequently observed changes in PD patients predominantly affect the fine motor behavior of the upper extremities. Therefore, the analysis of fine motor function of the arms, hands or fingers is a promising approach to evaluate symptoms in persons developing Parkinson's disease. The innovative BiSP system (Biometric Smart Pen) offers an objective and sensitive platform for an analysis of motor coordination disorders. To use this system for Parkinson diagnosis it is essential to extract characteristic features from the captured data, allowing for a reliable separation between patients and test groups of healthy persons. To reduce the number of features to a practical level, a classifier based on

Fisher's linear discriminant analysis was used. The rating of features and their combinations was done by a leave one out cross referencing routine focusing on the rate of correct classifications. In the underlying clinical study a number of six different writing and movement exercises have been measured with the BiSP system. The field test was executed by the Division of Molecular Neurology at the University Hospital Erlangen, in cooperation with the University of Applied Sciences, Regensburg. Six writing and movement exercises (henceforth denoted as „written objects“ or „items“) were analyzed individually: circles, meanders and spirals traced on a paper pad, circles drawn in air, diadochokinesis and finger tapping. After data sampling, data processing and template generation by numerical feature extraction, the optimum feature combination associated with each object was determined from the highest rate of correct classifications, in combination with the smallest number of selected features. To reduce the calculation time to practical levels, a forward selection routine was used. The object „meander“ resulted in an 89 percent correct classification rate, thereby offering the best results among all six items tested. Similarly, matching of the healthy persons also gave the best performance if using the meander, which lead to an excellent „true negative“ association rate of 95 percent. Classification of the group of Parkinson patients was optimal with „tapping“, giving a true positive hit rate of 91 percent. These results show that our approach has a high potential to become a standard screening test for early signs of Parkinson's disease.

METHOD

The presented method is a combination of several well-established mathematical approaches consisting of Fisher's linear discriminant analysis, leave-one-out cross validation and a forward selection routine.

Fisher's linear discriminant analysis:

Fisher's linear discriminant analysis (FDA) is an approach for a two group classification. Since it does not require the data to respect any limitation concerning the statistical distribution of underlying random variables (e.g. features), it represents a proper means to analyze the fine motor function data gathered with the BiSP system. This standard method maps multi-dimensional data points to scalar values, which are then used to build a decision barrier separating data from suspected Parkinson's patients from data of healthy control persons (binary classification). The transformation to a scalar plane is done under consideration of three criteria: minimize the intergroup scattering of each class (criteria 1

¹ Faculty of Electronics and Information Technology, University of Applied Sciences Regensburg;

² Faculty of Information Science and Mathematics, University of Applied Sciences Regensburg;

³ Division of Molecular Neurology, University Hospital Erlangen

	Parkinson (clinical)	Control (clinical)
Parkinson (BiSP)	true positive	false positive
Control (BiSP)	false negative	true negative

Table 1: confusion matrix

and 2) and maximize the separation of the two groups (criteria 3). Generally, these are conflicting criteria which cannot be met simultaneously. An appropriate solution must therefore compromise between the three target aims (cf. figure 1). To find the optimal transformation vector it is necessary (i) to evaluate the individual covariance matrices of each group and (ii) to calculate their respective inverse matrices [1], [2]. Unfortunately, inversion of a covariance matrix with a high degree of correlation within the data can produce massively incorrect results (bad conditioning). To counteract this problem it was required that the result should be correct to at least ten significant figures [3]. This limitation leads to a relatively small number of „good“ features which can be taken into account simultaneously because most of the many features extracted initially are more or less strongly correlated.

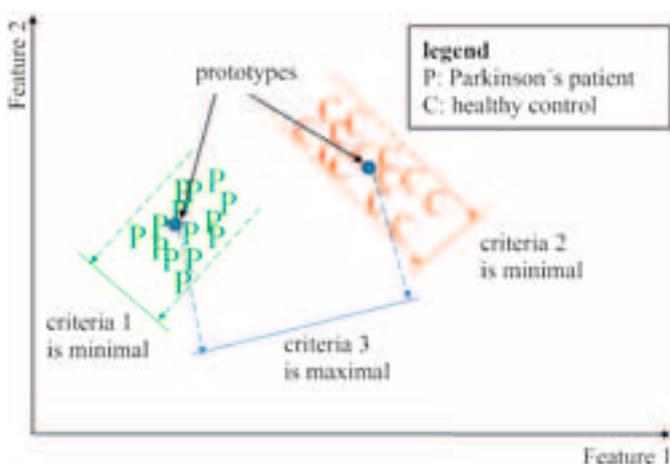


Fig. 1: criteria fisher linear discriminant analysis

Leave-one-out cross validation:

To benchmark the quality of single features and of various feature combinations, a leave-one-out cross validation routine was used. The routine selects an individual data set as sample-query (test specimen), whereby the rest of the data

is used as corresponding reference set in order to train the classifier („supervised learning“). The process is subsequently repeated for each person. Finally, the classification results can be put into four categories: true positive (TP), false positive (FP), true negative (TN) and false negative (FN), which are usually displayed in the so called confusion matrix (cf. table 1). With these four basic values a specific number of classification parameters can be evaluated. The parameter used here to rate the features is the relative number of correct classifications (TPR, TNR), which is defined as the ratio of correct classifications to all classifications.

Forward selection:

With respect to limited computing time it is unpractical to test every possible feature combination. Therefore an heuristic forward selection routine was applied. The possible option of a backward selection routine has been renounced due to the above mentioned limitation of simultaneously useable features. The forward routine first rates every single feature using the leave one out procedure, picking out the one which generates the maximum correct classification rate. In the next step this „optimum feature“ is combined with each one of the remaining set, respectively. These paired feature combinations are evaluated just as in the first step. The process of adding and grouping of features continues until a certain stop condition is met.

DATA

A central part of this work was the acquisition of data and the pre-analytical work concerning the usability of the recorded data. Aspects for the usability include technical integrity of the data as well as the clinical state of the patients, several patients had no definite diagnosis at the time of the study and their measurements therefore had to be discarded.

Survey:

The collection of data used in this work was performed at the University Hospital Erlangen. All data was obtained from

47 Parkinson's patients and 42 control persons which were used as reference for normal fine motor function. Each data set of a proband consists of six „written“ objects. Different objects were analyzed separately, in order to determine which movement task works best for detecting fine motor movement indications of Parkinson's disease. The approach is feature based, which means that the sensor data were numerically compressed to a set of numerical features, for example the time needed to write the object, the number of zero crossings of a measured signal, the standard deviation of amplitudes etc. Using a configuration of six sensors in the BiSP system (figure 2) [5], [8] a total of 492 features was extracted. Some features require aggregation of multiple sensor time series (e.g. $X(t)$ vs $Y(t)$), with an upper limit of three channel combinations.

OBJECTS:

The six objects used in this survey can be separated into paper based tasks („on pad“) and free air exercises. Circles require the test subject to repeatedly draw a circle twelve times, one after another on top of each other and without interruption. Meander and spiral request the probands to retrace given shapes, starting in the middle and working to the outside (figure 3). For these latter two objects four successive replications had to be drawn, giving a larger sample set and thereby more reliable results. The non paper



Fig. 2: sensors within the BiSP system

based movement tasks consisted of (i) circles in air (i.e. a circular motion with twelve successive rotations in free air), (ii) tapping and (iii) diadochokinesis. Tapping and diadochokinesis are well established neuromotor tests which are frequently used in the clinical diagnosis of Parkinson's disease. These standard tests have been adopted in the present BiSP field trial in order to administer a technically objective test

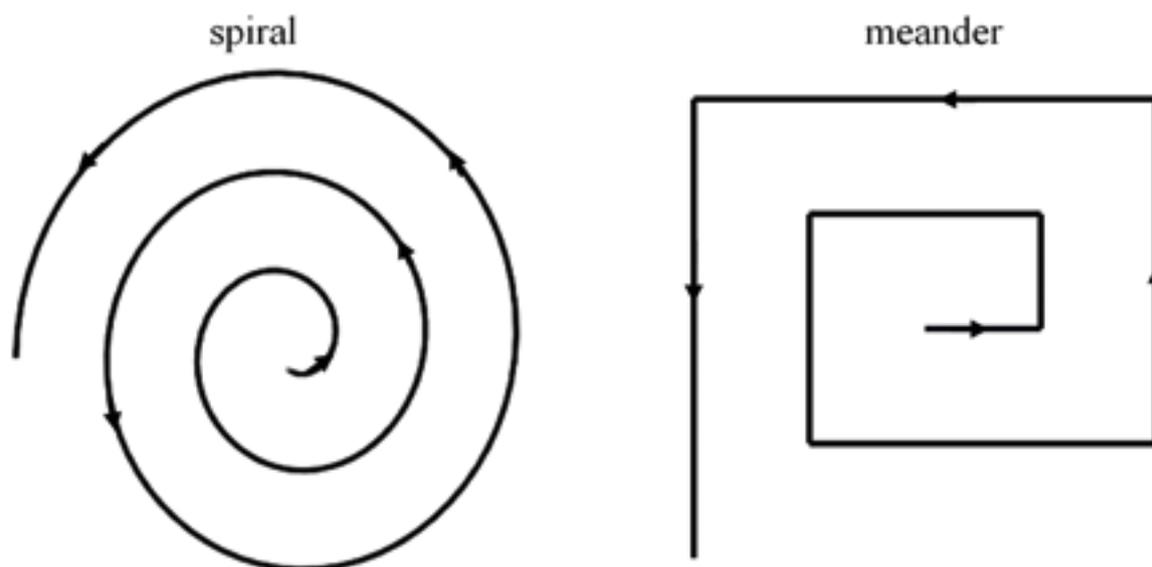


Fig. 3: objects spiral and meander

	Parkinson (clinical)	Control (clinical)
Parkinson (BiSP)	157	8
Control (BiSP)	31	160

Table 2: confusion matrix meander

platform, and to check for compatibility with the rather subjective estimations done „by eye“. Diadochokinesis requires the test person to perform a repetitive left-to-right rotating motion of both sprawled hands for a period of 20 seconds, while holding the BiSP in the dominant hand. „Tapping“ records recurring taps of the index finger on the BiSP grip sensor for a period of 20 seconds.

RESULTS

Since not all of the tested objects showed satisfying results, those presented here are the ones with the most promising approach towards developing a system scanning for fine motor characteristics in Parkinson's patients.

Meander:

Since each person had to draw four subsequent meanders the data set comprises 188 meanders from Parkinson patients and 168 meanders from healthy reference persons. The

best correct classification rate using the meander was obtained using a combination of twelve „good“ features. The progression of the correct classification rate shows that with a relatively small number of features a surprisingly accurate separation of groups can be achieved. It also shows that the classification scores quickly converge to a constant level, at which no further improvement is gained even if more features were added. This limit is reached at a maximum of 18 features (figure 5). With the best twelve features the classifier assigned 157 of the 188 Parkinson patients meanders correctly to the corresponding group. Out of the 168 reference meanders 160 were classified correctly (table 2). The meander also showed the best performance corresponding to the specificity of the test, which is one of the most important parameters used in medical biometrics. Specificity gives information about how good a classifier assigns reference data correctly to the test group - less false positives lead to higher specificity. In this case specificity reached a value of 95 percent.

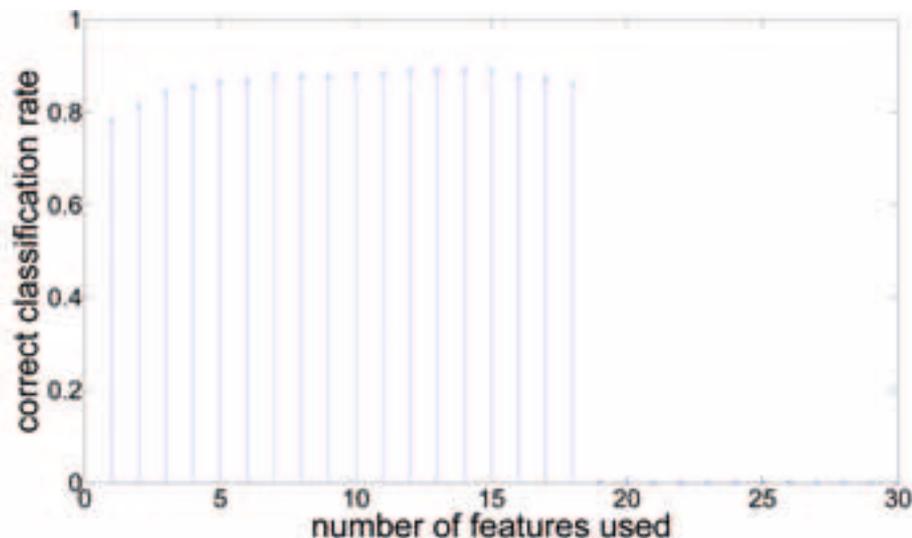


Fig. 4: progression of correct classification rate meander

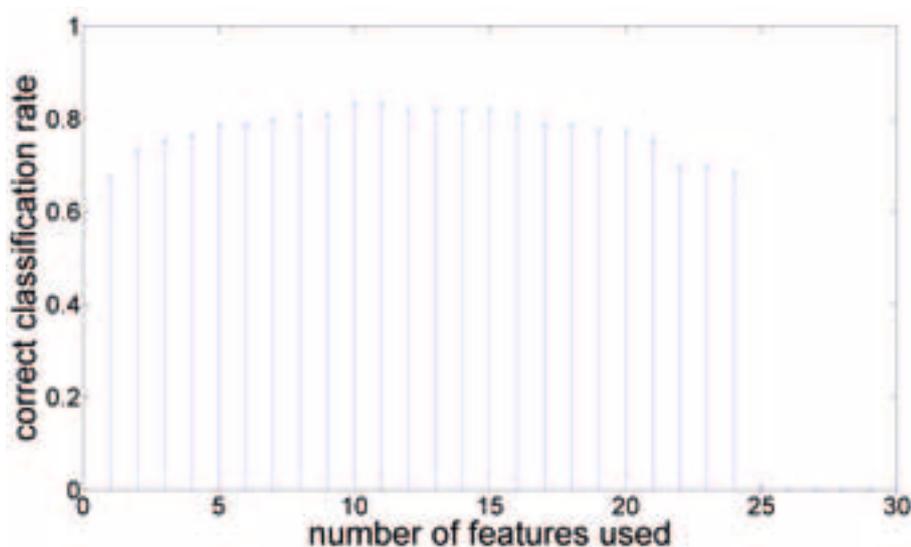


Fig. 5: progression of correct classification rate tapping

Tapping:

Tapping required the test subjects to tap the finger grip sensor continuously for at least 20 seconds. During data analysis 15 seconds of signal were cut out of the original data before extracting the features. The best correct classification rate was achieved with a combination of 10 features at 86 percent correct classifications. It also shows that combining more than twenty-four features no longer meets the accuracy demands. The interesting outcome of this object is its sensitivity: only four of the patient’s data sets were classified incorrectly (table 3). Sensitivity is similar to specificity but addresses the question of how well the system classifies the patient’s data correctly: less false negative results are equivalent to an higher sensitivity. In this case a sensitivity of 91 percent has been reached.

DISCUSSION

Parkinson’s disease is a very complex neurologic disorder which shows different symptoms even within one patient. The day to day fine motor performance can vary extensively, making it difficult to generalize typical signs of the disease. The present approach demonstrates that within a test group a good separability of Parkinson patients and healthy control persons can be achieved. This indicates that the BiSP technology is capable of detecting differences between those groups. Up to now it can not be predicated how well the system performs with independent data. One of the critical aspects in this approach is that feature reduction is done with an initially very large set of features, which can lead to overfitting and thereby to unwanted results. To further

	Parkinson (clinical)	Control (clinical)
Parkinson (BiSP)	43	11
Control (BiSP)	4	31

Table 3: confusion matrix tapping

Prof. Georg Scharfenberg

Tel.: 0941 943-1118

Fax: 0941 943-1424

georg.scharfenbeg@hs-regensburg.de

analyze this technology and the techniques used to find an optimal feature set, independent data sets are necessary. Similar conclusions were found for an approach with a standard graphics tablet [6].

REFERENCES

- [1] Thomas A. Runkler, "Data Mining: Methoden und Algorithmen intelligenter Datenanalyse" Vieweg und Teubner, 2009
- [2] Wolfgang Kohn, "Statistik: Datenanalyse und Wahrscheinlichkeitsrechnung" Springer, Berlin 2004
- [3] Anne Angermann, Michael Beuschel, Martin Rau, Ulrich Wohlfarth "MATLAB-Simulink-Stateflow: Grundlagen, Toolboxen, Beispiele" Oldenbourg, München 2009
- [4] G.K. Gupta "Introduction to Data Mining with Case Studies" Prentice-Hall of India Pvt.Ltd, 2006
- [5] Kempf J., Hook C., Scharfenberg, G. „Biometrischer Stift“ Deutsches Ärzteblatt Praxis 3/2005, #102, Ausgabe 20, 20.05.2005
- [6] N. M. Aly, J. R. Playfer, S. L. Smith, D. M. Halliday "A novel computer-based technique for the assessment of tremor in Parkinson's disease " Age and Ageing 2007, Pages: 395 - 399
- [7] Atilla Ünlü, Rüdiger Brause, Karsten Krakow "Handwriting Analysis for Diagnosis and Prognosis of Parkinson's Disease" Int. Symp. Biological and Medical Data Analysis, LNCS Vol 4345, Springer, Heidelberg 2006, Pages: 441-450
- [8] M. Bashir, and J. Kempf, „Person authentication with RDTW based on handwritten PIN and signature with a novel biometric smart pen device“, IEEE Workshop on Computational Intelligence in Biometrics: Theory, Algorithms, and Applications, 2009. CIB 2009, Volume , Issue , March 30 2009-April 2 2009 Pages:63 - 68
- [9] A. Götz „Algorithmen zur Analyse krankheitsbedingter oder medikamenteninduzierter Störungen der Feinmotorik anhand grafimetrischer Messungen mit einem multisensoriellen Schreibstift“ Diploma Thesis, University of Applied Sciences Regensburg, Faculty of Information Science and Mathematics, March 2009

BILDFUSION UND DEKONVOLUTION IN DER MIKROSKOPIE

1 EINLEITUNG

Das Prinzip des „selective plane illumination microscopy“ (SPIM) wird in der Literatur beschrieben ([5, 8]). Dabei wird eine dreidimensionale Probe in verschiedenen gedrehten Ansichten durch ein spezielles Mikroskop aufgenommen. Da die Auflösung und Detailinformation in den verschiedenen Ansichten unterschiedlich ist, ergibt sich die Aufgabe, die einzelnen dreidimensionalen Bilddaten in ein gemeinsames Bild zusammenzufügen.

Es sei $f(\underline{x})$ mit $\underline{x} = (x, y, z)$ die unbekannte Bildfunktion (dreidimensional) und es werden mit SPIM n Ansichten zu Rotationswinkel $\varphi_i, i = 1, \dots, n$ aufgenommen. Eine Registrierung der Ansichten sei schon als Vorverarbeitung durchgeführt. Dann liegen die Ansichten als 3d-Bilddaten der Form $g_i(\underline{x}), i = 1, \dots, n$ vor. Wir modellieren die Messung g_i für eine Orientierung der Lichtscheibe als Faltung mit einer zur entsprechenden Ansicht passenden PSF h_i (point spread function) in der Form

$$g_i = f \otimes h_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

Dabei wird h_i als bekannt vorausgesetzt, bzw. durch Messung vorab bestimmt. Durch die Aufnahmetechnik und die entsprechende PSF h_i kann angenommen werden, dass in den verschiedenen Ansichten jeweils unterschiedliche Details von f abgebildet werden, d.h. die Messungen g_i sind unterschiedliche Approximationen an die exakte Bildfunktion $f = f_c$.

Ein erster Ansatz für eine Fusion mit dem Ziel einer Zusammenfassung aller Details aus den verschiedenen Ansichten kann mit Methoden gemacht werden, die eine informationsabhängige Gewichtung durchführen. Durch Bewertung dieses Informationsgehaltes der g_i kann unabhängig von der Bildentstehung ein fusioniertes Bild konstruiert werden.

Ein zweiter Weg berücksichtigt die Modellgleichungen als Faltungsgleichungen und approximiert die unbekannte Bildfunktion durch Fusion mittels Dekonvolution, d.h. durch näherungsweise Lösen der Faltungsgleichungen.

Wir beschreiben in den nächsten Abschnitten Methoden für beide Ansätze und wenden sie auf SPIM-Daten an. Dabei zeigt sich, dass Dekonvolutionsverfahren in der Qualität den informationsgewichteten Verfahren überlegen sind. Falls jedoch die Faltungskerne nicht genau genug bekannt sind, kann eine einfache Fusion eine brauchbare und schnelle Alternative sein.

2 FUSION DURCH GEWICHTETE MITTELWERTE

Das allgemeine Prinzip stützt sich auf die Kombination der Ansichten g_i mit Gewichtsfunktionen w_i in der Form

$$f_c \approx g^w = \sum_{i=1}^n w_i g_i \quad (2)$$

Entscheidend für die Approximationseigenschaften der Fusion g^w ist die Wahl der Gewichte w_i . Man wird normalerweise eine Konvexkombination bilden, d.h. $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ verlangen. Die w_i können ortsabhängig als Funktionen $w_i(\underline{x})$ gewählt werden.

2.1 Einfache Mittelwertfusion

Werden die Gewichte konstant als $1/n$ gewählt, so ist die Fusion gegeben durch

$$\bar{g} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_i \quad (3)$$

Dieses sehr schnelle und einfache Verfahren kombiniert alle Ansichten mit gleichem Gewicht. Jede Ansicht trägt mit den spezifisch enthaltenen Details zum Ergebnis bei. Man erhält zwar ein zu den Einzelansichten im Detail verbessertes Ergebnis, jedoch dominiert in der Regel der Eindruck einer Glättung.

Aus den Modellgleichungen (1) kann man die Abweichung des Mittelwertfusion \bar{g} von der Funktion f folgendermaßen abschätzen:

$$\|\bar{g} - f\| = \frac{1}{n} \left\| \sum_{i=1}^n (f \otimes h_i) - f \right\| \leq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|f \otimes h_i - f\| \leq \max_{i=1, \dots, n} \|f \otimes h_i - f\|$$

Dies bedeutet, dass die Mittelwertfusion eine Approximation an f darstellt, die nicht schlechter ist, als die größte Abweichung der Einzelansichten g_i von f .

2.2 Fusion durch Gauss-Mittelwert-Varianz und lokale Varianz

Um spezifische ortsabhängige Strukturen aus den Ansichten bei der Fusion hervorzuheben, kann man die Gewichte nach besonderen Kriterien auswählen. Eine Verbesserung erreicht man durch Wahl der Gewichte in Abhängigkeit hochfrequenter Anteile in den einzelnen Ansichten. Preibisch et.al. [7] schlagen vor, Gewichte analog zu einer lokalen

Varianz zu verwenden:

$$W_i^G = G_{\sigma_1} \otimes [g_i - G_{\sigma_1} \otimes g_i]^2, \quad w_i^G = \frac{W_i^G}{\sum_{\alpha=1}^n W_{\alpha}^G}$$

Dies ist als eine Gewichtung gemäß der ersten Stufe einer Gauss-Pyramide interpretierbar. Aus der ersten Stufe der Gauss-Laplace-Pyramide ([1]) mit Gauss-Filter G_{σ_1} erhält man den zur Gewichtung verwendeten Hochpassanteil $S_1 = g_i - G_{\sigma_1} \otimes g_i$ und die Zerlegung $g_i = G_{\sigma_1} \otimes g_i + S_1$.

Das fusionierte Bild

$$g^G = \sum_{i=1}^n w_i^G g_i \tag{4}$$

muss durch die Größe der Gauss-Filter σ_1, σ_2 geeignet angepasst werden, so dass in der Regel eine bessere Rekonstruktion im Vergleich zur einfachen Mittelwertbildung erzielt wird. Wie bei Li ([6]) beschrieben, wurde Fusionierung mit Pyramiden von Toet 1990 vorgeschlagen.

Die Gewichtungsmethode der lokalen Varianz mit einem Fenster F verwendet den gleitenden Mittelwert M_F statt dem Gauss-Filter, dh. $M_F \otimes g_i(x_0) = \frac{1}{|F|} \sum_{x \in F} g_i(x - x_0)$ und die entsprechenden Gewichte sind

$$W_i^V = M_F \otimes [g_i - M_F \otimes g_i]^2, \quad w_i^V = \frac{W_i^V}{\sum_{\alpha=1}^n W_{\alpha}^V}$$

und das fusionierte Bild

$$g^V = \sum_{i=1}^n w_i^V g_i \tag{5}$$

Die Fenstergröße muss an die Dateninhalte angepasst werden und es ergeben sich ähnliche Resultate wie bei Methode mit der Gauss-Mittelwert-Varianz. Die lokale Varianz lässt sich jedoch bzgl. Rechenzeit effizienter implementieren. Die Fenstergröße bzw. die Gauss-Filter-Parameter haben entscheidenden Einfluss auf die Fusion und insbesondere kleine Fenster können Artefakte erzeugen. Sehr große Fenster scheinen Ergebnisse ähnlich der Mittelwertfusion zu liefern.

Alternativ wird in der Literatur ([7]) auch über Experimente mit lokaler Entropie berichtet, hier ist ein sehr großer Rechenaufwand erforderlich.

2.3 Wavelet-Fusion

Fusion von Bilddaten durch Wavelets wurde im reellen Fall von Li ([6]) beschrieben. Man bestimmt die Waveletkoeffizienten, die ähnlich den Fourier-Koeffizienten Information über den frequenzspezifischen Bildinhalt liefern, jedoch ortsspezifisch sind.

Bildet man nun Gewichte aus den Koeffizienten, in dem jeweils der betragsmäßig maximale in jedem Frequenzband und zu jeder Position gewählt wird, so ergibt sich eine aus den Wavelet-Koeffizienten der einzelnen Ansichten gebildete Wavelet-Transformierte, deren Rücktransformation eine Fusion darstellt. Diese auf reellen Wavelets basierte Fusion erweitert die Möglichkeiten der informationsgewichteten Fusion, jedoch können Artefakte entstehen. Eine deutliche Verbesserung erreicht man durch Fusion mit komplexen Wavelets. Diese Verfahren wurden von Hill ([4]) vorgeschlagen und beschrieben.

3 FUSION DURCH DEKONVOLUTION

Wir betrachten die Modellgleichungen für die unbekannte Bildfunktion $f(x)$ als ein Gleichungssystem der Form

$$h_i \otimes f = g_i, \quad i = 1, \dots, n \tag{6}$$

Es handelt sich um Faltungsgleichungen in einem linearen normierten Raum mit innerem Produkt. Wir gehen im allgemeinen Fall von Funktionen aus dem Raum $X = L^2(\mathbb{R}^3)$ der quadratintegrierbaren Funktionen aus. Nach Diskretisierung kann man sich auf Vektoren und den Raum $X = \mathbb{R}^N$ mit N als Anzahl der Voxel beschränken. Eine Dekonvolution kann für jede Ansicht mit der zugehörigen PSF h_i erfolgen, anschließend werden die Bilddaten aus den einzelnen Ansichten zusammengesetzt (Fusion). Dies wurde anfangs von den Erfindern von SPIM ([5, 8]) auch so vorgeschlagen. Durch Fourier-Transformation (mit Tilde notiert) erhält man:

$$\tilde{h}_i \tilde{f} = \tilde{g}_i, \quad i = 1, \dots, n$$

Über Existenz und Eindeutigkeit einer Lösung der obigen Faltungsgleichungen kann keine allgemeine Aussage gemacht werden, denn die Faltungsgleichungen sind inkorrekt gestellt. Da die rechten Seiten g_i in der praktischen Anwendung durch Rauschen gestört sind, wird es in der Regel keine exakte Lösung geben, man wird in diesem Fall immer Näherungen, etwa im Sinn kleinster Quadrate betrachten.

Andererseits sind die Faltungsgoperatoren bei Mikroskopieanwendungen mit PSF h_i nicht invertierbar, im Fourier-Raum erkennt man dies an dem beschränkten Träger der Transferfunktionen \tilde{h}_i , der normalerweise Torusform hat. Deshalb schränkt man die Suche der Lösung etwa durch Zusatzbedingungen auf eine Teilmenge $f \in X' \subset X$ ein, indem die Lösung regulärisiert wird.

3.1 Dekonvolution durch linearkombinierte Optimierung

Ein Verfahren zur Lösung der Faltungsgleichungen durch Kombination von Optimierungsfunktionen wurde von Verveer et.al. ([9]) veröffentlicht und patentiert. Für jede der Faltungsgleichungen kann die zugehörige Optimierungsfunktion für das Residuum mit einer zusätzlichen Gewichtung W betrachtet werden.

$$\Phi_i(f) = \|W(h_i \otimes f - g_i)\|^2 \rightarrow \min$$

Lineare Kombination gemäß den n Ansichten führt auf die Optimierungsfunktion

$$\Phi(f) = \sum_{i=1}^n \|W(h_i \otimes f - g_i)\|^2 \rightarrow \min \tag{7}$$

Es stehen nun verschiedene numerische Algorithmen zur Behandlung dieser Optimierung zur Verfügung. Die Autoren schlagen das iterative Verfahren von Verveer mit konjugierten Gradienten und Nichtnegativität vor. Dies entspricht einer Einschränkung auf die Teilmenge X' der nichtnegativen Funktionen bzw. Bilder. Als Ergebnis erhält man eine Approximation $f_1 \approx f_e$, die auch die Fusion darstellt.

3.2 Dekonvolution durch Linearkombination der Gleichungen

3.2.1 Dekonvolution der Mittelwertfusion

Es ist naheliegend, die Faltungsgleichungen (6) durch Linearkombination in eine neue Gleichung umzuformen.

$$g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_i = f \otimes \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \right] = h_o \otimes f$$

Damit erhält man eine Faltungsgleichung

$$h_o \otimes f = g \tag{8}$$

mit der Mittelwertfusion als rechte Seite und mit dem zusammengesetzten Faltungskern

$$h_o = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i$$

Falls f die einzelnen Gleichungen erfüllt, so erfüllt f auch die kombinierte Gleichung, das muss aber umgekehrt nicht der Fall sein. Eine bessere Beschreibung folgt aus den mit der exakten Bildfunktion f_e gültigen Gleichungen und dem Rauschen n_i , welches in g_i additiv modelliert wird.

$$g_i = g_i' + n_i, \quad g_i' = f_e \otimes h_i$$

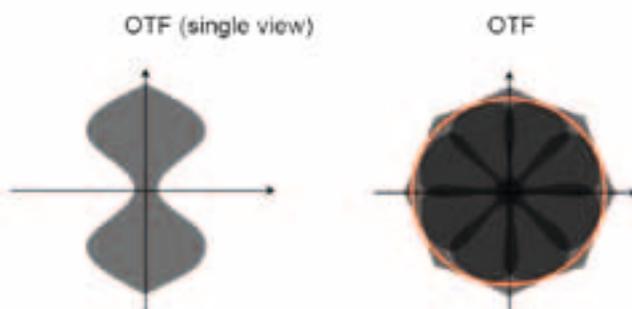
Nun zeigt die Linearkombination der Gleichungen

$$h_i \otimes f_e = g_i - n_i, \quad i = 1, \dots, n$$

eine Mittelung der Rauschanteile, d.h es gilt für die exakte Bildfunktion:

$$h_o \otimes f_e = g - \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n n_i \right]$$

Aus diesem Grunde erwartet man für die Lösung f_2 der Ersatzgleichung $h_o \otimes f = g$ eine gute Approximation an f_e zu sein, also $f_2 \approx f_e$. Außerdem hat der kombinierte Faltungskern h_o bei SPIM durch Rotation und Mittelwertbildung der einzelnen h_i verbesserte Eigenschaften bzgl. des Frequenzspektrums. Dabei wird die Fourier-Transformierte eines Faltungskerns als OTF (optical transfer function) bezeichnet. Man kann bei SPIM bei einer Einzelansicht von einer in axialer Richtung länglich aussehenden PSF ausgehen. Durch Rotation und Überlagerung entsteht ein sternförmiges Muster für die kombinierte PSF h_o . Die Graphiken zeigen schematisch das prinzipielle Verhalten in zwei Dimensionen, einer lateralen und der axialen Richtung.



Als numerisches Lösungsverfahren kann mit verschiedenen DCV-Algorithmen gearbeitet werden, es zeigt sich aber, dass ein einfaches regularisiertes inverses Filter in der Regel ausreichend ist. Im Vergleich zu der Iteration aus dem Optimierungsverfahren ist man damit viel effizienter. Im Vergleich zu der Dekonvolution der Einzelansichten hat die kombinierte Faltungsgleichung bessere Stabilitätseigenschaften, denn die OTF hat einen größeren Träger (Bereich ungleich Null). Die in einer einzelnen Ansicht ausgelöschten Frequenzen werden durch die Drehung in anderen Ansichten durchgelassen. Die Form und Größe der OTF bzw. ihres Trägers gibt Hinweise, wie bei einer gegebenen Optik die Ansichten gewählt werden sollen. Nämlich so, dass die gedrehten OTF-Funktionen sich möglichst gut zu einer geschlossenen Fläche um den Ursprung ergänzen. Es sind die nichtüberlappenden Teile der einzelnen OTF-Funktionen, die die höhere Auflösung ergeben.

Im Grenzfall könnte man $n \rightarrow \infty$ betrachten, dh. für jeden Winkel, $\varphi \in [0, 2\pi]$ die Ansicht g_φ mit der zugehörigen gedrehten PSF h_φ . Dem Mittelwert entspricht dann das Integral über alle Ansichten.

$$\bar{g} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} g_\varphi d\varphi = f \otimes \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} h_\varphi d\varphi$$

Man kann zeigen, dass die Ersatz-PSF $h_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} h_\varphi d\varphi$ nun rotationssymmetrisch ist.

3.2.2 Dekonvolution der linearkombinierten Normalgleichungen

Geht man erneut von den nicht exakt lösbaren Faltungsgleichungen aus, so kann man daraus die zugehörigen Normalgleichungen bilden.

$$h_i^* \otimes h_i \otimes f = h_i^* \otimes g_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (9)$$

Eine Lösung minimiert das Extremwertproblem $\Phi_i(f) = ||(h_i \otimes f - g_i)||^2 \rightarrow \min$ und existiert unter geeigneten Voraussetzungen, etwa im diskreten endlich dimensionalen Fall. Der Kern h_i^* entspricht dem adjungierten Faltungsoperator und kann durch Spiegelung der Filterkoeffizienten am Nullpunkt und Konjugation (bei komplexen Koeffizienten) erzeugt werden. Auch hier kann man durch Bildung einer Linearkombination eine neue Gleichung herleiten:

$$h_{no} \otimes f = \sum_{i=1}^n h_i^* \otimes g_i \quad (10)$$

mit dem Faltungskern h_{no}

$$h_{no} = \sum_{i=1}^n h_i^* \otimes h_i$$

Diese Faltungsgleichung kann mit verschiedenen numerischen Verfahren gelöst werden, etwa mit Iterationsverfahren oder einfacher mit regularisiertem inversen Filter. Die entsprechende Lösung $f_3 \approx f_e$ zeigt in Beispielen vergleichbare Approximationseigenschaften wie f_2 . Transformiert man in den Fourierbereich, so folgt:

$$h_i^* \hat{h}_i \hat{f} = h_i^* \hat{g}_i \implies \sum_{i=1}^n |\hat{h}_i|^2 \hat{f} = \sum_{i=1}^n \hat{h}_i^* \hat{g}_i$$

Auflösung durch regularisierten inversen Filter mit Regularisierungsparameter $\beta > 0$ ergibt:

$$\hat{f}_3(k) = \frac{\sum_{i=1}^n \hat{h}_i^*(k) \hat{g}_i(k)}{\sum_{i=1}^n (|\hat{h}_i(k)|^2 + \beta)} \quad (11)$$

Diese Form der Lösung lässt sich interpretieren als eine gewichtete Fourier-Mittelwertbildung, die in ähnlicher Form auch bei der Kombination der Anteile für die Rekonstruktion mit strukturierter Beleuchtung vorgeschlagen wurde ([2], [3]). Ergänzend kann die Linearkombination der Faltungsgleichungen auch mit Gewichtungsfaktoren erfolgen, etwa mit dem Faktor $1/\sigma_i^2$ bei einem entsprechenden Modell für das Rauschen.

Ein interessanter Zusammenhang zwischen der Dekonvolution mit Optimierungsfunktion nach Verveer aus dem vorigen Abschnitt und der Lösung der kombinierten Normalgleichungen findet man durch Differenzieren der Optimierungsfunktion, wobei zur Vereinfachung die Gewichte W alle auf 1 gesetzt wurden.

$$\Phi(f) = \sum_{i=1}^n ||(h_i \otimes f - g_i)||^2 \rightarrow \min$$

Eine Lösung erfüllt die Bedingung $\nabla\Phi(f) = 0$ und dies ist genau die kombinierte Gleichung

$$h_{no} \otimes f = \sum_{i=1}^n h_i^* \otimes g_i$$

Falls also das gleiche numerische Verfahren verwendet wird, gilt $f_1 = f_3$.

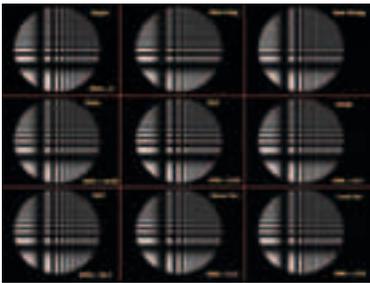
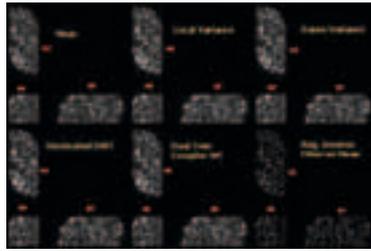
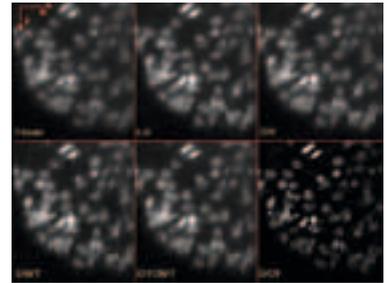
Prof. Dr. Dietwald Schuster

Tel.: 0941 943-1306

Fax: 0941 943-1426

dietwald.schuster@hs-regensburg.de

85

**Abb. 1:** Simulation mit Streifenmuster als Testbeispiel.**Abb. 2:** Pankreas-Zellen einer Ratte.**Abb. 3:** Pankreas-Zellen (Ausschnitt).

4 ANWENDUNGSBEISPIELE

Zu Testzwecken wurde ein 2d-Bild mit Streifenmuster unterschiedlicher Frequenzen erzeugt. Daraus wurden durch Simulation 2 Ansichten durch Glättung in senkrechter bzw. in horizontaler Richtung generiert. Diese Bilder sind in der ersten Zeile der nachfolgenden Darstellung zu sehen. Darunter stehen die Ergebnisse der verschiedenen Fusionierungsverfahren. Man erkennt eine leichte Verbesserung durch die Mittelwert-Fusionierung (mit Mean bezeichnet) gegenüber den einzelnen Ansichten. Die informationsgewichteten Fusionierungsverfahren, wie lokale Varianz, Gauss-Varianz, reelle Wavelets (DWT) und komplexe Wavelet (DTCW) liefern brauchbare Fusionierungsergebnisse. Das beste Ergebnis liefert die Fusion durch Dekonvolution (DCV). Ein reales 3d-Bild wird im nächsten Beispiel vorgestellt. Es wird jeweils ein Schnitt durch die Mitte des Bildvolumens in xy -, xz - und yz -Richtung visualisiert. Auch hier erhält man durch Dekonvolution die beste Fusion.

LITERATUR

- [1] Burt, P. J.; Adelson, E. H.: The Laplacian Pyramid as a Compact Image Code IEEE Transactions on Communications, 31 (4), 1983, 532-540.
- [2] Gustafsson, M.G.L.: Surpassing the lateral resolution limit by a factor of two using structured illumination microscopy. Journal of Microscopy 198, 2000, 82-87.
- [3] Heintzmann, R.: Saturated patterned excitation microscopy with two-dimensional excitation patterns Micron 34, 2003, 283-291
- [4] Hill, P.; Canagarajah, N.; Bull, D.: Image Fusion using Complex Wavelets BMVC 2002 (The 13th British Machine Vision Conference University of Cardi, 2-5 September 2002)
- [5] Huiskens, J.; Swoger, J.; Del Bene, F.; Wittbrodt, J.; Stelzer, E. H. K.: Optical Sectioning Deep Inside Live Embryos by Selective Plane Illumination Microscopy Science, Vol 305, August 2004
- [6] Li, H.; Manjunath, B.S.; Mitra, S.K.: Multisensor Image Fusion Using the Wavelet Transform Proc. 1st international conference on image processing, ICIP 94, Austin, Texas, Vol. 1, pp. 51-55, Nov 1994
- [7] S. Preibisch; T. Rohling; M.P. Hasak; P. Tomancak: Mosaicing of Single Plane Illumination Microscopy Images Using Groupwise Registration and Fast Content-Based Image Fusion Medical Imaging 2008: Image Processing, J. M. Reinhardt and J. P. W. Pluim, Eds., 2008, vol. 6914 of Proceedings of SPIE, p. 69140E.
- [8] Swoger, J.; Huiskens, J.; Stelzer, E. H. K.: Multiple imaging axis microscopy improves resolution for thick-sample applications Optics Letters, Vol 28, No. 18, Sept 2003
- [9] Verveer, P. J.; Swoger, J.; Pampaloni, F.; Greger, K.; Marcelllo, M; Stelzer, E. H. K.: High-resolution three dimensional imaging of large specimens with light sheet-based microscopy Nature Methods, Advance online publication, Natur Publishing Group 2007

MASCHINENBAU

I. EHRLICH, H. DINNEBIER

MATERIALVERHALTEN VON STRUKTURBAUTEILEN AUS FASERVERSTÄRKTEN KUNSTSTOFFEN MIT FERTIGUNGSBEDINGTEN ANOMALIEN UNTER ERSCHWERTEN (MILITÄRISCHEN) EINSATZBEDINGUNGEN

BISHERIGE ARBEITEN UND ERGEBNISSE

Die Arbeit beinhaltet zwei große Themengebiete. Zum einen ist zu klären, wie sich Poren langfristig auf die Festigkeit von CFK-Bauteilen auswirken, wenn diese hoher Feuchtigkeit und großen Temperaturschwankungen ausgesetzt sind. Bisherige Arbeiten beschreiben vor allem den Einfluss statischer Feuchteeinwirkung, nicht aber die Auswirkungen starker Klimazyklen [6]. Der zweite Themenbereich beinhaltet die Untersuchung der Diffusion von Wasser durch das Laminat in die Poren hinein, das Absorptions- und Desorptionsverhalten des Wassers in der Probe und die grundsätzliche Frage, ob und wie es zur Ansammlung flüssigen Wassers in den Poren kommen kann

1 FESTIGKEITSEINFLUSS DER FEUCHTEN POREN

Prinzipiell sind zwei Arten von Poren möglich, die auf völlig unterschiedliche Art und Weise entstehen. Der einfachere Fall sind luftgefüllte Poren. Diese entstehen in Prepreg-Materialien vor allem beim schichtweisen Aufbau des CFK-Bauteils aus Einzellagen. Oft ist es sehr schwer, vor allem große Prepreg-Abschnitte sauber und fehlerfrei aufeinander zu legen. Auf diese Weise wird zwischen den Lagen eine Luftblase eingeschlossen. Da sich derartige Blasenbildung nicht immer vermeiden lässt, wird im Idealfall nach jeder Lage eine Zwischenkompaktierung unter Vakuum durchgeführt und die Luftblase dadurch entfernt. Fehlt die Kompaktierung oder wird sie zu selten durchgeführt, kommt es zur Bildung von Luftblasen im Laminat.

Im zweiten Fall der Porenbildung handelt es sich um Dampfporen, die erst im Autoklaven selbst entstehen. Für die Bildung dieser Art von Poren müssen zwei grundsätzliche Bedingungen erfüllt sein: Zum einen muss im nicht ausgehärteten Harz ein verdampfbarer Anteil vorhanden sein, zum anderen müssen im Laminat Bedingungen vorherrschen, die dieses Verdampfen ermöglichen. Dies ist immer dann der Fall, wenn der Dampfdruck dieser Komponente höher ist als die von außen einwirkenden Kräfte, d.h. der lokal herrschende Außendruck und die Oberflächenspannung. Der Dampfdruck ist stets temperaturabhängig. Viele Harzsysteme werden bei 180 °C ausgehärtet. Im Fall von Wasser und noch viel mehr bei niedrigsiedenden organischen Lösungsmitteln kann bei dieser Temperatur der Dampfdruck den Autoklavendruck bereits überschreiten. Umso mehr ist dies der Fall, wenn aufgrund von Geometrieeffekten im Bauteil lokal nur noch ein Teil des Autoklavendrucks anliegt. Entsprechend setzte auch an diesem Punkt die gezielte Parametervariierung für die Probenherstellung an.

Die bisher im Rahmen dieser Arbeit versuchstechnisch erreichten Porositäten liegen zwischen 0 % und im Extremfall 20 % Volumenanteil (Bild 1). Im Bereich bis 5 % konnte dies durch realistische Herstellungsszenarien wie z.B. zu geringer Autoklavendruck, mangelndes Vakuum und Variation des Anpressdruckes erreicht werden [1].

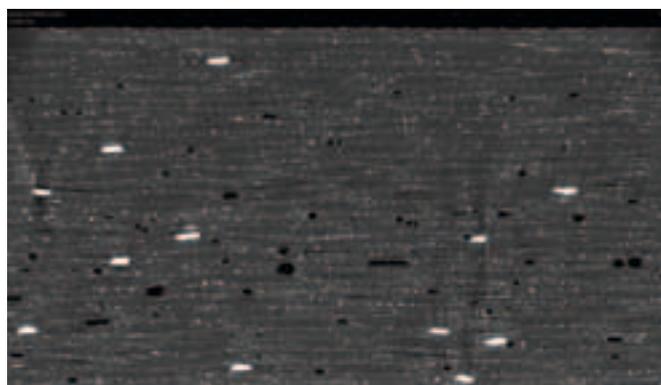


Abb. 1: Poröse CFK-Probe aus dem Werkstoff G939/M18-1

Nachdem die Herstellungstechnik erprobt war, wurden aus den Werkstoffen 8552/IM7 und G939/M18 Proben zur Festigkeitsbestimmung hergestellt. Nach einer Charakterisierung der Porosität mittels CT und Ultraschall wurden die 8552/IM7 Proben bis zur Sättigung warmfeucht ausgelagert. Die Auslagerung der Proben aus G939/M18 folgt (Stand 1/2011). Im Anschluss an die Sättigung mit Wasser werden die Proben zyklisch temperaturbelastet, um Btauungsvorgänge zu initiieren. Es erfolgt dann eine erneute Untersuchung mittels CT. Danach erfolgt die zerstörende Prüfung.

Die CT-Auswertetechniken zur Bestimmung des Porengehaltes mussten erst erarbeitet werden. Es ist mitnichten so, dass die CT hier ohne weiteres Zuthun korrekte Werte liefert. Die Schwankungsbreite aufgrund des menschlichen Einflusses bei der Schwellwertsetzung kann zwar minimiert, aber nicht völlig eliminiert werden.

Bei der Schwellwertsetzung ergeben sich die größten Fehlermöglichkeiten. Durch die steil ansteigende Flanke des Grauerthistogrammes ist es bei falscher Auswahl sehr einfach, einen deutlich zu hohen Wert zu messen [7]. Ein Lösungsansatz, um diesen Bedienerfehler durch Einsatz analytischer Verfahren auszuschließen, war die Peakentfaltung (Bild 2).

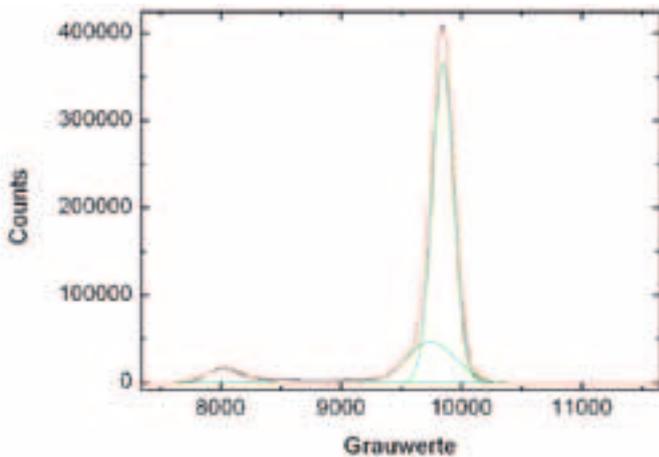


Abb. 2: Peakentfaltung an CT-Daten einer Faserverbundprobe mit den Bestandteilen Pore, Matrix und Faser

Im Vergleich zwischen den Ultraschallmessungen der Platten mit den CT-Ergebnissen zeigte im Fall von G939/M18-1 gute Übereinstimmung. Dagegen zeigten sich bei 8552-IM7 erhebliche Diskrepanzen [5] (Bild 3)

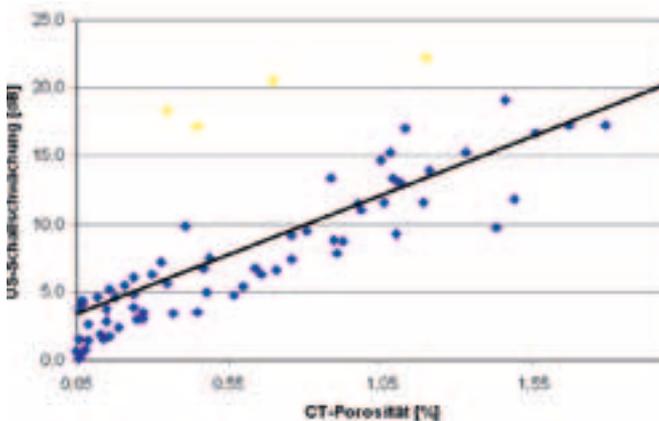


Abb. 3: Korrelation zwischen Ultraschall-Ergebnissen und CT bei 8552/IM7

Aus den so zerstörungsfrei geprüften Platten wurden verschiedene Probenarten für die zerstörende Prüfung hergestellt. Die ersten Messwerte zu G939/M18 werden ab Februar 2011 erwartet.

2 GRUNDSATZUNTERSUCHUNGEN ZUM DIFFUSIONSVERHALTEN

Ausgehend von Vorarbeiten aus einer Diplomarbeit [3] wurde ein Probenaufbau zur Simulation von Betaungsvorgängen in Poren entwickelt. Dabei verschließt ein Reinharzfilm eine künstliche Pore mit variabler thermischer Masse. Die Dicke des Harzfilms ist variabel, wobei der Fokus auf den sehr niedrigen Dicken (<1 mm) liegt. Die variable thermische Masse wird durch wechselbare Stahlplatten hinter der eigentlichen Kavität aus Harz erreicht. Damit können verschiedene thermische Trägheiten hinter der Pore simuliert werden. Ziel ist es, ein „Kennfeld“ zu erstellen, unter welchen Bedingungen die Ansammlung flüssigen Wassers überhaupt möglich ist.

Die bereits laufenden Auslagerungsversuche an realen CFK-Proben zeigen die Abhängigkeit der Feuchtigkeitsaufnahme vom Porengehalt. Sowohl die Geschwindigkeit der Feuchteaufnahme als auch der erreichbare Endwert sind bei porösen Proben deutlich höher (Bild 4). Die höhere Diffusionsrate bei porösen Proben ist ein offensichtliches Ergebnis des um mehrere Größenordnungen größeren Diffusionskoeffizienten von Wasser in den Poren im Vergleich zur ausgehärteten Matrix. Der höhere Absolutwert ist aber bereits ein Hinweis darauf, dass die Feuchtigkeit bereits in diesen noch nicht gezykelten Proben teilweise als Wasser vorliegen muss.

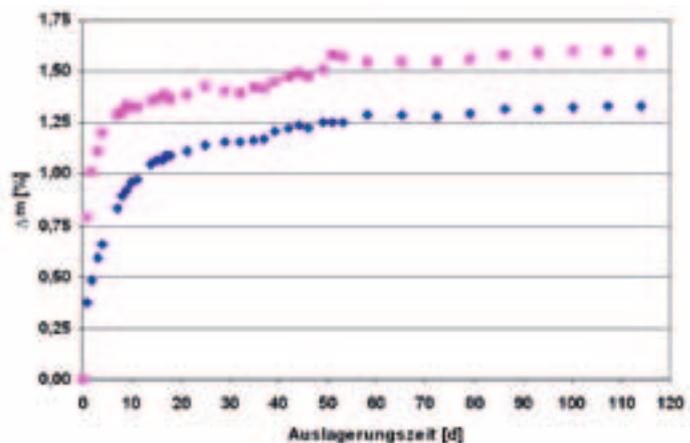


Abb. 4: Massenzunahme durch Feuchtigkeit: Vergleich zwischen porenarmer (blau) und porenreicher Probe (pink), Beide Proben aus 8552/IM7

Eine Berechnung zum Wassergehalt der Poren ergibt für die oben beschriebenen Proben, dass ein großer Teil des aufgenommenen Wassers im gemessenen Porenvolumen nicht

Prof. Dr.-Ing. Ingo Ehrlich
 Tel.: 0941 943-5152
 Fax: 0941 943-1428
ingo.ehrlich@hs-regensburg.de

gasförmig vorliegen kann, da Porenvolumen und Wasseraufnahmefähigkeit der Luft hierfür nicht ausreicht. Es wird mittels CT zu klären sein, ob flüssiges Wasser in den Poren nachweisbar ist.

Ein Vorversuch mit 0,8mm großen Bohrungen in CFK ergab bei einem Vergleich zwischen der trockenen und der nassen Probe deutlich sichtbar die Wassereinlagerung (Bild 5).

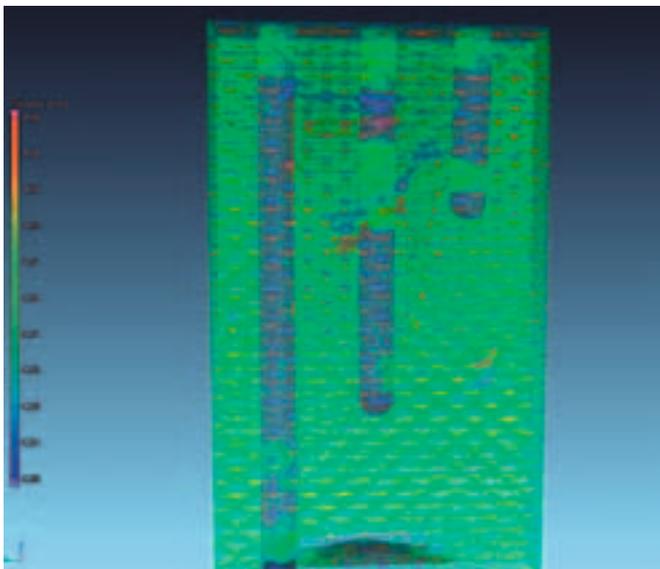


Abb. 5: CT Bild: An einer CFK-Probe mit sehr feinen Bohrungen konnte eingespritztes Wasser sehr gut gezeigt werden

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das Problem der Herstellung poröser Platten ist zwischenzeitlich gelöst. Die Vermessung der Platten mittels CT ist für UD-Material abgeschlossen. Für G939-M18 dauert die Vermessung noch an. Erste verwendbare mechanische Kennwerte werden ab Februar 2011 erwartet.

Die Betrachtungen zum Diffusionsverhalten zeigen bereits rechnerisch, dass ein Teil des Wassers bereits nach der Sättigung in den Poren flüssig vorliegen muss. Weitere Erkenntnisse zur Porenverteilung unterhalb der in der CT erfassbaren Größe werden derzeit mittels Feldemissions-REM erarbeitet. Hier erwarten wir völlig neue Aussagen zur Größe und Verteilung von Nano- und Mesoporen und ausgehend davon einen neuen Berechnungsansatz, der die Wassermenge berücksichtigt, die an den Wänden derartiger Poren durch atomare Kräfte als Flüssigkeit haftet.

Mit Hilfe einer adaptierbaren Diffusionsprobe sollen die Grenzen der inneren Betauung von Poren ausgelotet und zugleich auch die quantitativen Messwerte für die anschließende analytische Rechnung zum Diffusionsverhalten gewonnen werden.

QUELLEN:

- [1] SCHMID, V.; EHRlich, I., DINNEBIER, H.: *Untersuchung der künstlichen Herstellung und Analyse von Probekörpern aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen mit Porositäten und Lufteinschlüssen*. Bachelorarbeit, Labor für Faserverbundtechnik, Fakultät Maschinenbau, Hochschule Regensburg, 2011
- [2] SCHMID, V.; EHRlich, I. DINNEBIER, H.: *Fertigung von Faserverbundwerkstoffen mit definierter Porosität*. Praktikumsbericht, Fakultät Maschinenbau, Hochschule Regensburg, 2010
- [3] KUHNIA, S.; EHRlich, I.; SUCHANDT, T., DINNEBIER, H.: *Migration von Feuchtigkeit in Poren und Lunker von Faserverbundbauteilen*. Diplomarbeit an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Ingolstadt, 2008/2009
- [4] EHRlich, I.: *Fertigungsfehler NH90-Rumpfheck (NH90 Rear Structure)*. Interner Bericht für das Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung (BWB, Koblenz) und die NATO Helicopter Management Agency (NAHEMA, Frankreich, Aix-en-Provence), Wehrtechnische Dienststelle für Luftfahrzeuge - Musterprüfwesen für Luftfahrtgerät der Bundeswehr (WTD 61), Manching, 2006
- [5] WINTER, C.; STACHEL, D.; DINNEBIER, H.: *Herstellung und Untersuchung poröser CFK-Proben*, Diplomarbeit an der Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2010
- [6] COSTA, M.L. MULLER DE ALMEIDA, S.F., REZENDE, M.C.: *Hygrothermal Effects on Dynamic Mechanical Analysis and Fracture Behavior of Polymeric Composites*, Materials Research, Vol. 8, No. 3, 335-340, 2005
- [7] PLANK, B. SEKAJJA, J. MAYR, G. KASTNER, J.: *Porositätsbestimmung in der Flugzeugindustrie mittels Röntgen-Computertomografie*, Proc. Industrielle Computertomografie, S. 25-40, Wels/AT, 2010

DER AERODYNAMISCHE WIDERSTAND VON SEILEN

Seile, die Luftströmungen ausgesetzt sind, setzen diesen Strömungen einen aerodynamischen Widerstand entgegen. Im Windkanal wurde der aerodynamische Widerstand an ausgewählten Seilkonstruktionen gemessen. Über Ergebnisse dieser Messungen wird im Folgenden berichtet.

1 EINLEITUNG

In einigen Seilanwendungen, z.B. Mastabspannungen oder bei Seilbahnen sind die Seile z. T. hohen Windgeschwindigkeiten ausgesetzt. Seile setzen diesen Luftströmungen einen aerodynamischen Widerstand entgegen. Dieser Widerstand wird in einem Windkanal messtechnisch erfasst. Von besonderem Interesse sind der Einfluss der Seilkonstruktion und der Unterschied zu zylindrischen Bauelementen gleichen Durchmessers.

Die aerodynamische Widerstandskraft F_w eines quer angeströmten Seils ist nach [1]

$$F_w = c_w \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot v_w^2 \cdot d \cdot \ell \quad (1)$$

Darin sind

- c_w Luftwiderstandsbeiwert,
- ρ_L Luftdichte,
- v_w Windgeschwindigkeit,
- d Seilnennendurchmesser,
- ℓ angeströmte Seillänge.

Die aerodynamische Widerstandskraft ist näherungsweise proportional zum Quadrat der Windgeschwindigkeit. Dieser parabolische Verlauf wird unterbrochen, wenn die zunächst unterkritische Strömungsablösung in eine überkritische umschlägt. Kriterium hierfür ist die kritische Reynoldszahl Re_{krit} . Aus ihr kann die Strömungsgeschwindigkeit v_{krit} für den Übergang unterkritisch/überkritisch bestimmt werden

$$v_{krit} = \frac{\eta \cdot Re_{krit}}{\rho_L \cdot d} \quad (2)$$

Darin sind

- η dynamische Viskosität,
- Re_{krit} kritische Reynoldszahl für das Ablöseverhalten.

Die Zuordnung der Windgeschwindigkeiten zu den Windstärken nach Beaufort sind in Tabelle 1 aufgeführt [2].

Zur Untersuchung des aerodynamischen Verhaltens von Seilen wurden zwei Drahtseile unterschiedlicher Außenlitzenzahl, ein Faserseil und zum Vergleich ein gezogenes Messingrohr mit glatter Oberfläche untersucht.

2 MESSPRINZIP

Sechs parallele Seilmuster derselben Konstruktion sind in einen Rahmen eingespannt, der in eine Luftströmung konstanter Geschwindigkeit gehalten ist. Der Rahmen ist mit einer Windkanalwaage verbunden, welche Kräfte und Momente in allen Raumrichtungen messen kann. Die Versuchsanordnung ist in Bild 1 dargestellt.

Windstärke	0	1	2
Bezeichnung	Windstille	leichter Zug	leichte Brise
Windgeschwindigkeit	0 – 0,2 m/s	0,3 – 1,5 m/s	1,6 – 3,3 m/s

3	4	5	6	7
schwache Brise	mässige Brise	frische Brise	starker Wind	steifer Wind
3,4 – 5,4 m/s	5,5 – 8,9 m/s	9,0 – 11 m/s	11 – 13,9 m/s	14 – 17 m/s

8	9	10	11	12
Stürmischer Wind	Sturm	Schwerer Sturm	Orkanartiger Sturm	Orkan
17,1 – 20,8 m/s	20,9 – 24,4 m/s	24,5 – 28,4 m/s	29 – 33 m/s	> 33 m/s

Tabelle 1: Beaufortskala



Abb. 1: Versuchsaufbau in der offenen Messstrecke im Regensburg Wind Tunnel (RWTT), Hochschule Regensburg, Seilrahmen (unten) mit Kraftmess-einrichtung (oben).

Die Versuche wurden mit einem 8- und einem 18-litzigen Drahtseil ($d = 7,5\text{mm}$ bzw. $d = 7,0\text{mm}$), einem 6-litzigen Faserseil ($d = 8,0\text{mm}$) und einem gezogenen Messingrohr ($d = 7,0\text{mm}$) durchgeführt: Die Strömungsgeschwindigkeit wurde stufenweise von Null bis 37 m/s erhöht. Die Seile wurden quer zur Längsrichtung unter 90° angeströmt. Gemessen wurden die Strömungsgeschwindigkeit und die Widerstandskraft in Strömungsrichtung. Die Widerstandskraft wurde innerhalb von fünf Sekunden 50 Mal erfasst und gemittelt.

Die Widerstandskraft des leeren Rahmens wurde ebenfalls gemessen, so dass aus den Messergebnissen die Netto-Widerstandskraft eines einzelnen Seilstranges bzw. die län-genbezogene Widerstandskraft errechnet werden konnte:

$$\frac{F}{\ell} = \frac{F_{\text{ges}} - F_{\text{Rahmen}}}{n \cdot \ell} \quad \wedge \quad n = 6 \text{ Stränge} . \quad (3)$$

Während der Messungen betragen die Luftdichte $\rho_L = 1,14 \text{ kg/m}^3$ und die dynamische Viskosität der Luft $\eta = 1,835 \cdot 10^{-5} \text{ PAS}$. Der Turbulenzgrad in der offenen Mess-strecke des Windkanals liegt bei $T_U \approx 0,5\%$.

4 AUSWERTUNG

Für die untersuchten Versuchsmuster liegt die Strömungsgeschwindigkeit und die damit verbundene Reynoldszahl eine Größenordnung unterhalb der kritischen Reynoldszahl für glatte Kreiszylinder. Die kritische Reynoldszahl ist in [3] mit $Re_{\text{krit}} = 2 \cdot 10^5$ angegeben. Bei einer Windgeschwindigkeit von $v = 40 \text{ m/s}$ wird bei einem Nenndurchmesser von $d = 7,0 \text{ mm}$ etwa eine Reynoldszahl von $Re = 2 \cdot 10^4$ erreicht. Die Versuche zeigten also ausnahmslos unterkriti-sches Ablöseverhalten.

Aus den Strömungsgeschwindigkeiten und dem jeweiligen Seilnen- bzw. Rohrdurchmesser wurden die c_w -Werte berechnet. Im Geschwindigkeitsbereich von $v_w = 4 \text{ m/s}$ bis ca. 25 m/s sind für jedes Versuchsmuster die c_w -Werte in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit erwar-tungsgemäß etwa konstant. Es wurde deshalb der Mittelwert innerhalb dieser Grenzen gebildet. Die ermittelten c_w -Werte sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Mit Hilfe des c_w -Werts lassen sich die gemessen Wider-standskräfte auf andere Durchmesser umrechnen:

$$\left(\frac{F}{\ell}\right)_2 = \frac{d_2}{d_1} \cdot \left(\frac{F}{\ell}\right)_1 . \quad (4)$$

Zur zahlenmäßigen Darstellung der Widerstandskraft in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit wurden Regressionsrechnungen durchgeführt. Der Ansatz lautet:

$$\frac{F}{\ell} = a_2 \cdot v_w^2 + a_1 \cdot v_w . \quad (5)$$

Die Konstanten a_2 und a_1 sowie das Bestimmtheitsmaß B sind ebenfalls in Tabelle 2 aufgeführt. In Bild 2 sind die mit Gl. (5) berechneten Widerstandskräfte der vier Versuchs-muster für den Nenndurchmesser $d = 7,0 \text{ mm}$ dargestellt.

Versuchsmuster	c_w -Wert	α_2	α_1	B
Drahtseil: 8x17 Seale + SES	1,58	0,0046	0,0309	0,9958
Drahtseil: 18x7 + SES, verdichtet	1,42	0,0057	0,0038	0,9947
Faserseil: Langhanfseil, gedreht	1,57	0,0065	0,0006	0,9973
gezogenes Messingrohr	1,29	0,0045	0,0134	0,9954

Tabelle 2: Ergebnisse für Nenndurchmesser $d = 7,0 \text{ mm}$ und Luftdichte $\rho_L = 1,14 \text{ kg/m}^3$. Hinweis: Der c_w -Wert ist zwischen $v_w = 4 \text{ m/s}$ und 25 m/s gemittelt.

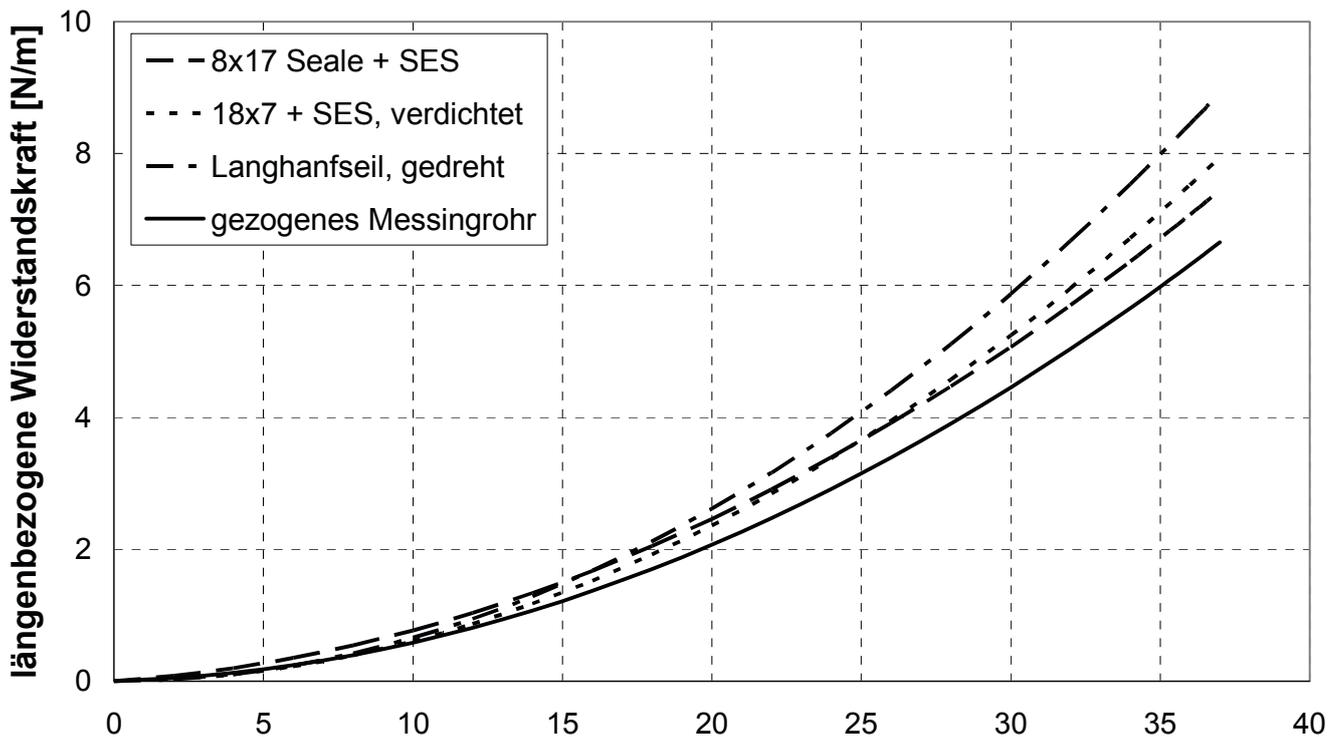


Abb. 2: Regressionskurven zur längenbezogenen Widerstandskraft von quer angeströmten Seilen aus Messungen an der HS Regensburg bei der Luftdichte $\rho_L = 1,14 \text{ kg/m}^3$ und dem Nenndurchmesser $d = 7,0 \text{ mm}$

5 ERGEBNISSE

Bei gleichem Nenndurchmesser hat das gezogene Messingrohr erwartungsgemäß den geringsten aerodynamischen Widerstand. Die Widerstandskräfte des verdichteten 18-litzigen Seils und des Faserseils sind bis zu einer Strömungsgeschwindigkeit von ca. 10 m/s vergleichbar mit der des Messingrohres und zeigen bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten ca. 10-20% bzw. 25-35% höhere Widerstandskräfte an. Die Widerstandskraft des 8-litzigen Seiles ist bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten ca. 50% größer als beim Messingrohr und reduziert diesen Wert für die höchste eingestellte Strömungsgeschwindigkeit von 37 m/s auf ca. 10%.

Beim Vergleich der beiden untersuchten Drahtseile zeigt sich, dass die Widerstandskraft des verdichteten 18-litzigen Seils mit seiner nahezu glatten Oberfläche bis zu einer Strömungsgeschwindigkeit von ca. 25 m/s niedriger, aber bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten höher ist als beim 8-litzigen Seil mit seiner mehr zerklüfteteren Oberfläche.

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Briem

Tel.: 0941 943-5194

Fax: 0941 943-1428

ulrich.briem@hs-regensburg.de

Bei den metallischen Versuchsmustern steigt der c_w -Wert mit zunehmender Abweichung von der zylindrischen Oberfläche an, d.h. mit abnehmender Anzahl von Außenlitzten nimmt der c_w -Wert zu. Es wird vermutet, dass bei niedrigerer Außenlitzenzahl örtlich eine frühere laminare Strömungsablösung stattfindet.

6 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Bohl, W.: Technische Strömungslehre. Vogel Buchverlag 2002
ISBN 3-8023-1878-1
- [2] Beaufortskala aus <http://de.wikipedia.org/wiki/Beaufortskala>
- [3] Hucho, W.H.: Aerodynamik von stumpfen Körpern. Vieweg & Sohn 2002
ISBN 3-528-06870-1

DANKSAGUNG

Die Autoren danken der CASAR Drahtseilwerk Saar GmbH und der Braun GmbH für die Bereitstellung der Seilmuster.

A. KODER, A. BIALEK, A. GENEWSKY, M. NEUMEIER, P. SCHLOSSER, H. RABL

ENTWICKLUNG UND KONSTRUKTION EINER VORRICHTUNG ZUR 2-DIMENSIONALEN ERMITTLUNG DES KONZENTRATIONSPROFILS IM ABGASSTRANG

Wie oft in den Medien publiziert, tragen Abgasemissionen zur bodennahen Ozonbildung bei und beeinträchtigen die Lebensqualität vor allem in Großstädten mit hohem Verkehrsaufkommen. Das Europäische Parlament hat für das Jahr 2013 eine erneute Verschärfung der Emissionsgrenzwerte eingeführt. Besonders bei schweren Nutzfahrzeugen stellt der Partikel- und Stickoxidausstoß eine hohe Umweltbelastung dar. Die Nutzfahrzeughersteller sind daher stetig bemüht, die postmotorischen Maßnahmen zur Stickoxid (NO_x)-Verminderung weiterzuentwickeln und zu optimieren. An der Hochschule Regensburg wird im Labor für Verbrennungsmotoren und Abgasnachbehandlung, unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans Peter Rabl, im Rahmen eines Forschungsprojektes, eine Vorrichtung zur 2-dimensionalen Konzentrationsmessung im Abgasstrang entwickelt. Dieses Tool soll die Entwicklung der Abgasnachbehandlung besonders bei großvolumigen Motoren unterstützen. Durch die Einbindung der entwickelten Entnahmeeinheit wird die Gaszusammensetzung ortsabhängig gemessen und ermöglicht eine Bewertung der vorausgehenden Abgasnachbehandlung.

KONZEPT

In der Konzeptionsphase der Vorrichtung werden der modulare Aufbau eines linearen Block-Systems gewählt und die translatorischen Bewegungen in zwei Raumrichtungen mittels Schrittmotoren und Gewindespindeln realisiert. Weiterhin stellt die Reproduzierbarkeit der Messungen einen wichtigen Aspekt bei der Auslegung dar, beispielsweise um

Vergleichsmessungen durchzuführen, oder diese mit Simulationsergebnissen zu vergleichen. In Abbildung 1 sind das Motion-Modul (1), das Main-Modul (2), sowie das Pipe-Modul (3) dargestellt.

MOTION-MODUL

Als Motion-Module werden die Baugruppen bezeichnet, welche für die Bewegung der Entnahmesonde im Inneren der Abgasanlage verantwortlich sind. Aufgrund der 2-dimensionalen Bewegung über den Querschnitt bietet sich eine Aufteilung des Verfahrssystems in Motion-Modul X und Motion-Modul Y an. Jede der beiden Baugruppen verfügt jeweils über eine eigene grundlegende Antriebseinheit, bestehend aus einem Schrittmotor, einer Trapezgewindespindel mit Gewindemutter, sowie einem Linearpotentiometer (Abb.2: (2)) zur Positionsbestimmung.

MOTION-MODUL X

Das Motion-Modul X realisiert die horizontale Bewegung der Sonde im Abgassystem und ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Basis der Baugruppe bildet eine 10 mm starke Teflonplatte (4), welche auch die Funktion der Isolation gegenüber dem heißen Abgasstrom übernimmt. Dieses Bauteil sitzt direkt auf dem Main-Modul und gewährleistet, dass sich die oberhalb der Platte montierten Bauteile nicht signifikant erwärmen. Dies ist insbesondere im Hinblick auf die verwendete Antriebseinheit aus Gewindespindel (2) und Spindelmutter sehr wichtig. Eine starke Wärmedehnung würde hier mit hoher Wahrscheinlichkeit die Funktion des Antriebs beeinträchtigen. Als Isolationsmaterial wird Teflon verwendet, da es eine hohe Temperaturresistenz aufweist. Die Rotationsbewegung der Motorwelle wird über den bereits beschriebenen Spindeltrieb in eine translatorische Bewegung des Schlittens umgewandelt. Die Steigung der Gewindespindel ist hier in Bezug auf das maximale Dreh-

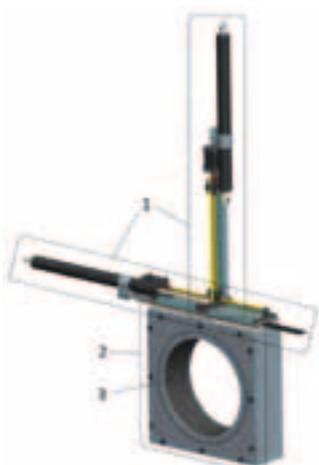


Abb. 1: Entnahmeverrichtung unterteilt in Motion-Modul (1), Main-Modul (2) und Pipe-Modul (3)

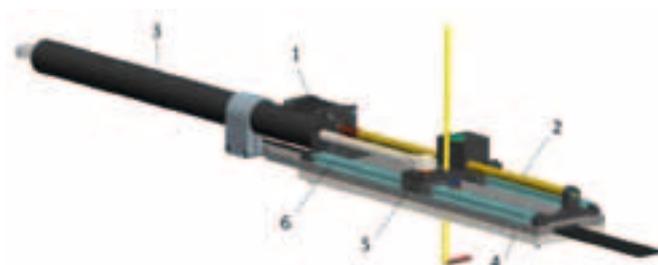


Abb. 2: Motion-Modul X mit Entnahmesonde

moment des Schrittmotors (1) ausgelegt. Der Schlitten wird dabei auf zwei parallelen Miniaturgleitführungen (5) geführt, um ein Verkanten zu verhindern. Die dazugehörigen Führungsschienen (6) sind wärmeisoliert auf der Oberseite des Motion-Moduls montiert.

Abbildung 3 zeigt den Schlitten im Schnittbild senkrecht zur Bewegungsrichtung. Wie schon erwähnt ist der Schlitten die angetriebene Komponente. Links im Bild befindet sich der bewegliche Potentiometerarm (1), welcher am Schlitten (2) befestigt ist und dadurch linear die Position der Sonde (3) wiedergeben kann. Die Antriebskraft wird auch auf das Verschiebblech (4) übertragen, welches mit dem Schlitten verschraubt ist. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass sich das Blech synchron zur Sonde bewegt.

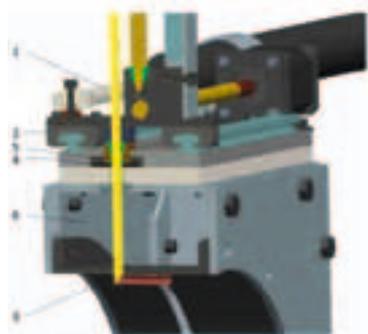


Abb. 3: Motion-Modul X, Schnittdarstellung

Dieses Blech gleitet dabei in einer eng tolerierten Teflondichtung (5), was eine möglichst große Dichtheit des Systems garantiert. Somit kann dort kein Abgas aus dem Inneren der Entnahmeverrichtung in die Umgebung strömen. Der untere Bildbereich zeigt das Main-Modul (6) und das Pipe-Modul (3).

MOTION-MODUL Y

Das Motion-Modul Y führt die vertikale Bewegung der Sonde analog zur X-Richtung aus. Abbildung 4 zeigt das Modul. Der Schrittmotor (1), das Linearpotentiometer (2) sowie die Führungsschiene (3) sind an einem U-Profil (4) angebracht, welches mit dem horizontalen Schlitten (5), aus dem Motion-Modul X, fest verbunden ist. Rotiert die Spindel (6) wird die Rohrklammer (7) mit integrierter Spindelmutter in eine vertikale Bewegung versetzt und damit auch die daran fixierte Sonde (8). Der bewegliche Potentiometerarm (9) ist seitlich an der Rohrklammer befestigt. Das entnommene Abgas wird am oberen Ende des Sondenröhrchens zur Messanalytik abgeführt.



Abb. 4: Motion-Modul Y

Eine Herausforderung stellt die Abdichtung der Sondenöffnung zum Main-Modul dar. Abbildung 5 zeigt die konstruktive Lösung im Detail. Das Sondenröhrchen (1) verläuft zunächst durch eine Bohrung (2) im Schlitten, danach durch ein Gleitlager (3) und schließlich durch eine ringförmige Teflondichtung (4) ins Innere des Main-Moduls (5). Mittig im Bild ist außerdem die Spindelmutter (6) für die horizontale Bewegung abgebildet.

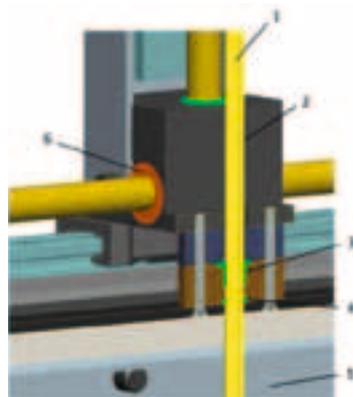


Abb. 5: Motion-Modul Y, Schnittdarstellung

MAIN-MODUL

Das Main-Modul (Abbildung 6) erlaubt die Implementierung der Maschine in den Abgasstrang und ist gleichzeitig die Befestigungsbasis für die beiden Motion-Module. Es besteht aus vier U-Profilen (1), welche zu einem Rechteck verschweißt sind. Auf der Oberseite weist der Kasten ein Langloch (2) auf, welches die horizontale Bewegung der Sonde ermöglicht. Das Modul ist gasdicht verschweißt, um ein Austreten der heißen Abgase zu verhindern. In der Abbildung ist die Adapterplatte (3) mit einer zentralen Bohrung von 10,5 Zoll dargestellt. Sie ist jeweils an die Vorder- und Rückseite des geschweißten Kastens geschraubt. Dabei ist der Durchmesser der Bohrung in der Adapterplatte, beziehungsweise die eigentliche Geometrie dieser Aussparung, abhängig von Größe und Form des Katalysatorquerschnitts. Zur Adaptierung der Vorrichtung an ein Abgassystem mit abweichendem Katalysatorquerschnitt müssen lediglich die Adapterplatte und das Pipe-Modul ausgetauscht werden. Als Dichtung (4) zwischen den Adapterplatten und dem Kasten werden an dieser Stelle 1,5 mm dicke Glimmerdichtungen verwendet. Dabei handelt es sich um ein Flachdichtungsmaterial mit Metalleinlage, welches für Hochtemperaturanwendungen bis 900 °C verwendet wird (Hendricks-Indutec, 2010).

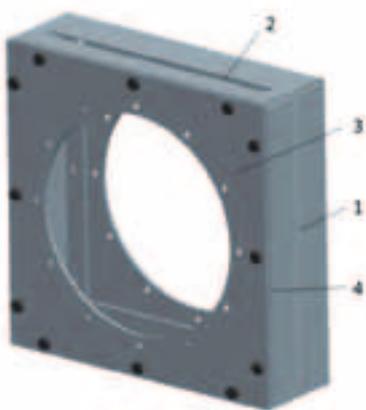


Abb. 6: Main-Modul

PIPE-MODUL

Das Pipe-Modul (Abbildung 7) stellt die Verlängerung des Abgasstrangs durch die Gasentnahmevorrichtung dar. Der Innendurchmesser, die Form und die zentrale Öffnung in der Adapterplatte sind durch den Katalysatorquerschnitt definiert. Analog zum Main-Modul weist auch das Rohr ein

nach oben gerichtetes Langloch (1) auf, in dem die Sonde verfahren kann. Auch das Lochbild (2) ist identisch zu dem der Adapterplatte. Das Modul besteht aus einem lasergeschnittenen, gebogenen und verschweißten Blech (3) sowie zwei identischen, aufgeschweißten Flanschen (4).



Abb. 7: Pipe-Modul

IMPLEMENTIERUNG IM PRÜFSTAND UND ERGEBNISSE

Abbildung 8 zeigt das System im Detail. Das Abgas wird durch die Sonde (1) und den auf 170°C beheizten Schlauch (2) zum Massenspektrometer geführt und dort analysiert. Der SCR-Kat (3) ist direkt an das Main-Modul (4) angeschraubt. Die beiden Linear-Potentiometer (5) werden zur Positionserkennung und Nullpunktsuche verwendet. Je Antriebsachse führen 2 Leitungen vom Schaltschrank (nicht im Bild) zum System. Dazu gehören die Steuer- und Versorgungsleitungen für die Schrittmotoren und die Anschlüsse der Potentiometer.



Abb. 8: Implementierung in den Prüfstand

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Rabl
Tel.: 0941 943-5164
Fax: 0941 943-1428
hans-peter.rabl@hs-regensburg.de

In Abbildung 9 ist schließlich eine erste NO_x -Konzentrationsmessung über den Rohrquerschnitt dargestellt. Die rote Linie definiert den Rohrinne Durchmesser der in diesem Fall 10,5 Zoll beträgt. Erste Versuchsmessungen lieferten vielversprechende Ergebnisse im Hinblick auf den späteren Einsatz der Entnahmevorrichtung. Das 2-dimensionale Stickoxid-Profil wurde mit der National Instruments Software DIAdem® erstellt.

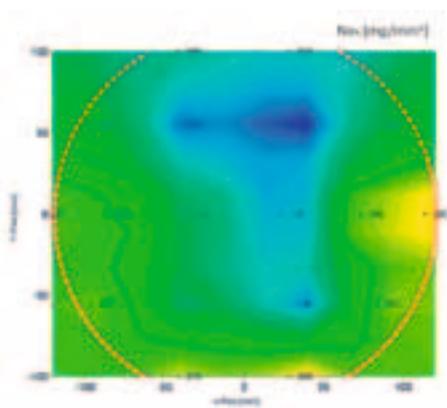


Abb. 9: Konzentrationsprofil über Rohr-Querschnitt
[Messung: Andreas Pfaffinger, M.Sc.]

ZUSAMMENFASSUNG / AUSBLICK

Die eingangs erwähnten Hauptanforderungen (Gasdichtheit und Reproduzierbarkeit der Messergebnisse) können durch die Entnahmevorrichtung, bestehend aus Motion-Modul, Main-Modul und Pipe-Modul sehr gut umgesetzt werden. Auch ist eine Applikation verschiedener Rohrgeometrien und -abmessungen durch die Variabilität am Main-Modul gegeben. Außerdem ist es möglich, durch das entwickelte Elektronikpaket, die Vorrichtung im stand-alone-Betrieb, sowie im remote-Betrieb zu benutzen. Die softwaretechnische Koppelung mit dem Prüfstand, sowie eine automatische Generierung des Konzentrationsprofils sind angedacht. Eine Kernaufgabe der Einrichtung wird in Zukunft jedoch die Validierung von Simulationsergebnissen darstellen, da an der Hochschule Regensburg auch Simulationstools wie AVL-FIRE® u.a. zur Errechnung des Strömungsbildes und der Reaktionschemie im Abgasstrang eingesetzt werden.

M. PAULE, C. GALSTER, M. SCHIEDERMEIER, A. ZWICKEL, C. HOBMEIER,
T. BISCHOFF, G. RILL, TH. SCHAEFFER

VERGLEICH MEHRERER MKS-PROGRAMME IM BEREICH DER FAHRDYNAMIK

ZUSAMMENFASSUNG

In einem Forschungs- und Entwicklungsprojekt [1] wurde am Labor Mehrkörpersimulation der Fakultät Maschinenbau ein reales Modellfahrzeug im Maßstab 1:5 mit den Mehrkörpersimulations-Programmen (MKS-Programmen) *ADAMS*, *RecurDyn*, *veDYNA*, *Dymola* und *Simpack* nachgebildet. Bild 1 zeigt das am Labor für Mehrkörpersimulation vorhandene reale Modellfahrzeug.



Bild 1: Reales Modellfahrzeug im Maßstab 1:5

1 EINLEITUNG UND MOTIVATION

Bei Geländelimosinen, den sogenannten Sport Utility Vehicles (SUVs), nehmen aufgrund des höher liegenden Schwerpunkts Fahrzeugüberschläge immer mehr zu. Deshalb werden aktive und passive Sicherheitssysteme entwickelt, die entweder helfen sollen, die Gefahr von Überschlägen z. B. durch Abbremsen einzelner Räder zu verringern oder zumindest das Verletzungsrisiko durch optimale Ansteuerung der Sicherheitssysteme (z. B. gestaf-

feltes Auslösen der Airbags) zu reduzieren. Hierzu ist es notwendig, charakteristische Fahrzustände im Vorfeld eines Überschlags zu erkennen. Diese lassen sich durch geeignete Messgrößen, z. B. Gierrate oder Querbesehleunigung, anhand von Überschlagsversuchen messtechnisch ermitteln. Allerdings sind solche Versuche sehr kostenintensiv. Deshalb versucht man u. a. durch virtuelle Überschlagsimulationen das Fahrzeugverhalten zu analysieren. Allerdings müssen diese virtuellen Simulationsmodelle zuvor anhand messtechnischer Versuche verifiziert werden. Ein Lösungsansatz um die Aufwände hierbei zu reduzieren ist, die virtuellen Modelle durch Vergleich mit maßstäblichen Modellfahrzeugen zu verifizieren.

Eine entscheidende Rolle hierbei spielt das realistische Abbilden des Reifen-Boden-Kontakts. Hierzu ist es notwendig, durch entsprechende Zusatzroutinen den Funktionsumfang der Standard-Simulations-Programme zu erweitern.

Ziel des Projekts war es, die verwendeten MKS-Programme bezüglich ihrer Ergebnisqualität und Rechengeschwindigkeit anhand unterschiedlicher Fahrversuche vergleichend zu untersuchen. Besonderes Augenmerk lag hier auf der Anbindung des Reifenmodells *TMeasy* [2] an die einzelnen MKS-Programme.

2 ERSTELLUNG EINES GENERISCHEN DATENFILES

Um sicherzustellen, dass in allen MKS-Programmen dieselben Eingangsparameter verwendet werden, wurde zunächst ein generisches Datenfile in *Excel* mit folgenden Informationen erstellt:

- Schwerpunktkoordinaten der Bauteile (x -, y - und z -Koordinate)
- Koordinaten der Gelenkpunkte (x -, y - und z -Koordinate)
- Massen der Bauteile
- Trägheitsmomente der Bauteile (I_{xx} , I_{yy} , I_{zz} , I_{xy} , I_{xz} , I_{yz})
- Feder- und Dämpferkennwerte
- Parameter für das Reifenmodell *TMeasy*

Mit Hilfe eines bereits vorhandenen CAD-Modells des Fahrzeugs [3] wurden sämtliche geometriebezogenen Daten, wie Lage der Schwerpunkte der einzelnen Bauteile oder Lage der Gelenkpunkte, sowie alle Massen und Massenträgheitsmomente für alle relevanten Bauteile ermittelt. Die Steifigkeiten der Vorder- und der Hinterachsfedern wurden experimentell bestimmt, da diese einen wesentlichen Einfluss auf die Fahrdynamik haben. Die Dämpferkennwerte, die

3 TOPOLOGISCHER AUFBAU DES MODELLFAHRZEUGS

Um das reale Modellfahrzeug im jeweiligen Simulationsprogramm als virtuelles Modellfahrzeug abbilden zu können, ist es wichtig, den kinematischen Aufbau des realen Modellfahrzeugs exakt zu erfassen. In Bild 3 ist beispielartig die grundlegende Topologie der Hinterachse des Modellfahrzeugs dargestellt.

Die einzelnen Bauteile (Ellipsen) sind durch Gelenke oder Feder-Dämpfer-Elemente (Rechtecke) miteinander verbunden. Es sind nur die beweglichen Bauteile dargestellt. Alle anderen Bauteile sind an einem der in Bild 3 aufgeführten Bauteile fixiert und müssen somit nicht durch Gelenke oder Feder-Dämpfer-Elemente miteinander verbunden werden. Mithilfe der topologischen Darstellung des realen Modellfahrzeugs wurden die virtuellen Fahrzeuge in den jeweiligen MKS-Programmen aufgebaut.

4 MODELLAUFBAU IN DEN SIMULATIONSPROGRAMMEN

4.1 Modellerstellung und Parametrierung

Bei den sogenannten generischen MKS-Programmen konnte die bereits vorhandene CAD-Geometrie eingelesen werden. Anschließend wurden die Gelenke, Kraftelemente und Kontakte direkt an der importierten CAD-Geometrie angebracht. Zu den generischen MKS-Programmen gehören ADAMS, Simpack und RecurDyn. Diese Programme wurden nicht speziell zur Simulation von Fahrzeugen entwickelt, sondern finden in allen Bereichen des Maschinenbaus Anwendung. Die in diesen Programmen erstellten Simulationsmodelle sind in Bild 4 dargestellt.

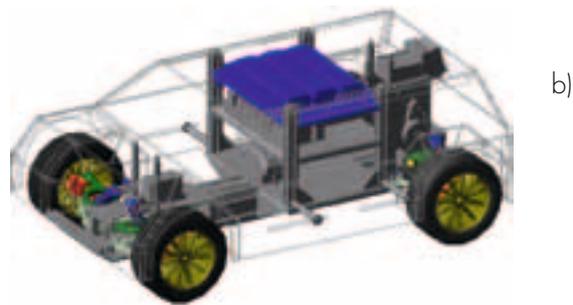


Bild 4: Simulationsmodelle der generischen MKS-Programme: a) ADAMS, b) RecurDyn, c) Simpack

Ein weiteres generisches MKS-Programm stellt die Software Dymola dar. Grundlegender Unterschied zu den bereits aufgeführten Programmen ist jedoch die Modellierungsweise. Dymola ist im Grunde „nur“ eine graphische Bedienoberfläche zur Nutzung des freien, objektorientierten Sprachstandards Modelica. Durch die Bedienoberfläche ist es möglich, graphisch zu programmieren (Bild 5).

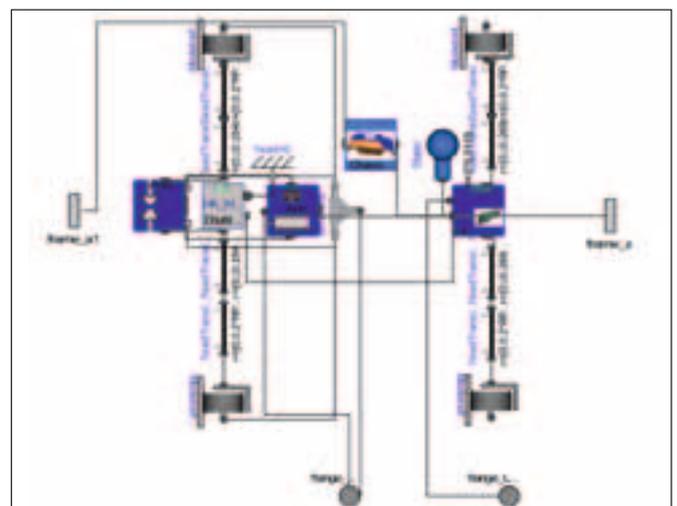


Bild 5: Simulationsmodell des Simulations-Programms Dymola

MASCHINENBAU

100

Das Simulationsprogramm *veDYNA* wurde speziell zur Simulation von Fahrzeugen entwickelt und unterscheidet sich von generischen MKS-Programmen wie *Simpack* oder *ADAMS* dahingehend, dass auf ein bereits vollständiges Fahrzeugmodell zurückgegriffen werden kann, welches mit den Para-

metern des zu simulierenden Fahrzeugs konfiguriert wird. Die einzelnen Kernmodule des Fahrzeugmodells sind dabei als C-Code in *Matlab* S-Functions eingebettet, wobei die Erstellung des Gesamtfahrzeugmodells durch Verknüpfung einzelner Module in *Simulink* programmintern erfolgt (Bild 6).

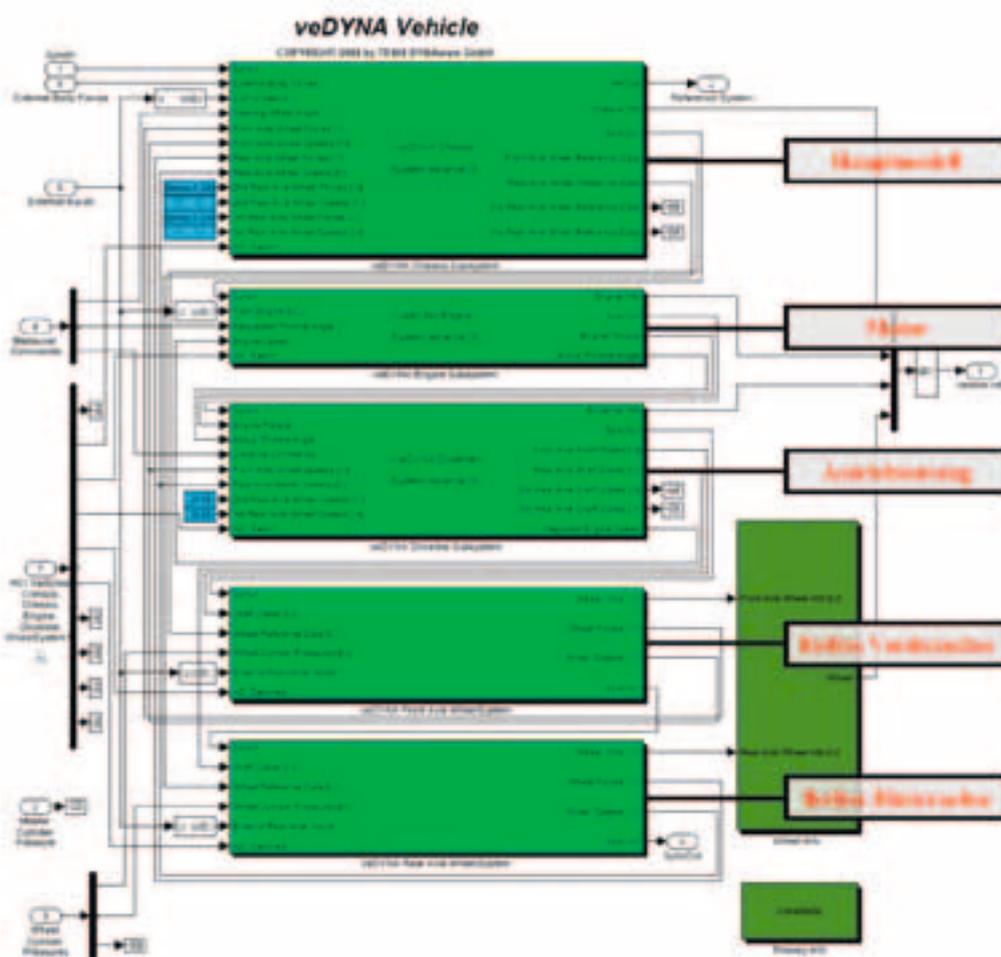


Bild 6: Simulationsmodell des Fahrzeugsimulations-Programms *veDYNA*

In allen MKS-Programmen wurde bei der Modellerstellung auf volle Parametrierbarkeit geachtet. Als Grundlage hierfür dient das bereits erwähnte generische Datenfile, mit welchem alle erstellten Parameterfelder im jeweiligen MKS-Programm mit entsprechenden Werten belegt werden können. Beispielartig für die volle Parametrierbarkeit des Modells sind in Bild 7 der variable Radstand und der variable Schwerpunkt durch Anhebung der Akkuplatte des Modellfahrzeugs dargestellt.

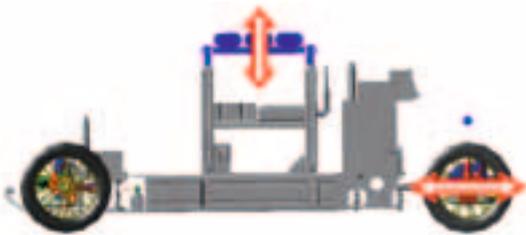


Bild 7: Variierbarer Radstand und Schwerpunkt

4.2 Implementierung des Reifenmodells *TMeasy*

TMeasy stellt ein halbempirisches Reifenmodell dar, welches von Prof. Dr.-Ing. Georg Rill an der Hochschule Regensburg entwickelt wurde. Die Vorteile des Modells liegen in kurzen Rechenzeiten. Vor allem für den standardisierten Anwendungsfall sind die erzielten Ergebnisse durchaus realitätsnah. Im Programm *veDYNA* wird standardmäßig das Reifenmodell *TMeasy* verwendet. In den Programmen *ADAMS* und *Simpack* wurde die aktuelle Version von *TMeasy* erfolgreich mit Hilfe von extern aufrufbaren Berechnungsroutinen implementiert. In *Dymola* ist standardmäßig das Reifenmodell *RillTyre* verfügbar, welches mit *TMeasy* vergleichbar ist. Da der Vergleich von *RillTyre* mit dem offiziellen *TMeasy* durchaus interessant ist, wurde auf das Einbinden eines externen Modells verzichtet.

Im Programm *RecurDyn* war es im Rahmen dieses Projektes nicht möglich, *TMeasy* erfolgreich zu implementieren. Zur erfolgreichen Anbindung von *TMeasy* an *RecurDyn* wäre die allgemein gebräuchliche Schnittstelle für Reifenmodelle *Standard Tire Interface (STI)* notwendig, welche jedoch bis dato in *RecurDyn V7R4* nicht frei zugänglich war. Um dennoch Simulationen durchführen zu können, wurde der Reifenkontakt durch eine einfache Starrkörper-Kontaktmodellierung realisiert. Da durch eine solche Kontaktmodellierung allerdings nur die vertikalen Eigenschaften des Reifens abgebildet werden können, konnten keine dynamischen Fahrmanöver simuliert werden.

5 BENCHMARK

5.1 Untersuchung des Modellaufbaus

Um einen Benchmark zwischen den unterschiedlichen MKS-Programmen durchführen zu können, wurde zunächst ein Einschwingversuch durchgeführt. Hierbei wird die statische Ruhelage der Modelle ermittelt, die anschließend verglichen werden kann.

VERSUCHSBESCHREIBUNG ZUM EINSCHWINGVERSUCH

In der Ausgangssituation für den Einschwingversuch befindet sich das Fahrzeug 0,15 m über der Fahrbahn. Dieser Abstand beschreibt die z-Position des körperfesten Koordinatensystems, das in der Mitte der Vorderachse sitzt, wie in Bild 8 zu sehen ist.

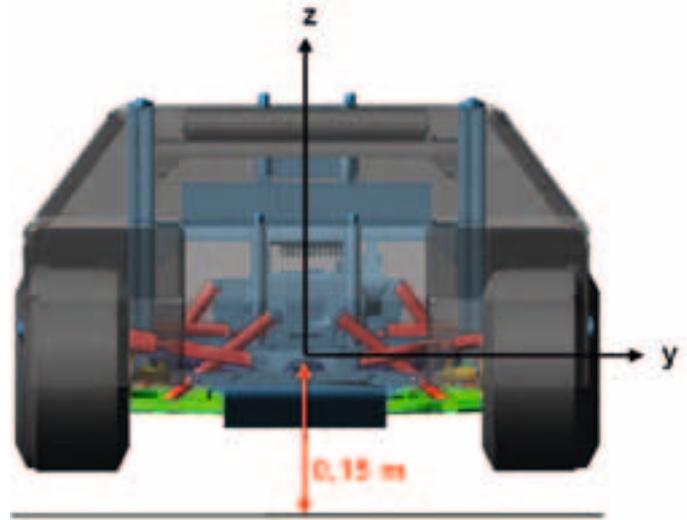


Bild 8: Fahrzeugausgangslage beim Einschwingversuch

Aus dieser Position wird das Fahrzeug fallen gelassen, so dass die Reifen kurz darauf Kontakt mit der Fahrbahn herstellen. Aufgrund der Feder-Dämpfer-Elemente, die in dem Modell verbaut sind, beschreibt das Modellfahrzeug nun eine abklingende Schwingung, bevor es den Ruhezustand erreicht. Für den Benchmark wurden während des Versuches unter anderem die z-Positionen der Schwerpunkte der beiden Hinterreifen über der Fahrbahn gemessen und verglichen.

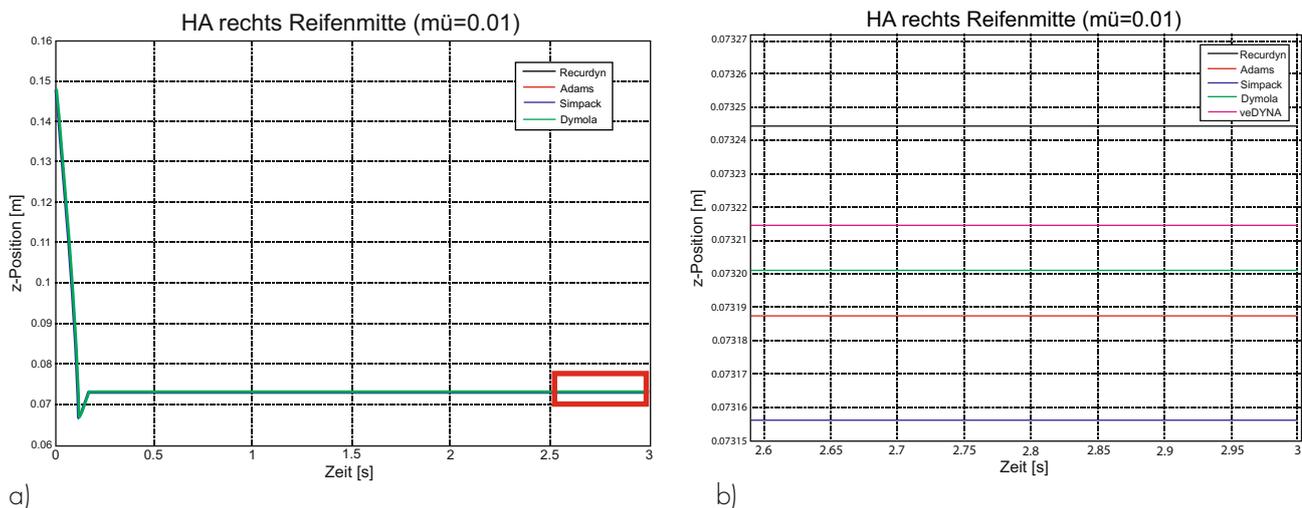


Bild 9: Simulationsergebnisse des Einschwingversuchs: a) Gesamtverlauf b) Vergrößerung des markierten Bereichs

VERSUCHSERGEBNISSE DES EINSCHWINGVERSUCHS

In Bild 9 ist beispielartig der Verlauf der z-Position des rechten Hinterreifens über den gesamten Versuchszeitraum zu sehen. Wie in Bild 9a) zu sehen ist, weisen alle dargestellten MKS-Programme den gleichen Verlauf auf. Dies ist ein Indiz dafür, dass der Modellaufbau aller Programme nahezu identisch ist. Da diese Darstellung allerdings viel zu grob ist, um Aussagen darüber zu treffen, wie deckungsgleich die statische Ruhelage der einzelnen Programme ist, wird der dort markierte Bereich in Bild 9b) vergrößert dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die statische Ruhelage der einzelnen Modelle bis auf eine maximale Abweichung von ca. 0,00009 m identisch ist. In Anbetracht der programmspezifischen Modellierungsunterschiede stellt dies ein sehr gutes Ergebnis dar.

VERSUCHSBESCHREIBUNG ZUM HYDROPULSVERSUCH

Eine tragende Säule für die fahrdynamischen Eigenschaften eines Fahrzeuges ist die Kinematik der Radaufhängung, welche die räumliche Bewegung des Rades bei Federungs- und Lenkbewegungen bestimmt. Daraus ergeben sich dann beispielsweise Spurwinkel oder Sturzwinkel in Abhängigkeit von Radhub und Lenkeinschlag.

Für den Vergleich der MKS-Modelle bezüglich ihrer Kinematik, wurde in diesem Projekt der Hydropulsversuch ausgewählt. Dabei wurde ein eigener Prüfstand definiert, der zu möglichst allen MKS-Programmen kompatibel ist. Bild 10 zeigt den Prüfstand bei dem der Radhub variiert, indem das Chassis translatorisch in z-Richtung bewegt wird und die verbleibenden Freiheitsgrade gesperrt werden.

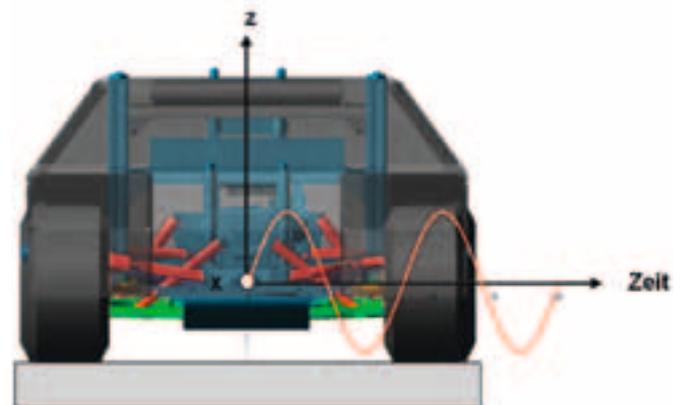


Bild 10: Versuchsaufbau Hydropulsversuch

Die z-Koordinate ist durch die Sinusfunktion $z = \hat{z} \cdot \sin(\omega t) + r_{stat}$ mit der Amplitude \hat{z} beschrieben, wobei die Frequenz ω konstant ist. Zu Beginn der Simulation ist die z-Koordinate gleich dem statischen Reifenradius r_{stat} und der Reifen in Kontakt mit der Straße, so dass sich das Fahrzeug in der Konstruktionslage befindet. Die Räder besitzen keine zusätzlichen Einschränkungen bezüglich ihrer Freiheitsgrade.

In Bild 11 sind die untersuchten Messgrößen des Hydropulsversuchs dargestellt.

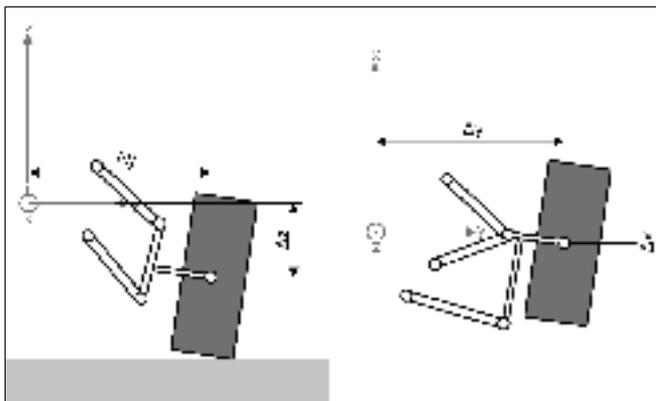


Bild 11: Messgrößen des Hydropulsversuchs:
a) Vorderansicht, b) Draufsicht

Bild 11 a) zeigt die Vorderansicht (yz-Ebene) des Fahrzeuges. Gemessen werden hier die Längenänderung Δy , die der halben Spurweite des Modellfahrzeuges entspricht, und der Radhub Δz . Beide Größen werden an der Vorderachse und an der Hinterachse ausgewertet. An der Vorderachse wird außerdem in der xy-Ebene (Draufsicht) die aufgrund des veränderlichen Hubs sich ergebende Spuränderung durch die Abweichung Δx des Radmittelpunktes vom fahrzeugfesten Koordinatensystem gemessen (Bild 11 b).

VERSUCHSERGEBNISSE DES HYDROPULSVERSUCHS

Bild 12a) zeigt beispielartig die Simulationsergebnisse der Vorderachse in yz-Ebene. Es ist nur ein Graph sichtbar, da alle anderen deckungsgleich sind. Hierbei fällt auf, dass der Graphenverlauf von veDYNA eine geringere Hubbewegung ausführt. Dies liegt daran, dass es mit dieser Software nicht möglich ist, das Chassis in z-Richtung zwangs

zu führen. Diese Koordinate wird aus dem Reifen-Fahrbahn-Kontakt unter Berücksichtigung der Elastizitäten in Reifen und Federn berechnet. Deshalb wurde hier die z-Koordinate der Straße vorgegeben, was aber aufgrund der dämpfenden Anteile in Fahrwerk und Reifen nicht zur selben Hubbewegung führt. Trotzdem ist deutlich erkennbar, dass Lage und Krümmung der Kurve identisch sind. In Bild 12b) ist schließlich Δx über Δy zu sehen. Alle Graphen liegen hier wieder übereinander. Aufgrund der beschriebenen Unterschiede in der Vorgabe der z-Bewegung in veDYNA ist der y-Bereich des Diagrammes größer.

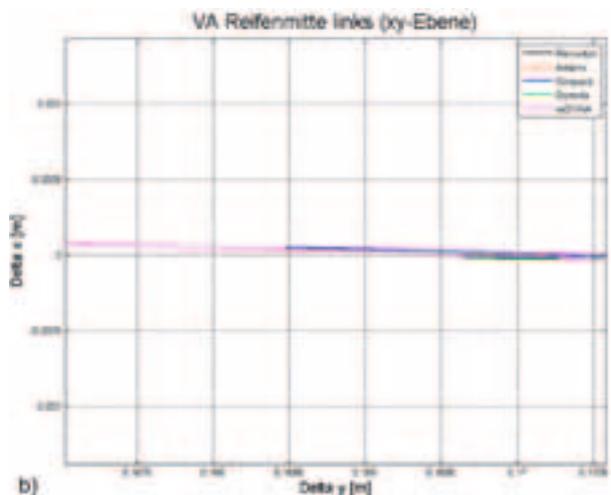
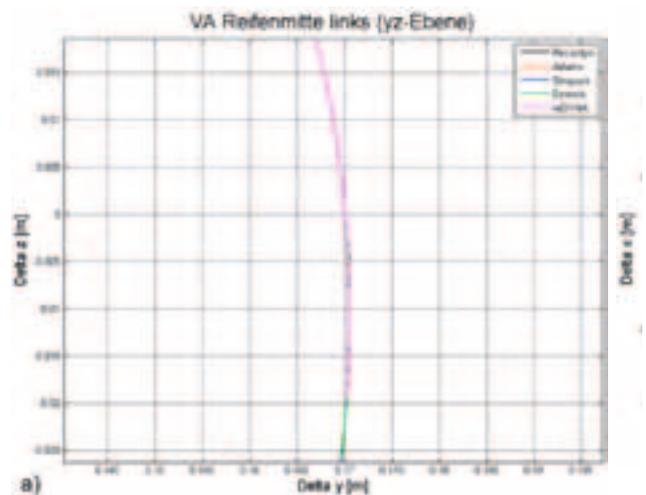


Bild 12: Simulationsergebnisse des Hydropulsversuchs:
a) yz-Ebene, b) xy-Ebene

Die Ergebnisse aus den Hydropulsversuchen belegen, dass die Kinematik der Achsaufhängung bei den einzelnen MKS-Modellen identisch ist. Die Verläufe zeigen ein Verhalten welches für Doppelquerlenkerachsen typisch und deshalb auch plausibel ist.

5.2 Dynamische Simulation

Zur Bewertung der dynamischen Eigenschaften des Modellfahrzeugs wurde das Fahrmanöver „Lenkwinkelsprung“ simuliert. Bei diesen Fahrmanövern bewegt sich das Fahrzeug zunächst mit konstanter Geschwindigkeit auf einer Geradeausfahrt. Ausgehend davon steuert das Fahrzeug in eine Kurve mit bestimmtem Radius. Ursache für diese Kurvenfahrt ist ein definierter und konstanter Lenkwinkelschlag. Der Lenkwinkel und die Translationsgeschwindigkeit dienen als

Eingangsgrößen der Fahrmanöver. Die Werte wurden vor dem Start der Simulation im jeweiligen MKS-Programm eingegeben. Die Querbearschleunigung und die Gierrate, die Drehgeschwindigkeit um die Hochachse, werden als Messgrößen aufgetragen. Für einen Benchmark der eingesetzten MKS-Programme wurden diese Daten aus den Simulationsprogrammen exportiert und miteinander verglichen.

ERMITTLUNG DER MAXIMAL MÖGLICHEN QUERBESCHLEUNIGUNG

Zunächst wurde in einem Vorversuch die maximal mögliche Querbearschleunigung des Modellfahrzeugs bestimmt (Bild 13). Hierfür bewegt sich das Fahrzeug zunächst auf einer Geradeausfahrt mit konstanter Geschwindigkeit (1).

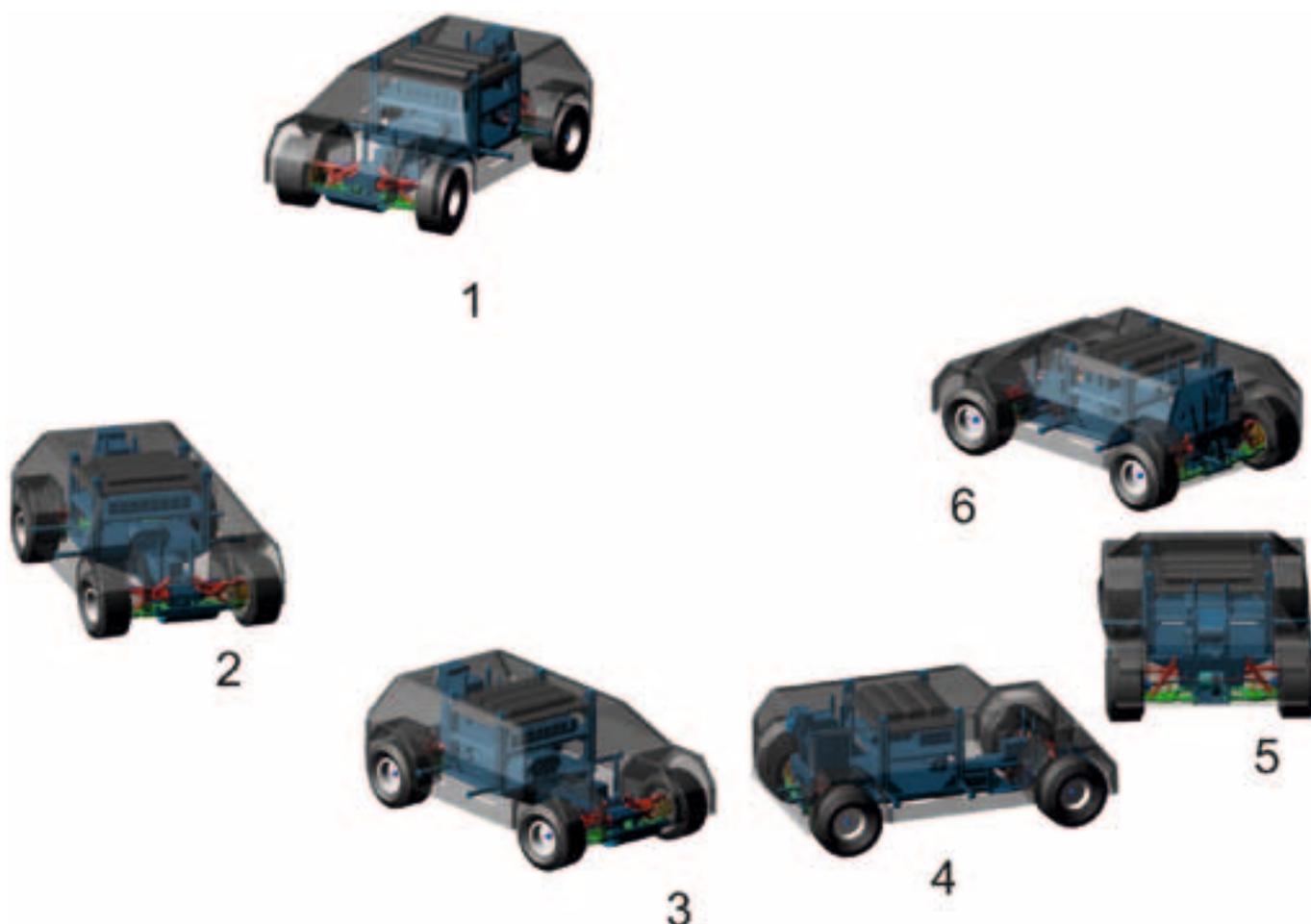


Bild 13: Ausbrechen des Modellfahrzeugs

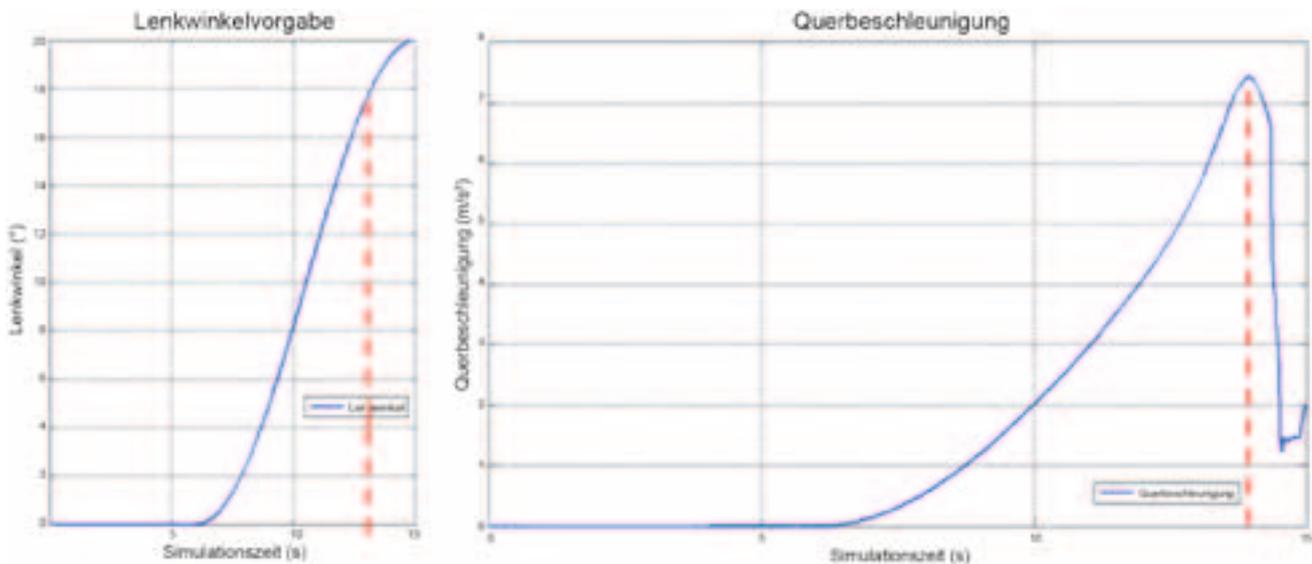


Bild 14: Ermittlung der maximalen Querbeschleunigung

Anschließend steuert das Fahrzeug in eine Kurve (2), (3) und (4). Durch einen kontinuierlich zunehmenden Lenkeinschlag von 0° bis 20° verringert sich der Kurvenradius. Dies verursacht bei einer konstanten Raddrehzahl von 60 rad/s eine bis zum Ausbrechen des Fahrzeugs ansteigende Querbeschleunigung. Das Fahrzeug übersteuert und bricht aus (5) und (6).

Die Verläufe des Lenkwinkels und der Querbeschleunigung bei der Ermittlung der maximal möglichen Querbeschleunigung sind in Bild 14 dargestellt.

Die maximal mögliche Querbeschleunigung liegt bei $7,4 \text{ m/s}^2$. Bei der gegebenen Raddrehzahl stellt sich diese bei einem Lenkwinkel von ca. $16,5^\circ$ ein.

Ausgehend von dem so ermittelten Maximalwert wurde die Dynamik des Fahrzeugs im Bereich niedriger, mittlerer und hoher Querbeschleunigung untersucht. Dabei wurde der Bereich niedriger Querbeschleunigung mit einem Lenkwinkelsprung von 9° , der Bereich mittlerer Querbeschleunigung mit einem Lenkwinkelsprung von $12,5^\circ$ und der Bereich hoher Querbeschleunigung mit einem Lenkwinkelsprung von 15° untersucht.

LENKWINKELSPRUNG IM BEREICH NIEDRIGER QUERBESCHLEUNIGUNG

Im Folgenden wird stellvertretend für alle durchgeführten Versuchsfahrten der Lenkwinkelsprung bei niedriger Querbeschleunigung erläutert. Der Lenkwinkelsprung von 9° wurde dabei mittels einer Step-Funktion $3. \text{ Grades}$ innerhalb von $0,8 \text{ s}$ bei einer konstanten Raddrehzahl von 60 rad/s vollzogen.

Als Ergebnisgrößen werden die Querbeschleunigung und die Gierrate betrachtet. Diese beiden Kenngrößen geben maßgebliche Informationen über das dynamische Verhalten des Fahrzeugs in Kurvenfahrten. Die Ergebnisse der Gierrate und der Querbeschleunigung sind in Bild 15 dargestellt. Sowohl bei der anfänglichen Geradeausfahrt als auch beim Erreichen der stationären Kurvenfahrt sind beide Werte konstant.

Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Ergebnisse der einzelnen MKS-Programme begründen sich aus dem jeweils eingesetzten Reifenmodell. In *Simpack* und *ADAMS* werden identische Versionen des Modells *TMeasy* verwendet. Der Verlauf der Gierrate und der Querbeschleunigung sind daher nahezu deckungsgleich. In *Dymola* und *veDYNA* sind modifizierte Versionen von *TMeasy* implementiert. Daher erklären sich die Abweichungen bei der Gierrate und der

Prof. Dr.-Ing. Georg Rill
 Tel.: 0941 943-5191
 Fax: 0941 943-1428
georg.rill@hs-regensburg.de

Prof. Dr.-Ing. Thomas Schaeffer
 Tel.: 0941 943-5179
 Fax: 0941 943-1428
thomas.schaeffer@hs-regensburg.de

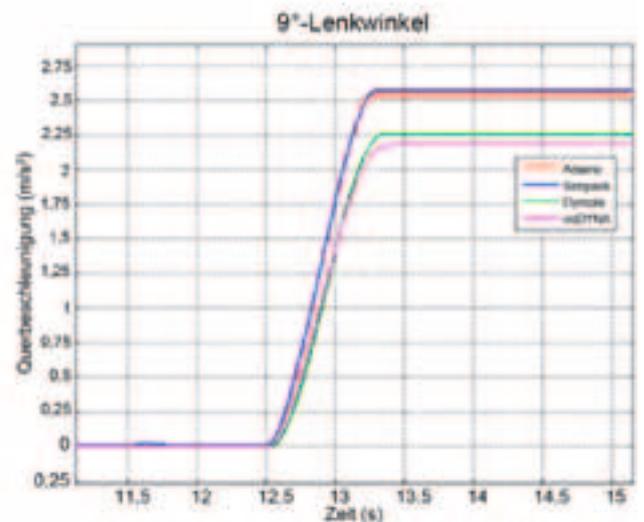
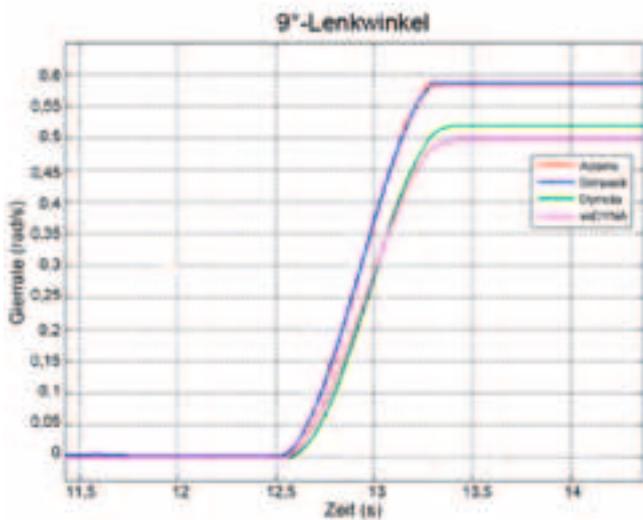


Bild 15: Gierrate und Querbeschleunigung bei 9° Lenkwinkleinschlag

Querbeschleunigung. In *RecurDyn* konnte das dynamische Fahrmanöver „Lenkwinkelsprung“ aufgrund des bisher nicht implementierbaren Reifenmodells *TMeasy* nicht durchgeführt werden.

6 FAZIT

Erstmals wurde in fünf verschiedenen Simulationsprogrammen ein parametrisches Fahrzeugmodell aufgebaut, dessen beschreibende Daten in einem einzigen generischen Datenfile enthalten sind. Bis auf eine Ausnahme konnte das Reifen-Modell *TMeasy* als Zusatzmodul angebunden werden. Der Vergleich der Simulationsergebnisse zeigt, dass in allen Programmsystemen trotz teilweise anderer Modellierungen und Rechenmethoden hinreichend gleiche Ergebnisse erzielt werden können.

7 AUSBLICK

In einem weiteren Forschungs- und Entwicklungsprojekt an der Hochschule Regensburg wird das vorhandene, reale Modellfahrzeug mit Messtechnik ausgestattet. Die bisher in den verschiedenen MKS-Programmen durchgeführten virtuellen Versuchsfahrten können dann mit dem realen Modellfahrzeug nachgefahren werden. Somit können die Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen der realen Fahrversuche verglichen und auf Plausibilität überprüft werden.

8 SCHRIFTTUM

- [1] T. Bischoff; C. Galster; C. Hobmeier; M. Paule; M. Schiedermeier; A. Zwickel: *Fahrdynamik in der Simulation*. FuE-Bericht Hochschule Regensburg, Fakultät Maschinenbau, Labor Mehrkörpersimulation, Regensburg, 2010
- [2] W. Hirschberg; G. Rill; H. Weinfurter: *Tyre Model TMeasy*. CCG Seminar TV 4.08 *Tyre Models in Vehicle Dynamics: Theory and Application*, Wien, 16.-17. Sept. 2008
- [3] F. Nebl: *Aufbau eines Modellautos zur Verifizierung von Überschlagssimulationen*. Studienarbeit Hochschule Regensburg, Fakultät Maschinenbau, Labor Mehrkörpersimulation, Regensburg, 2009

ENTWICKLUNG EINES ASSISTENZROBOTERS FÜR EINE ANLAGE ZUR KULTIVIERUNG MENSCHLICHER ZELLEN IN INDUSTRIELLEM MASSSTAB

EINLEITUNG

Moderne Produktionsverfahren erfordern immer mehr eine enge Zusammenarbeit von Mensch und Roboter. Die Fusionierung beider Arbeitsräume in der industriellen Produktion wird intensiv erforscht, siehe beispielsweise [1], [3] und [4]. Der im hier berichteten Projekt relevante Einsatzbereich für einen mit dem Menschen kollaborierenden Roboter ist die patientenspezifische Kultivierung menschlicher Zellen in einer hoch automatisierten Anlage. Einzelne Handhabungsschritte bei der Kultivierung von Zellen sind an einem teilautomatisierten Arbeitsplatz durch einen Laboranten durchzuführen, deren Ausführung durch den zu entwickelnden Assistenzroboter unterstützt wird. Dieser Kurzbeitrag umreißt aktuell laufende Entwicklungsarbeiten zur Realisierung des Assistenzroboters.

PROJEKTUMFELD UND -ZIELE

Die Entwicklung des Assistenzroboters wird im Labor Materialflusstechnik und Robotik der Hochschule Regensburg als Teilprojekt des internationalen Forschungsvorhabens „Manu-Cyte“, siehe [2], durchgeführt. Entwicklung und Aufbau der gesamten Anlage erfolgen durch ein internationales Konsortium europäischer Forschungsinstitute und Unternehmen mit großzügiger Förderung durch das 7. Rahmenprogramm der Europäischen Union unter Leitung des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart. Mit der zu entwickelnden Anlage werden patientenspezifische Zellkulturen gepflegt, auf deren Basis auf individuelle Patienten optimierte Zelltherapien und Pharmazeutika entwickelt werden können. Derzeit liegt der Fokus auf Herz- und Leberzellen. Ein im Rahmen des Forschungsvorhabens aufzubauender Demonstrator wird die unabhängige Pflege von bis zu 300 Zellkulturen erlauben. Die zu realisierende Anlage wird modernste Produktionsverfahren integrieren. Zu diesen zählt auch die enge Kollaboration von Robotern und Bediener in einem gemeinsamen Arbeitsraum bei der Ausführung von unter Umständen komplexen Handhabungsaufgaben. Bei der Kultivierung von Zellen sind strenge hygienische Standards zu berücksichtigen, um eine Kontamination von Zellkulturen mit unerwünschten Keimen und auch die Kreuzkontamination verschiedener Zellkulturen untereinander in jedem Fall zu vermeiden. Ein gemeinsamer Arbeitsplatz von Roboter und Bediener, in dem Zellkulturen in Zuchtbehälter eingebracht, versorgt und auch extrahiert werden, wird daher als Reinraum ausgeführt. Bild 1 zeigt das Konzept des zu entwickelnden roboterunterstützten Arbeitsplatzes. Ein

Laborant arbeitet an der Vorderseite (im Bild links). Der Roboter unterstützt von der Rückseite her. Eine Laminar Flowbox sorgt im gemeinsamen Arbeitsraum für eine Luftströmung, die unerwünschte Partikel aus dem Arbeitsraum entfernt. Der Assistenzroboter muss den Anforderungen, die aus den zu realisierenden Handhabungsfähigkeiten, den geforderten Reinraumbedingungen und strikten Sicherheitsvorschriften für die Mensch-Roboter-Kollaboration resultieren, genügen.

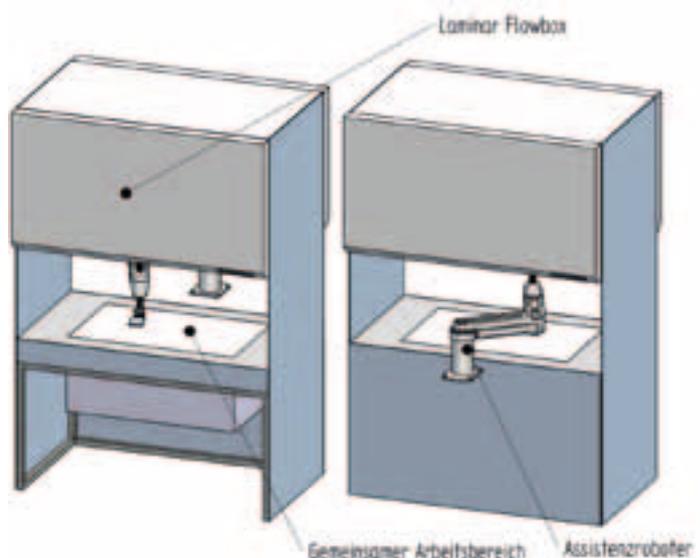


Abb. 1: Arbeitsplatz mit Assistenzroboter in Vorderansicht (links) und Rückansicht (rechts)

ENTWICKLUNGSZIELE FÜR DEN ASSISTENZROBOTER

Der mechanische Aufbau des Robotersystems wird speziell für den Anwendungsfall der Interaktion mit einem menschlichen Bediener in einer Reinraumumgebung bei sich wiederholenden, eintönigen oder gefährlichen Aufgaben optimiert. Es werden verschiedene Handhabungsaufgaben betrachtet, bei denen eine hohe Wiederholgenauigkeit wesentlich für die Qualität der Zellkulturen ist. Beispiele hierfür sind das Pipettieren und Durchmengen von Flüssigkeiten, die Anlieferung benötigter Materialien zum Laboranten oder die Wiederholung von vom Laboranten vorgemachten Tätigkeiten, wie etwa das Schneiden von Gewebe. Um diese Aufgaben bewerkstelligen zu können, wird eine neue kinematische Struktur mit fünf Achsen entwickelt, die auf den gemeinsamen Arbeitsraum von Roboter und Bediener hin optimiert ist, siehe Bild 2.

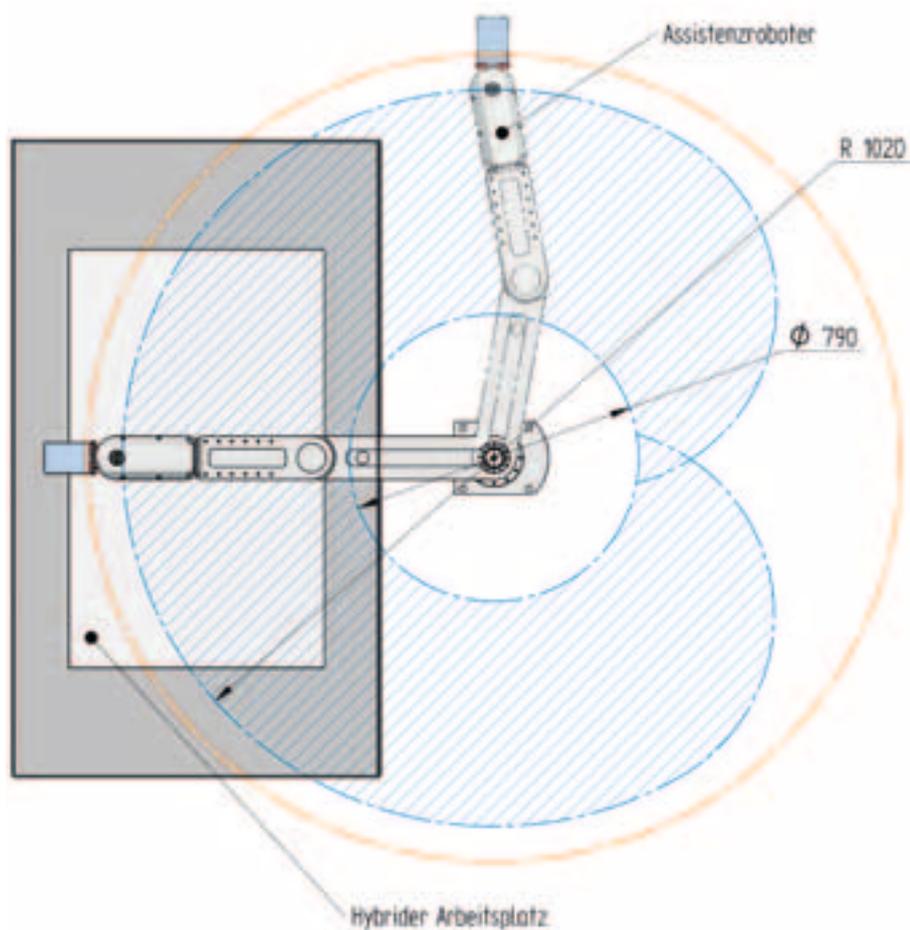


Abb. 2: Draufsicht auf den Arbeitsraum des Roboters und den mit dem Bediener gemeinsamen Arbeitsraum

Aufgrund der geforderten Reinraumbedingungen ist der Roboter zudem konstruktiv so ausgelegt, dass er minimale Partikelemission aufweist und in einer Umgebung mit laminarer Luftströmung geringstmögliche Turbulenzen hervorruft. Damit der Roboter gefahrlos mit einem Menschen zusammenarbeiten kann, werden verschiedene Konzepte zur Integration von Ultraschall- und optischen Sensoren in der Steuerung des Roboters integriert. Diese ermöglichen die dynamische Erkennung von Hindernissen und menschlichen Extremitäten im gemeinsamen Arbeitsbereich von Roboter und Mensch. Bild 3 zeigt beispielhaft die vorderen Achsen des Assistenzroboters mit Ultraschallsensoren und deren Schallkegel. Zur Vereinfachung ist nur ein Teil der verbauten Ultraschallsensoren auf einer Seite der Roboterglieder dargestellt.

Eine Auswertung der durch die Distanzsensoren gelieferten Abstände zwischen Roboter und Hindernis gestattet es, das Bewegungsverhalten des Roboters selbsttätig an verschiedene Situationen anzupassen. Bei Erkennung von Hindernissen



Abb. 3: Ansicht der für die Interaktion mit dem Menschen kritischen Roboterbauteile mit Ultraschallsensoren auf einer Seite

oder menschlichen Extremitäten wird die Bewegung zunächst verlangsamt und, falls nötig, komplett gestoppt. Bei weiterer Annäherung eines bewegten Hindernisses, etwa den Händen eines Bedieners, beginnt der Roboter mit einer Ausweichbewegung, um unerwünschten Kontakt zu vermeiden.

Verschiedene Sensorkonzepte, wie der Einsatz von Ultraschallsensoren oder optischen Sensoren zur dynamischen Erkennung von Hindernissen und menschlichen Extremitäten im gemeinsamen Arbeitsbereich von Roboter und Mensch werden anhand eines SCARA-Knickarm-Roboters (Selective Compliance Assembly Robot Arm) entwickelt. Dieser wurde in den letzten zwei Jahren im Labor Materialflusstechnik und Robotik in Abschluss- und Projektarbeiten konzipiert und aufgebaut. Er dient als Experimentalplattform für neue Algorithmen zur Mensch-Maschine-Interaktion.

Der entstehende Assistenzroboter stellt eine Weiterentwicklung dieses SCARA-Roboters dar. Hochpräzise, spielarme Getriebe dienen zur Aktuierung von drei der fünf Roboterachsen und gewährleisten ein hohes Maß an Präzision und Wiederholgenauigkeit.

Bild 4 zeigt den bestehenden Testträger, der sich aufgrund der ähnlichen kinematischen Struktur sehr gut zur Erprobung von Konzepten für den Assistenzroboter eignet und es erlaubt, die gewonnenen Erkenntnisse nahtlos auf das neue System zu übertragen.

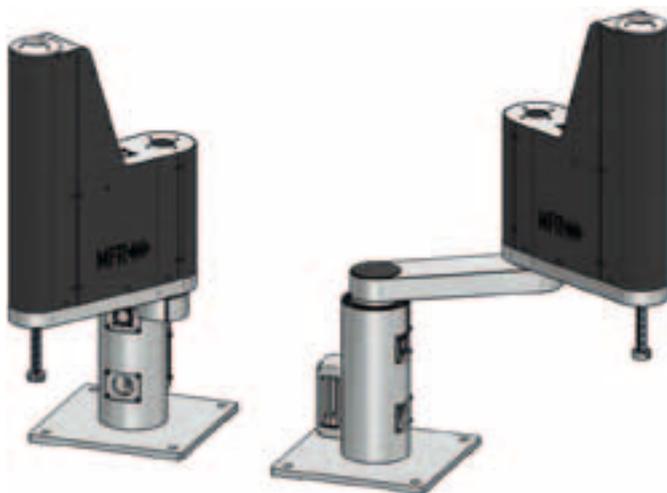


Abb. 4: Im Labor für Materialflusstechnik und Robotik der Hochschule Regensburg entwickelter Testträger für Technologien im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion

Die Steuerungsarchitektur für den Assistenzroboter fußt auf der bestehenden und erprobten Steuerung des SCARA-Roboters, die ebenfalls im Labor in studentischer Eigenleistung aufgebaut wurde. Sie beinhaltet Algorithmen zur Bahnplanung und Bahnregelung des Roboters in kartesischen Koordinaten oder in Gelenkwinkeln sowie Funktionen zur elektrischen und funktionellen Diagnose des Systems. Der Einsatz eines sechssachsigen Kraftsensors in Verbindung mit einer Kraft-/Momentenregelung erlaubt es dem Bediener zudem, den Roboter durch Handführen zu programmieren. Die direkte textuelle Programmierung verschiedener vom Roboter anzufahrender Punkte durch Eingaben an einem Bedienpanel wird durch diese haptische Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine erweitert und vereinfacht. Die im Labor Materialflusstechnik und Robotik entwickelte graphische Benutzerschnittstelle ist in Bild 5 dargestellt.

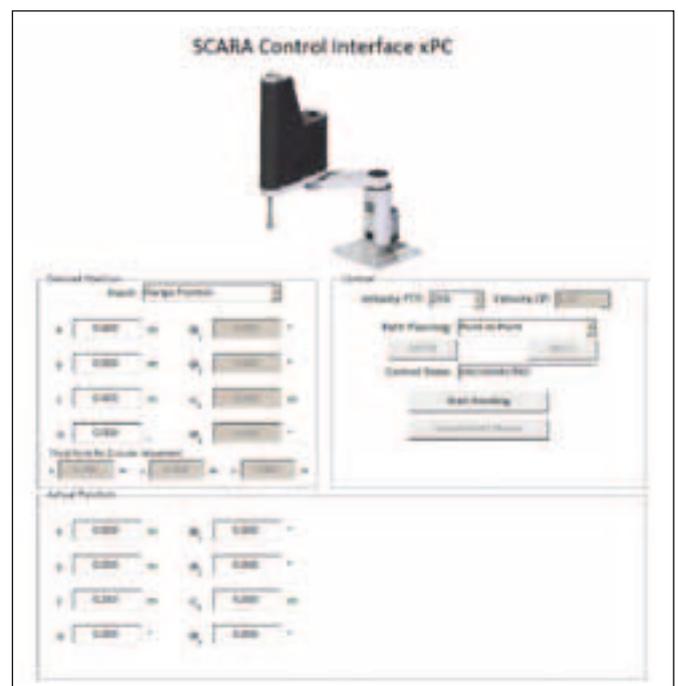


Abb. 5: Graphische Benutzerschnittstelle für im Labor Materialflusstechnik und Robotik entwickelte Robotersysteme

Die Entwicklung der gesamten Steuerungsarchitektur des Assistenzroboters, beginnend bei Erfassung und Fusion von Sensordaten, bis hin zur Aktorregelung, wird modellbasiert mit einer durchgehenden Kette von Rechnerwerkzeugen durchgeführt.

Prof. Dr.-Ing. Thomas Schlegl
 Tel.: 0941 943-5180
 Fax: 0941 943-1428
thomas.schlegl@hs-regensburg.de

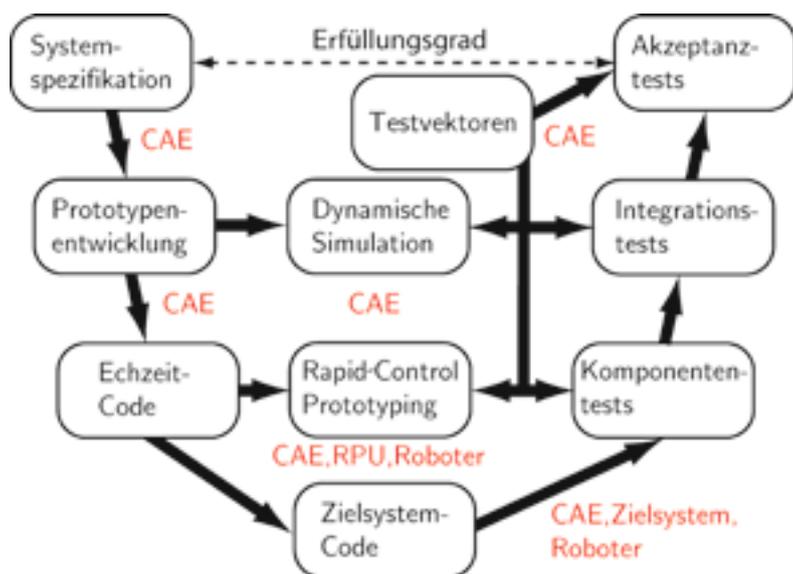


Abb.6: Entwicklungsprozess für die Steuerung des Assistenzroboters nach V-Zyklus

Sie erfolgt nach einem V-Zyklus Entwicklungsprozess gemäß Bild 6 mit der Computer Aided Engineering-Software (CAE) MATLAB/Simulink/Stateflow und weiteren Toolboxes. Die Architektur der Steuerung ist modular aufgebaut. Erste Prototypen von Modulen der Steuerung werden mit Hilfe von dynamischen Simulationen gegen ein elektromechanisches Modell des Roboters auf Ihre Funktionstüchtigkeit hin evaluiert. Nachdem diese erfolgreich nachgewiesen werden konnte, werden einzelne Module bis hin zur kompletten Steuerungsarchitektur durch einen Code-Generator in für ein Echtzeitsystem optimierten C-Code übersetzt und auf eine Zielhardware übertragen. Hierbei kann es sich um ein Rapid Control Prototyping-System (RPU) oder ein PC-basiertes Echtzeitsystem handeln. Diese Vorgehensweise erlaubt es, eine in Rechnersimulationen getestete Robotersteuerung in ein Echtzeitsystem zu überführen, ohne durch erneute manuelle Kodierung Fehler einzuführen. Durch Experimente mit dem realen Roboter können einzelne Steuerungsmodul und ihre Integration in die Gesamtarchitektur getestet werden. Sensorik und Steuerung des Roboters sind redundant ausgelegt, um Sicherheitsanforderungen aus [5] zu erfüllen und Gefahren für den kollaborierenden Bediener auszuschließen.

AUSBLICK AUF WEITERE ARBEITEN

Bedienersicherheit wird durch Redundanz von Sensoren und Steuerung sichergestellt. Aus diesem Grund werden derzeit verschiedene weitere Sensorkonzepte, wie etwa optische Entfernungssensoren sowie ein Mehrkamerasystem zur redundanten Überwachung des Arbeitsbereichs, in das Robotersystem integ-

riert. Durch die Diversität verschiedener Sensor- und Auswerteprozessen kann eine hohe Zuverlässigkeit in der Hinderniserkennung erreicht werden. Weitere Optimierungsschritte in der konstruktiven Ausführung des Manipulators sowie die Anpassung der Regelungs- und Steuerungsarchitektur stellen die nächsten Meilensteine im Entwicklungsprozess des Assistenzroboters dar. Durch die in diesem Teilprojekt gewonnenen Erkenntnisse kann dazu beitragen werden, die Arbeitsbereiche von Mensch und Maschine auf eine sichere Art und Weise zu verschmelzen. Zusammen mit den Projektpartnern im Forschungsvorhaben „ManuCyte“ kann durch die Entwicklung der Gesamtanlage mit dem Assistenzroboter als wichtigem Teilsystem ein wichtiger Beitrag zur Kultivierung patientenspezifischer Zellen geleistet werden.

LITERATUR

- [1] Kuka GmbH: Sichere Mensch-Roboter Kooperation. 33. Sitzung des VDI/VDEGMA- Fachausschuss Steuerung und Regelung von Robotern, Seite 15, 2003.
- [2] <http://www.manucyte-project.eu>
- [3] Heiligensetzer, Dr.-Ing. Peter: Aktuelle Entwicklungen bei Industrierobotern im Bereich der Mensch-Roboter Kooperation. Tag der Arbeitssicherheit (Fellbach), Seite 35, 2009
- [4] Konold, Prof. Peter: Hand in Hand mit der Maschine. A&D - Fachmagazin für industrielle Automation, Seite 35, 2009.
- [5] DIN EN ISO 10928-1:2009-07 Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen

Reinklicken und Ihre Kommune mobil erleben www.total-lokal.de



The screenshot displays the totallokal website interface on a tablet. The top navigation bar includes the totallokal logo, search bars for 'Was interessiert Sie hier?' and 'Wo (Kommune, Stadt, Landkreis oder Postleitzahl)?', and a 'SUCHEN' button. Below the navigation is a large banner image of a town square. The main content area is divided into several sections: 'Kommunale Veranstaltungen' with a calendar for March 2011, 'Regionale Seite' featuring a map of Germany and a list of regions, and 'Kommunale Stellen nach Datum' with a list of job openings. A sidebar on the right contains a search bar, a 'WILLKOMMEN' message, and a list of regional news items.

MASCHINENBAU

M. BECKE, TH. SCHLEGL

ENTWICKLUNG EXPERIMENTELLER METHODEN ZUR EVALUIERUNG DES BIOMECHANISCHEN GELENKVERHALTENS UNTER HOCH VARIABLEN BELASTUNGSSITUATIONEN

1 ABSTRAKT

Die Ziele der hier vorgestellten Arbeit sind die Entwicklung von experimentellen Methoden zur Evaluierung des Verhaltens biologischer Präparate unter definierten Belastungs- und Bewegungssituationen sowie die Entwicklung und Inbetriebnahme von Robotersystemen mit Kraft-Momenten-Regelung zur gezielten Einprägung dieser kombinierten Kraft-Bewegungs-Trajektorien. Dazu werden integrierte Methoden entwickelt, um gezielte Experimente für Testserien durchführen zu können. Im konkreten Fall wurde im Labor Materialflusstechnik und Robotik der Fakultät Maschinenbau der Hochschule Regensburg ein industrieller Hochlastroboter mit sechs Bewegungsfreiheitsgraden und Kraft-Momenten-Regelung erfolgreich ertüchtigt, sowohl das Bewegungsverhalten menschlicher oder tierischer Gelenkpräparate selbstständig zu untersuchen als auch diese mit physiologisch korrekten Belastungen zu beaufschlagen. Diese Methode ermöglicht es, durch synchrone Einprägung von Kraft- und Bewegungstrajektorien komplette Zyklen, wie z. B. im Falle des Kniegelenks das Gehen in der Ebene, zu simulieren. Dadurch können biomechanische Eigenschaften von Gelenken, das Langzeitverhalten von Materialien und Geweben unter Last sowie die Unterschiede zwischen verschiedenen im Gelenk implantierten Endoprothesen und Operationstechniken gezielt untersucht werden. In diesem Zusammenhang werden der Nutzen und die Vorteile solcher Systeme für die medizinische Forschung deutlich.

2 EINFÜHRUNG

Die Emulation biomechanischer Zusammenhänge in Verbindung mit dynamischer Simulation physiologischer Belastungssituationen eröffnet ein weites Feld an Anwendungen für die medizinische Forschung. Robotersysteme, ausgestattet mit geeigneten Algorithmen zur Kraft-Momenten-Regelung (Force-Torque Control, FTC), können flexibel für die Einprägung physiologischer Kraft-Momenten-Verläufe auf biomechanische Gelenke, wie z. B. Schulter-, Hüft-, Sprung- oder Kniegelenke, eingesetzt werden. Abzusehende Untersuchungsschwerpunkte sind:

- Änderungen der Gewebe- und Materialeigenschaften resultierend aus der Beaufschlagung mit speziellen Lastsituationen.
- Einflüsse verschiedener Endoprothesen, Implantate oder sogar Traumata auf das kinematische Verhalten und die resultierende Belastung der Gelenke.

- Unterschiede der kinematischen Beeinflussung und Belastung zwischen verschiedenen Operationstechniken und Methoden.

Für diese Untersuchungsszenarien müssen neue geeignete Testmethoden unter der Berücksichtigung partiell hoher auftretender Belastungen entwickelt werden, passend für die jeweilige Untersuchung und verwendete Gerätschaften, sowie anwendbar auf verschieden gestaltete Einzelpräparate. Das Ziel ist die Ertüchtigung eines mit Kraft-Momenten-Regelung ausgestatteten Robotersystems mit sechs Freiheitsgraden zur realistischen Aktuierung biologischer Präparate unter hoch variablen Belastungssituationen als ersten Schritt hin zu den oben genannten Untersuchungen. Die Hauptteile des entwickelten methodischen Ablaufs sind:

- Testinitialisierung mit Kraft-Momenten-geregelter Präparatfixierung und Gewichtskompensation.
- Kraft-Momenten-geregelte Bestimmung einer Neutral-Bahn entlang der Flexionsrichtung des Gelenks als Trajektorie des geringsten Widerstands mit nachfolgender Bahnoptimierung.
- Aktuierung von Präparaten mit gleichzeitiger Einprägung von Kraft- und Bewegungsprofilen mit Hilfe der Kraft-Momenten-Regelung und anschließender Datenanalyse.

In dieser Arbeit wurden die methodischen Abläufe entwickelt und aus Gründen der Verfügbarkeit an tierischen diarthrodialen Gelenken, nämlich Schweineknie, getestet. Als einzuprägende Kraft-Bewegungs-Trajektorien wurden solche ausgewählt, die denen beim menschlichen Gang ähneln.

3 VERWANDTE ARBEITEN

Möglichkeiten der Untersuchung medizinischer Fragestellungen unter Verwendung von Robotersystemen mit Kraftsensorik bzw. Kraft-Momenten-Regelung wurden bereits in mehreren Arbeiten beschrieben. So wurden u. A. Industrieroboter eingesetzt, um resultierende Kräfte und Momente an Präparaten zu messen [1], oder wurden mit Kraft-Momenten-Regelung betrieben [2], wobei oft die notwendigen Regelungs-Algorithmen selber implementiert wurden oder wie in dieser Arbeit auf industrielle Regelungen zurückgegriffen wurde [3]. Obwohl biomechanisch inspirierte Tests mit Hilfe von Robotersystemen an vielen Gelenken möglich und von Interesse sind, wurden hauptsächlich Kniegelenke untersucht [3]. Zwar wurden realistische Bewegungen ähnlich denen des menschlichen Gangs bereits simuliert, jedoch wurden

hierbei nur resultierende Belastungen gemessen bzw. nur mit weniger als sechs Bewegungsfreiheitsgraden aktuiert [4]. Mit Ausnahme der Beaufschlagung mit diskreten statischen bzw. quasi-statischen Kräften und Momenten wurde noch keine Simulation von kontinuierlichen Belastungssituationen berichtet. Eine integrierte Methodik mit Kraft-Momenten-geregeltem Robotersystem mit sechs Freiheitsgraden zur hoch variablen Einprägung von Kraft-Bewegungs-Trajektorien zur Simulation physiologischer Belastungen wurde noch nicht beschrieben.

4 AUSSTATTUNG

Die in dieser Arbeit verwendeten Hardware- und Software-Komponenten sind im Folgenden aufgezählt und beschrieben.

4.1 Industrielles Robotersystem mit Kraft-Momenten-Regelung

Für die vorliegende Arbeit wurde ein Hochlast-Industrieroboter (KUKA KR 2400-2, Serie 2000) mit sechs seriellen Drehgelenken und einer nominalen Nutzlast von 2400 N verwendet. Ein Kraft-Momenten-Sensor mit sechs Freiheitsgraden (ATI Omega 190 SI-7200-1400) am Manipulatorflansch bestimmt den verallgemeinerten Kraft-Momenten-Vektor, dessen sechs Einträge die drei Kraftkomponenten in Richtung der Sensorkoordinatenachsen und die drei Momentenkomponenten um die Sensorkoordinatenachsen sind. Die eingesetzte standardmäßige Industrieroboter-Steuerung (KUKA KR C2) wurde mit einer abgeänderten und von KUKA zu Verfügung gestellten Firmware ausgestattet. Zu den wesentlichen Unterschieden ist hier die verkürzte Taktzeit von 4 ms zu nennen, sowie ein freier programmierbarer Signalfluss. Obwohl Bahnregelung, Sensor-Schnittstelle (Robot Sensor Interface, RSI) und Kraft-Momenten-Regelung von der Serienversion der Steuerungssoftware abweichen, ist diese weiterhin über die proprietäre Programmiersprache (KUKA Robot Language, KRL) bedienbar.

4.2 Präparatfixierung

Die Anordnung von fixiertem und in das Testsystem eingebundenem Präparat ist in Bild 1 dargestellt. Das Präparat ist aus Gründen der Krafteinleitung kopfüber in das Testsystem eingebunden, die Oberschenkel-seitigen (femorale) Komponenten sind unten und die Unterschenkel-seitigen (tibiale) Komponenten sind oben bzw. roboterseitig angeordnet.

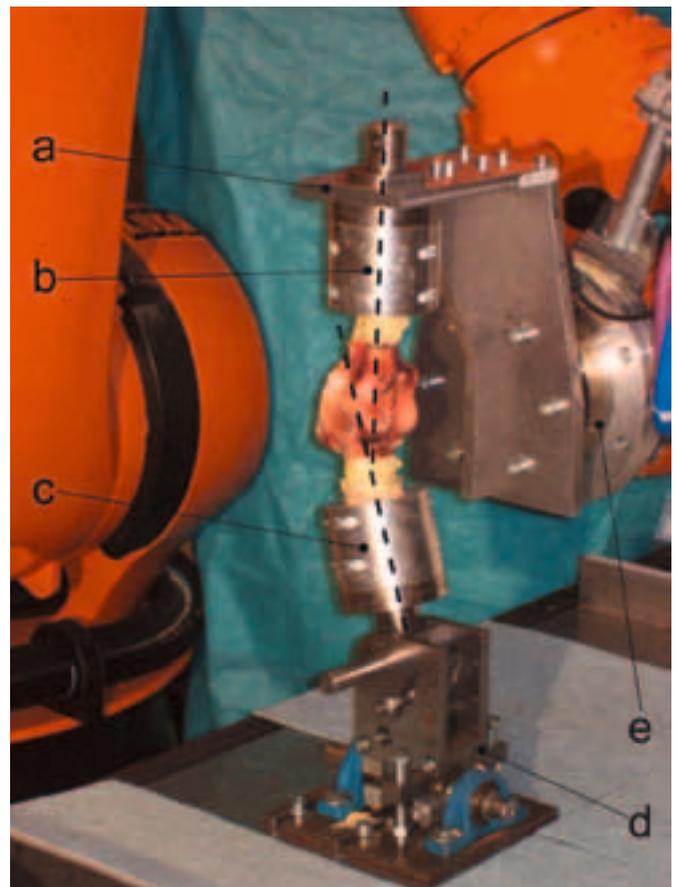


Abb. 1: Roboterseitige Aufnahme (a), distale Präparatfixierung mit tibialer Achse (b), proximale Fixierung mit femoraler Achse (c), statische Aufnahme (d) und Roboter mit Kraft-Momenten-Sensor (e)

Für die mechanische Fixierung und anatomische Ausrichtung werden intramedulläre Stahlstifte sowohl in den distalen (tibialen) wie auch in den proximalen (femorale) Markkanal eingeführt, nachdem die Probe präpariert worden ist. Um eine Stabilisierung und Wiederausrichtung zu garantieren, wird jeder Stahlstift mit drei bikortikalen Schrauben verschraubt und in Zylindern mit Knochenzement eingebettet. Die Fixierungen sind nun zu den anatomischen Achsen von Tibia und Femur ausgerichtet. Die proximale Fixierung wird auf eine statische Plattform mit einstellbarer Neigung montiert. Die distale Fixierung wird mit der roboterseitigen Aufnahme verbunden, so dass eine definierte Ausrichtung der anatomischen Achse der Tibia zum Sensorkoordinatensystem gegeben ist.

5 METHODEN UND TESTPROZEDUREN

Die entwickelten Methoden und Testprozeduren werden nun mit einigen Voraussetzungen beschrieben. Der prinzipielle Testablauf ist in Bild 2 dargestellt.

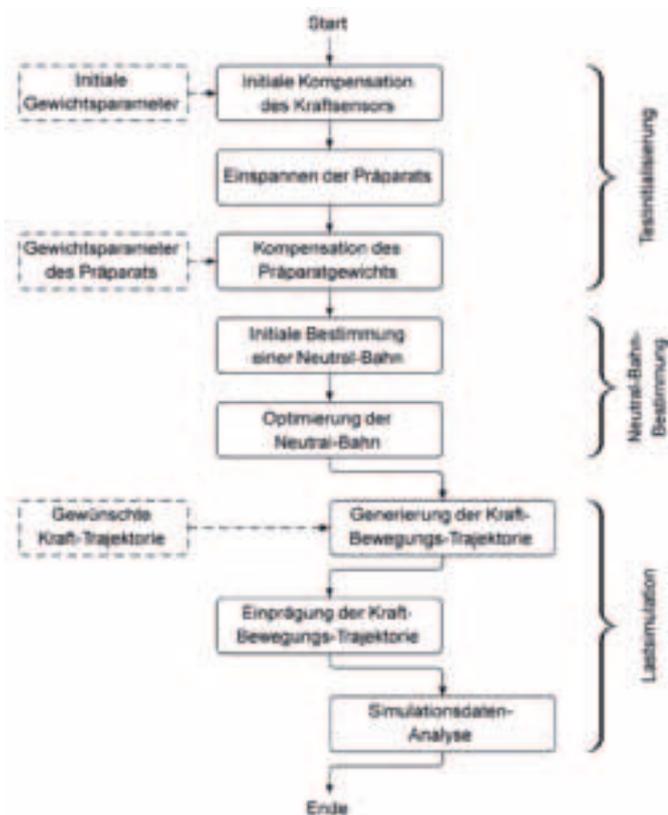


Abb. 2: Testablauf und entwickelte Methoden

5.1 Voraussetzungen

Ein diarthrodiales Gelenk besitzt ein räumliches kinematisches Verhalten mit sechs Bewegungsfreiheitsgraden. Es existieren verschiedene bewährte Herangehensweisen, komplexe Kniegelenks-Koordinatensysteme zur Beschreibung von gegenseitigen Bewegungen zu definieren. In dieser Arbeit wird jedoch auf die Tatsache zurückgegriffen, dass die anatomischen Achsen von Femur und Tibia an den Fixierungen bzw. Montagevorrichtungen ausgerichtet sind, um hierdurch eine relativ simple Beschreibung der Gelenkinematik zu erhalten:

- Die Mittelachse der distalen Fixierung, welche durch den tibialen Stahlbolzen festgelegt ist, ist kollinear mit der anatomischen Achse der Tibia.

- Die Mittelachse der proximalen Fixierung, beschrieben durch den femoralen Stahlbolzen, ist kollinear mit der anatomischen Achse des Femurs.
- Eine Nullstellung, in welcher der Flexionswinkel 0° beträgt, wird durch eine parallele Stellung der anatomischen Achsen bzw. durch eine parallele Bolzenanordnung definiert.
- Durch Betrachtung des Winkels zwischen den anatomischen Achsen kann der Flexionswinkel bestimmt werden. Da es sich bei der Bewegung der Komponenten des Kniegelenks im Allgemeinen um eine Überlagerung von Rotation und Translation handelt, können Verschiebungen durch Betrachtung des wandernden Rotationszentrums mit betrachtet werden.

Desweiteren muss die räumliche relative Anordnung von Sensorkoordinatensystem, distalem Fixierungskordinatensystem sowie Gelenkkordinatensystem für eine korrekte Kraft-Momenten-Regelung berücksichtigt werden. Je nach Art und Herkunft der einzuprägenden Datensätze in Bezug auf Messposition, z. B. implantierte Messgeräte oder Bodendruckmessplatten, müssen die entsprechenden Kräfte und Momente in das Sensorkoordinatensystem transformiert werden. Die proportionale Verstärkung des Regelfehlers von einzusteuender Soll-Kraft und Messwerten bewirkt eine inkrementale Bahnänderung des Roboters je Abtastschritt, so dass sich über der Programmlaufzeit ein integrales Verhalten der Kraft-Momenten-Regelung einstellt. In Kombination mit einer vorprogrammierten Bahn lässt sich somit eine kombinierte Kraft-Bewegungs-Trajektorie einstellen.

5.2 Testinitialisierung

Da der Kraft-Momenten-Sensor wie auch die montierte Fixierungsaufnahme je nach räumlicher Lage unter verschiedenem Einfluss des Schwerfelds der Erde stehen, muss der Sensor kompensiert werden. Zu Beginn der Testreihe wird der Sensor erstmalig kompensiert, d. h. die notwendigen Daten wie Gewicht und Schwerpunktlage werden mit Hilfe eines Lastschätzprogramms bestimmt und für eine statische Kompensation bereitgestellt.

Im Anschluss wird die Einzelprobe bzw. das Präparat mit den Fixierungen montiert. Nachdem die proximale Komponente an die Aufnahme auf der statischen Plattform montiert worden ist, kann die Aufnahme für die distale Komponente mit Hilfe der Kraft-Momenten-Regelung einfach aufgesetzt werden. Hierzu werden sämtliche Komponenten von Sollkraft und Sollmoment zu Null gesetzt, so dass der Roboter

durch Handführen in die passende Pose gebracht, aufgesetzt und fest mit der Fixierung verbunden werden kann.

Als letzten Schritt der Testinitialisierung wird der Sensor ein weiteres Mal kompensiert, um das zusätzliche Gewicht der distalen Komponenten des Präparats zu berücksichtigen. Während Kontaktsituationen läge ansonsten deren Gewicht auf den proximalen Komponenten, in Nicht-Kontaktsituationen jedoch wäre der Sensor gänzlich belastet, so dass ein systematischer Fehler entstünde. Um dies zu vermeiden, wird der Roboter mit dem Präparat in eine aufrechte Pose gebracht, so dass die anatomische Achse des distalen Parts annähernd parallel zum Schwerfeld liegt. Die Sollkraft entgegen dem Schwerfeld wird auf einen Wert eingestellt, der der geschätzten Gewichtskraft der distalen Komponenten entspricht, die verbleibenden Komponenten werden zu Null eingestellt, so dass durch Verspannungen induzierte Kräfte und Momente minimiert werden können. Schließlich wird in der resultierenden Pose eine Rekompensation des Sensors durchgeführt.

5.3 Bestimmung einer Neutral-Bahn

Eine Neutral-Bahn ist eine räumliche Trajektorie innerhalb der Bewegungsmöglichkeiten des Gelenks, in welcher kontinuierlich sämtliche Kraft- und Momentenkomponenten Null betragen. Für eine erste Kraft-Momenten-geregelte Bestimmung einer solchen Neutral-Bahn genügt es, die Sollwerte der Kräfte und Momente also zu Null zu setzen und den Roboter entweder manuell oder automatisiert in Flexionsrichtung zu kommandieren. Manuell geschieht dies wieder durch Handführen, automatisiert wurden mehrere Methoden getestet, wobei sich eine Spline-basierte Bahnvorgabe am besten bewährt hat. Hierbei wird die Bahn des Roboterflansches mit einem Circular-Spline angenähert. Der Roboter bewegt sich entlang dieser Bahn bis zu einem geschätzten Endpunkt, wobei versucht wird, auftretende Kräfte und Momente zu Null hin auszuregulieren. Durch eine permanente Bestimmung des Flexionswinkels können äquidistant die zugehörigen Daten der Roboterpose (Positionen und Orientierungen des Roboterflansches) mitgespeichert werden, so dass aus diesen wiederum neue Spline-Stützpunkte für kommende Optimierungsschritte generiert werden können. Dieser neue Spline zeichnet sich durch die Bahnkorrekturen der Kraft-Momenten-Regelung durch geringere Abweichungen zu einer widerstandsfreien Bahn aus.

Durch eine solche iterative Bahn-Optimierung kann eine neue, verbesserte Bahn gefunden werden, die tatsächlich

sehr nah an einer Neutral-Bahn liegt und als Datensatz von Flexionswinkeln des Gelenks mit den zugehörigen Roboterposen vorliegt. In der Regel kann die Optimierung nach der zweiten Iteration beendet werden, da hier schließlich nur noch geringe Abweichungen von etwa zweifacher Sensorauflösung auftreten. Somit kann eine für das jeweilig untersuchte Präparat charakteristische Bahn gefunden und für weitere Untersuchungen hinterlegt werden.

5.4 Lastsimulation

Für die Simulation einer physiologischen Gelenkbelastung, wie sie während des menschlichen Gangs auftritt, wird ein Datensatz für einen kompletten Schrittzyklus, d. h. beginnend mit dem Fersenaufsatz über Abrollvorgang und Schwungphase bis hin zu erneutem Fersenaufsatz, benötigt. Der in dieser Arbeit verwendete Datensatz ist an die Norm ISO 14243 zur Prüfung von Knie-Implantaten angelehnt und in Bild 3 dargestellt. Da die Belastung in axiale Richtung, im vorliegenden Fall die Belastung entlang der anatomischen Achse der Tibia, betragsmäßig die Hauptbelastung ist, werden für die folgenden Betrachtungen die restlichen Komponenten nicht eingehender betrachtet.

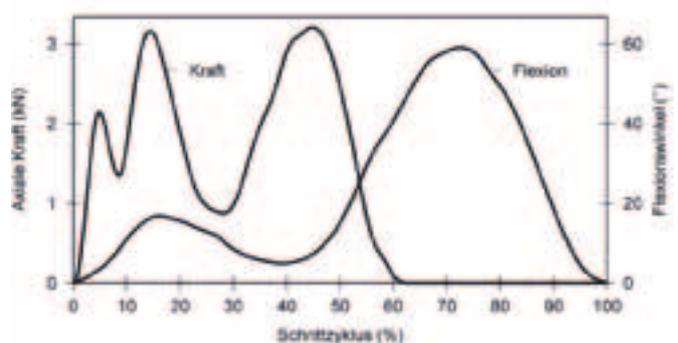


Abb. 3: Beispieldatensatz zur Lastsimulation: Kraft in axiale Richtung und zugehöriger Flexionswinkel über dem Fortschritt eines Schrittzyklus

Für die Erstellung einer kombinierten Kraft-Bewegungs-Trajektorie für ein spezifisches Präparat wird neben den Soll-Kraftwerten der zuvor bei der Neutral-Bahn-Aufnahme hinterlegte Datensatz der abfolgenden und die Neutral-Bahn beschreibenden Parameter (Roboterposen) mit deren Flexionswinkeln herangezogen. So wird zu jedem Zeitpunkt des geplanten Schrittzyklus ein Flexionswinkel definiert, dessen Parameter bereits bekannt sind und mit einem zugehörigen interpolier-

ten Soll-Kraftwert verknüpft. Hierbei ist zu beachten, dass im Laufe des Schrittzyklus der Flexionswinkel mehrfach denselben Wert annehmen kann, die Belastungen jedoch je nach Fortschritt des Zyklus unterschiedlich groß sind. Die Generierung des Datensatzes der kombinierten Kraft-Bewegungs-Trajektorie in Form zweier Splines geschieht außerhalb der eigentlichen Robotersteuerung. Mit Hilfe der Kraft-Momenten-Regelung wird wiederum der generierte kombinierte Datensatz auf das spezifische Präparat eingepreßt. Konkret wird ein Spline für die Bahn der Steuerung übergeben, wobei wiederum an jedem Stützpunkt abhängig vom jeweils aktuellen Flexionswinkel die Sollwerte für die Kraft-Momenten-Regelung aus einem Spline interpoliert werden.

Abweichungen der Bahn durch werden wieder mit aufgezeichnet und stehen zur späteren Datenauswertung zur Verfügung. Diese Abweichungen resultieren zum Einen aus der veränderten Belastungssituation, z. B. durch Weichteilkompression, zum Anderen aus Nachgiebigkeiten z. B. aufgrund eines durch chirurgische Eingriffe geschwächten Gewebes. Ähnlich der Vorgehensweise bei der Neutral-Bahn-Aufnahme kann durch sukzessive Neu-Aufnahme von Bahnparametern eine aktualisierte Kraft-Bewegungs-Trajektorie generiert werden und so die Regelgenauigkeit durch verbesserte Sollwertvorgabe erhöht werden.

6 ERGEBNISSE

Die nachfolgend präsentierten Ergebnisse zeigen beispielhaft die Resultate der Anwendung der oben beschriebenen Methoden auf ein präpariertes Schweineknie. Bei der Präparation wurden diesem Sehnen und Muskeln entfernt. Kreuz- und Kollateralbänder sowie die Gelenkkapsel wurden erhalten, anschließend wurde das Präparat fixiert.

Nach erfolgter Erstkompensation des Kraft-Momenten-Sensors, Einspannung des Präparats, sowie erfolgter Maßnahme zur Kompensation des Gewichts der distalen Komponenten des fixierten Präparats, wurde automatisiert die initiale Neutral-Bahn-Aufnahme sowie zwei Optimierungsschritte durchgeführt.

Anschließend wurde entsprechend der beschriebenen Vorgehensweise zur Lastsimulation aus den Daten der Neutral-Bahn-Aufnahme und einem Kraftprofil Stützpunkte interpoliert sowie die Kraft-Bewegungs-Trajektorie generiert. Die Sollwerte der Kraft- und Momentenkomponenten des hier verwendeten Datensatzes waren mit Ausnahme der Axial-

kraft Null. Zwar traten hier vom Sollwert Null abweichende Messwerte auf, jedoch werden diese im Folgenden nicht näher diskutiert, da diese nicht direkt im Fokus stehen und der im Vergleich zur betragsmäßig dominierenden Axialkraft unbedeutend sind.

Die Interpolation der Stützpunkte sowie die Generierung der Kraft-Bewegungs-Trajektorie wie auch die Auswertung der Messdaten erfolgte offline in dem proprietären CAE-Tool Matlab, alle anderen Algorithmen bzw. Methoden wurden in KRL und RSI auf der Robotersteuerung mit einer Abtastzeit von 4 ms durchgeführt.

Bild 4 zeigt die Ergebnisse der Beaufschlagung mit 0,8-fach skaliertem Maximalbelastung entsprechend ISO 14243 und dem 0,75-fachen der Maximalgeschwindigkeit des Roboters für einen simulierten Gangzyklus. Die Simulation des kompletten Schrittzyklus unter Belastung dauert in diesem Fall ca. 8,5 s. Der Vergleich von Sollwert und gefiltertem Messwert der Axialkraft zeigt, dass die Vorgabe ca. 0,2 s verzögert erreicht wird. Die Abflachung im Profil des Flexionswinkels ist durch eine zeitliche Verzögerung bei der Richtungsänderung bei 15 % und 75 % des Schrittzyklus (vergleiche Bild 3) zu erklären, was den dynamischen Eigenschaften des Roboters geschuldet ist. Jedoch kann man hier für dieses erste prototypische Arrangement von einer ausreichenden Genauigkeit sprechen.

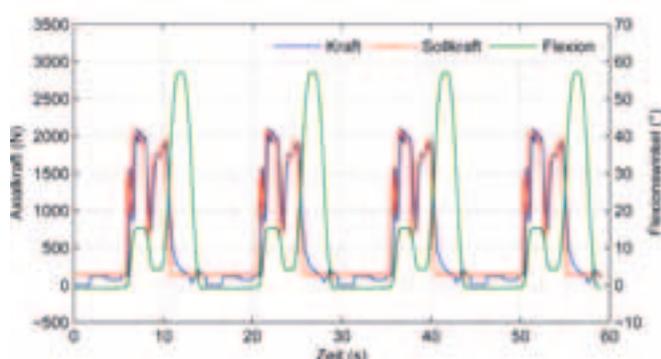


Abb. 4: Ergebnisse der Beaufschlagung mit einer kombinierten Kraft-Bewegungs-Trajektorie mit 0,8-fach skaliertem Maximalbelastung und 0,75-facher Maximalgeschwindigkeit. Dargestellt sind der gefilterte Messwert und der Sollwert der Axialkraft sowie der synchron erreichte Flexionswinkel für einen simulierten Gangzyklus

In Bild 5 sind hintereinander mehrere Simulationszyklen unter denselben Belastungsparametern dargestellt. Im Zeit-

Prof. Dr.-Ing. Thomas Schlegl

Tel.: 0941 943-5180

Fax: 0941 943-1428

thomas.schlegl@hs-regensburg.de

117

raum von 0 s bis 6 s wird der Roboter von der Robotersteuerung in die Ausgangspose kommandiert und die Axialkraft zu Beginn des Schrittzyklus eingeregelt. Die Simulation des eigentlichen, physiologischen Schrittzyklus entsprechend Bild 3 findet im Zeitraum von 6 s bis ca. 14,5 s statt, benötigt also nur etwa die letzten 60 % des kompletten Simulationszyklus. Diese zeitliche Verteilung ist für jeden Simulationszyklus charakteristisch. Die zyklische Initialisierung zu Beginn jedes Simulationsschritts ist zum derzeitigen Arbeitsstand noch notwendig, da aufgrund von Hysterese-Effekten und Laxizitäten der Präparate die Endposition von der Anfangsposition abweicht.

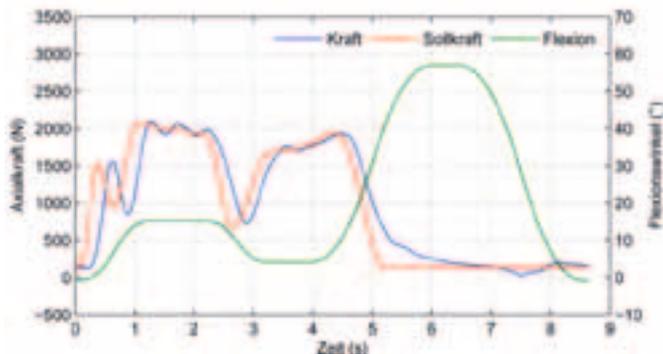


Abb. 5: Ergebnisse der Aneinanderreihung mehrerer Simulationszyklen mit zeitlicher Anordnung der simulierten Schrittzyklen innerhalb der Simulationszyklen unter Beaufschlagung mit einer kombinierten Kraft-Bewegungs-Trajektorie mit 0,8-facher Belastung und 0,75-facher Maximalgeschwindigkeit

7 ZUSAMMENFASSUNG UND KÜNFTIGE ARBEITEN

In dieser Arbeit wurden entwickelte methodische Zusammenhänge und Testabläufe zur Einprägung realistischer Belastungen, wie sie während des menschlichen Gangs im Kniegelenk auftreten, vorgestellt. Für diesen Zweck wurde ein mit Kraft-Momenten-Regelung ausgestattete Schwerlast-Industrieroboter ertüchtigt, physiologisch inspirierte Kraft-Bewegungs-Trajektorien einzuregulieren. Methoden zur Testinitialisierung, Neutral-Bahn-Aufnahme und zur Einprägung kombinierter Kraft-Momenten-Regelung zur Emulation körperlicher Randbedingungen und Simulation kompletter Gangzyklen wurden entwickelt, angewendet und an präparierten Schweineknieen evaluiert. Mit diesem ersten prototypischen Aufbau konnten gute Ergebnisse hinsichtlich Ausführdauer eines Schrittzyklus und Regelgenauigkeit erzielt werden. Somit ist ein erster Schritt in Richtung der in Abschnitt 2 genannten Untersuchungen getan.

Kommende Schritte konzentrieren sich auf eine dynamischere Einprägung der Kraft-Momenten-Verläufe. Eine zeitliche Verkürzung bzw. ein Wegfall der zyklischen Reinitialisierungsphase bei jedem Simulationszyklus ist angestrebt, wofür eine genauere Untersuchung der Gelenkkinematik notwendig ist. Eine Ausstattung des vorhandenen Roboter-Testsystems mit videometrischer Sensorik und nebenwissenbasierten Auswertalgorithmen zur Verifikation der durch derzeit verwendete roboterinterne Positions- und Kraftsensorik erreichbaren Positioniergenauigkeit ist derzeit in der Planungsphase. Nicht zuletzt sind Testreihen an menschlichen Kniegelenken und weiteren Gelenkstypen durchzuführen.

8 LITERATUR

- [1] P. M. Aubin, M. S. Cowley, W. R. Ledoux: Gait simulation via a 6-dof parallel robot with iterative learning control, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 55, No. 3, 2008
- [2] T. W. Rudy, G. A. Livesay, S. L.-Y. Woo, F. H. Fu: A combined robotic/universal force sensor approach to determine in situ forces of knee ligaments, Journal of Biomechanics, Vol. 29, No. 10, 1996
- [3] N. Diermann, T. Schumacher, S. Schanz, M. J. Raschke, W. Petersen, T. Zantop: Rotational instability of the knee: internal tibial rotation under simulated pivot shift test, Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery, Vol. 129, No. 3, 2009
- [4] L. P. Maletsky, B. M. Hillberry: Simulating dynamic activities using a five-axis knee simulator, Journal of Biomechanical Engineering, Vol. 127, No. 1, 2005

MASCHINENBAU

A. BIALEK¹, K. SENN, C. SCHLIEKMANN

HF-SIMULATION ZUR OPTIMIERUNG EINES HOHLRAUMRESONATORS FÜR DIE PREFORMERWÄRMUNG MITTELS MIKROWELLEN

1 EINLEITUNG

Bei der Herstellung von Kunststoffflaschen für die Getränkeindustrie werden heute Vorformlinge in einer Streckblasmaschine zu Flaschen umgeformt. Hierzu müssen die Vorformlinge auch Preforms genannt, über ihre Glastemperatur auf etwa 100-120°C erwärmt werden bevor sie, in einem zweiten Bearbeitungsschritt, streckgeblasen werden können. Für die Erwärmung werden derzeit weltweit Infrarotöfen (IR-Öfen) genutzt. Nun versucht man bei der Krones AG erstmalig, unter Produktionsbedingungen, Preforms mittels Mikrowellen auf die Verstrecktemperatur zu bringen. Die Mikrowellentechnik ist sowohl energetisch, als auch im Hinblick auf die Schnelligkeit und die Präzision der vorhandenen IR-Technologie überlegen. Vor diesem Hintergrund werden unterschiedliche Konzepte von Mikrowellenheizeinheiten simulationstechnisch auf deren Potenzial untersucht und optimiert. Für die Simulation wird die Software ANSYS Classic verwendet, die die Möglichkeit der Hochfrequenzsimulation bietet. Nach dem bisherigen Entwicklungsstand, kann ein speziell entwickelter Hohlraumresonator, also das Bauteil in dem die eigentliche Preformerwärmung stattfindet, lediglich auf eine einzelne Preformvariante ausgelegt werden. Mit einem solchen Resonator lassen sich jedoch Preforms mit anderen Abmessungen nur bedingt erwärmen [1]. Dieser Sachverhalt stellt eine besondere Hürde bei der Entwicklung eines Mikrowellenheizsystems für die industrielle Anwendung dar. Es wird daher versucht die Problematik mit einem variablen Resonatoraufbau zu umgehen.

2 MODELLAUFBAU

Von entscheidender Bedeutung bei der Auslegung der Mikrowellenstreckenbauteile ist der parametrische Modellaufbau. Damit lassen sich Variantenstudien durchführen, deren Simulationsergebnisse der Auffindung einer optimalen Bauteilkonfiguration dienen. ANSYS Classic bietet die Möglichkeit einer solchen Parametrisierung, sodass bestimmte Bauteilabmessungen variiert und damit die optimalen Abmaße für die einzelnen Komponenten der Mikrowellenstrecke ermittelt werden können. Bei jeder Hochfrequenzsimulation wird stets der Hohlraum modelliert, welcher von den leitenden, metallischen Wänden des Resonators umschlossen wird [2]. Dieser entspricht gewissermaßen dem eingeschlossenen Luftvolumen. Ein solches Simulationsmodell ist in Abb. 1 dargestellt. Es werden also keine Modelle des Resonators selbst (vgl. CAD-Modell in Abb. 2) aufgebaut, sondern nur die Geometrie des Luftvolumens im Inneren der betrachteten

Bauteile. Dies ist besonders wichtig für das Verständnis und muss bei der Analyse solcher Simulationsmodelle stets im Hinterkopf behalten werden. Ansonsten führt die Modellbetrachtung relativ schnell zu Missverständnissen und Verwirrung.

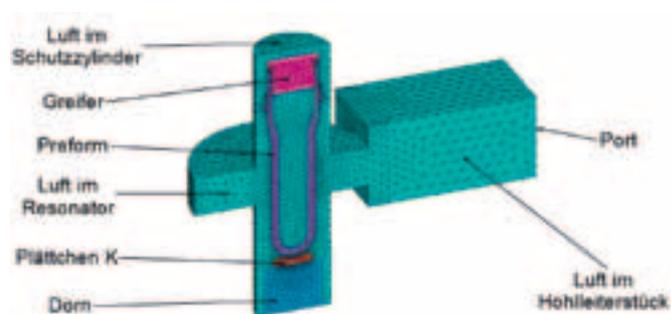


Abb. 1: Simulationsmodell zur Resonatorauslegung

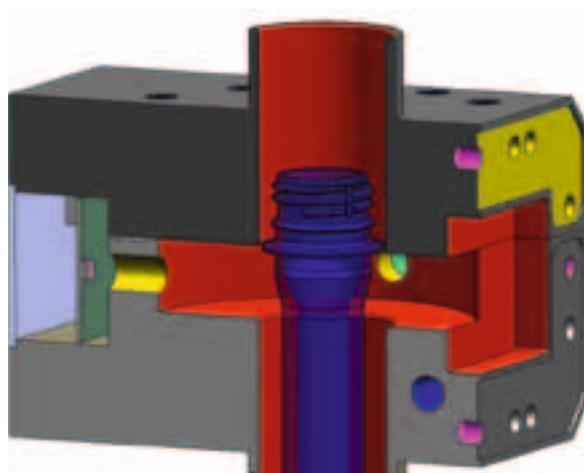


Abb. 2: beispielhaftes CAD-Halb-Modell eines Resonators

Im Gegensatz zu den parametrisierten Hohlräumen können die Bauteile, die in den Resonator eingebracht werden, hier sind in erster Linie die Preforms gemeint, über einen Bauteilimport in das Simulationsmodell eingefügt werden. Das bevorzugte Dateiformat für den Import ist dabei das Parasolid-Format, welches von allen gängigen CAD-Programmen unterstützt wird, sodass zumeist eine problemlose Umwandlung der vorliegenden CAD-Daten in dieses Format möglich ist. Die weiteren Bauteile die ebenfalls importiert

¹ M. Sc. Krones AG

werden können sind der Greifer, das Plättchen K und der Dorn. Das Aluminiumplättchen wird auf einem Polypropylen-Dorn (PP) montiert und einen Millimeter unterhalb der Kuppe des jeweiligen Preforms platziert, um mit ihm synchron in axialer Richtung der Preformmittellachse bewegt werden zu können. Der Greifer dient als Schnittstelle zwischen der linearen Rotationseinheit und dem Preform. Er besteht großteils aus Stahl und beeinflusst deshalb erheblich das elektromagnetische Feld im Resonator, sodass er unbedingt bei den Simulationen mitberücksichtigt werden muss. Die Anordnung der beschriebenen Bauteile im Simulationsmodell ist in Abb. 1 gezeigt. Es handelt sich hierbei um ein Halbmodell des

genannt [3]. Es handelt sich dabei um ein 3D Tetraeder-Solid-Element. In der ANSYS-Elementbibliothek ist auch ein weiterer Typ mit der Bezeichnung HF120 zu finden, der ebenso für derartige Hochfrequenzsimulationen geeignet ist. Dieser eignet sich jedoch nicht zur Vernetzung der komplexen Geometrie eines Preforms, oder des Resonatorinnenraumes. Die Freiheitsgrade dieser beiden Elemente werden AX genannt, deren physikalische Bedeutung eine Projektion des elektrischen Feldes auf die Elementkanten und die Elementflächen ist [3]. Die Anzahl der Freiheitsgrade pro Element ist abhängig von der Elementordnung und der Elementform. Eine Übersicht darüber bietet die folgende Tabelle 1.

Element	Elementordnung	Freiheitsgrade pro Kante	Freiheitsgrade pro Fläche	Freiheitsgrade im Inneren	Σ
HF119 Tetraeder 6 Kanten, 4 Flächen	1.	1	-	-	6
	2.	2	2	-	20
HF120 Hexaeder 12 Kanten, 6 Flächen	1.	1	-	-	12
	2.	2	4	6	54
HF120 Prisma 9 Kanten, 4 Flächen	1.	1	-	-	9
	2.	2	4	4	38

Tabelle 1: Freiheitsgrade der HF-Elementtypen

Gesamtaufbaus. Dabei entspricht die Schnittebene der Symmetrieebene des Modells in Längsrichtung. Die Halbmodellbildung ist hier zulässig, da der Aufbau des Mikrowellenfeldes stets völlig symmetrisch ist. Darüber hinaus bleiben die Simulationsergebnisse von dieser Vereinfachung unbeeinflusst. Der große Vorteil dabei ist jedoch, dass die Anzahl der Elemente für die Vernetzung des Modells um ca. 42% reduziert werden kann. Dies hat eine immense Verkürzung der erforderlichen Simulationszeit zur Folge.

3 SOFTWARETYPISCHE EIGENHEITEN

Zur Vernetzung des FEM-Simulationsmodells in ANSYS Classic muss zunächst ein geeigneter Elementtyp definiert werden, der die durchzuführenden Hochfrequenzsimulationen ermöglicht. Der hierfür verwendete Typ wird HF119

Anhand der Abb. 1 sind die unterschiedlichen Vernetzungsdichten des Modells zu erkennen. Insbesondere der Preform, aber auch die Bauteile mit geringen Abmessungen, wie beispielsweise das Plättchen K, sind besonders fein vernetzt. Schließlich ist der Preform das relevante dielektrische Bauteil, welches in besonderem Maße die Verteilung des elektromagnetischen Feldes beeinflusst. Der Modellabschnitt, der die Luft im Hohlleiterstück darstellt ist dagegen relativ grob vernetzt. Er dient lediglich der korrekten Einkopplung der Mikrowellenleistung über den Port und muss aus simulationstechnischen Gründen stets mitmodelliert werden. Hier genügt dieses grobe Netz, denn die elektrische Feldstärke innerhalb des Hohlleiters hat über die Höhe stets den gleichen Betrag [4]. Die einzige Forderung bezüglich der Vernetzung, ist eine Anzahl von mindestens fünf Elementen über die Höhe des Simulationsmodells. Diese Forderung wird mit

Bauteil	Farbe	Material	Elementgröße
Luft im Hohlleiter	Türkis	Luft	6,5 mm
Luft im Resonator	Türkis	Luft	4,5 mm
Luft im Schutzzyylinder	Türkis	Luft	4,5 mm
Greifer	Pink	Stahl	3,5 mm
Dorn	Blau	PP	3,5 mm
Plättchen K	Rot	Aluminium	1,5 mm
Preform	Lila	PET	1,5 mm

Tabelle 2: Elementgrößen der Bauteile des Simulationsmodells

der verwendeten Elementgröße erfüllt, die darüber hinaus eine ausreichende Beschreibung des sinusförmigen Verlaufes des Feldes über die Breite ermöglicht. In der Tabelle 2 sind die einzelnen Bauteile des Modells samt den zugehörigen Elementgrößen aufgeführt, wobei sich die Farben auf die Darstellung in Abb. 1 beziehen. Diese Einstellungen werden bei jeglichen Simulationen beibehalten, um die best mögliche Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse zu gewährleisten. Die gewählten Elementgrößen garantieren darüber hinaus plausible Resultate.

Die Definition von passenden Materialkennwerten ist bei HF-Simulationen besonders wichtig, um den Einfluss der verschiedenen Bauteile auf das elektromagnetische Feld korrekt abbilden zu können. Eine außerordentliche Bedeutung haben dabei die Permittivität und der Tangens des Verlustwinkels. Der Verlustwinkel beschreibt hier die dielektrische Eigenschaft eines Materials, woraus beispielsweise die Leistungsaufnahme eines Preforms im elektromagnetischen Feld ermittelt werden kann. Die verwendeten Materialkennwerte wurden der Fachliteratur entnommen [5], oder basieren auf Erfahrungen aus früheren Simulationen. Ihre Verwendung liefert realitätsnahe Ergebnisse, die durch frühere Messreihen verifiziert wurden.

4 KONZEPTE

Die Gemeinsamkeit sämtlicher entwickelter Konzepte ist die Anpassungsmöglichkeit an unterschiedliche Preformgrößen, die sich durch ihre Anwendung ergibt. Das Ziel dabei ist,

stets eine definierte Verteilung des elektromagnetischen Feldes zu realisieren. Durch einen solchen Feldverlauf besteht erst die Aussicht, dass die verschiedenen Perfortypen gut erwärmt und schließlich zu qualitativ hochwertigen PET-Flaschen geblasen werden können. Zwei der insgesamt sechs ausgearbeiteten Konzepte unterscheiden sich grundsätzlich von den anderen Ansätzen. Hier bleibt die Größe des Resonatorhohlraumes konstant. Die Feldbeeinflussung erfolgt durch das Einbringen von zusätzlichem Material, in Form von Teflonstiften, bzw. Teflonhülsen, in den Resonator. Die vier anderen Lösungsvarianten zeichnen sich dadurch aus, dass hier die Anpassung durch die Veränderung der Größe des Resonatorhohlraumes erreicht wird. Beim dritten Konzept erfolgt dies über die veränderliche Durchbiegung eines Federstahlbleches, während bei den letzten drei Konzepten unterschiedliche Blenden verschoben werden, um die Größe zu ändern. Das aussichtsreichste untersuchte Lösungskonzept ist ein Resonator mit verschiebbarer Blende im vorderen Resonatorbereich. Der mögliche Aufbau eines solchen Resonators ist in Abb. 3 dargestellt.

5 ERGEBNIS

Die Beurteilung der Simulationsergebnisse erfolgt bei der durchgeführten Art der HF-Simulation durch die Gegenüberstellung der Beträge des so genannten S-Parameters S_{11} . Es gilt, dass der Betrag des S-Parameters stets minimal sein sollte. In diesem Fall ist die Reflexion der eingebrachten Leistung am geringsten. Dies ist wiederum gleichbedeutend mit einer

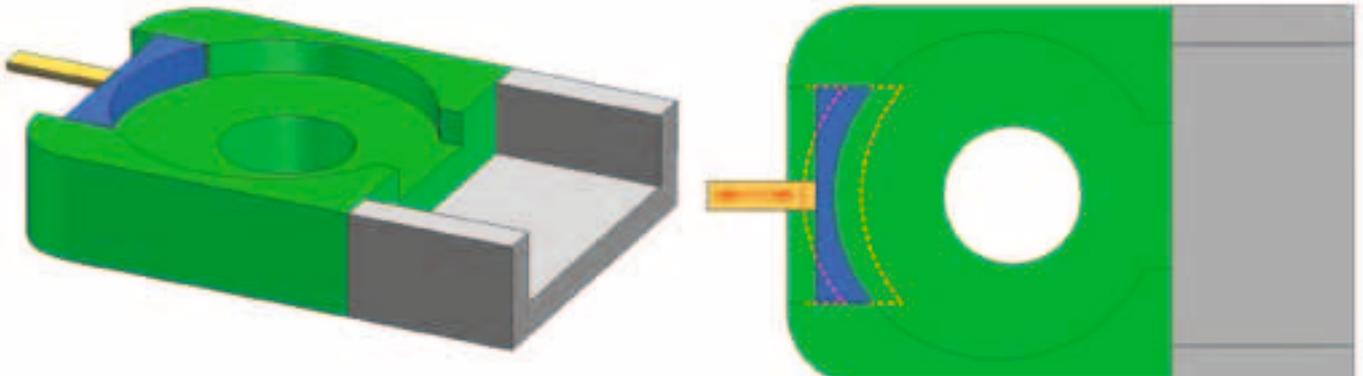


Abb. 3: Aufbau eines Resonators mit verschiebbarer Blende vorne

maximalen Absorption der Leistung durch das dielektrische Material im Resonator (hier PET-Preform). Die Ermittlung der Beträge des S-Parameters erfolgt in ANSYS für unterschiedliche Eintauchpositionen des Preforms im Resonator. Zusätzlich wird für jede Position eine Variation der Frequenz der eingekoppelten Mikrowelle durchgeführt. In ANSYS wird dies als S-Parameter-Sweep bezeichnet. Aus den Simulationsergebnissen lässt sich für jeden untersuchten Preform ein anschauliches Diagramm erzeugen, welches für das Konzept mit verschiebbarer Blende vorne in Abb. 4 dargestellt ist. Anhand dieses Diagramms lässt sich die Abhängigkeit des S-Parameterbetrages $|S_{11}|$ von der Mikrowellenfrequenz und der Eintauchtiefe des Preforms im Resonator veranschau-

lichen. Das blaue Feld im Zentrum von Abb. 4 repräsentiert die niedrigsten ermittelten S-Parameter-Beträge zwischen 0,50 und 0,55. Es befindet sich bei einer Frequenz von 2,46 GHz, die der Nennfrequenz der Mikrowellenquelle in der Versuchsanlage entspricht. Anhand des Diagramms lässt sich erkennen, dass das untersuchte Blendenkonzept eine sehr gute Anpassung des Resonators, auch an unterschiedliche Preformgrößen, ermöglicht. Die Lösung mit verschiebbarer Blende vorne hat darüber hinaus einige weitere Vorteile. Dieses Konzept lässt sich mechanisch relativ einfach umsetzen, es erfordert lediglich einen Blende Antrieb und es ermöglicht eine sehr kompakte Bauweise der Mikrowellenheizstrecke.

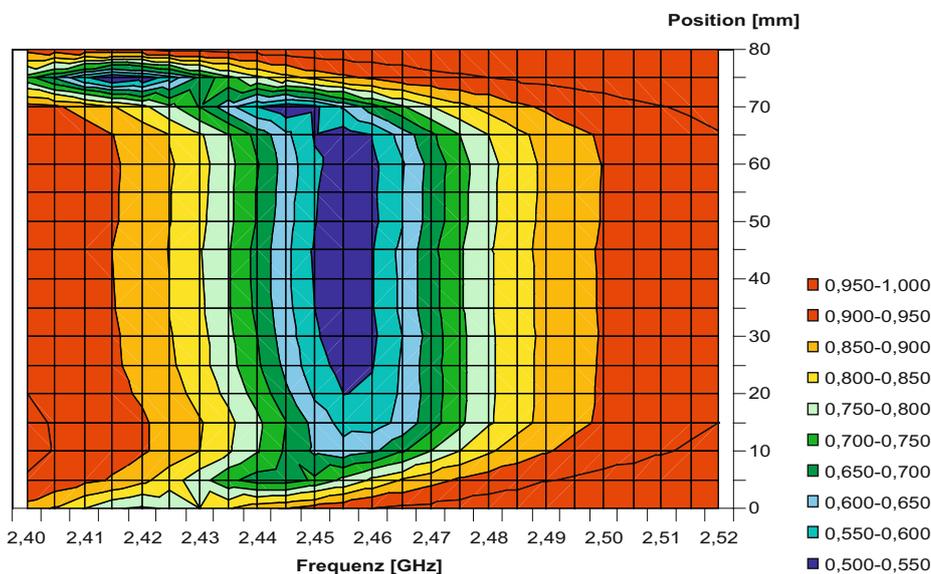


Abb. 4: $|S_{11}| = f(\text{Frequenz}, \text{Preformposition})$

6 FAZIT

Das entwickelte und untersuchte Konzept bietet die Grundlage für die Erarbeitung eines Blendenverfahrprofils zur exakten Regelung und Anpassung des Resonatorhohlraumes an die eingebrachte Preformgeometrie. Die mittels ANSYS ermittelten Profile sind in Abb. 5 dargestellt.

Das Diagramm zeigt die Blendenpositionen für drei unterschiedliche Preformvarianten (14,5 g-, 28,0 g- und 39,0 g-Preform) mit denen sich jeweils eine optimale Erwärmung realisieren lässt. Die Blendenposition hängt hier von der Eintauchtiefe der Preforms in den Resonator ab. Für positive Werte der Blendenposition wird die entsprechende Blende in Richtung der Resonatormittelechse bewegt. Für negative Werte gilt die umgekehrte Bewegungsrichtung. Stellt man die Blende entsprechend des Profils ein ergibt sich beispielhaft der in Abb. 6 dargestellte Verlauf des S-Parameter-Betrages. Im Vergleich zu Abb. 4 wird hier deutlich, dass hier das

Abdriften des S-Parameter-Minimums für die niedrigen bzw. die großen Eintauchtiefen wirksam verhindert werden kann, wenn die Blendenposition interaktiv entsprechend der Preformposition verändert wird. Das Konzept mit verschiebbarer Blende vorne eignet sich laut den ermittelten Simulationsergebnissen sehr gut, um die gewünschte Variabilität des Resonators zu realisieren.

Es zeigt sich auch, dass die Software ANSYS Classic sehr gut geeignet ist, um derartige Hochfrequenzsimulationen durchzuführen, zumal sich die Simulationsergebnisse größtenteils mit den Erfahrungen aus der Praxis decken.

Als ein nächster Schritt in Richtung des Serieneinsatzes der Mikrowellenheiztechnologie sollte die konstruktive Ausgestaltung einer Resonatorvariante mit motorisch verstellbarer vorderer Blende angestoßen werden, um einen automatisierten, vollvariablen Erwärmungsprozess an der Versuchsanlage zu testen. In diesem Zusammenhang muss jedoch auch eine entsprechende Steuerung des Blendenantriebs ausgearbeitet werden.

Blendenpositionen

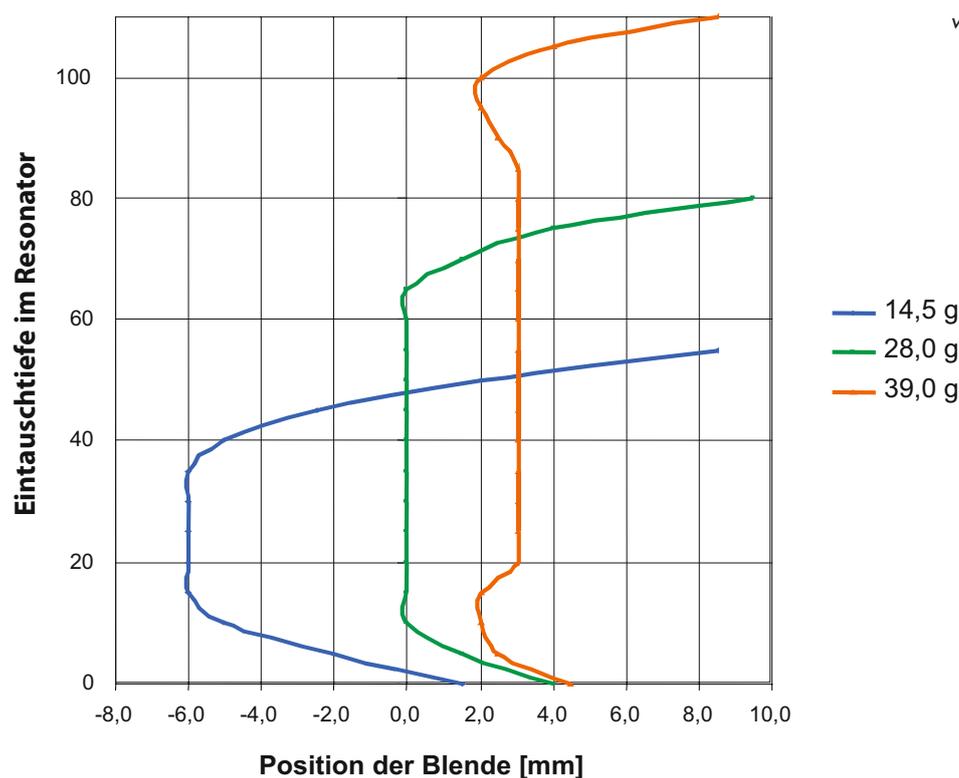


Abb. 5: Position der Blende in Abhängigkeit von der Preformposition

Prof. Dr.-Ing. Claus Schliekmann

Tel.: 0941 943-5182

Fax: 0941 943-1428

claus.schliekmann@hs-regensburg.de

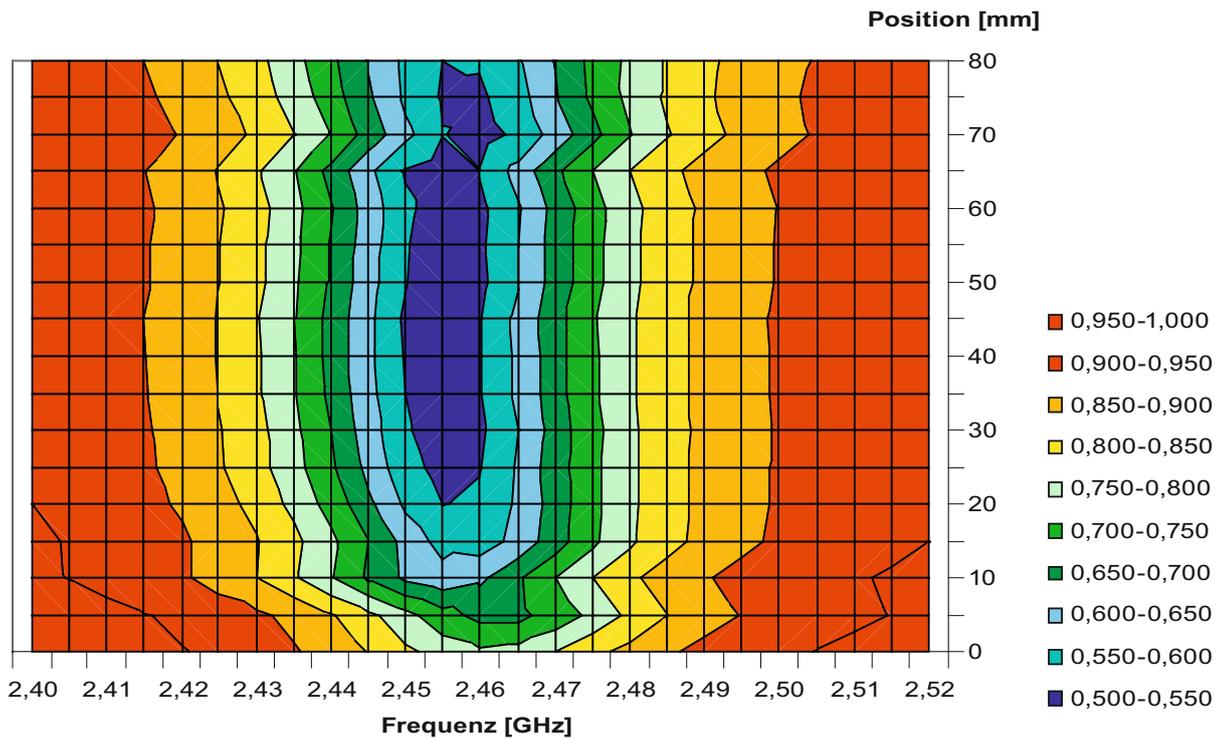


Abb. 6: S-Parameter S_{11} in Abhängigkeit von Frequenz und Preformposition (für variable Blendenposition)

LITERATUR

- [1] Apelsmeier, A.; Optimierung eines Versuchsstandes zur Preformerwärmung mittels Mikrowellen; Diplomarbeit, Neutraubling, 2007.
- [2] Winkler, G.; Mikrowellentechnik in ANSYS, KRONES AG, F&E Technische Berechnung, Neutraubling, 2008.
- [3] ANSYS, Inc.; ANSYS 12.0 release Help.
- [4] Winkler, G.; Mikrowellenausbreitung im Hohlleiter, KRONES AG, F&E Technische Berechnung, Neutraubling, 2008.
- [5] Erbulut, D. U.; Maswood, S. H.; Tran, V. N.; Sbarski, I.: A Novel Approach of Measuring the Dielectric Properties of PET Preforms for Stretch Blow Moulding, 2008.

MASCHINENBAU

P. SCHOLZ, C. SCHLIEKMANN

SIMULATION DES SCHWINGUNGSVERHALTENS EINES GEKOPPELTEN 3-WALZEN-SYSTEMS ZUR WELLPAPPENHERSTELLUNG

1 EINLEITUNG

Einer der am weitesten verbreiteten Werkstoffe für Verpackungen unterschiedlichster Art ist die Wellpappe. Wellpappe besteht aus einer oder mehreren Lagen gewellten Papiers, das zwischen mehrere Lagen eines anderen Papiers oder Kartons verleimt ist. Am häufigsten wird die beidseitig gedeckte, sogenannte einwellige Wellpappe produziert (Abb. 1).



Abb. 1: Wellpappenstrukturen (5)

Die Anordnung Decke-Welle-Deckbahn bewirkt die charakteristischen Eigenschaften der Wellpappe, nämlich die relativ hohen Steifigkeiten und Festigkeiten bei gleichzeitig geringem Materialeinsatz. Somit kann Wellpappe als ein klassischer Leichtbauwerkstoff betrachtet werden. Hergestellt wird die Wellpappe auf Produktionsanlagen von 1,80 bis 3,30 m Breite, die bei einer Produktionsgeschwindigkeit von bis zu 400 m/min in einem kontinuierlichen Prozess Wellpappe produzieren. Um die Wellenform in das Papier zu bringen muss dieses zunächst erwärmt und bei Bedarf angefeuchtet werden. Anschließend wird es unter Druck- und Hitzeeinwirkung zwischen zwei geriffelte Walzen geführt und erhält dort die gewellte Form. Unmittelbar nach der Formgebung

wird die gewellte Papierbahn mit einer ebenen Papierbahn an den Wellenköpfen verleimt. Der beschriebene Produktionsprozess, der zur einseitigen Wellpappe führt, wird im sogenannten „Single Facer“ durchgeführt, der drei mit hohen Drücken gegeneinander gepresste, gekoppelte Walzen – zwei Riffelwalzen (MRW und ÄRW) und eine Anpresswalze (APW) – enthält (Abb. 2).

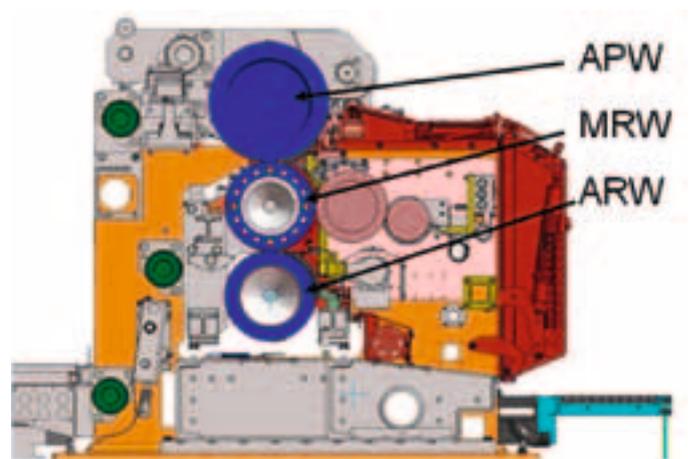


Abb. 2: „Single Facer“ zur Produktion einseitiger Wellpappe (1)

Infolge der mechanischen Kopplung kommt es bei bestimmten Produktionsgeschwindigkeiten zu kritischen Schwingungszuständen, die, wenn keine Gegenmaßnahmen ergriffen werden, zu einer Beeinträchtigung der Produktqualität führen können. (Abb. 3).

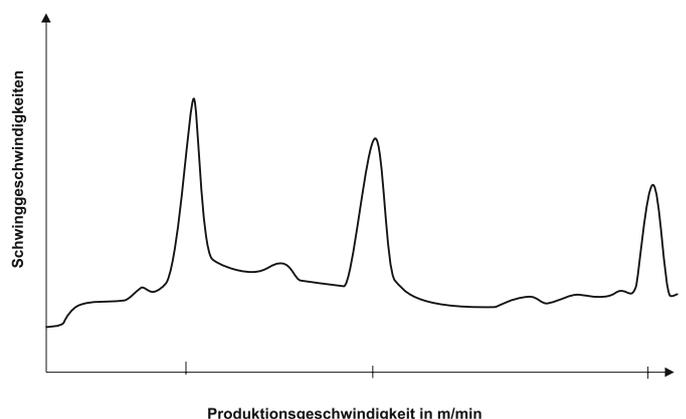


Abb. 3: Kritische Produktionsgeschwindigkeiten. Quelle: (1)

Die Schwingungsanregung erfolgt zum einen durch den Abwälzvorgang der beiden Riffelwalzen – der eine gewisse Ähnlichkeit zum Abwälzen zweier Zahnräder hat – und zum anderen durch den quasi stoßförmigen Kontakt der Anpreßwalze mit den Riffelköpfen der mittleren Riffelwalze. Entsprechend existieren für den Riffelwalzen-Riffelwalzen-Kontakt (Gl. 1.1) und für den Anpreßwalzen-Riffelwalzen-Kontakt (Gl. 1.2) von der Produktionsgeschwindigkeit v_P und der Riffelteilung T_z – hier die C-Flute mit 7,95 mm – abhängige Erregerfrequenzen

$$f_{RW} = 2 \cdot \frac{v_P}{T_z} \quad (1.1)$$

$$f_{PW} = 0,5 \cdot f_{RW} \quad (1.2)$$

Durch die von der Produktionsgeschwindigkeit beeinflussten Walzenkontakte werden somit Schwingungen im System angeregt. Liegen diese Schwingungen in Bereichen von Eigenfrequenzen des Systems führt dies zu erhöhten Schwinggeschwindigkeiten. Ferner kann es zu Kontaktschwingungsphänomenen – wie Walzenspringen – kommen. Die Untersuchungen zum Schwingungsverhalten werden in dieser Arbeit mit dem expliziten FE-Programm LS-Dyna simuliert.

2 GRUNDLAGEN UND MODELLAUFBAU

Die Bewegungsgleichung, die die kinetische Antwort eines Systems von finiten Elementen beschreibt, lautet:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = r \quad (2.1)$$

Es bezeichnen:

- C Dämpfungsmatrix
- K Steifigkeitsmatrix
- M Massenmatrix
- r Äußere Kräfte
- u, \dot{u}, \ddot{u} Verschiebungs-, Geschwindigkeits-, Beschleunigungsvektor

Die zeitabhängigen Terme $M\ddot{u}$ und $C\dot{u}$ werden bei quasistatischen Berechnungen vernachlässigt. Sollen Dämpfungs- und Trägheitskräfte berücksichtigt werden, wird eine Diskretisierung der Zeit nötig. Prinzipiell kann man sich vorstellen, dass für jedes Zeitintervall Δt das Kräftegleichgewicht auf-

gestellt wird, dass neben statischen nun auch Trägheits- und Dämpfungskräfte umfasst. Hierfür besteht in LS-Dyna die Möglichkeiten ein explizites Zeitintegrationsverfahren zu verwenden.

EXPLIZITE ZEITINTEGRATION

In LS-Dyna wird das zentrale Differenzenverfahren verwendet, um die Bewegungsgleichung zu lösen. Es wird von einem linearen Verlauf der Verschiebungen ausgegangen. Die Beschleunigung wird dann mit

$$\ddot{u}_t = \frac{1}{\Delta t} (\dot{u}_{t+\Delta t/2} - \dot{u}_{t-\Delta t/2}) \quad (2.2)$$

und die Geschwindigkeit mit

$$\dot{u}_{t+\Delta t/2} = \frac{1}{\Delta t} (u_{t+\Delta t} + u_t) \quad (2.3)$$

angesetzt. Die Bewegungsgleichung wird zum Zeitpunkt t aufgestellt:

$$M_t \ddot{u}_t + C_t \dot{u}_t + K_t u_t = r_t \quad (2.4)$$

Das Einsetzen von Geschwindigkeiten und Beschleunigungen führt auf

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2} M_t + \frac{1}{2\Delta t} C_t\right) u_{t+\Delta t} = r_t - \left(K_t - \frac{2}{\Delta t^2} M_t\right) u_t - \left(\frac{1}{\Delta t^2} M_t - \frac{1}{2\Delta t} C_t\right) u_{t-\Delta t} \quad (2.5)$$

Dies kann nach $u_{t+\Delta t}$ aufgelöst werden. Die Lösung von $u_{t+\Delta t}$ beruht demnach auf der Bewegungsgleichung zur Zeit t . Man hat ein Gleichgewicht zum Zeitpunkt t und ein Ungleichgewicht zum Zeitpunkt $t+\Delta t$. Beschleunigungen bringen das System wieder ins Gleichgewicht, daher wird das Integrationsverfahren als explizite Integrationsmethode bezeichnet. Eine Besonderheit dieses Verfahrens ist, dass die Verschiebungen zum Zeitpunkt $t+\Delta t$ bekannt sein müssen. Daher ist ein Startverfahren für den Zeitpunkt 0 erforderlich. Zum anderen steht die Steifigkeitsmatrix K_t auf der rechten Seite. Das reduziert den Berechnungsaufwand beträchtlich, da somit aufwändige Matrixinversionen entfallen.

Das Verfahren ist nur bedingt stabil, d.h., wenn der gewählte Zeitschritt zu groß ist, wachsen Fehler an, die beispiels-

weise durch Rundung im Rechner entstehen, und machen die Berechnung unbrauchbar. In LS-Dyna orientiert sich die Wahl des Zeitschritts an der höchsten Eigenfrequenz im Modell und die Zeitschrittweite berechnet sich aus dem COURANT-LEVY-Stabilitätskriterium:

$$\Delta t = 0,9 * \frac{\text{charakteristische Elementlänge}}{\text{Schallgeschwindigkeit im Element}} \quad (2.6)$$

Um das dynamische Verhalten des gekoppelten 3-Walzen-Systems simulieren zu können, ist eine Idealisierung notwendig, da eine komplette dreidimensionale Erfassung der Dynamik mit der heute zu Verfügung stehenden Software und den Rechnerleistungen nicht realisierbar ist. Für die Idealisierung wird ein quasi ebenes mechanisches Ersatzsystem erzeugt, das wesentliche Eigenschaften des Originalsystems – die ersten Biegeeigenfrequenzen der ungekoppelten und gekoppelten Walzen sowie den Kontakt zwischen den Walzen angenähert beschreiben kann. Hingegen werden z. B. Ovalisierungsschwingungen der Walzen nicht erfasst.

Folgende Annahmen werden getroffen:

- Die Verformungen der Walzenquerschnitte im Vergleich zu den Durchbiegungen und der Bewegung der Walzen in ihren Lagern sind gering. Deswegen können die Querschnitte als starr angenommen werden.
- Für die Betrachtung des Schwingungsverhaltens wird der Einfluss des Papiers lediglich in den Kontakteinstellungen der Walzen berücksichtigt. In der Simulation werden sichtbare Penetrationen zugelassen, was die Papierkompression repräsentieren soll. Ebenso werden die komplexen Vorgänge im Preßnip, wie Entwässerungsvorgänge und Temperatureinflüsse, nicht berücksichtigt.
- Die Rotationsachsen der Walzen bleiben parallel.
- Die Kontaktfläche hat in Längsrichtung der Rotationsachse nur wenige Elementen, was zu einem quasi ebenen Modell führt. Schwingungen, die eine asymmetrische Schwingungsanregung über die Walzenlänge zur Folge haben, können deshalb mit dem Schwingungsmodell nicht beschrieben werden.
- Der Antrieb erfolgt über Reibkontakt über die mittlere Riffelwalze (MRW). Die Steifigkeit des Antriebs wird vernachlässigt.
- Die Walzenlagerungen werden mit linearen elastischen Federn mit jeweils unterschiedlichen Steifigkeiten beschrieben (Abb. 4).

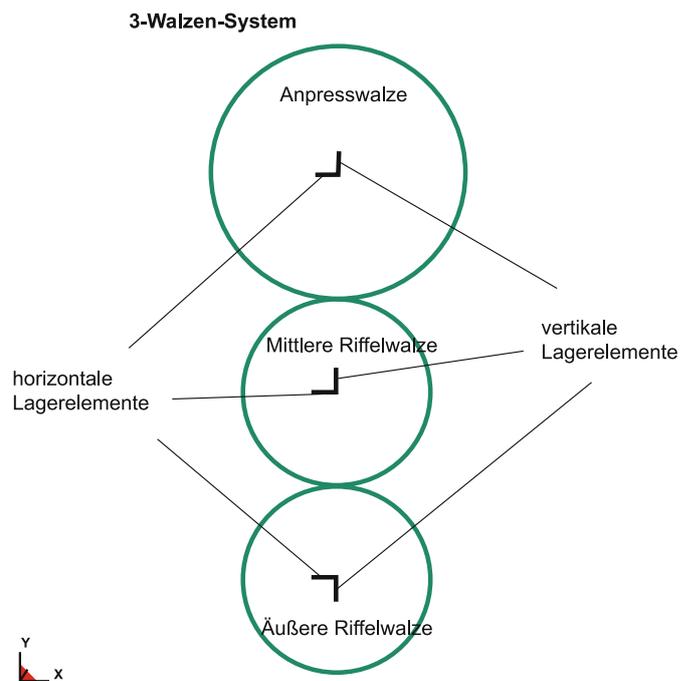


Abb. 4: Darstellung des Simulationsmodells mit LS-PrePost mit den Schalenelementen, die die Kontaktfläche erzeugen (grün) und den Feder-Dämpferelementen, die als Lager fungieren (grau)

3 MODELLPARAMETER

Lagersteifigkeit

Da ein einfacher Zusammenhang (Gl. 3.1) zwischen der 1. Eigenkreisfrequenz und der Steifigkeit besteht, kann für die Walzenlagerungen eine Ersatzfedersteifigkeit ermittelt werden, die auf der Modalanalyse der Walzengeometrien beruht, die in [1] durchgeführt wurde

$$c_{Ersatz} = \omega^2 * m \quad (3.1)$$

Damit wird die Biegesteifigkeit der Walze mit Hilfe der 1. Biegeeigenfrequenz und daraus die Ersatzfedersteifigkeit für das ebene mechanische Ersatzmodell bestimmt.

Normale Kontaktsteifigkeit

In [3] wird ein mechanisches Ersatzmodell für eine einfache Anordnung zweier Walzen beschrieben (Abb. 5).

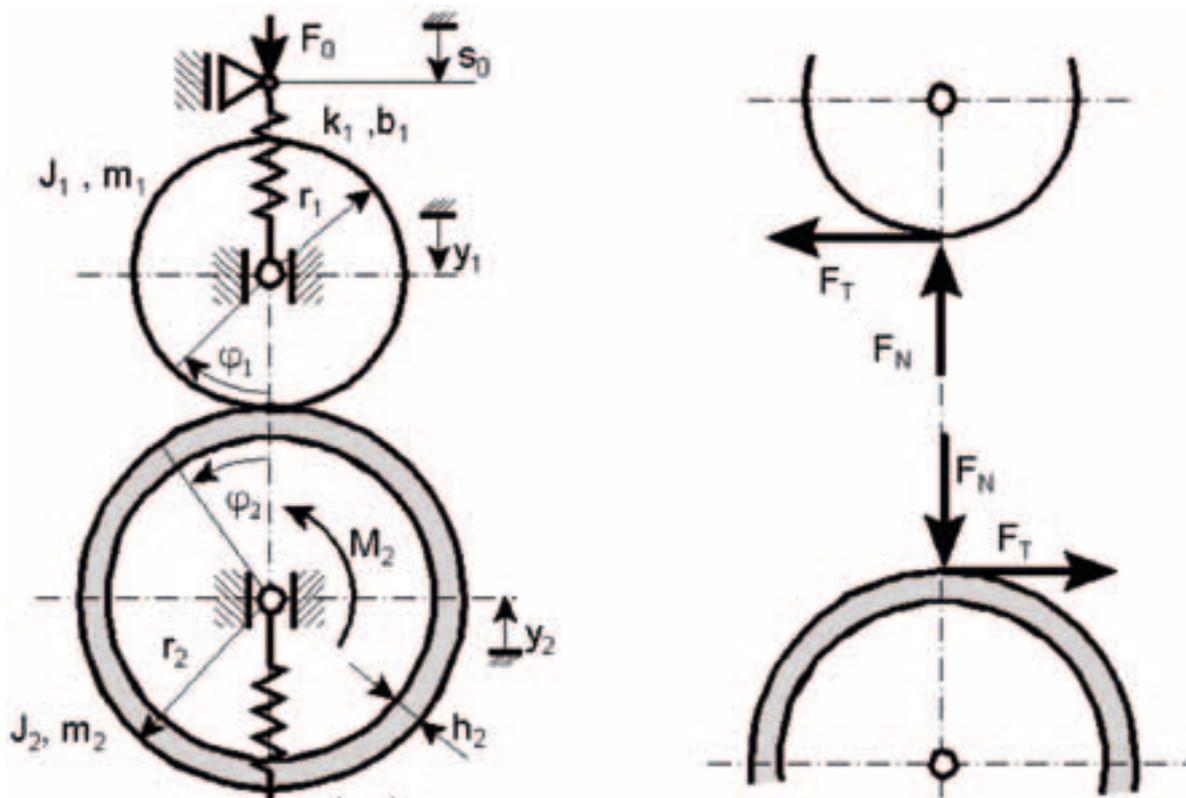


Abb. 5: Minimalmodell einer Anordnung zweier Walzen. Quelle: [3]

Die Eigenkreisfrequenz, mit der die Walzen miteinander schwingen, berechnet sich mit

$$\omega_I^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{k_1}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} \right) \quad (3.2)$$

sowie die Eigenkreisfrequenz, mit der die Walzen gegeneinander schwingen zu

$$\omega_{II}^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{k_1}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} \right) + k_N \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) \quad (3.3)$$

Es bezeichnen:

- k_1, k_2 Lagersteifigkeiten
- k_N Kontaktsteifigkeit
- m_1 Masse der Mittleren Walze
- m_2 Masse der Äußeren Walze
- ω_I, ω_{II} Eigenkreisfrequenzen

An diesem übersichtlichen Modell können die Parameter für den Kontakt unter Einbeziehung der Papierelastizität und der Penetration beim Penalty-Kontaktverfahren abgeschätzt werden.

4 VERNETZUNG

Aus [1] konnte ein modifiziertes APDL-Skript zur Erstellung und Vernetzung des Simulationsmodells übernommen werden. Das Skript erzeugt die parametrisierte Geometrie des 3-Walzen-Ersatzsystems, vernetzt diese mit Schalenelementen und definiert die Kontaktflächen. Verwendung fanden unterschiedliche Elementtypen:

- Discrete translational springer damper element: Zweiknoten-elemente mit einer linear elastischen Kennlinie. Diese einfachen Elemente repräsentieren die Lagerung der Walzen.
- BELYTSCHKO-TSAY Shell: In LS-Dyna das vom Rechenaufwand günstigste Schalenelement. Mit diesem Elementtyp wird die Oberfläche der Walzen abgebildet (Abb. 6).

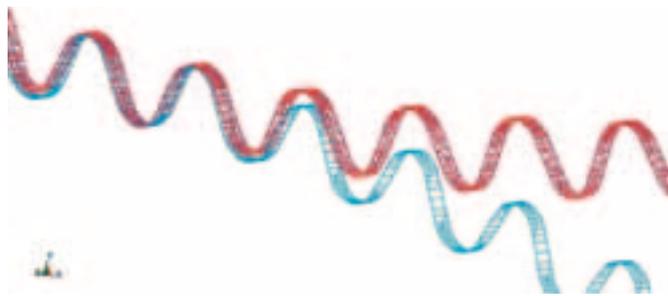


Abb. 6: Darstellung des Eingriffs der MRW (rot) und der ÄRW (blau). Sichtbar ist das FE-Netz, bestehend aus Schalenelementen.

5 RANDBEDINGUNGEN

Die Walzen werden im Modell quasi als Scheiben betrachtet, die von der angetriebenen mittleren Riffelwalze (MRW) ausgehend bewegt werden. Dabei rotiert die MRW mit einer konstanten Winkelbeschleunigung, die Anpresswalze (APW) wird über Reibungsschluß zur MRW angetrieben und die äußere Riffelwalze (ÄRW) über Formschluss, der sich durch die Riffelung ergibt, angetrieben.

6 ERGEBNISSE

Eine Vielzahl von Parametern sind für die Simulation in LS-Dyna einzustellen. Da es bei vielen dieser Parameter keine Literaturangaben oder Erfahrungswerte gibt, empfiehlt es sich zumindest die Auswirkung einer Variation der gewählten Parameter abzuschätzen.

Lagersteifigkeit

Da es sich um einen der wichtigsten Einstellparameter handelt, wird untersucht, wie sich unterschiedliche Lagersteifigkeiten auf das Schwingungsverhalten auswirken. Um diesen Einfluss sehen zu können wird ein Bereich erhöhter Schwingungsgeschwindigkeiten betrachtet. Hier wird der Einfluss der unterschiedlichen Lagersteifigkeiten am deutlichsten. Variiert werden die Lagersteifigkeiten an der APW und ÄRW. Die Lagersteifigkeit an der MRW wird nicht variiert, da das System von den außen liegenden Walzen dominiert wird.

In Abb. 7 ist zu sehen, was geschieht, wenn die Lagersteifigkeit an der ÄRW erhöht bzw. verringert wird. Die Schwingungsgeschwindigkeiten verhalten sich proportional zu der Lagersteifigkeit. Deutlich zu sehen ist auch, dass bei einer verringerten Lagersteifigkeit der Anstieg der Schwing-

geschwindigkeit früher eintritt. In der Frequenzdarstellung (Abb. 8) ist dies deutlicher ersichtlich. Der Resonanzpeak verschiebt sich für die höhere Steifigkeit zu höheren Frequenzen und umgekehrt.

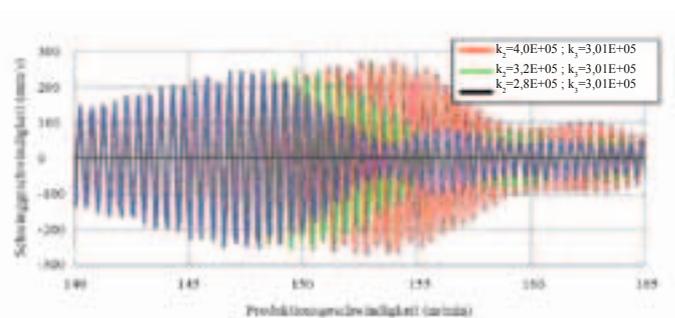


Abb. 7: Schwingungsgeschwindigkeit der APW bei Variation der Lagersteifigkeit an der ÄRW

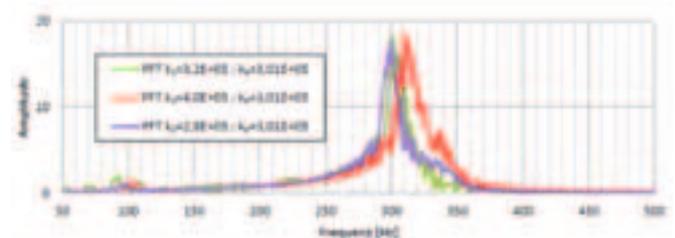


Abb. 8: Fourier transformierte der Schwingungsgeschwindigkeit der APW

Normale Kontaktsteifigkeit

Im Rahmen dieser Untersuchungen wird der Sliding Interface Kontakt von LS-Dyna verwendet. Der Sliding Interface Kontakt ist die allgemeinste Form der Kontaktdefinition und behandelt beliebige Paarungen von starren und deformierbaren Kontaktpartnern. Die Kontaktbedingungen werden hier durch eine Penalty-Methode beschrieben, d.h., es werden Eindringungen ermittelt sowie zusätzliche Kräftepaare aufgebracht, die dann im folgenden Zeitschritt wirken. Die Energieneutralität dieser Methode ist bei genügend kleinem Zeitschritt gewährleistet.

Die normale Kontaktkraft berechnet sich über

$$F_N = k_N * g \tag{6.1}$$

mit der Kontaktsteifigkeit für Schalenelemente

$$k_N = slsfac * sf * K * A/d \tag{6.2}$$

Es bezeichnen:

- A Kontaktfläche
- d Diagonale der Kontaktfläche
- g Eindringtiefe
- K Kompressionsmodul
- k_N Kontaktsteifigkeit
- $s/sfac, sf$ Skalierungsfaktoren

In dem dargestellten Geschwindigkeitsbereich treten für die geringere Kontaktsteifigkeit höhere Schwinggeschwindigkeiten auf (Abb. 9). Im Frequenzspektrum (Abb. 10) ist die Auswirkung der Kontaktsteifigkeit auf einzelne signifikante Frequenzen dargestellt. Die Frequenzen, die verstärkt werden, sind weitgehend identisch. Allerdings unterscheiden sie sich erheblich in der Größenordnung der Verstärkung. Gut sichtbar ist dies bei ca. 125 Hz, wo eine deutliche Amplitudenerhöhung für die höhere Kontaktsteifigkeit erkennbar ist und dagegen bei 110 Hz für die kleinere Kontaktsteifigkeit

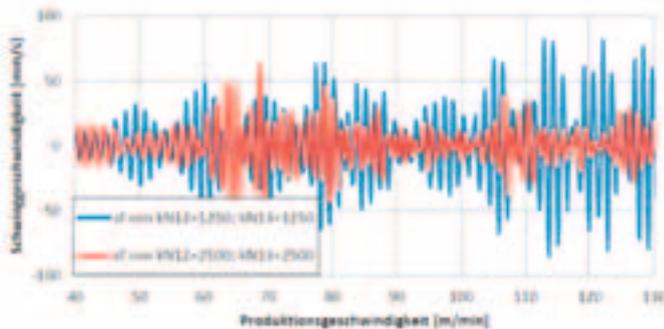


Abb. 9: Schwinggeschwindigkeit der APW bei unterschiedlichen Kontaktsteifigkeiten. sf = Skalierungsfaktor für die Kontaktsteifigkeit

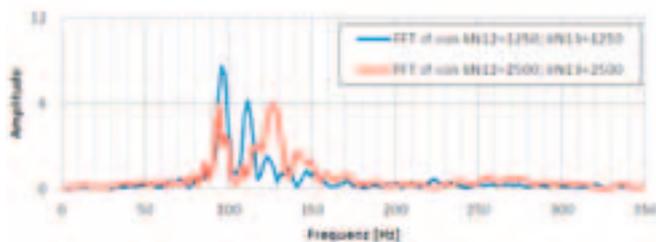


Abb. 10: 10: FFT der Schwinggeschwindigkeit der APW bei unterschiedlichen Kontaktsteifigkeiten

Netzfeinheit

Wesentlich für die Rechenzeit expliziter Simulationen ist nicht so sehr die Anzahl der Elemente als vielmehr ihre Größe, da die Rechenzeit durch den kleinsten Zeitschritt bestimmt wird, welcher sich nach Gl. 2.6 zu

$$\Delta t = 0,9 \frac{l_{min}}{c} \tag{6.3}$$

berechnet, mit der Schallgeschwindigkeit

$$c = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 - \nu^2)}} \tag{6.4}$$

Es bezeichnen:

- E E-Modul
- l_{min} Kürzeste Elementkantenlänge
- ρ Dichte
- ν Querkontraktionszahl

Die Vernetzung der Geometrie erfolgt in LS-Dyna automatisch. Über den APDL-Befehl *smartsizes* hat der Benutzer allerdings die Möglichkeit, die Feinheit der Vernetzung zu beeinflussen. In Abb. 11 wird deutlich, welchen Einfluss die Vernetzung auf die Schwingungscharakteristik hat. Eine zu feine Vernetzung kann dazu führen, dass die Ergebnisse zu weniger „glatten“ Kurven führen; die Rechnung wird numerisch instabil. Es ist daher insgesamt sinnvoller, zu Gunsten von eindeutigeren Ergebnissen und geringer Rechenzeit, ein gröberes Netz zu wählen, das allerdings das Stabilitätskriterium (6.3) erfüllen muss.

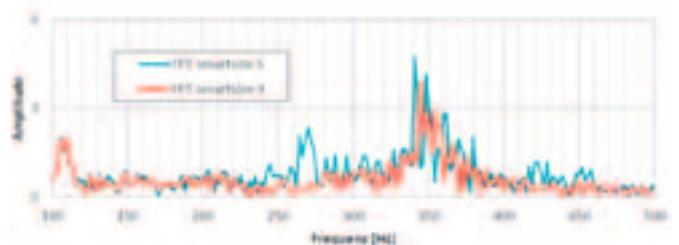


Abb. 11: FFT der Schwinggeschwindigkeiten bei unterschiedlicher Versatzeinstellung

Walzenversatz

Ein signifikanter Einstellparameter für das 3-Walzen-System ist der Versatz der 3 Walzen gegeneinander. Dies ist auch am gebauten „Single Facer“ die gängige Praxis, um die

Schwingungsgeschwindigkeiten in den kritischen Bereichen zu reduzieren. In der Simulation wurden exemplarisch drei Versatzeinstellungen untersucht. Versetzt wurde nur die Anpresswalze. Die Ergebnisse sind in Abb. 12 dargestellt.

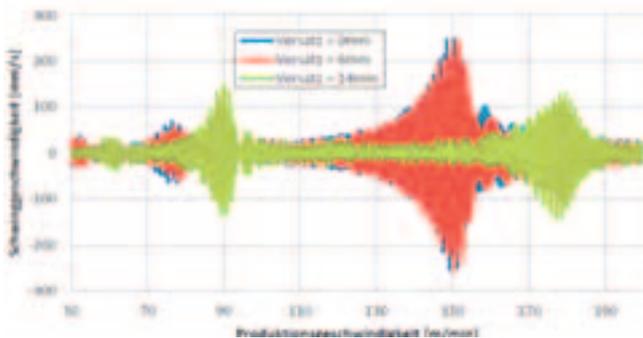


Abb. 12: Untersuchung der APW-Versatzeinstellung

Bei zunehmendem Versatz sinken die maximalen Schwingungsgeschwindigkeiten und die Maxima verschieben sich in den Bereich höhere Produktionsgeschwindigkeiten. Dies wird auch im Frequenzspektrum (Abb. 13) ersichtlich. Die Maxima im Frequenzspektrum korrelieren mit der Preßwalzenerregerfrequenz nach Gl. 1.2. In Abb. 12 ist die Erhöhung der Schwingungsamplitude bei 85 m/min allerdings durch die Riffeingriffsfrequenz nach Gl. 1.1 zu erklären.

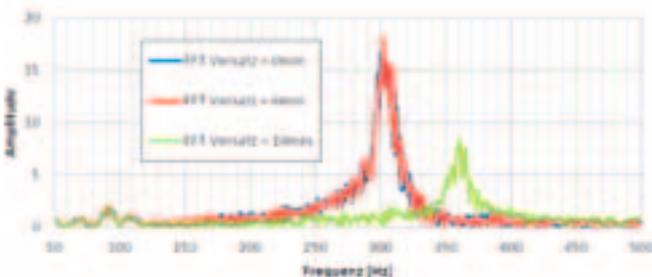


Abb. 13: Fourier transformierte der Schwingungsgeschwindigkeiten von Abb. 12

Massen- und steifigkeitsabhängige Dämpfungsparameter

In LS-Dyna setzt sich die Dämpfung allgemein aus α der masseproportionalen und β der steifigkeitsproportionalen Dämpfungskonstantengemäß Gl. 6.5 zusammen.

$$c = \alpha * M + \beta * K \tag{6.5}$$

Der masseabhängige Dämpfungsparameter wirkt global auf Knoten von verformbaren Körpern und auf die Massen-

punkte M von Starrkörpern. Der β -Parameter wirkt auf die Steifigkeitsmatrix K und dämpft höhere Frequenzen. Beim direkten Vergleich der masseabhängig gedämpften mit den ungedämpften Schwingungsgeschwindigkeiten wird der Einfluss der Dämpfung deutlich (Abb. 14). Der Einfluss von β zeigt ebenfalls den erwarteten Effekt. Bei niedrigen Produktionsgeschwindigkeiten, d.h., niedrigen Erregerfrequenzen, unterscheidet sich die ungedämpfte Simulation kaum von der gedämpften. Deutlich zu sehen ist, dass die gedämpfte Simulation bei höheren Produktionsgeschwindigkeiten also auch höheren Erregerfrequenzen kleinere Schwingungsgeschwindigkeiten liefert als die ungedämpfte (Abb. 15).

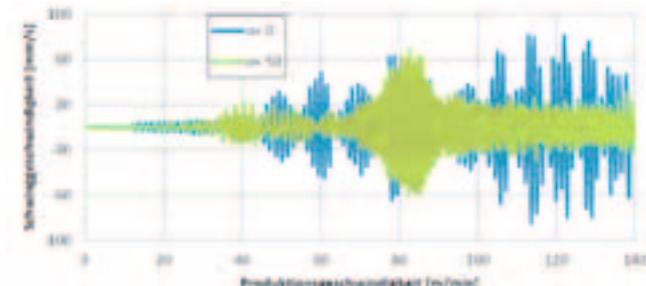


Abb. 14: Masseabhängig gedämpfte und ungedämpfte Schwingung

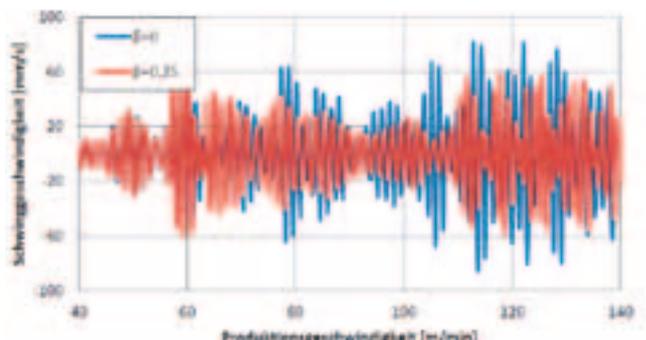


Abb. 15: Steifigkeitsabhängig gedämpfte und ungedämpfte Schwingung

7 VERGLEICH MIT ADAMS UND MESSERGEBNISSEN

ADAMS

In den Simulationen mit LS-Dyna und ADAMS wurde das gleiche geometrische Modell verwendet um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen. In beiden Fällen wurde in der gleichen Zeit auf dieselbe Produktionsgeschwindigkeit konstant beschleunigt. Bei der Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse sind die starken qualitativen Abweichun-

gen augenfällig (Abb. 16). Zunächst soll hier aber auf die qualitative Ähnlichkeit der Schwingungscharakteristik eingegangen werden. In beiden Simulationen sind zwei Bereiche erhöhter Schwinggeschwindigkeiten deutlich erkennbar: Für die ADAMS-Simulation bei ca. 65 und 140 m/min und für LS-Dyna bei ca. 90 und 150 m/min. Auch sind die Schwinggeschwindigkeiten zumindest von der Größenordnung vergleichbar.

Die Hauptursache für die Unterschiede im Ergebnis der beiden Simulationen liegt, neben den unterschiedlichen numerischen Verfahren zum Lösen der Bewegungsdiffe-

Dabei entspricht in ADAMS k der Kontaktsteifigkeit und c_{max} der maximalen Dämpfung. Die Step-Funktion kann je nach Abstand q zwischen den beiden Kontaktkörpern Werte zwischen Eins und Null annehmen [2]. Diese Unterschiede bei der Beschreibung von Kontaktsteifigkeit und -dämpfung erklären auch die insgesamt höheren Schwingungsausschläge bei der LS-Dyna Simulation im Vergleich zu der ADAMS-Simulation.

Messung

Auf Basis der von Fa. BHS Corrugated GmbH durchgeführten Schwingungsmessungen am „Single Facer“ kann eine Gegenüberstellung von Simulations- und Messergebnissen durchgeführt werden. Die Schwinggeschwindigkeiten von Simulation und Messung stimmen in Teilbereichen der Produktionsgeschwindigkeit qualitativ gut überein (Abb. 17).

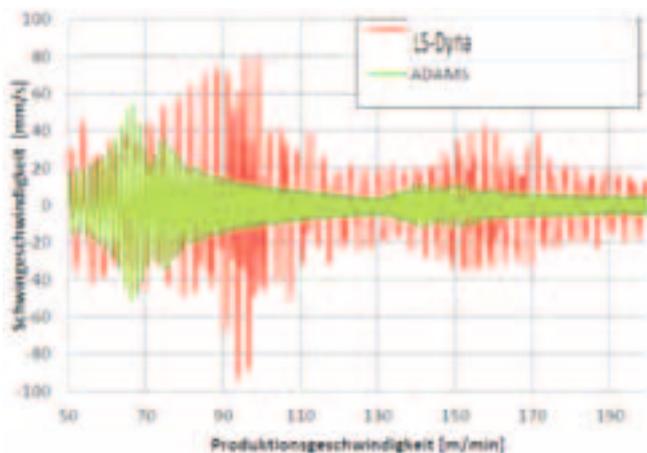


Abb. 16: Gegenüberstellung der mit LS-Dyna und ADAMS simulierten Schwinggeschwindigkeiten

renzialgleichungen, wohl primär in den unterschiedlichen Beschreibungen bei den Walzenkontakten der beiden Softwaresysteme. Die Ergebnisse der Simulationen wird durch die Berechnung des Kontaktes dominiert. ADAMS geht von einer konstanten Kontaktsteifigkeit aus, die direkt im Programm eingestellt wird (Gl. 6.6). In LS-Dyna wird die Kontaktsteifigkeit (Gl. 6.2) in jedem Zeitschritt neu berechnet und zwar abhängig von der Elastizität der Kontaktpartner und der in Kontakt stehenden Flächen, d.h., die Kontaktsteifigkeit wird mit zunehmender Kontaktfläche größer. Damit ergibt sich eine zusätzliche Nichtlinearität und insgesamt eine größere Kontaktsteifigkeit. Ferner wird in ADAMS auch die Kontaktdämpfung im Unterschied zu LS-Dyna (siehe auch Gl. 6.1 und 6.2) gemäß Gl. 6.6 zur Berechnung der Kontaktkraft berücksichtigt:

$$(6.6)$$

$$q \geq q_1: F = 0$$

$$\text{if } q \leq q_1: F = k(q_1 - q)^e - c_{max} \cdot \dot{q} \cdot \text{step}(q, q_1 - d, 1, q_1, 0).$$

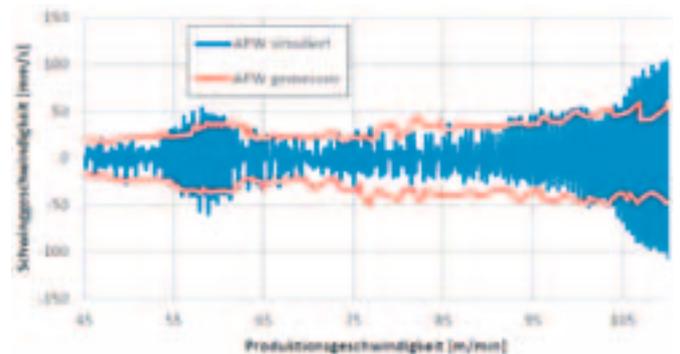


Abb. 17: Vergleich Messung und Simulation der Schwinggeschwindigkeit der APW

Grundlegende Einstellparameter wie z. B. der Walzenversatz führen sowohl bei der Simulation als auch bei der vermessenen realen Maschine zu einer signifikanten Einflußnahme auf das Schwingungsverhalten. Der Einfluß der Dämpfung, der bei der Wellpappenproduktion durch die Papiergrammatur eine wesentliche Wirkung hat, kann durch die in LS-Dyna bzw. ADAMS vorhandenen Dämpfungsmodelle in die Simulation qualitativ erfasst werden.

Insgesamt scheint das Modell geeignet, das Schwingungsverhalten abzubilden. Um eine abschließende Sicherheit über die Zulässigkeit des Modells zu gewinnen sind weitergehende Untersuchungen notwendig.

Prof. Dr.-Ing. Claus Schliekmann

Tel.: 0941 943-5182

Fax: 0941 943-1428

claus.schliekmann@hs-regensburg.de

8 ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Die Dynamik des 3-Walzen-Systems wurde im Modell durch drei Massen beschrieben, die rotieren können und jeweils zwei translatorische Freiheitsgrade besitzen. Deren diskrete Massen-, Massenträgheitsmomente, Feder- und Dämpfungseigenschaften stellen die relevanten Größen des Systems dar. Die elastische Eigenschaft der Kontaktschicht zwischen den als starr angenommenen Walzenkörpern, in Realität die Wellpappe, wurde mit einem Sliding Interface Kontakt und dem Penalty-Verfahren abgebildet. Die parameterabhängige Anregung wurde durch die Diskretisierung der Riffelung erreicht.

Die Ergebnisse waren u. a. die vertikalen Schwinggeschwindigkeiten der drei Walzenmittelpunkte. Die Untersuchungen wurden sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich durchgeführt. Der Einfluss der Simulationsparameter wurde untersucht und mit Blick auf die Schwingungscharakteristik beschrieben. Es zeigt sich, dass bei einem Versatz der APW die Schwinggeschwindigkeiten signifikant beeinflusst werden. Dies wurde auch in anderen Arbeiten zu diesem Thema beschrieben [2]. Allgemein zeigt sich für unterschiedliche Parametereinstellungen stark voneinander abweichendes Verhalten des Modells. Dies wurde dokumentiert. Die Beurteilung der Güte einzelner Parameterwerte erfolgt

beispielsweise für die Kontaktsteifigkeit über ein reduziertes Walzenmodell, welches gut mit einfachen analytischen Zusammenhängen verglichen werden kann. Weiterhin wurden die Simulationsergebnisse aus [2] und Messungen der Fa. BHS Corrugated GmbH zum Vergleich herangezogen.

9 LITERATUR

- [1] Käufel Dominik, *Untersuchung der Presswalzenversatz-einstellung für das 3-Walzen-System des QF-P/AF-P mit Hilfe der FEM-Kontaktsimulation*. HS Regensburg: s.n., 2009.
- [2] Sippl Christian, *Analyse und Optimierung des Schwingungsverhaltens gekoppelter 3-Walzen-Systeme mit Hilfe impliziter und expliziter Simulationsprogramme*. HS Regensburg: s.n., 2010.
- [3] Weiß Jörg, *Modellbildung und Simulation radial gekoppelter Rotoren*. Diss., TU Chemnitz: s.n., 2008.
- [4] N. N. LS-Dyna, *Keyword User's Manual*. Livermore: LSTC, 2007. Version 971.
- [5] N. N. [Online] Verband der Wellpappen-Industrie e.V, 2009. <http://www.resy-gmbh.online.de>.

SIMULATION ZUR DYNAMIK EINER LEPORELLOFALTMASCHINE

1 EINLEITUNG

Untersucht wird die Kinematik und Dynamik eines Konzeptentwurfs für eine Leporellofaltmaschine. Der Führungsprozess dieser Maschine (vgl. Abb. 1) besteht aus einer überlagerten Bewegung zwischen drei Antrieben. Ein Elektromotor mit konstanter Drehzahl treibt hierbei die Scheibe (1) an. Die Finger (3) befinden sich auf der Scheibe und werden separat von einem Servomotor angetrieben, damit die genaue Bahnkurve (2) abgefahren werden kann. Diese Kurve dient zur Faltung von Endlos-Wellpappe in einer Produktionsfabrik.

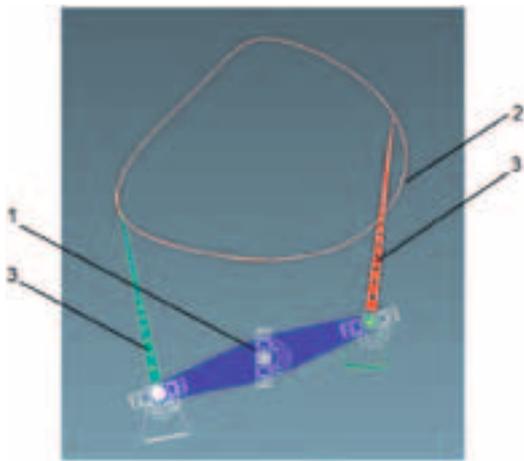


Abb. 1: Bahnkurve der Maschine

Eine vereinfachte Beschreibung der Bewegung mit analytischen Mitteln ist zwar möglich, aber sehr aufwendig und zeitintensiv. Bei diesen Problemen ist der Einsatz von computergestützter Mehrkörpersimulation (MKS) hilfreich. Bisher wurden in der Mehrkörpersimulationen nur starre Körper betrachtet. Elastische Körper wurden überwiegend mit der Finite-Elemente-Methode berechnet. Neue Entwicklungen und schnellere Prozessoren im Bereich MKS und FEM ermöglichen es, dass flexible und starre Körper in einer Baugruppe gemeinsam berechnet werden können. Allerdings ist die Rechenzeit bei der Berücksichtigung flexibler Körper deutlich höher als bei starren Körpern. Daher sollte man in einer Mehrkörpersimulationen nur flexible Bauteile verwenden, wenn dies zwingend erforderlich ist. Im vorliegenden Fall kann die Beschreibung mit starren Körpern erfolgen.

Das Finite-Elemente-Programm ANSYS bietet seit Version 11 auch die Möglichkeit MKS-Simulation durchzuführen.

Diese Analyseart ist in ANSYS neu und wird hier anhand der Starrkörpersimulation für die Leporellofaltmaschine eingesetzt. Dabei werden die Ergebnisse aus analytischen Berechnungen, ANSYS Workbench Mehrkörperdynamik (MKD), sowie mit dem MKS-Simulationsprogramm RecurDyn verglichen.

2 ANALYTISCHE BESCHREIBUNG MIT MATHCAD

Die Bahnkurve ist durch den Führungsprozess der zu faltenden Papierbahn vorgegeben. Sie wird mit den Winkeln φ_1 und φ_3 beschrieben (vgl. Abb. 2). Der Winkel φ_1 beschreibt hierbei die Drehbewegung der Scheibe (1) (vgl. Abb. 1). Der Drehwinkel φ_3 beschreibt die dazugehörige Stellung des Fingers (3). Die Ermittlung der Ortskurve erfolgt mit Mathcad auf der Basis der Werte von φ_3 und φ_1 . Mit einer Regressionsfunktion kann ein Polynom aus den Tabellenwerten erzeugt werden. Dabei ermittelt Mathcad den funktionalen Zusammenhang aus den Vorgabewerten φ_3 und φ_1 .

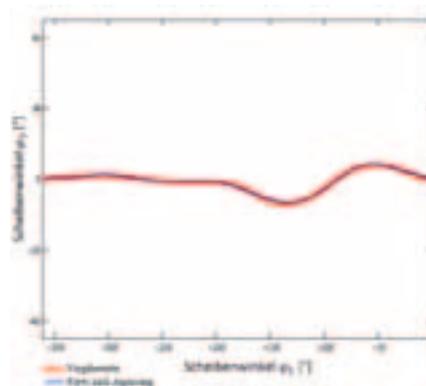


Abb. 2: Polynomregression aus Mathcad

Es entsteht eine Funktion $\varphi_3(\varphi_1)$, die durch ein Polynom 8. Grades mit einer Genauigkeit von 99 % an die Ursprungswerte angenähert wird. Es kann differenziert, integriert werden und ist stetig. Außerdem werden Polynome höherer Ordnung in der Antriebstechnik gerne verwendet, da sie sich in ihren Ableitungen Geschwindigkeits- und Beschleunigungsoptimal verhalten und bestmögliche Ruckwerte aufweisen. Bei der Berechnung von Geschwindigkeit und Beschleunigung ist zu beachten, dass die Scheibe mit einer konstanten Winkelgeschwindigkeit dreht. Die Finger bewegen sich relativ dazu.

¹ BHS CORRUGATED

Mit der ermittelten Funktion

$$\varphi_3 = f(\varphi_1) \quad (2.1)$$

folgt durch die erste und zweite Ableitung von φ_3 nach φ_1 und unter Beachtung das φ_1 und φ_3 in Winkelgrad vorliegen

$$\varphi_3' = \frac{d\varphi_3}{d\varphi_1} \quad (2.2)$$

und

$$\varphi_3'' = \frac{d\varphi_3}{d\varphi_1} = \frac{d^2\varphi_3}{d\varphi_1^2} \quad (2.3)$$

Die Winkelgeschwindigkeit ω_3 berechnet sich mit der ersten Ableitung nach der Zeit t zu

$$\omega_3 = \frac{d\varphi_3}{dt} = \varphi_3' \quad (2.4)$$

Mit (2.2) und (2.4) folgt durch die Kettenregel

$$\omega_3 = \frac{d\varphi_3}{d\varphi_1} \cdot \frac{d\varphi_1}{dt} \quad (2.5)$$

wobei die Winkelgeschwindigkeit der Scheibe

$$\omega_1 = \frac{d\varphi_1}{dt} = const \quad (2.6)$$

ist. Somit ergibt sich für die Winkelgeschwindigkeit des Faltfingers

$$\omega_3 = \frac{d\varphi_3}{d\varphi_1} \cdot \omega_1 = \varphi_3' \cdot \omega_1 \quad (2.7)$$

Die Winkelbeschleunigung ε_3 berechnet sich nach der zweiten Ableitung nach der Zeit t zu

$$\varepsilon_3 = \frac{d^2\varphi_3}{dt^2} = \frac{d\omega_3}{dt} = \frac{d(\varphi_3' \cdot \omega_1)}{dt} \quad (2.8)$$

Mit der Produktregel folgt

$$\varepsilon_3 = \frac{d\varphi_3}{d\varphi_1} \cdot \omega_1 + \varphi_3' \cdot \frac{d\omega_1}{dt} \quad (2.9)$$

Mit (2.3) und (2.8) folgt durch die Kettenregel

$$\varepsilon_3 = \frac{d\varphi_3}{d\varphi_1} \cdot \frac{d\varphi_1}{dt} \cdot \omega_1 = \varphi_3'' \cdot \omega_1^2 \quad (2.10)$$

wobei sich bei der Winkelbeschleunigung ε_3 noch ein Korrekturterm von $\frac{180}{\pi}$ für die Umrechnung von Grad in Rad ergibt. Daraus lässt sich die Winkelbeschleunigung mit

$$\varepsilon_3 = \varphi_3'' \cdot \omega_1^2 \cdot \frac{180}{\pi} \quad (2.11)$$

berechnen. Mit diesen Gleichungen ist die Geschwindigkeit und Beschleunigung der Bahnkurve analytisch beschrieben. Im nächsten Schritt wird die Bewegung mit den Simulationsprogrammen ANSYS und RecurDyn simuliert und anschließend verglichen. Zunächst sollen allerdings die Grundgleichungen der Starrkörperdynamik erläutert werden. [1,2,3]

3 EINBLICK IN DIE GRUNDGLEICHUNGEN DES STARREN KÖRPER

An dieser Stelle werden nur die wichtigsten Grundgleichungen der Mehrkörpersimulation mit starren Körpern dargestellt. Ein starrer Körper ist ein System mit Massenpunkten, deren Abstände sich nicht ändern.

Der starre Körper ist mit Ortsvektor und Drehmatrix eindeutig beschrieben. Der Ortsvektor \underline{r}_{0S} gibt dabei die Lage des körperfesten Punktes S an. Die Drehmatrix \underline{A}_{0K} beschreibt dabei die momentane Richtung des körperfesten Koordinatensystems K gegenüber dem Ursprungssystem O . Verwendet das MKS-System hier Kardanwinkel, so setzt sich die Drehmatrix aus

$$\underline{A}_{0K} = \underline{A}_{01} \underline{A}_{12} \underline{A}_{2K} \quad (3.1)$$

zusammen, wobei die Drehmatrix durch die Elementardrehungen um x, y, z mit

$$\underline{A}_{01} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

$$\underline{A}_{01} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad (3.3)$$

$$\underline{A}_{01} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

beschrieben wird. Die Drehmatrix kann ebenfalls durch Eulerwinkel und Eulerparameter dargestellt werden. Jeder weitere Punkt P wird mit der Vektorkette

$$\underline{r}_{0P,0} = \underline{r}_{0S,0} + \underline{A}_{0K} \underline{r}_{SP,K} \quad (3.5)$$

festgelegt.

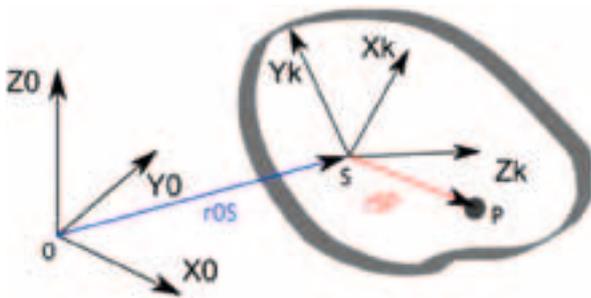


Abb. 3: Inertialsystem O und beliebiger Körper mit Körperfestem Koordinatensystem K

Mit dieser Beschreibung wird die Lage eines starren Körpers im Raum mit den Lagegrößen

$$\underline{y} = (x_s, y_s, z_s, \alpha_s, \beta_s, \gamma_s)^T \quad (3.6)$$

eindeutig festgelegt. Zur Beschreibung und Analyse bewegter Systeme ist ebenfalls der Geschwindigkeits- und Beschleunigungszustand erforderlich. Betrachtet man die Geschwindigkeit des Punktes P im O System, ergibt sich

$$\dot{\underline{r}}_{0P,0} = \dot{\underline{r}}_{0S,0} + \underline{A}_{0K} \underline{r}_{SP,K} + \underline{\dot{A}}_{0K} \underline{r}_{SP,K} \quad (3.7)$$

Durch mathematische Operationen und der Starrkörperbedingung kann wie in [4] gezeigt, die Gleichung (3.7) auf die Eulersche Geschwindigkeitsgleichung

$$\dot{\underline{r}}_{0P,0} = \dot{\underline{r}}_{0S,0} + \underline{\omega}_{0K,0} \times \underline{r}_{SP,K} \quad (3.8)$$

gebracht werden. Dadurch ist der Geschwindigkeitszustand eines starren Körpers mit der Geschwindigkeit eines körperfesten Punktes $\dot{\underline{r}}_{0S,0}$ und der Winkelgeschwindigkeit des starren Körpers $\underline{\omega}_{0K,0}$ eindeutig beschrieben. Mit (3.8) kann jede weitere Geschwindigkeit eines körperfesten Punktes ermittelt werden.

Beim starren Körper der Masse m_K ergibt sich der Impuls mit

$$\underline{p} = m_K \underline{v}_{K,0} \quad (3.9)$$

wobei $\underline{v}_{K,0}$ die Absolutgeschwindigkeit im O-System des Körperschwerpunktes S beschreibt. Das zweite Axiom von Newton beschreibt, dass eine Impulsänderung durch eine Kraft hervorgerufen wird.

$$\underline{F}_{K,0} = \frac{d\underline{p}_0}{dt} \quad (3.10)$$

Unter Voraussetzung eines abgeschlossenen Systems folgt der Impulssatz mit

$$\frac{d\underline{p}_0}{dt} = m_K \frac{d\underline{v}_{K,0}}{dt} = m_K \underline{a}_{K,0} = \underline{F}_{K,0} \quad (3.11)$$

wobei $\underline{a}_{K,0}$ die Absolutbeschleunigung des Körperschwerpunktes S ist.

Analog zum Impulssatz kann der Drallsatz mit dem Trägheitstensor \underline{J}_K und der Winkelgeschwindigkeit $\underline{\omega}_{S,K}$ mit

$$\underline{d} = \underline{J}_K \cdot \underline{\omega}_{S,K} \quad (3.12)$$

beschrieben werden. Im Gegensatz zum Impulssatz wird der Drallsatz im körperfesten Koordinatensystem K beschrieben, da der Trägheitstensor vom Koordinatensystem abhängig ist und am besten im körperfesten System beschrieben werden kann. Somit folgt der Drallsatz im körperfesten Koordinatensystem

$$\frac{d\underline{d}_K}{dt} = \underline{J}_K \cdot \frac{d\underline{\omega}_{S,K}}{dt} = \underline{M}_{S,K} \quad (3.13)$$

wobei die Änderung des Dralls ein Drehmoment $\underline{M}_{S,K}$ im körperfesten Koordinatensystem bewirkt.

Durch die Dynamik des starren Körpers ergeben sich weitere 6 Zustandsgrößen. Damit ergeben sich für die Dynamik mindestens 12 gewöhnliche Differentialgleichungen 1. Ordnung, die in der Zustandsgleichung

$$\underline{\dot{y}} = (\dot{x}_s \dot{y}_s \dot{z}_s \dot{\alpha}_s \dot{\beta}_s \dot{\gamma}_s \dot{v}_x \dot{v}_y \dot{v}_z \dot{\omega}_x \dot{\omega}_y \dot{\omega}_z)^T \quad (3.14)$$

zusammengefasst werden können. Ist der Trägheitstensor \underline{J}_K nur auf der Hauptdiagonalen besetzt, können die Winkelbeschleunigungen $\dot{\omega}_x$, $\dot{\omega}_y$ und $\dot{\omega}_z$ einfach ermittelt werden. Im ungünstigsten Fall ist der Trägheitstensor vollbesetzt. Die Differentialgleichungen in (3.14) sind nichtlinear und können daher meistens nur numerisch gelöst werden.

Ein System aus beliebig vielen starren Körpern kann mit den bisher entwickelten Berechnungsansätzen gelöst werden. Hierbei beeinflussen sich jedoch diese Körper nicht gegenseitig. Ein einfacher Ansatz wäre das Verbinden der Körper mit Feder-Dämpfersystemen um technische Lager und Verbindungselemente nachzubilden. Diese Vorgehensweise würde jedoch zu einem System von Differentialgleichungen

führen, welche aufwändig zu lösen sind und bei einem expliziten Solver zu sehr hohen Rechenzeiten führen. Eine elegantere Vorgehensweise ist die Definition von kinematischen Gelenken und Zwangsbedingungen. Dabei werden nach dem Lagrange-Formalismus der klassischen Mechanik die entstehenden Lagerkräfte berechnet. Ein mechanisches Gelenk schränkt die Bewegungsmöglichkeit ein und setzt das mechanische System einem bestimmten Zwang aus. Die dabei wirkenden Kräfte bezeichnet man als Zwangskräfte, alle anderen auf den Körper wirkenden Kräfte hingegen als eingepreiste Kräfte. Mit Hilfe der virtuellen Arbeit werden diese Zwangskräfte eliminiert. Dadurch entstehen zusätzliche Bindungsgleichungen zwischen den einzelnen Körpern. [4,5]

4 STARRKÖRPERSIMULATION MIT ANSYS

Der Faltprozess der Leporellofaltmaschine besteht aus einer überlagerten Bewegung, hervorgerufen durch drei verschiedene Antriebe. Eine einfache Beschreibung zur Ermittlung der erforderlichen Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Leistungen der Antriebe ist daher mit einfachen analytischen Rechnungen sehr aufwendig. Daher wird ein vereinfachtes Halbmodell, wie in Abb. 1 dargestellt, zur Mehrkörpersimulation in ANSYS verwendet.

Im Modell ist es wichtig, die Lagerungen und Randbedingungen richtig zu wählen. Durch die Lagerungen in Gelenken oder Kontaktflächen werden die Freiheitsgrade bestimmt. Im Raum kann ein Körper maximal 6 Freiheitsgrade besitzen. Die Anzahl der Freiheitsgrade F kann man mit der vereinfachten Grübler Gleichung

$$F = 6n - u \quad (4.1)$$

bestimmt werden. Dabei benötigt man die Anzahl der Körper n und die Anzahl der Gelenkfreiheiten u . Die Drehgelenke (1) werden mit je einem „revolute joint“ simuliert, welches fünf Freiheitsgrade sperrt (vgl. Abb. 4). Alle anderen Körper sind mit einem „fix joint“ miteinander fixiert, hierbei werden alle sechs Freiheitsgrade gesperrt. Konkret für die Leporellofaltmaschine ergibt sich somit

$$F = 6 \cdot 15 - (12 \cdot 6 + 3 \cdot 5) = 90 - 72 - 15 = 3 \quad (4.2)$$

Das System besitzt daher 3 Freiheitsgrade. Durch die Vorgabe von drei Antrieben in den Drehgelenken (1) (vgl. Abb. 4), werden diese drei Freiheitsgrade kompensiert. Somit besitzt

das System keinen Freiheitsgrad mehr. Dadurch treten keine Redundanzen auf und alle Gleichungen im MKS-System sind bestimmt.

Die Bewegung wird mithilfe diskreter Datenpunkte in den Drehgelenken (1) vorgegeben.

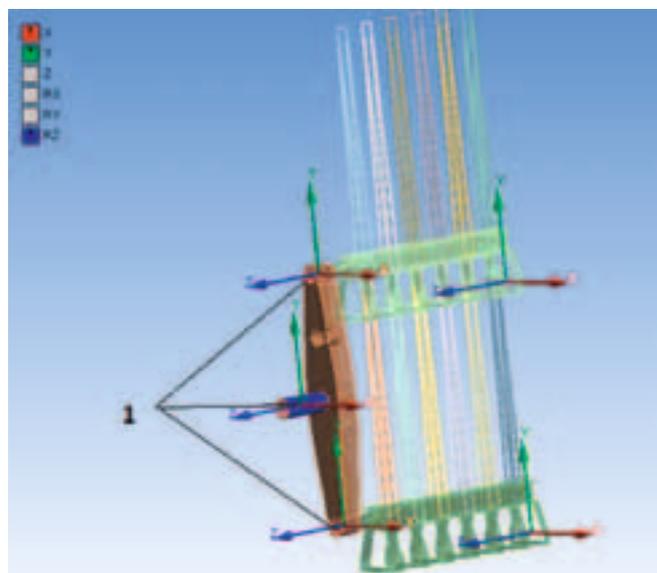


Abb. 4: Vereinfachtes Starrkörpermodell in ANSYS MKD

Die zugehörigen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen ermittelt ANSYS durch numerische Ableitungen selbst. Im Volumenmodell können Werkstoffeigenschaften für die Bauteile vergeben werden. Somit lassen sich auch Antriebsmomente und Lagerreaktionen in den Gelenken ermitteln. Um auch hier einen Vergleich zu bekommen, wird das Modell in den Mehrkörpersimulationsprogramm RecurDyn simuliert. [6,7,8,9]

5 SIMULATION MIT RECURDYN

Die Software RecurDyn wird von der Firma Functionbay vertrieben. RecurDyn hat anders als ANSYS seine Ursprünge in der MKS. Es wird überwiegend bei Bewegungsabläufen eingesetzt, um Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung sowie daraus resultierende Kräfte und Drehmomente zu errechnen. Es besitzt daher auch weitaus mehr Einstellmöglichkeiten als ANSYS MKD.

Um einen aussagekräftigen Vergleich zu bekommen, sind Aufbau und Randbedingungen des Modells identisch mit

der Simulation in ANSYS Mehrkörperdynamik (vgl. Abb. 5). Als Lagerungen werden ebenfalls drei Rotationsgelenke verwendet. Die Bewegungspunkte werden wiederum mithilfe von Datenpunkten in RecurDyn eingelesen. Hieraus wird ein Spline erzeugt. Geschwindigkeiten, Beschleunigungen sowie Drehmomente und Lagerreaktion berechnet RecurDyn selbstständig.

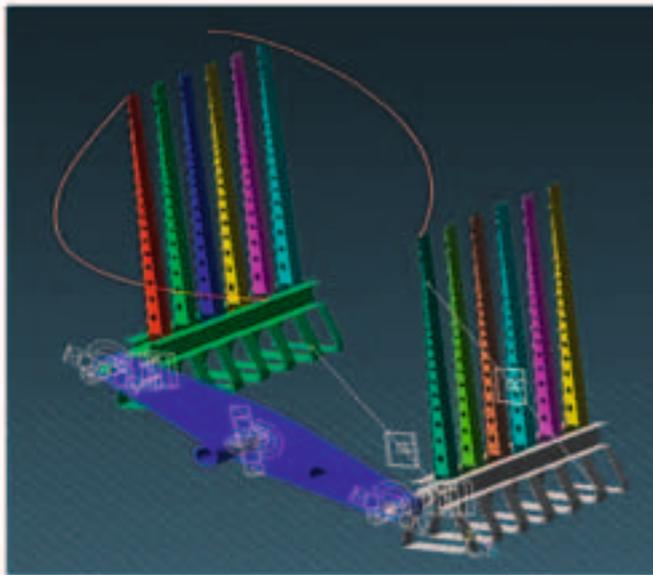


Abb. 5: Starrkörpermodell in RecurDyn MKS

6 VERGLEICH DER ERGEBNISSE

Für die drei Methoden werden die überlagerten Bewegungen des Fingers im Rotationsgelenk verglichen. Die hier ermittelten Daten sind:

- Winkelgeschwindigkeit (t)
- Winkelbeschleunigung (t)
- Antriebsmoment (t)
- Resultierende Lagerreaktion (t)

Die ermittelten Werte werden in Excel importiert und in einem Diagramm dargestellt. Die Winkelgeschwindigkeiten sind bei analytischen, sowie numerischen Berechnungsverfahren aus ANSYS und RecurDyn fast identisch (vgl. Abb. 6).

Lediglich Start- und Endwerte weichen geringfügig ab, was aber bei numerischen Berechnungen nicht ungewöhnlich ist und durch numerische Rundungsfehler zu erklären ist.

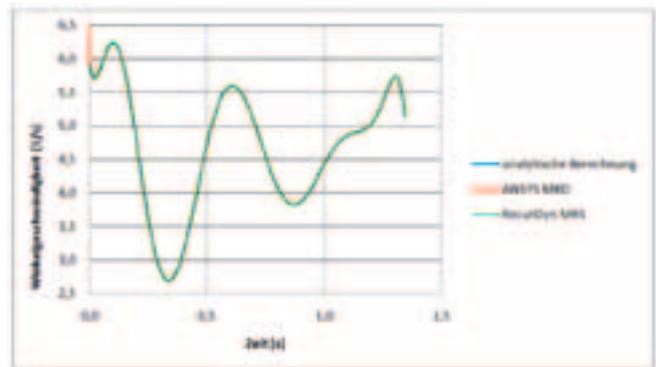


Abb. 6: Winkelgeschwindigkeit über der Zeit

Bei den Winkelbeschleunigungen decken sich die Ergebnisse aus der analytischen Berechnung mit den Ergebnissen aus ANSYS MKD. Die Lösung aus RecurDyn weist geringe Unstetigkeitsstellen auf. Auch eine höhere Auflösung der Zeitschritte brachte hier keine Verbesserung. Dies resultiert daraus, dass RecurDyn mit der Funktion „AKISPL“ einen Spline durch die vorgegebenen Werte legt. Diese lineare Interpolation der Datenpunkte zeigt bei höheren Ableitungen Unstetigkeiten (vgl. Abb. 7).

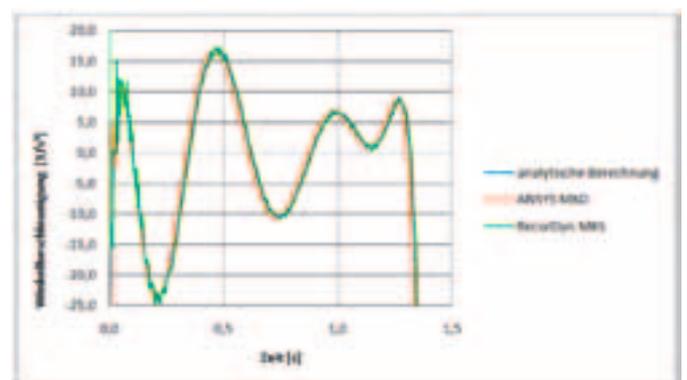


Abb. 7: Winkelbeschleunigung über der Zeit

Dies macht sich besonders bei der Winkelbeschleunigung bemerkbar. ANSYS hingegen interpoliert hier mit einem kubischen Spline. Dadurch wird der Übergang zwischen zwei Stützpunkten geglättet und die gesamte Kurve ist stetig. Die analytische Lösung ist ebenfalls stetig, da es sich hier um Ableitungen eines Polynoms handelt. Beim Antriebsmoment im Fingergelenk erhält man wiederum bei allen drei Verfahren identische Lösungen (vgl. Abb. 8).

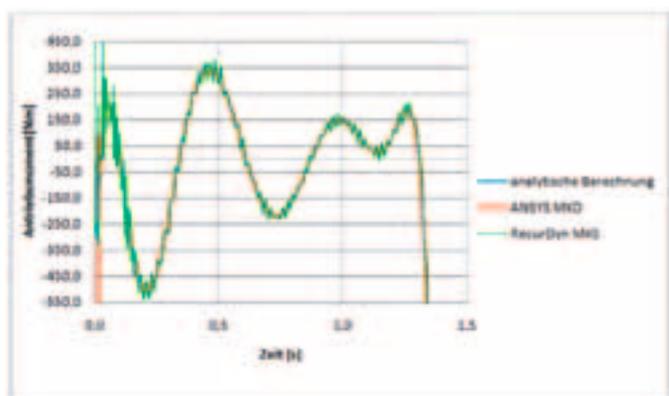


Abb. 8: Antriebsmoment über der Zeit

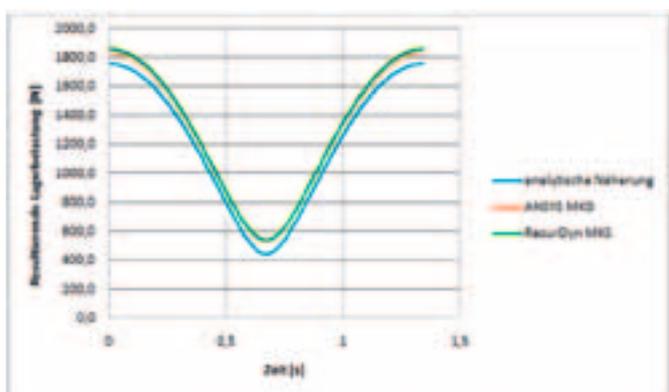


Abb. 9: Resultierende Lagerbelastung über der Zeit

Hierbei handelt es sich überwiegend um ein Drehmoment, das aus dem Produkt von Winkelbeschleunigung und Massenträgheit resultiert. Daher spiegeln sich die Unstetigkeitsstellen aus RecurDyn verstärkt wieder.

Auch bei den Lagerreaktionen zeigen sich ähnlich gute Ergebnisse (Abb. 9). Anders als beim Drehmoment wirken hier überwiegend Massenkräfte. Winkelbeschleunigungen spielen daher eine untergeordnete Rolle. Da sich hier der Massenschwerpunkt des Fingers ständig verlagert, kann eine analytische Berechnung nur angenähert werden. Trotzdem ist auch hier nur eine geringe Abweichung zu den numerischen Lösungen erkennbar.

7 FAZIT

In der Version 11 von ANSYS ist die Integration von Starrkörpern gelungen. Analytische Berechnungen und Vergleichssimulationen mit dem Mehrkörpersimulationsprogramm RecurDyn zeigen identische Ergebnisse. Bei der Bedienung zeigen ANSYS und RecurDyn eine sehr benutzerfreundliche Bedienoberfläche. Allerdings ist der Funktionsumfang bei ANSYS MKD in Version 11 noch sehr eingeschränkt. Es lassen sich z.B. keine Kräfte am Modell antragen. Auch die Auswahl an Gelenken zum Erzeugen von Verbindungen zwischen den einzelnen Körpern ist begrenzt. Kontaktdefinitionen zwischen Körpern sind noch nicht möglich. Hier wurde allerdings Abhilfe geschaffen: In ANSYS MKD Version 12.1 und 13 finden sich weitere neue Funktionen wie Kontakte, Kräfte, Feder- und Dämpferelemente. Dennoch besitzt RecurDyn hier eine weitaus größere Auswahl an Funktionen und Einstellungen. Flexible Körper können in beiden Simulationsprogrammen mit eingebunden werden. [7,9]

Prof. Dr.-Ing. Claus Schliekmann

Tel.: 0941 943-5182

Fax: 0941 943-1428

claus.schliekmann@hs-regensburg.de

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass eine Realisierung des Konzeptentwurfs aus maschinendynamischer Sicht möglich ist. Weitere Untersuchungen zur Interaktion der Faltfinger mit der Papierbahn müssen durchgeführt werden, um die Brauchbarkeit dieses Konzepts zur Leporellofaltung sicher zu stellen.

8 LITERATUR

- [1] Papula Lothar, *Mathematische Formelsammlung*, 8. Auflage, Vieweg Verlag Wiesbaden, 2003
- [2] Kuchling Horst, *Taschenbuch der Physik*, Carl Hanser Verlag München, 2007
- [3] Trölb Josef, *Angewandte Mathematik mit Mathcad Lehr- und Arbeitsbuch*, Band 1 Einführung in Mathcad, Springer Verlag Wien, 2005
- [4] Rill Georg und Schaeffer Thomas, *Grundlagen und Methodik der Mehrkörpersimulation*, Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2010
- [5] Simon Philipp, *Entwicklung eines Softwarekonzepts zur Bewegungsanalyse und -synthese von Mehrkörpersystemen beliebiger Topologie mit Fokus auf Antriebsauslegung*, Hochschule Regensburg, Masterarbeit, Fakultät Maschinenbau, 2009
- [6] Scheitenberger Hubert, *Vorlesungsskript zur Getriebe-technik*, Hochschule Regensburg, Fakultät Maschinenbau, 2008
- [7] <http://www.cadfem.de> – Homepage der CADFEM GmbH, München [Sichtungsdatum 15.08.2009]
- [8] ANSYS INC.: *Dokumentation zu ANSYS Workbench 11*, 2007
- [9] CADFEM GmbH: *Rigid Dynamic Analysis with ANSYS Workbench*, 2008

Mit Energie

in die Zukunft



Sichere Energieversorgung und gutes Trinkwasser. 400 engagierte Mitarbeiter. Hohe technologische Kompetenz. Kundenorientierte, marktgerechte Strategien. Die REWAG: ein starkes Unternehmen.

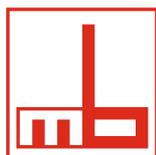
Immer für Sie nah!
REWAG
www.rewag.de



Tragende Ideen. Visionäre Baukunst.

Bau . Dienstleistung . Innovation . Betrieb
www.max-boegl.de

Hochbau . Schlüsselfertiges Bauen . Betonfertigteile
Stahl- und Anlagenbau . Brückenbau . Verkehrswegebau
Tunnelbau . Ver- und Entsorgung . Umwelttechnik
Fahrwegtechnologie



MAX BÖGL

Fortschritt baut man aus Ideen.

Postfach 11 20 · 92301 Neumarkt
Telefon +49 9181 909-0 · Telefax +49 9181 905061
info@max-boegl.de

KULTUR

GESELLSCHAFT

ÖKOLOGIE

TECHNIK



Für ein lebendiges Bayern.