

# Forschungsbericht

2015



Herausgegeben in Zusammenarbeit mit:



reine  
Produktivität

**Herding**  
FILTERTECHNIK



**FILTERANLAGEN // SINTERLAMELLENFILTER  
SYSTEMLÖSUNGEN // SICHERHEITSTECHNIK  
ZUBEHÖR // SERVICE**

**Herding<sup>®</sup> FILTERTECHNIK**

[herding.de](http://herding.de)

Herding GmbH Filtertechnik // August-Borsig-Str. 3 // 92224 Amberg // Deutschland  
Tel.: +49 9621 630-0 // Fax: +49 9621 630-120 // Mail: [info@herding.de](mailto:info@herding.de)

Seit Oktober 2013 trägt unsere Hochschule den Titel Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden. Im Verbund mit der OTH Regensburg sind wir mit dem Prädikat „Technische Hochschule“ in der Landschaft der bayerischen Hochschulen für angewandte Wissenschaften ausgezeichnet und aufgewertet worden.

Fachliche Breite des Fächerspektrums, Leistungsfähigkeit in den technischen Fächern, nationale und internationale Sichtbarkeit, Kooperationen mit anderen Hochschulen und Wissenschaftseinrichtungen, Zusammenarbeit mit der Wirtschaft, Drittmittelstärke, das waren die Kriterien, die im Wettbewerb um diesen Titel den Ausschlag gegeben haben, und mit denen wir überzeugen konnten.

Vor 20 Jahren als Doppelstandort gegründet, war und ist Bildungspolitik, begleitet von Regional- und Strukturpolitik, das Ziel der OTH Amberg-Weiden. Es sollten von Beginn an Chancenunterschiede bei der Erreichung eines Hochschulabschlusses abgebaut werden, verbunden mit der Intention, der Wirtschaft hoch qualifizierten Nachwuchs anzubieten. Diese Ziele wurden mehr als erfüllt. Wir verzeichnen Dynamik in allen Parametern.

Das Ausbauziel unserer Hochschule betrug zunächst 1.500 Studierende, aktuell sind an der OTH Amberg-Weiden 3.500 Studentinnen und Studenten eingeschrieben. Dies bedeutet ein Plus von mehr als 130 % seit 2003. Und es haben mittlerweile über 4.200 Absolventinnen und Absolventen erfolgreich in ihr Berufsleben gewechselt. Der Beitrag für die regionale Entwicklung wird in der Verbleibquote deutlich: 80 Prozent der Alumni sind bei Arbeitgebern in der Hochschulregion beschäftigt, sie arbeiten und wohnen mit ihren Familien in der Oberpfalz.

Seit 2012 ist unsere Hochschule personell stark gewachsen. Hiermit eng verbunden sind die zusätzlichen Stellen, die wir im Zuge der OTH-Forschungscluster und ihrer Umsetzung erhalten haben. Junge Forschungsassistentinnen und -assistenten unterstützen die Projektleiter

bei der Bearbeitung der anspruchsvollen Projekte einer gemeinsamen anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung im OTH-Verbund.

Und so sind aus Drittmitteln an der OTH Amberg-Weiden im Jahresdurchschnitt 30 Projektingenieurinnen und -ingenieure beschäftigt. Gerade in Zeiten des Fachkräftemangels und eines steigenden Bedarfs in den Unternehmen an qualifiziertem Nachwuchs etwa im MINT-Bereich bedeutet dies für die OTH Amberg-Weiden, die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in den Forschungsprojekten der Hochschule auch aus dem eigenen Nachwuchs zu rekrutieren.

Förderprogramme auf verschiedenen Ebenen ermöglichen es, unsere Kapazitäten weiter auszubauen. Hier ist ein weiterer Erfolg des OTH-Verbundes zu verbuchen: Im Rahmen des Bund-Länder-Wettbewerbs „Aufstieg durch Bildung: Offene Hochschulen“ haben wir im OTH-Verbund einen positiv beurteilten Antrag eingereicht. Im gemeinsamen Projekt „OTHmind“ werden wir ein modulares innovatives Netzwerk der Durchlässigkeit zwischen Hochschule und Wirtschaft aufbauen, das der Weiterqualifizierung in der Region dient. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt uns auf diesem Weg in den kommenden dreieinhalb Jahren mit einer Fördersumme von insgesamt 3,4 Millionen Euro.

Der Bayerische Ministerrat hat in seiner Sitzung am 5. August 2014 in Nürnberg den Nordbayernplan des Freistaates Bayern beschlossen. In den regional- und strukturpolitischen Initiativen zur Stärkung der ländlichen Räume in Nordbayern ist die Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden mit mehreren Projekten umfangreich vertreten.

Die Fördermittel aus dem Nordbayernplan der Bayerischen Staatsregierung sind für unsere Hochschule ein entscheidender Impuls, Projekte voranzubringen, die für die Hochschule und die Hochschulregion Oberpfalz von hoher Priorität und regionaler Tragweite sind. Die OTH

Amberg-Weiden wird nun – auch im Verbund mit der OTH Regensburg – gerade jene Kompetenzfelder und Initiativen stärken, die zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit der Oberpfalz und Ostbayerns ganz wesentlich beitragen. Dies betrifft Zukunftsbranchen wie die Energie- und Medizintechnik ebenso wie den Wissens- und Technologietransfer von der Hochschule in die Praxis und das Wirken in die Region über Innovative LernOrte.

Lernen, wo das Wissen lebt: Das Konzept der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden, keine Außenstellen zu gründen, sondern im engen Schulterschluss mit Partnern in der Hochschulregion Oberpfalz Innovative LernOrte (ILO) einzurichten, wird zum Erfolgsmodell. Im Laufe des Jahres 2014 wurden hierzu die Kooperationsvereinbarungen mit bedeutenden Unternehmen und Klöstern in der Hochschulregion unterzeichnet, verbunden mit der Installation der entsprechenden ILO-Schilder als deutliches Zeichen der engen Zusammenarbeit heute und in Zukunft.

Diese Zukunft wird gerade auch mit Blick auf den demografischen Wandel in unserer Region, den sich immer deutlicher abzeichnenden Fachkräftemangel auf allen Ebenen und die steigenden Qualifikationsanforderungen in der Wirtschaft durch Bildung und Wissen gewonnen. So verstehen wir gelebte Formen der Zusammenarbeit und eng gewobene Netzwerke im Sinne der Vision einer Wissensregion Oberpfalz.

Wir stehen in Ostbayern, in der Oberpfalz vor großen Herausforderungen. Eine boomende Wirtschaftsentwicklung und ein Arbeitsmarkt nahe der Vollbeschäftigung sind verbunden mit zusätzlichen Aufgaben von Hochschulen und ihrem Zusammenwirken mit der Praxis. Hierzu zählen auch neue Zielgruppen, die ich im berufs begleitenden Studium, in der Durchlässigkeit für beruflich Qualifizierte, in passgenauen Weiterbildungsangeboten, in Modulen einer offenen Hochschule für Berufstätige in ihrer Weiterqualifizierung und im dualen Studium sehe.

Mit einer solchen Strategie der Partnerschaften auf allen Ebenen steht der Schulterschluss auch über den Amberger und Weidener Technologie-Campus in der Verantwortung für die Zukunft eines Wirtschafts- und Bildungsraums Ostbayern und damit der Wissensregion Oberpfalz. Damit ist unsere enge Zusammenarbeit mit der Praxis auch ein Innovationsmotor der Region mit Blick auf ihre Zukunft und den weiteren Strukturwandel. Der OTH Technologie-Campus (ATC und WTC) hat eine Schlüsselrolle bei der Vernetzung von Wirtschaft und Wissenschaft, wir bauen unsere Stärken in der angewandten Forschung kontinuierlich aus.

Die OTH Amberg-Weiden wird für den Weg der Region in die Zukunft ein Erfolgsfaktor in ihrem bei Weitem noch nicht abgeschlossenen Strukturwandel sein. Wissen ist die Kompetenz der Zukunft. Daher werden wir noch mehr

als heute in der Oberpfalz, in Ostbayern, das gesamte Spektrum der Bildung und Ausbildung von der Grundschule bis zur Technischen Hochschule anbieten, verbunden mit einem attraktiven Weiterbildungspaket. Und wir tragen sicherlich zu einem positiven Image der Oberpfalz nach innen und außen bei, wenn wir ganz aktiv herausstellen: Die Oberpfalz bietet eine Vielzahl von Chancen!

Der Schwerpunkt bei der Realisierung des OTH Technologie-Campus war: Der Weidener Technologie-Campus (WTC) und der Amberger Technologie-Campus (ATC) sollen unsere Kompetenzen im Wissens- und Technologietransfer jeweils auf dem Hochschulcampus bündeln. Damit stärken wir nicht nur die Hochschulstandorte Weiden und Amberg – wir stärken die gesamte nördliche und mittlere Oberpfalz. Hochschule und Wirtschaft sowie die beteiligten Landkreise und Städte haben einander gefunden. Der Erfolg stellt sich immer da ein, wo Wissenschaft und Wirtschaft gemeinsam die traditionellen Stärken der Region bespielen. Unser gemeinsames Ziel war damit nicht die Gründung von Außenstellen in der Hochschulregion, sondern das Prinzip der kurzen Wege in unmittelbarer Anbindung an die Hochschule und ihre Infrastrukturen.

Ausschlaggebend waren zudem wirtschaftliche Vorteile, die sich aus der räumlichen und organisatorischen Konzentration von Kapazitäten ergeben. Gegenüber dezentralen Standorten sind mit dem Konzept der OTH Amberg-Weiden Ressourcen schonende und Ressourcen erhaltende Investitionen verbunden.

Wir wollten auf diese Weise den regionalen Innovationsmotor der OTH Amberg-Weiden deutlich stärken. Im OTH Technologie-Campus wird Forschung, Innovation und Entwicklung umgesetzt. Dieser Meilenstein ist in der Lage, An- und In-Institute, Wissenschaftler(innen), Unternehmer(innen) und Studierende zusammenzubringen, um ihre Kräfte und Ideen auch weiterhin zu bündeln.

Ergänzt wird dieses Angebot über den Wissens- und Technologietransfer in acht An- und In-Instituten, die Professoren gegründet haben und leiten:

- Institut für Angewandte Forschung (IAF)
- Automations Institut Amberg GmbH (aia)
- Institut für Energietechnik IfE GmbH
- Institut für Energieverfahrenstechnik und Fluidmechanik GmbH
- Institut für Handelsmanagement (BayTech IHM)
- Institut für industrielles Service-Management „Service4Industry“
- Institut für Nachhaltigkeit in Technik und Wirtschaft
- Institut für Statistik und quantitative Methoden (BayTech istqm)

Wir sehen die OTH Amberg-Weiden in 20 Jahren in einer Wissens- und Bildungsregion Oberpfalz und in ganz Ostbayern verankert. Wir werden auch in den kommenden Jahren die zentralen bildungs- und strukturpolitischen Herausforderungen in unseren Hochschulstädten und unserer Hochschulregion annehmen. Wir wollen ein Nukleus in der Bildungsregion sein, ein Wachstumspol, der nach innen und außen ausstrahlt. Die OTH Amberg-Weiden wird auch in Zukunft ein Erfolgsfaktor in der Amberger und Weidener Stadtentwicklung sein. Wissen ist die Kompetenz der Zukunft. Und wir werden mit Blick auf die demografischen Prozesse, den immer deutlicheren Fachkräftemangel und die hohen Qualifikationsanforderungen der Wirtschaft Lösungen angeboten haben.

Die kommenden 20 Jahre werden von der Realisierung des Konzepts der Lernenden Region, von durchlässigen Bildungsbiografien sowie von einer noch intensiveren Kooperation zwischen Hochschule, Kommune und Wirtschaft geprägt sein.

Bei der Gründung der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden – damals als Fachhochschule Amberg-Weiden – war nicht abzusehen, dass wir eine so dynamische Entwicklung nehmen würden, obwohl schon im Jahr 1994 und bei der folgenden Eröffnung des Lehr- und Studienbetriebs im Oktober 1995 von einem Jahrhundertereignis gesprochen wurde. Unsere dynamische Entwicklung in den letzten 20 Jahren ist ein deutlicher Beleg für den Auftrag der OTH Amberg-Weiden, Bildungs- und Strukturpolitik in der Hochschulregion Ostbayern zu verwirklichen.

Prof. Dr. Erich Bauer

Präsident der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden

Prof. Dr. Reiner Anselstetter

Vizepräsident der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden  
Wissenschaftlicher Leiter  
des Instituts für Angewandte Forschung

Ltd. RD Ludwig von Stern

Kanzler der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden  
1. Vorsitzender des Technologie-Campus  
an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden e.V.

Prof. Dr.-Ing. Markus Brautsch

Technologietransferbeauftragter  
der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden

# Preface

Since October 2013 our institution has held the title “Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden”. Together with the OTH Regensburg, we have been awarded the title “Technische Hochschule”. This award has enhanced our position among Bavarian Universities of Applied Sciences.

A wide range of subjects, high performance in technical subjects, national and international visibility, close cooperation with other universities and scientific institutions, close links to business and industry, a high volume of third-party funds – these were the decisive factors for our competitive success.

Educational policy accompanied by a regional and structural policy has always been – and continues to be – the OTH’s main objective since its inception on two campuses 20 years ago. From the beginning, the OTH has aimed to promote equal access to educational and professional opportunities while at the same time providing the industry with highly qualified graduates. These targets have been surpassed. We are currently witnessing a dynamic development in all parameters.

The expansion target of our university was an initial 1,500 students. Currently, the OTH enrolls 3,500 students. This is an increase of more than 130% since 2003. By now, more than 4,200 graduates have successfully started a professional career. The OTH’s contribution to the regional development manifests itself in the retention rate: 80% of the OTH’s alumni are employed by employers in the university region; they and their families choose to work and live in the Upper Palatinate.

Since 2012, the number of academic and administrative staff has grown considerably. This includes the additional jobs that have been created following the establishment of the OTH’s research clusters. Many young research assistants have been recruited to support the project managers in a number of challenging projects that are

part of the joint and application-oriented research and development within the OTH clusters.

Thus, a yearly average number of 30 project engineers employed at the OTH Amberg-Weiden was financed by third-party funds. In view of skills shortage and increasing demand for qualified professionals, e.g. in the so-called MINT- areas (mathematics, informatics, natural sciences and technology), the OTH Amberg-Weiden has to recruit the employees for its research projects from within its own graduates.

Support programmes at various levels enable us to expand our capacities. We have also been successful in submitting a positively judged application as part of the Federal Government-Länder Competition “Advancement through Education: Open Universities”. As part of the joint project “OTHmind” we will establish a modular innovative network of permeability between industry and academia to ensure further qualification opportunities in the region. The Bavarian State Ministry of Sciences, Research and the Arts (BMBF) has granted us funds in the amount of €3.4 m for the coming three years.

Bavaria's Council of Ministers approved and endorsed the Northern Bavaria Plan of the Free State of Bavaria at its meeting in Nuremberg on August 5, 2014. The OTH Amberg-Weiden is involved in the regional and structural initiatives for the enhancement of rural areas in Northern Bavaria with several projects.

The funds granted under the Northern Bavaria Plan of the Bavarian State Government have encouraged our university to promote projects that are of high priority and regional importance for the both the university and the academic region of the Upper Palatinate. The OTH Amberg-Weiden – in a joint effort with the OTH Regensburg – strives to strengthen specifically those areas of competence and initiatives that significantly contribute to securing the competitiveness of both the Upper Palatinate and Eastern Bavaria. This involves future

industries such as energy and medical engineering as well as the transfer of knowledge and technology from university to practical industrial applications.

Learning where knowledge lives: The OTH's concept for establishing innovative learning places (ILO) in the academic region of the Upper Palatinate in close cooperation with its partners – instead of setting up branch offices – has turned out to be a model for success. In the course of the year 2014, the respective cooperation agreements with important companies and monasteries of the region were signed, accompanied by the installation of ILO signs signaling our close cooperation.

In view of the demographical changes taking place in our region and in response to increasing skills shortages at all levels and the high qualification requirements in industry, our future can only be mastered with education and knowledge. We perceive these practical forms of cooperation and tightly-woven networks as a vision of the knowledge region in the Upper Palatinate.

We are currently facing tremendous challenges in Eastern Bavaria and in the Upper Palatinate. In view of the booming economic development and a labour market with almost full employment, our university is confronted with additional problems that involve the interrelation between universities and industrial practice. In this context, we have to attract new target groups by offering coop programmes, permeability for the professionally qualified, customized extension courses, as well as modules for the further qualification of the employed as part of the open university.

With this strategy of partnerships at all levels, the cooperation of the Technology Campuses in Amberg (ATC) and Weiden (WTC) contributes to the future of the economic and educational area of Eastern Bavaria and hence the knowledge region of the Upper Palatinate. Accordingly, our close cooperation with industry is a driving force for innovation in the region with regard to its further structural change. The OTH Technology Campuses play a decisive role in linking business and science. We are constantly strengthening our position in applied research.

The OTH Amberg-Weiden will pave the way for the region's future in view of the ongoing structural change, which is far from being completed yet. Knowledge is the competence of the future. That is why we are committed to fostering a whole range of educational and training programmes, from elementary school to technical university, supplemented by an attractive further education package. We will certainly contribute to the positive image of the Upper Palatinate by actively pointing out that the Upper Palatinate offers a multitude of opportunities.

When setting up the OTH Technology Campus, our intention was to bundle our competencies in both locations, the Weiden Technology Campus (WTC) and the Amberg Technology Campus (ATC). Thus, we are not only strengthening the university locations of Amberg and Weiden – we are strengthening the whole region in the northern and central Upper Palatinate. University and businesses as well as all the regions involved represent a perfect match. Success can only be realized when science and business together make use of the traditional strength of the region. Accordingly, our mutual aim was not to establish branch offices. The guiding principle was that of short distances in close vicinity to the university and its infrastructures.

Economic advantages resulting from the spatial and organizational concentration of capacities were also crucial. The concept of the OTH Amberg-Weiden ensures resource-saving and resource-preserving investments, as opposed to decentralized locations.

It was our intention to strengthen the regional innovative drive of the OTH Amberg-Weiden. The OTH Technology Campus aims to put research, innovation and development into practice. We have set a milestone by bringing associated institutes, researchers, entrepreneurs and students together in order to pool resources and ideas.

The following eight associated institutes founded by professors from the OTH complement the OTH's knowledge and technology transfer:

- Institute for Applied Research
- Automations Institute Amberg (aia)
- Institute for Energy Technology
- Institute for Energy Process Engineering and Fluid Mechanics
- Institute for Retail Management (BayTech IHM)
- Institute for Industrial Service Management „Service4Industry“
- Institute for Sustainability in Technology and Industry
- Institute for Statistics and Quantative Methods (BayTech istqm)

Our university is strongly rooted in the knowledge and education regions of the Upper Palatinate and Eastern Bavaria. We will take on the central challenges posed by structural and educational policy. We want to be a nucleus within this region, a pole of growth that radiates internally and externally. The OTH Amberg-Weiden is committed to remaining a success factor for the urban development in Amberg and Weiden. Knowledge is the competence of the future. We will offer solutions for demographical processes, for the increasing skills shortages and the high qualification requirements of the industry.

The coming 20 years will be geared towards the implementation of the “concept of the learning region”, towards permeable educational careers and finally towards a more intensive cooperation between university, municipalities and the industry.

At the inception of the OTH Amberg-Weiden in 1994 – which was then called the HAW – such a dynamic development could not have been predicted, although the commencement of our operations in October 1995 was referred to as a once-in-a-century event. Our dynamic development over the past 20 years is a clear signal for the OTH Amberg-Weiden to continue on its path towards implementing the educational and structural policy in the academic region of Eastern Bavaria.

Prof. Dr. Erich Bauer

President of the Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden

Ltd. RD Ludwig von Stern

Chancellor of the Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden/  
Chairman of the Technology Campus at the Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden e.V.

Prof. Dr. Reiner Anselstetter

Vice-President of the Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden/  
Scientific Director of the Institute of Applied Research

Prof. Dr.-Ing. Markus Brautsch

Commissioner for Technology Transfer of the Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden



## DIE KOMPETENZEN UNSERER MITARBEITER BESTIMMEN DEN ERFOLG UNSERES UNTERNEHMENS!

Unsere Möglichkeiten für Studenten und Hochschulabsolventen:

- FERIENARBEIT
- PRAKTIKUM & PRAXISSEMESTER
- FACH- & STUDIENABSCHLUSSARBEITEN
- DIREKTEINSTIEG FÜR ABSOLVENTEN

*Nähere Informationen über aktuelle Stellenanzeigen finden Sie unter [www.bhs-world.com](http://www.bhs-world.com) oder auf Facebook unter [www.facebook.com/bhs.world](http://www.facebook.com/bhs.world)*

 *Better – across the Board!*



BHS Corrugated Maschinen- und Anlagenbau GmbH  
Personalabteilung - Herr Hiller  
Paul-Engel-Straße 1  
92729 Weiherhammer

Tel.: 09605.919.666  
Mail: [hiller@bhs-corrugated.de](mailto:hiller@bhs-corrugated.de)  
Web: [www.bhs-world.com](http://www.bhs-world.com)

## Wohnen bei unserer Genossenschaft bietet Ihnen viele Vorteile

Sicherheit und Geborgenheit  
als Genossenschaftsmieter

Unterstützung im Alltag durch  
unsere Seniorenbetreuung

Genossenschaftliche Altersvorsorge  
mit Minderung  
der Miete in der Rente

vom Singleappartement  
bis zum Einfamilienhaus

genossenschaftseigener  
Kindergarten

Hausmeisterdienst

Notdienst rund um die Uhr



Wohnungsbau  
Siedlungswerk  
Werkvolk eG

Hans-Thoma-Str. 9, 92224 Amberg  
Tel. 09621 76630, Fax 09621 766325  
[www.ws-eg.de](http://www.ws-eg.de), [info@ws-eg.de](mailto:info@ws-eg.de)

## Constantia Hueck Folien



**Wir verpacken weltweit Markterfolge.** Mit flexiblen Verpackungen für Lebensmittel, Pharma und Getränke sind wir als einer der führenden Anbieter in einem attraktiven Wachstumsmarkt tätig. Durch innovative Lösungen, intensive Forschung und modernste Produktionstechnologien setzen unsere über 8.000 Mitarbeiter in mehr als 50 Konzerngesellschaften in 20 Ländern weltweit maßgebende Trends. Mit einem Umsatz von rund EUR 1,8 Mrd. und einer soliden Finanzstruktur sind wir ein verlässlicher Partner bei umweltschonenden, sicheren sowie einfach benutzbaren flexiblen Verpackungen, die uns das alltägliche Leben ermöglichen.

### Ihr Ansprechpartner:

**Constantia Hueck Folien GmbH & Co. KG**

Pirkmühle 14-16

92712 Pirk

[bewerbung@hueck.cflex.com](mailto:bewerbung@hueck.cflex.com)

[www.cflex.com](http://www.cflex.com)

### Wir vergeben:

- Praktika und Abschlussarbeiten für Studierende des Maschinenbaus, der Druck und Verpackungstechnik, der Chemie, der Elektrotechnik, der angewandten Informatik oder des Wirtschaftsingenieurwesens
- Einstiegsmöglichkeiten als Trainee

Informationen finden Sie auf unseren Karriereseiten unter [www.cflex.com](http://www.cflex.com)

 **Constantia**  
Flexibles  
*we do Your best.*

# Inhaltsverzeichnis

(Artikel-Reihenfolge nach  
Alphabet der Autoren)

<b>Vorwort</b> .....	1	Theresa Hanneschläger Prof. Dr. Stefanie Abels-Schlosser
<b>Preface</b> .....	4	<b>Analyse und Optimierung logistischer Abläufe in einem mittelständischen Groß- und Einzelhandelsunternehmen</b> .....
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Frenzel		37
<b>Untersuchung zum Einsatz von ARM Cortex-M Prozessorkernen in voll digitalisierten Wechselrichtern</b> .....	14	Zusammenfassung/Summary .....
Zusammenfassung/Abstract .....	14	37
Einführung .....	15	Arbeitsbereiche .....
Ziel der Untersuchung .....	16	37
Hardware .....	16	Ergebnisse .....
Echtzeitbedingungen .....	18	38
Software .....	19	
Algorithmen .....	20	
Ergebnis .....	21	
Andreas Fuchs, M.Eng. Stefan Fuchs, M.Eng. Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmidt		
<b>Kontaktlose Energie- und Datenübertragung für räumlich verteilte Lasten</b> .....	24	Michael Hebauer, M.Eng. Raphael Lechner, M.Sc. Prof. Dr.-Ing. Markus Brautsch
Kurzfassung/Abstract .....	24	<b>Analyse der Partikelemissionen von Zündstrahlmotoren im Holzgasbetrieb</b> .....
Einleitung .....	24	40
Systembetrachtung .....	24	Zusammenfassung/Abstract .....
Verifizierung der Auslegungsprinzipien .....	26	40
Fazit und Ausblick .....	27	Messprinzip .....
		40
		Aufbau der Versuchsanlage .....
		41
		Partikelmessungen mit dem Zündöl Heizöl .....
		41
		Partikelmessungen mit dem Zündöl Rapsöl .....
		42
		Partikelmessungen mit dem Zündöl Biodiesel .....
		43
		Zusammenfassung/Ausblick .....
		44
Bernd Gerlang, M.Eng. Prof. Dr. Dieter Meiller		Johannes Klier
<b>Benutzungsschnittstellen für Produktionsanlagen</b> .....	29	<b>Thermal models of IGBT modules. Foster to cauer conversion</b> .....
Zusammenfassung/Summary .....	29	46
Ausgangssituation .....	29	Abstract/Zusammenfassung .....
Problemstellung und Lösungsansatz .....	30	46
Ausblick .....	30	Introduction .....
		47
		Thermal laws and principles .....
		47
		Thermal models .....
		48
		Foster to Cauer transformation .....
		50
		Summary .....
		53
Christoph Haller, B.Eng. Prof. Dr.-Ing. Tim Jüntgen		Prof. Dr. Peter Kurzweil
<b>Potential kleiner Spritzgießmaschinen</b> .....	32	<b>Langzeitstabilität elektrochemischer Speicher unter thermischer Überlast und hoher Spannung: TGA-IR-Studie an Elektrolytsystemen</b> .....
Hintergrund/Background .....	32	54
Technologisches Potential der Babyplast 6/10		Zusammenfassung/Abstract .....
Kolbenspritzgießmaschine .....	33	54
Untersuchung und Beurteilung aktueller Zugversuche .....	33	Beschleunigte Alterung unter Übertemperatur .....
Zusammenfassung/Ausblick .....	36	54
		Alterung unter Überspannung .....
		55
		Thermische Stabilität des Elektrolytsystems .....
		56
		Stabilisierte Elektrolyte .....
		57
		Analyse von Ausfallteilen .....
		57
		Modellversuche .....
		57
		Elektrochemische Stabilität .....
		57
		Danksagung .....
		57

Prof. Dr. Nailja Luth

**Automatische Verarbeitung visueller Informationen .... 59**

Zusammenfassung/Summary ..... 59

Einführung ..... 59

Verfügbarkeit und Nutzen von Bildern ..... 60

Methoden des automatischen Bildverstehens ..... 60

Biometrische Bildauswertung ..... 62

Inhaltsbezogene Suche in großen Bildsammlungen ..... 64

Fazit ..... 65

Prof. Dr. Franz Magerl  
Reinhold Hartwich, B.Eng.

**Einsatz der Schweißsimulation in der Produktentwicklung ..... 67**

Hintergrund/Background ..... 67

Die Schweißsimulation ..... 68

Ergebnis ..... 69

Prof. Dr. Franz Magerl  
Dr. Bernhard Schmitt  
Sabine Binder, B.Eng.

**Reibungsverhalten von Kunststoffen bei unterschiedlichen tribologischen Kontaktbedingungen ..... 71**

Zusammenfassung/Abstract ..... 71

Einführung ..... 71

Ausgangssituation ..... 72

Versuchsdurchführung ..... 72

Ergebnisse ..... 73

Fazit ..... 77

Prof. Dr. Matthias Mändl  
Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Schafberger

**Untersuchung der Richtungsortung von akustischen Warneinrichtungen für bevorrechtigte Wegebewerber im Innenraum von Kraftfahrzeugen ..... 79**

Zusammenfassung/Abstract ..... 79

Einführung ..... 79

Ergebnisse ..... 81

Schlussfolgerungen ..... 90

Ausblick/Danksagung ..... 90

Prof. Dr. Dieter Meiller  
Dr. Ulrike Laufer  
Sebastian Abele  
Daniel Kaiser

**Entwicklung von Kiosk-Systemen für ein Technikmuseum in Verbindung mit einer virtuellen Ausstellung im Web ..... 92**

Zusammenfassung/Summary ..... 92

Ausgangssituation ..... 92

Webseite ..... 92

Medienstationen ..... 93

Prof. Dr. Mario Mocker  
Jonathan Aigner, M.Eng.

**Rohstoffbedarf der Energiewende ..... 95**

Zusammenfassung/Abstract ..... 95

Einleitung ..... 96

Methodik ..... 96

Ergebnisse ..... 97

Diskussion und Fazit ..... 100

Danksagung ..... 101

Prof. Dr. Karlheinz Müller  
Karin Janwlecke

**Felusa und die Forellen ..... 103**

Hintergrund ..... 103

Felusa und die Forellen ..... 104

Dipl.-Ing. (FH) Nicholas O'Connell  
Raphael Lechner, M.Sc.  
Prof. Dr.-Ing. Markus Brautsch

**Vergleich des Verbrennungs- und Emissionsverhaltens von hocheffizienten Blockheizkraftwerken ..... 116**

Zusammenfassung/Abstract ..... 116

Einführung ..... 117

Untersuchte BHKW-Anlagen ..... 117

Verbrennungsanalyse Referenzzyylinder ..... 117

Verbrennungsanalyse für alle Zylinder ..... 118

Emissionsverhalten ..... 119

Fazit und Zusammenfassung ..... 120

Prof. Dr. Ralf Ringler  
Prof. Dr. Clemens Forster

**Kortikale Schmerzverarbeitung bei mentalem Stress – Visualisierung mit funktioneller Magnetresonanztomografie (fMRT) ..... 122**

Einleitung/Introduction ..... 122

Materials and methods ..... 123

Results ..... 123

Conclusion ..... 124

Prof. Dr.-Ing. Horst Rönnebeck

**Elektrischer Radnabenmotor für den Formula Student Rennwagen der OTH-Amberg-Weiden ..... 126**

Zusammenfassung/Summary ..... 126

Einführung ..... 127

Beschreibung des neuartigen Radnabenantriebes ..... 127

Weitere konstruktive Besonderheiten ..... 129

Auslegung des Radnabenmotors ..... 130

Fertigung der Motoren ..... 131

Inbetriebnahme und Erprobungsphase ..... 131

Fazit ..... 132

Formula Student ..... 133

Prof. Dr. Horst Rottmann

**Die empirischen Determinanten des Suizidverhaltens in den OECD-Ländern ..... 135**

Hintergrund/Background ..... 135

Einleitung ..... 136

Datenbeschreibung und empirische Spezifikation ..... 137

Empirische Ergebnisse und ihre Interpretation ..... 138

Zusammenfassung ..... 141

Benjamin Rußwurm, B.Eng.  
Reinhold Hartwich, B.Eng.  
Prof. Dr. Franz Magerl  
Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

**Strömungstechnische Analyse eines High-Tech-Operationsssaales mit Star-CCM+ ..... 144**

Einleitung/Abstract ..... 144

Lüftungstechnik im Operationsaal ..... 145

Strömungssimulation im Operationsaal ..... 145

Verifizierung der Simulation mit Star-CCM+ durch experimentelle Untersuchungen ..... 146

Schlussfolgerung ..... 147

Benjamin Rußwurm, B.Eng.  
Dr. rer. nat. Sebastian Buhl  
Prof. Dr. Franz Magerl  
Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

<b>Hygiene und Medizintechnik – Patientensicherheit durch technische Hygiene im OP .....</b>	<b>149</b>
Hintergrund/Background .....	149
Unmittelbare Patientengefährdung durch Design- und/oder Entwicklungs-„fehler“ bei Medizinprodukten.....	150
Analyse und Bewertung von antimikrobiellen Oberflächen .....	150
Luftkeimmessungen .....	151
Schlussfolgerungen und Diskussion .....	151

Josef Schmid, B.Eng.  
Andreas Waigel, B.Eng.  
Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

<b>eDAS – Holistic Energy Management for 3<sup>rd</sup> and 4<sup>th</sup> Generation of Electric Vehicles .....</b>	<b>153</b>
Abstract/Zusammenfassung .....	153
Introduction .....	153
State of the art .....	154
Approaches to improve the predictable mileage .....	154
Prospects: Battery Management System Demonstrator .....	155
Conclusion/Acknowledgement .....	156

Roman Schönthier, B.Eng.  
Sebastian Schmidt, B.Eng.  
Raphael Lechner, M.Sc.  
Prof. Dr.-Ing. Markus Brautsch

<b>Entwicklung und Aufbau einer Forschungsanlage für vernetzte dezentrale Energiesysteme .....</b>	<b>158</b>
Zusammenfassung/Abstract .....	158
Einleitung .....	158
Aufbau Forschungsanlage .....	159
Energetechnische Komponenten .....	159
Beispielanlage .....	162
Zusammenfassung .....	163

Prof. Dr. Franz Seitz  
Markus A. Schmidt

<b>Money in modern macro models: A review of the arguments .....</b>	<b>166</b>
Zusammenfassung/Abstract .....	166
Introduction .....	167
Some general reflections .....	167
New Keynesian models .....	169
New Monetarist Economics .....	174
Financial Intermediation .....	176
Conclusion .....	178

Prof. Dipl.-Ing. Burkhard Stolz  
Dr. rer. nat. Sebastian Buhl  
Dipl.-Wirtschaftsing. (FH) Kornelia Graf

<b>Reinraumtechnik für die industrielle Medizintechnik .....</b>	<b>186</b>
Zusammenfassung/Abstract .....	186
Anforderungen der Industrie .....	186
Ausstattung an der OTH Amberg-Weiden .....	187
Industrielle Zusammenarbeit .....	187

Prof. Dr. Johann Strassl  
Prof. Dr. Günter Schicker  
Christian Grasser, B.A.

<b>(Überlegungen zu) Gestaltungsprinzipien des Dienstleistungsentwicklungsprozesses für produzierende Unternehmen .....</b>	<b>189</b>
Hintergrund/Background .....	189
Die Unternehmenslandschaft der Dienstleistungen .....	189
Anforderungen an die Dienstleistungsentwicklung .....	190
Gestaltungsprinzipien eines Dienstleistungsentwicklungsprozesses .....	191
Agilität .....	192

Manuela Weiß, M.Sc.  
Prof. Joachim Hummich

<b>Biopolymere – eine Zukunft ohne Erdöl! .....</b>	<b>194</b>
Zusammenfassung/Abstract .....	194
Entwicklung der Biopolymere .....	195
Gründe für den Einsatz von Biopolymeren .....	195
Tank, Trog oder Teller-Debatte .....	196
Projektbeschreibung .....	196
Versuchsergebnisse .....	198
Fazit .....	202

Prof. Dr.-Ing. Armin Wolfram  
Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Stich

<b>Entwicklung und Aufbau des Einpersonen-Transporters OTH-elo .....</b>	<b>204</b>
Einführung/Introduction .....	204
Mechanischer Aufbau .....	205
Elektronik .....	206
Informationsverarbeitung .....	207
Zusammenfassung und Ausblick .....	209

Johannes Zrenner, M.Eng.  
Heike Lepke, M.Eng.  
Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

<b>MotorBrain – Drivetrain Development for the 3<sup>rd</sup> Generation of Electric Vehicles .....</b>	<b>212</b>
Zusammenfassung/Abstract .....	212
Einleitung .....	213
Technische Zielsetzung .....	213
Erreichte Ergebnisse .....	215
Arbeiten der OTH Amberg-Weiden .....	216
Ausblick .....	218

<b>Impressum .....</b>	<b>221</b>
------------------------	------------

<b>Inserentenverzeichnis .....</b>	<b>222</b>
------------------------------------	------------



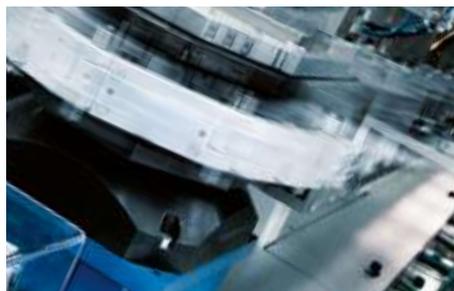
SIEMENS



Kristina Pähr  
Digital Factory, Amberg, Deutschland

Ihr Job ist es, Befehle zu erteilen.  
Indem sie Anlagen programmiert.

Kristina Pähr hat bei Siemens den Job gefunden, der zu ihr und ihrer Qualifikation passt. So kann die Software-Entwicklerin beim Planen und Herstellen von automatisierten Anlagen ihre kreative Begabung und Leidenschaft für Technik einbringen. Besonders schön ist es für sie, wenn die Maschinen zum ersten Mal laufen. Entdecken auch Sie Siemens für Ihre Karriere und bewerben Sie sich jetzt online. Gemeinsam machen wir den Unterschied.



Automatisierung von Maschinen und Anlagen.

Siemens  
Karriere

[siemens.de/karriere](https://www.siemens.de/karriere)



ZUKUNFT LASERTECHNIK: [www.ARGES.de/career](http://www.ARGES.de/career)



AUTOMATION  
**baumann**

EIN STARKES TEAM  
BRAUCHT AUCH MAL PAUSE

### Freiraum für Ideen

Leistungsbereitschaft, Verantwortungsgefühl und Teamfähigkeit sind für unsere Mitarbeiter selbstverständlich. Als Arbeitgeber mit sozialer Kompetenz wissen wir aber auch, dass gute Ideen Spielraum brauchen. Deshalb leisten wir in einer kreativen Atmosphäre Überdurchschnittliches. Begleiten Sie uns auf dem Weg im internationalen Wettbewerb nicht nur gute, sondern die besten Maschinen zu bauen.

Wir suchen:

#### Ingenieure Bachelor/Master (m/w) und Praktikanten (m/w)

aus den Bereichen **Maschinenbau** und **Elektrotechnik**. Vielfältige Kundenanforderungen und wechselnde Aufgabenstellungen in unseren Geschäftsbereichen Photovoltaic, Handling & Assembly und Testsolutions machen die Arbeit bei Baumann zu einer spannenden und abwechslungsreichen Herausforderung. Erfahren Sie mehr über unser weltweit operierendes Unternehmen unter [www.baumann-automation.com](http://www.baumann-automation.com).



img@baumann

Baumann GmbH, Oskar-von-Miller-Straße 7, 92224 Amberg  
Tel.: (+49) 9621/6754-0, Fax: (+49) 9621/6754-921  
[bewerbung@baumann-automation.com](mailto:bewerbung@baumann-automation.com)



**DEPRAG**



Als internationales Unternehmen sind wir zuverlässiger Partner der produzierenden Industrie vorwiegend in den Bereichen Elektrotechnik, Automobilzulieferer, Maschinenbau und Telekommunikation. Aus der Position einer weltweit geschätzten Familienfirma entwickeln und fertigen wir in Amberg hochqualitative Produkte der Schraubtechnik, Druckluftmotoren und -werkzeuge sowie komplette Montageanlagen.

Seit Gründung der Hochschule Amberg-Weiden sind wir Partner in vielen gemeinsamen Projekten. Diese erfolgreiche Zusammenarbeit werden wir auch in Zukunft fortsetzen.

Für Studenten und Absolventen der Fachbereiche Maschinenbau, Elektro- und Informationstechnik, BWL und Wirtschaftsingenieurwesen bieten wir attraktive:

- Vor- und Grundpraktika
- Praxissemester
- Studienarbeiten
- Abschlussarbeiten
- Stellen für den Berufseinstieg

DEPRAG SCHULZ GMBH u. CO.  
Carl-Schulz-Platz 1  
92224 Amberg  
Tel. 09621 371-0 • Fax 09621 371-120  
[info@deprag.de](mailto:info@deprag.de) • [www.deprag.com](http://www.deprag.com)



# Untersuchung zum Einsatz von ARM Cortex-M Prozessorkernen in voll digitalisierten Wechselrichtern

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Frenzel

## 1 Zusammenfassung

Zum Betrieb moderner elektrischer Antriebe und zur Ankopplung von Solarmodulen an unsere elektrischen Energieversorgungsnetze werden in großer Stückzahl leistungselektronische Stellglieder benötigt, die Gleichspannung in Wechselspannung umwandeln. Diese Wechselrichter sind in heutiger Zeit nahezu ausnahmslos digitalisiert. Eine zentrale Rolle spielen dabei die verbauten Prozessoren, die preisgünstig, leistungsfähig und leicht portierbar sein müssen. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf Prozessorarchitekturen, die nicht an einen speziellen Hersteller gebunden sind. Dies ermöglicht einen vergleichsweise schnellen und damit preisgünstigeren Wechsel zu einem anderen Hersteller, wenn Prozessoren abgekündigt werden. Eine solche Prozessorarchitektur bietet die Firma ARM (Advanced RISC Machines Ltd.) mit dem Cortex-M-Kern speziell für den Verbau in eingebettete Systeme an, der weltweit inzwischen eine außerordentliche Verbreitung gefunden hat. Die vorliegende Untersuchung überprüft daher Prozessoren mit ARM Cortex-M-Architektur hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit in voll digitalisierten Wechselrichtern. Nach einer Gegenüberstellung in Bezug Preis und Ausstattung verschiedener Prozessortypen fiel die Wahl auf eine Variante des STM32F103 der Firma ST Microelectronics. Zur Verifikation wurde auf Basis eines Evaluation Boards dieses Prozessors ein Echtzeit-Scheduler mit Hintergrundmonitor zur Abarbeitung der Wechselrichtersoftware entwickelt. Anhand des Modellsystems konnten Algorithmen aus anderen Projekten zum Betrieb in voll digitalisierten Wechselrichtern erfolgreich implementiert werden. Es zeigte sich, dass die Cortex-M-Kerne im Vergleich zu bisher im Labor Mechatronik verwendeten Prozessoren bei der Hälfte des Preises mehr als das Doppelte an Rechenleistung zur Verfügung stellen. Als Ergebnis ist die ARM Cortex-M-Architektur somit vollumfänglich geeignet, um leistungsstarke und preisgünstige Wechselrichtersysteme aufzubauen.

## 1 Abstract

For the operation of modern electric drives and for coupling solar modules to our electrical power grids, a large number of power electronic devices converting DC to AC voltage are required. Nowadays, these inverters are digitized almost without exception. For this, the installed processors play a prominent role, which shall be low-priced, powerful and portable. Particular attention is given to processor architectures that are not dependent on a single supplier. In case of a processor's obsolescence, this allows a comparably fast and therefore cheaper change to another manufacturer. Such a processor architecture is provided by the company ARM (Advanced RISC Machines Ltd.), known as Cortex-M. This architecture was specifically designed for installation in embedded systems. This type of processor has since been widely used. Therefore, the present study examined processors with ARM Cortex-M architecture in terms of their usability for fully digitized inverters. A comparison of price and features of different types of processors identified the STM32F103 by ST Microelectronics as a promising candidate. On basis of an evaluation board, a real-time scheduler with a background monitor was developed. For verification, different algorithms already used in other fully digitized inverter projects were successfully implemented. The study demonstrated that Cortex-M cores have more than twice the processing power at half the price compared to previously used processors. As a result, the ARM Cortex-M architecture is fully suitable to build high-performance and low-cost inverter systems.

## 2 Einführung

In der heutigen Zeit sind die überwiegende Mehrzahl der am Markt erhältlichen Wechselrichter voll digitalisiert. Diese Baugruppen werden flächendeckend sowohl im Bereich der regenerativen Energiegewinnung, zum Beispiel in Kombination mit Solarmodulen in der Photovoltaik, als auch zur gezielten Veränderung der Drehzahl, der Lage oder des Drehmoments in Verbindung mit elektrischen Maschinen und Antrieben verwendet.

Wechselrichter dienen zur Erzeugung sinus- oder kosinusförmiger Spannungs- oder Stromverläufe größerer elektrischer Leistungen und werden von Gleichstrom- oder Gleichspannungsquellen gespeist. Die Amplitude, Frequenz und der Nullphasenwinkel der Ausgangsspannungen oder -ströme sind einstellbar und an die jeweilige Anforderung anzupassen. Die meisten Wechselrichter neuerer Bauart sind Gleichspannungs-Zwischenkreis-Wechselrichter, die aus einer Gleichspannungsquelle – bei mobilen Anwendungen häufig aus Batterien [1] – gespeist werden und eine oder mehrere sinusförmige Ausgangsspannungen erzeugen. Aus Gründen der Minimierung der Verluste wird dabei die Sinusform der Ausgangsspannung nur im Mittel eingestellt. Durch Veränderung des Puls-/Pausen-Verhältnisses wird also der Mittelwert der Ausgangsspannung verändert, grundsätzlich wird jedoch immer die gesamte Gleichspannung auf den Ausgang zugeschaltet oder von diesem getrennt.

Dieses als Pulsweitenmodulation (PWM) bekannte Verfahren wird heute in fast allen Wechselrichtern mit Mikroprozessorsystemen realisiert. Bei Verwendung in Kombination mit elektrischen Antrieben wird mit diesem Verfahren im Mittel die Spannung an den Motorwicklungen der Drehfeldmaschinen – Asynchron- oder Synchronmaschine – in Abhängigkeit von den gerade gemessenen Motorströmen bzw. der Rotorlage eingestellt.

Ein geeignetes Prozessorsystem muss daher in möglichst hoher Auflösung zusammen mit kurzen Zykluszeiten Algorithmen bearbeiten, das in Abhängigkeit von den Sollwerten und den aktuellen Messwerten die bei Drehstrommaschinen notwendigen drei zunächst unabhängigen sinusförmigen Spannungen für die Motorwicklungen zur Verfügung stellt. Die Bearbeitung in zeitlich kurzen Zyklen – typisch sind etwa 20 kHz bzw. 50  $\mu$ s – bedeutet zwangsweise auch die Forderung einer hohen Rechenleistung. Zusätzlich muss ein Prozessorsystem eines Wechselrichters Kontrollfunktionen übernehmen, um zu gewährleisten, dass der Betriebszustand des Antriebs oder der Anlage jederzeit im zulässigen Arbeitsbereich liegt. Ebenso muss ein Monitorprogramm zur Verfügung gestellt werden, das dem Benutzer den aktuellen Systemzustand anzeigt oder eine Parametrierung des Wechselrichters erlaubt, ohne jedoch die Algorithmik innerhalb eines Zyklus zu stören oder gar

zu unterbrechen. Auch muss fast immer für höhere Zwischenkreisspannungen eine galvanische Isolation und eine Datenbusanbindung zu einer übergeordneten Steuerung vorhanden sein, um nur ein paar Anforderungen zu nennen.

Für ein solches Wechselrichtersystem wird daher ein schneller, hochauflösender und flexibler Prozessor mit einer Software mit Echtzeitfunktionalität und vielfältiger Hardware benötigt. Zudem ist ein äußerst wichtiger Gesichtspunkt bei der Prozessorwahl, inwieweit die einmal entwickelte Hardware zu konkurrenzfähigen Preisen angeboten werden kann und wie leicht die erstellte Software, z. B. aufgrund von Obsoleszenzen, auf Prozessoren anderer Hersteller portiert werden kann. Gerade ein Prozessorwechsel als zentraler Baustein einer Wechselrichterhardware kann dabei eine Hürde sein, vor der Entwicklungsabteilungen zunächst zurückschrecken, da die Einarbeitung in einen neuen Prozessor kosten- und zeitintensiv ist.

Ein möglicher Ausweg aus dieser Problematik ist auf Prozessorkerne zu setzen, die von verschiedenen Herstellern angeboten werden, jedoch herstellerunabhängig immer dieselbe Architektur besitzen. Prozessorkerne mit der sog. ARM-Architektur der Firma ARM (Advanced RISC Machines Ltd.) bieten diese Eigenschaft. Die Firma produziert selbst keine Prozessoren, sondern spezifiziert lediglich deren Architektur samt passendem Befehlssatz. Diese wird anschließend den Halbleiterherstellern zur Implementierung in Lizenz zur Verfügung gestellt. Die Hersteller ergänzen die von ARM spezifizierten Kerne durch eigene, zusätzliche Peripherie, der Kern samt Interrupt Controller ist jedoch bei allen Prozessoren gleich. So ist es nicht weiter verwunderlich, dass bereits im Jahr 2010 mehr als zwei Milliarden ARM-Prozessoren pro Jahr ausgeliefert wurden [2].

Alle heute führenden Halbleiterhersteller weltweit sind Lizenznehmer von ARM-Prozessorkernen. Je nach Anwendung werden verschiedene Versionen der ARM-Architektur realisiert. Für den Bereich Mobile Computing für Tablets oder Smartphones (z. B. Apple iPad Air, Samsung S4, Apple iPhone 5S: ARM Cortex A Serie) werden andere Prozessorarchitekturen angeboten als für den Embedded Bereich. Prozessoren für diese Anwendungen benötigen einen weniger komplexen Befehlssatz und eignen sich daher auch für den Einsatz in Wechselrichtern.

Speziell für den Embedded Bereich wurde die Cortex-M-Serie entworfen, in der die erstmals 2004 und 2010 vorgestellten Versionen Cortex-M3 und Cortex-M4 sich besonders zum Einsatz als Prozessoren in Wechselrichtern anbieten. Die Version M4 ist ein im Wesentlichen um Signalprozessorbefehle erweiterte M3-Version mit höherer Rechenleistung. Optional ist auch eine Gleitkommaeinheit verfügbar. Für preisgünstigere Lösungen wird man jedoch auf die Version M3 zurückgreifen. Für diese

Version ist aufgrund der Popularität und des guten Preis-Leistungs-Verhältnisses zwischenzeitlich eine Vielzahl an Prozessorvarianten erhältlich. Beim Hersteller ST Microelectronics beispielsweise kann der Kunde alleine nur für die M3-Version aus über 180 verschiedenen Prozessorvarianten auswählen [3]. Bei Rechenleistungen von bis zu 150 DMIPS sind diese 32-bit Prozessoren preislich im Bereich von 8-bit-Prozessoren angesiedelt, jedoch um ein Vielfaches leistungsstärker als Letztere.

### 3 Ziel der Untersuchung

Ziel der Studie war es, aufgrund der in der Einleitung genannten Vorteile einen Prozessor mit ARM Cortex-M3-Kern hinsichtlich Verwendbarkeit zum Einsatz in voll digitalisierten Wechselrichtern näher zu untersuchen und ggf. dessen Verwendbarkeit für den genannten Einsatzfall nachzuweisen.

Um möglichst preisgünstige Prozessorvarianten zu verwenden und um möglichst kleine Bauräume der Wechselrichter-Hardware, auch mit Hinblick auf mobile Anwendungen, realisieren zu können, sollte dabei kein umfangreiches Echtzeitbetriebssystem eingesetzt werden, das ggf. externe Speicher benötigen würde und dessen Funktionalität im Detail schwer zu überprüfen wäre.

Die Software sollte so beschaffen sein, dass sie möglichst klar strukturiert, übersichtlich und einfach zu validieren ist und in preisgünstige Prozessorvarianten mit selbst geringer Speicherdichte von nur einigen kBytes zu integrieren ist. Auch sollte gezeigt werden, dass der Thumb-Befehlssatz des Cortex M3-Kerns bestens zum Einsatz in voll digitalisierten Wechselrichtern geeignet ist, obwohl es sich dabei um einen reduzierten ARM-Befehlssatz handelt, jedoch mit dem Vorteil größerer Speicherdichte [4–6].

Zum Leistungsnachweis sollte daher ein vollständig in Assembler entworfener Echtzeit-Scheduler auf einem

Modellwechselrichter implementiert werden, mit dem die Algorithmen simultan von einem Antrieb bis zu maximal vier Antrieben gerechnet werden können.

## 4 Hardware

### 4.1 Prozessor

Als Hardware wurde ein ARM Cortex-M3-Prozessor ausgewählt, der mindestens vergleichbare Leistungsmerkmale wie die in früheren Projekten eingesetzten 32-bit-Prozessoren für voll digitalisierte Wechselrichtersysteme hat, jedoch preislich deutlich unter den bisher verwendeten Prozessoren liegen sollte. Ein Leistungs- und Preisvergleich zweier ausgewählter ARM-Cortex-Prozessoren der Versionen M3 und M4 mit bisher im Labor Mechatronik verwendeten Prozessoren für Wechselrichtersysteme zeigt Abbildung 1.

Beide dargestellten Cortex-M-Prozessorvarianten verfügen neben den im Kern bereits standardmäßig integrierten Komponenten zusätzlich über alle Baugruppen, die der Modellwechselrichter benötigt, wie etwa mindestens einen eingebauten CAN-Controller und eine USART-Schnittstelle für die Monitoring-Funktion [5].

Vorabuntersuchungen ergaben, dass die Rechenzeit des nach Abbildung 1 deutlich günstigeren Cortex-M3-Prozessors für den Modellwechselrichter ausreichend ist. Daher wurde als Prozessor der Prozessor STM32F103VCT6 [7] der Firma ST Microelectronics gewählt.

### 4.2 Timing Master

Der Vorteil des gewählten Prozessortyps ist, dass er bereits über eine externe Datenschnittstelle (FSMC) zur Anbindung weiterer Prozessoren, Speicher oder programmierbarer Logikbausteine verfügt. Grundsätzlich benötigt ein Prozessor in einem Wechselrichtersystem eine solche Datenschnittstelle zwar nicht. Aus Sicherheitsgründen ist es dennoch häufig vorteilhaft eine externe, vom Prozessor

Performance Comparison of Different CPUs – for embedded inverter applications –								
CPU	Manufact.	Core	Clock	DMIPS	Algorithm	CPU Time	Algorithm	CPU Time
MC68332	Freescale	68k 32 bit	20 MHz	4	Sinus	3.40 µs	Alg_res with atan2	23.8 µs
DSP56F803	Freescale	DSC 16 bit	80 MHz	40		0.65 µs		3.4 µs
STM32F103	ST Micro	Cortex-M3 32 bit	72 MHz	90		0.47 µs		2.0 µs
STM32F407	ST Micro	Cortex-M4 32 bit	168 MHz	210		0.20 µs(*)		0.86 µs(*)

Chip	Pins	Flash/kB	RAM/kB	Price p.u. <sup>(1)</sup>	Price p.u. <sup>(2)</sup>
MC68332GCEH20	132	–	2	14.85 €	22.62 €
DSP56F803BU80E	100	64	4	9.27 €	7.87 €
STM32F103VCT6	100	256	48	4.72 €	3.87 €
STM32F407VGT6	100	1024	192	7.17 €	7.74 €

- Test algorithms with table lookup for trigonometric functions (sin, atan2)
- MC68332 features an assembly lookup instruction (tbls.w)
- (\*) Time scaled using STM32F407 to STM32F103 DMIPS ratio
- (1) Farnell net price without discount for > 300 pcs (November 28, 2013)
- (2) DigiKey net price without discount for 1000 pcs (November 28, 2013)

Abbildung 1: Leistungs- und Preisvergleich verschiedener Prozessoren für voll digitalisierte Wechselrichter

unabhängige Hardware zu haben, die als Timing-Master fungiert und die Zeitscheibe des Prozessors durch einen einzigen, im System vorkommenden Interrupt zyklisch weiterschaltet (*siehe 5 Echtzeitbedingungen*). Diese Hardware übernimmt im Modellwechselrichter auch aus Synchronisationsgründen die Pulsweitenmodulation zur Ansteuerung der Motoren, die Steuerung des externen AD-Wandlers zur Lageerfassung der Motoren, die Resolverversorgung sowie die Aufbereitung der Strom- und Spannungsmesssignal(e). Eine Übersicht eines solchen Systems für zwei Motoren zeigt Abbildung 2.

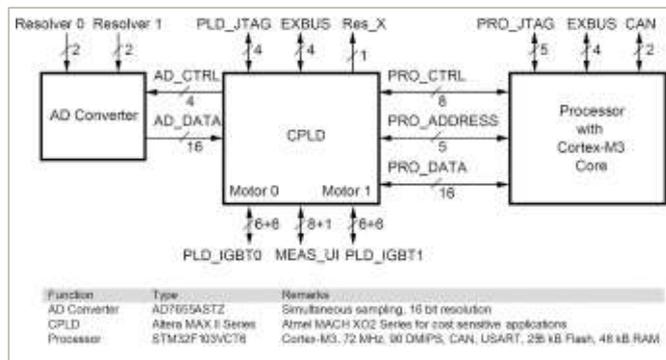


Abbildung 2: Systemübersicht eines Modellwechselrichters für 2 Motoren mit CPLD als Timing Master

Um möglichst flexibel verschiedene Verfahren implementieren zu können, wurde als externe und vom Prozessor unabhängige Hardware ein bereits im Labor Mechatronik der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden vorhandener programmierbarer Logikbaustein (CPLD) verwendet, der über eine 16-bit-breite Datenleitung an den FSMC des ARM-Prozessors angeschlossen wurde. Die Hardware im Baustein wurde mit der Hardware-Beschreibungssprache (HDL) Verilog realisiert, deren Syntax mit der weit verbreiteten Programmiersprache C verwandt ist.

Eine parallele Anbindung wurde aufgrund der hohen Abstraten einer seriellen Anbindung vorgezogen, um in möglichst kurzer Zeit die bei vier Motoren maximal 4x3 PWM-Kommandos an das CPLD zu übertragen. Die Darstellung nach Abbildung 3 zeigt einen mit dem Logic Analyzer Tektronix TLA6202 [8] aufgezeichneten Datentransfer für insgesamt 2 Motoren.



Abbildung 3: Datentransfer (PWM-Kommandos) von ARM Cortex-M3-Prozessor zum CPLD bei zwei Motoren

In der Darstellung werden die 6x16-bit-breiten PWM-Kommandos zur Ansteuerung der Halbbrücken des Motors 0 (Adressen 0x00...0x02) und des Motors 1 (Adressen 0x03...0x05) innerhalb von etwa 860 ns übertragen.

### 4.3 Rotorlageerfassung

Als Rotorlagegeber werden die besonders bei elektrischen Antrieben häufig anzutreffenden Resolver verwendet, da diese Geber besonders robust sind und – verglichen mit Encodern und anderen Drehgebern – bei rauen Umgebungsbedingungen, wie etwa bei hohen Temperaturen, geringe Fehlerraten aufweisen [9].

Zur Lageerfassung der Rotorstellungen der Motoren werden in Abbildung 2 nicht die bereits in den Prozessoren integrierten AD-Wandler verwendet, da deren 12-bit Auflösung zu gering ist. Ursächlich dafür ist, dass der über den 4-Quadranten-Arkustangens zu berechnende Rotorwinkel zur Gewinnung von Drehzahl bzw. Drehbeschleunigung noch bis zu zweimal zu differenzieren ist. Dadurch verschlechtert sich das SNR erheblich und eine geeignete Regelung wäre nur noch mit unzureichender Regelgüte realisierbar. Zudem kann eine Wandlung nur in den Pulspausen der PWM-Muster erfolgen und muss mit der Pulsung synchronisiert werden (*siehe 5 Echtzeitbedingungen*).

### 4.4 Strom- und Spannungsmessung

Die Strommessung erfolgt bei Wechselrichtersystemen sehr häufig durch Mittelwertbildung der Messsignale über eine Abtastperiode. Dadurch bleibt die Strommessung durch kurze Störungen aufgrund der Pulsung der Leistungsstufe unbeeinflusst. Besonders einfach und mit minimalen Hardwareaufwand lässt sich dies dadurch realisieren, dass man Strommesswiderstände in Kombination mit einem bereits galvanisch isolierten  $\Sigma\Delta$ -Modulator einsetzt [10]. Man kann dann direkt und ohne Decimation durch Summation des  $\Sigma\Delta$ -Signals des Modulators über einen Zähler im CPLD die Mittelwertbildung vornehmen. Bei einer Periodendauer von beispielsweise 50  $\mu$ s und einer Taktfrequenz des Modulators von 20 MHz folgt eine Auflösung von 10 bit. Nimmt man exemplarisch Strangströme von bis zu  $\pm 200$  A an, entspricht dies einer ausreichenden Auflösung des Stromes von  $I_{LSB} \approx 400$  mA. Eine im Labor Mechatronik der OTH Amberg entwickelte bis 2500 V Wechselspannung vollständig isolierte  $\pm 200$  A Messeinheit sowie deren Messfehler zeigt Abbildung 4. In die Strommesseinheit wurde zusätzlich eine isolierte Versorgung integriert [11]. Somit werden nur nicht isolierte Versorgungsspannungen zum Betrieb benötigt.

Für Ströme über 200 A Dauerstrom wird man eine Erfassung der Strangströme mit HALL-Sensoren vorziehen, da die Verluste der Shuntmessung zu hoch werden.

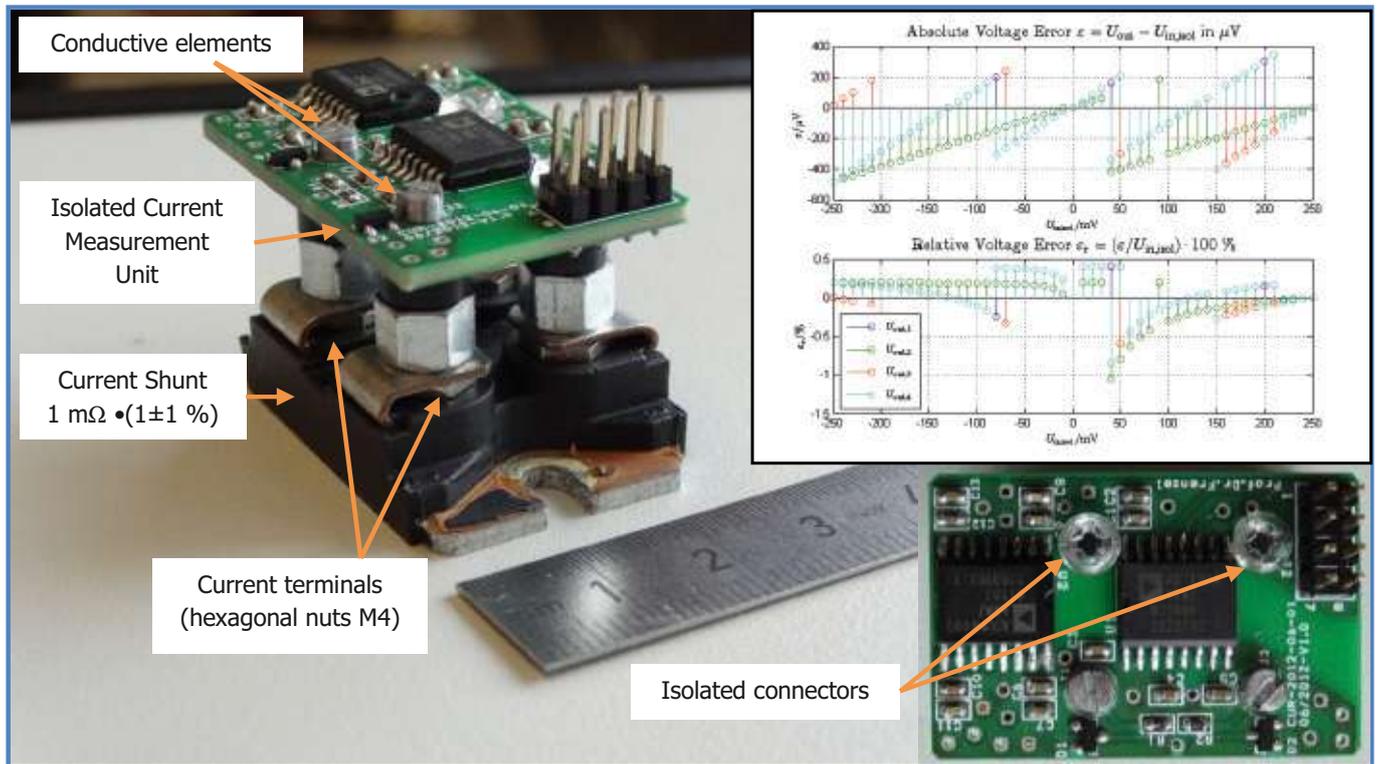


Abbildung 4: Strommessenheit bis 200 A Dauerstrom, 2.5 kV Isolationsspannung sowie ermittelter Messfehler, gemessen an vier Mustern mit Sourcemeter Keithley 2410 im Bereich  $\pm 250$  mV Shuntspannung

Die isolierte Strommessenheit lässt sich problemfrei auch zur Messung der Zwischenkreisspannung des Wechselrichters verwenden. Hierzu wird lediglich die isolierte Strommessenheit an einen hochohmigen Spannungsteiler anstelle des Strommesswiderstands angeschlossen.

#### 4.5 Debugging und Monitoring

ARM Cortex-Prozessoren haben im Vergleich zu älteren ARM-Modellen eine völlig neu überarbeitete Debug-Schnittstelle, die eine Erweiterung einer JTAG-Schnittstelle hinsichtlich Realtime-Funktionalität darstellt [2]. Dieses sog. CoreSight Debug System ist über einen internen Bus an den Kern angeschlossen und nicht – wie bei anderen ARM-Kernen – in diesen integriert. Dadurch ist ein on-chip Debugging selbst im Niedrigenergie- oder sogar Schlafmodus des Prozessors möglich. Auch kann der Debugger auf Register und Speicherinhalte im laufenden Betrieb zugreifen [6]. Die zusätzlich benötigte Debugging Interface Hardware ist dadurch vergleichsweise einfach gestaltet.

Als Debugging Interface Hardware wurde für den Modellwechselrichter der kostengünstige USB ST-LINK/V2 [12] verwendet, der sowohl eine Übertragung des Programms in den FLASH-Speicher als auch das on-chip Debugging via JTAG erlaubt. Die Monitoring-Schnittstelle war PC-seitig eine RS232-Schnittstelle (COM), die bei modernen Rechnern häufig nicht mehr on-board zur Verfügung gestellt wird, aber mit einer preisgünstigen PCI-Einsteckkarte realisiert werden kann, siehe z. B. [13].

## 5 Echtzeitbedingungen

Beim Aufbau voll digitalisierter Wechselrichter ist grundsätzlich das Timing von ganz entscheidender Bedeutung für den störungsfreien Betrieb und für ein deterministisches Schaltverhalten. Grund sind die signifikanten elektromagnetischen Störungen bei Schaltvorgängen an Zwischenkreisspannungen von mehreren hundert Volt bzw. mit induktiven Strömen von mehreren hundert Ampere. Analoge und zum Betrieb eines Wechselrichters notwendige Messvorgänge können meist nur in den Schaltpausen der Leistungshalbleiter durchgeführt werden. Außerdem ist eine simulative Vorabuntersuchung bei Einsatz einer deterministischen Zeitscheibensteuerung unter Echtzeitbedingungen wesentlich einfacher oder gar erst möglich.

Grundsätzlich verfügt der ARM Cortex-M3-Kern über einen 24-bit-Timer (SYSTICK-Timer), der sich für die Verwendung einer Zeitscheibensteuerung anbietet. Treten jedoch Laufzeitfehler während des Betriebs auf, besteht die Gefahr von Fehlschaltungen der vergleichsweise teuren Leistungshalbleiter des Wechselrichters, was zu deren Zerstörung führen kann. Daher wird als Timing Master meist eine externe Schaltung in Form eines programmierbaren Logikbausteines gewählt, der im zeitlichen Raster der Zeitscheibensteuerung eine im ARM-Prozessorsystem vorkommende Unterbrechung (IRQ) einleitet und damit einen Zeitscheibenwechsel auslöst. Wird innerhalb eines definierten Zeitintervalls die Unterbrechung nicht quittiert und neue Schaltsignale an den Pulsbreitenmodulator des programmierbaren Logikbausteines verschickt, schaltet dieser die Endstufen selbstständig auf null Volt Ausgangsspannung.

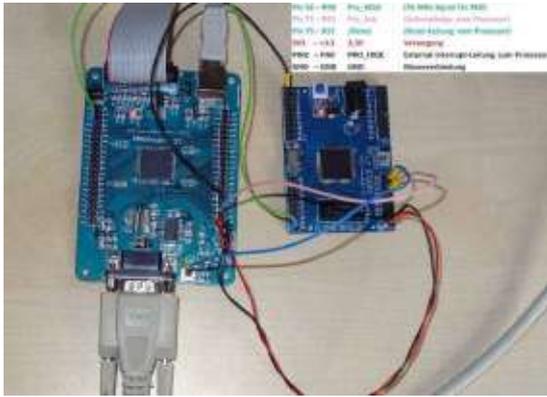


Abbildung 5: Minimal notwendige Verbindungen zwischen ARM Cortex-M3-Prozessor (links) und CPLD (rechts) für einen Unterbrechungs-/Quittungsmechanismus zur Zeitscheibensteuerung

Ein solcher Unterbrechungs-/Quittungsmechanismus ist nach Abbildung 5 vergleichsweise einfach zu realisieren und bietet ein hohes Maß an Sicherheit vor Zerstörung der Leistungshalbleiter. Ebenso einfach lassen sich Rechenzeitüberschreitungen detektieren, da eine Unterbrechung nur dann auftreten darf, wenn die Vordergrundpartition vollständig abgearbeitet wurde und sich der ARM-Prozessor in einer Hintergrundpartition befindet. Da der Interrupt-Controller des Cortex-M allerdings keine Unterbrechung einer ISR durch einen Interrupt gleicher Priorität zulässt, löst im Scheduler der externe IRQ eine Unterbrechung geringerer Priorität aus und beendet sich anschließend selbst. Damit ist sichergestellt, dass ein neuerlicher, externer IRQ die niederpriorige ISR, in der die Vordergrundpartition läuft, unterbrechen kann.

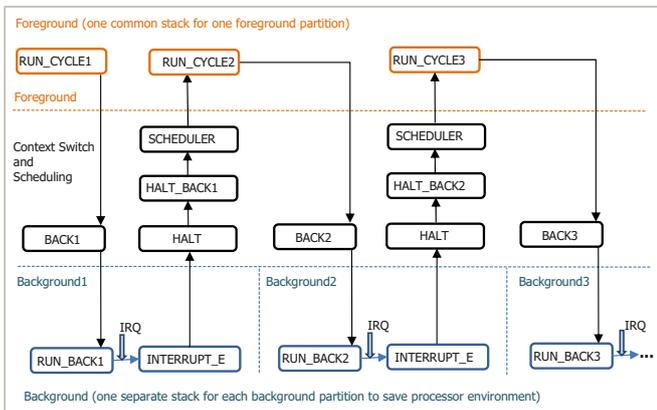


Abbildung 6: Darstellung der Zeitscheibensteuerung im ARM Cortex-M3-Programm des Modellwechselrichters

Bei der realisierten Zeitscheibensteuerung im Modellwechselrichter wurden beispielhaft eine Vordergrundpartition zur Bearbeitung der benutzerdefinierten Algorithmen und vier Hintergrundpartitionen zu Überwachungszwecken und zur Abarbeitung des Monitors umgesetzt. Der Scheduler lässt sich jedoch einfach um weitere Zeitscheiben erweitern, falls dies erforderlich sein sollte. Eine schematische Darstellung der Zeitscheibensteuerung zeigt Abbildung 6. Die Zeit vom Auftreten des IRQ bis zum Eintritt in den nachfolgenden

Vordergrundprozess RUN\_CYCLE<sub>x</sub> ist in Abbildung 7 dargestellt und beträgt bei einer maximalen Kernfrequenz des Cortex-M3 (SYSCLK) von 72 MHz etwa 1.7  $\mu$ s.



Abbildung 7: Zeit für Context Switch vom IRQ bis zum Vordergrund

## 6 Software

Die Software des Modellwechselrichters wurde vollständig in Assembler erstellt. Aus Gründen der Codegröße und aus Validierungsgründen wurde auf die bei der Programmierung mit der Programmiersprache C häufig verwendeten Funktionen der CMSIS verzichtet. Jedoch wurden Assemblermacros und eine umfangreiche Kommentierung erstellt, um die Lesbarkeit des Codes zu erhöhen. So wurden zum Beispiel die bei vielen Assemblern für Speicherzugriffe üblichen Bitbefehle wie bset, bclr, btst und bchg eingeführt, die den zunächst schwer zu lesenden Bit-Banding-Mechanismus des ARM Cortex verwenden [2], [5–6].

Um Studierenden eine möglichst kostenfreie Variante für weitere Untersuchungen zu geben, wurde die frei verfügbare Variante der CodeSourcery Toolchain von Mentor Graphics verwendet [14]. Diese stützt sich auf den sehr weit verbreiteten GNU ARM Assembler und hat somit keine Beschränkungen hinsichtlich Wiederverwendbarkeit oder Codegröße wie etwa die integrierte Entwicklungsumgebung MDK-ARM der Firma KEIL [15]. Letztere bietet zwar auch eine freie, aber auf 32 kByte beschränkte Version ihrer Entwicklungsumgebung samt Toolchain an. Vorteil der KEIL-Entwicklungsumgebung jedoch ist, dass bereits ein Simulator integriert ist, der bei den GNU Tools fehlt.

Als IDE wurde die ebenfalls frei verfügbare und sehr weit verbreitete Eclipse-Umgebung der Eclipse Foundation eingesetzt [16]. Sie bietet den Vorteil, dass mit ihr benutzerfreundlich Übersetzungsvorgänge oder externe Programme gestartet werden können.

Gleichzeitig ist bereits eine Debugging-Umgebung integriert, die im Zusammenspiel mit dem in der CodeSourcery Toolchain enthaltenen GNU Debugger (GDB) ein komfortables on-chip Debugging ermöglicht. Hierzu muss lediglich einmalig ein on-chip Debug Server gestartet werden, der bei Auftreten von Debugging Events

diese an den Debugger weiterleitet bzw. auftretende Debug Requests vom Debugger an die Hardware weiterreicht.

Für den Modellwechselrichter wurde als on-chip Debug Server das ebenfalls frei erhältliche Programm openOCD verwendet [17]. Dieses wurde von Dominic Rath im Rahmen einer Diplomarbeit an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Augsburg entwickelt und kontinuierlich weiterentwickelt. Es unterstützt zwischenzeitlich eine Vielzahl von ARM-Prozessoren und Debug Adaptern.

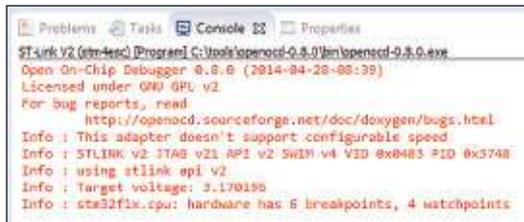


Abbildung 8: Verbindungsaufbau mit einem ST-Link/V2 via openOCD

Abbildung 8 zeigt einen erfolgreichen Verbindungsaufbau mit einem ST Link/V2, der über eine JTAG-Verbindung an einen STM32F103VCT6-Prozessor angekoppelt wurde. Die Kommunikation zwischen GDB und openOCD erfolgt dabei standardmäßig über das TCP/IP-Protokoll, Port 3333 [18].

## 7 Algorithmen

### 7.1 Feldorientierte Regelung

Anhand des Modellwechselrichters sollte untersucht werden, ob die Rechenzeit im Vordergrund einer Zeitscheibe ausreichend ist, um heute gängige Verfahren zur Ansteuerung von Drehstrommotoren zu realisieren. Dazu müssen nach Wechsel in den Vordergrund im RUN\_CYCLE $x$  ( $x=1...4$ ) folgende Schritte bearbeitet werden:

- Ausgabe der im letzten Zyklus berechneten PWM-Kommandos
- Einlesen der Sollwerte vom CAN-Bus
- Einlesen und Aufbereiten der Messwerte
- Berechnung der Algorithmen zur feldorientierten Regelung
- Wechsel in den Hintergrund RUN\_BACK $x$  ( $x=1...4$ )

Die Algorithmen implementieren eine Umrechnung der Maschinengrößen in ein transformiertes Koordinatensystem. Das seit einigen Jahren gängige Verfahren zur Darstellung aller Feld- und Zustandsgrößen eines Motors ist die Feldorientierung, bei der alle Größen in ein meist mit dem Erregerfeld des Rotors mitrotierendes, orthogonales Koordinatensystem transformiert werden [19]. Zwar sind auch durchaus andere Ansätze möglich, jedoch hat das Verfahren der Feldorientierung den großen Vorteil, dass die bei einer Stromregelung verwendeten Sollwerte bei konstantem Drehmoment zeitlich unabhängig werden. Damit lassen sich – verglichen zum Beispiel mit dem

Verfahren nach [20] – auch integrierende Anteile im Stromregler realisieren. Dadurch entfällt die Notwendigkeit von Nachlaufreglern. Nach Berechnung der Reglerausgangsgrößen müssen diese allerdings wieder mithilfe der inversen PARK- und CLARKE-Transformationen in das dreisträngige, statorfeste Koordinatensystem der Drehstrommaschine umgerechnet werden. Diese bilden dann die Kommandos für den im CPLD realisierten Pulsbreitenmodulator.

### 7.2 CAN-Bus

Die Sollwerte des Modellwechselrichters werden mithilfe des bereits im STM32 integrierten CAN-Controllers von einem übergeordneten Kontrollrechner über den CAN-Bus vorgegeben. Um eine hohe Kompatibilität zu gewährleisten, wurde das Protokoll nach dem CANopen Standard integriert. Die Funktionalität wurde dabei auf die einer Minimum Bootup Node im Protokoll beschränkt, allerdings ohne SDO-Kommunikation, siehe Abbildung 9.

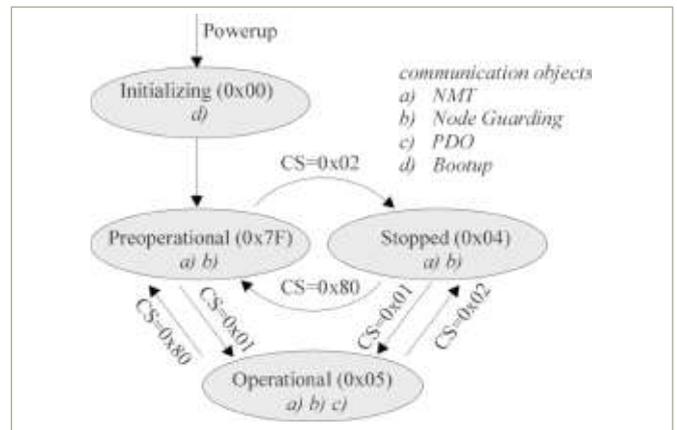


Abbildung 9: Zustandsdiagramm der CANopen-Kommunikation des Modellwechselrichters

Nachdem die Wechselrichterparametrierung über die RS232-Schnittstelle des integrierten Monitors erfolgt, ist eine SDO-Kommunikation auch nicht zwingend erforderlich, sofern PDO und NMT vollständig zur Verfügung stehen. Im Detail wurden folgende, zum Teil parametrierbare Standardwerte für die Kommunikationsparameter gewählt:

- Baud Rate: 250 kbaud
- CAN 2.0 A identifier: 11 bit (standard identifier)
- Data Byte Format: Little Endian
- Data Format: CANopen Word Format (2 Bytes)
- Standard Node-ID: 0x03
- Sync counter: 0x01
- NMT | Sync COB-ID: 0x000 | 0x080
- Implementation Type: Slave Node with integrated NMT node guarding
- NMT States: Initializing, Preoperational, Stopped
- PDO communication: PDO1 (tx) and PDO1 (rx)
- SDO communication: missing

### 7.3 Hintergrund-Monitor

Der Monitor läuft in einer der vier Hintergrundpartitionen des Realtime Schedulers und wird je nach zur Verfügung stehender Rechenzeit aufgerufen. Die Ausgabe erfolgt in einem VT100 Terminal über eine serielle Schnittstelle mit den Verbindungsdaten 9600 baud, 8N1. Abbildung 10 zeigt die Tracefunktion des Monitors, die kontinuierlich die niederwertigen 16-bit der Systemzeit (erste Spalte) als Vielfache der Dauer einer Zeitscheibe – im Modellwechsler 50 µs – anzeigt. Ebenso werden das System- und Benutzerstatuswort sowie 10 parametrierbare Speicherhalbworte in einer Tracetabelle anzeigt.

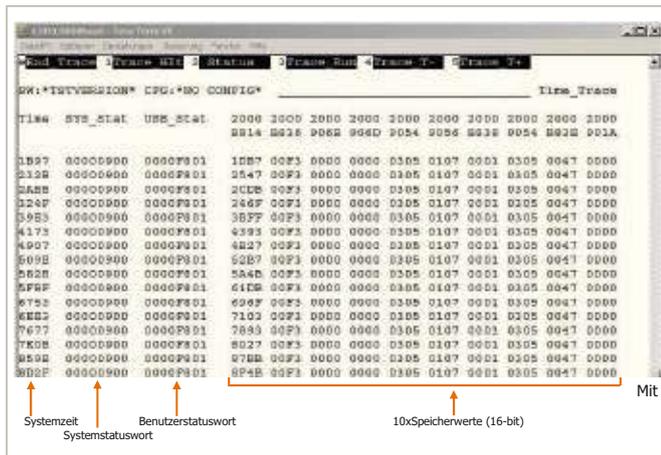


Abbildung 10: Monitor-Tracefunktion: Ausgabe von 10xSpeicherwerten (16-bit) und des Programmstatus

Mit den Tasten 4 und 5 kann auf bis zu vier weitere Tracetabellen umgeschaltet werden, sodass sich insgesamt bis zu 40 Speicherhalbworte (16-bit) darstellen lassen. Zusätzlich werden der Softwarestand sowie die Versionsnummer der Parameterdatei zur Motorenkonfiguration dargestellt.

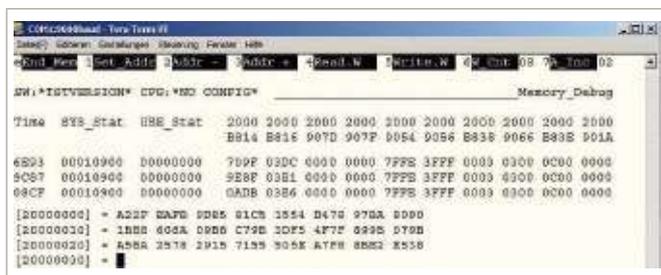


Abbildung 11: Monitor-Speicherfunktion: Auslesen/Manipulieren von Speicherinhalten

Weitere Funktionalitäten sind die Modifikationsmöglichkeit von System- und Benutzerstatuswort, das Durchführen von Rücksetzfunktionen, das Hochladen von Parameterdateien im s19-Record Format mit on-chip Flashmöglichkeit, das Herunterladen von Realtime Traces von bis zu 4x16-bit Variableninhalten (mit konfigurierbarem Abtastintervall) sowie eine Auslesemöglichkeit des im Chip integrierten Speichers, siehe Abbildung 11. In flüchtigen Speicherbereichen des Prozessors können über diese Schnittstelle zusätzlich Daten manuell verändert werden.

### 8 Ergebnis

Im Rahmen der Untersuchungen konnte die Verwendbarkeit von ARM Cortex-M3-Kernen zum Einsatz in voll digitalisierten Wechselrichtern vollumfänglich bestätigt werden. Die erstellten Programme werden im Rahmen von Projekten an die Studierenden weitergegeben und die gewonnenen Erfahrungen in die Lehrveranstaltungen integriert werden. Eine Schnittstelle zur Lehre ist zum Beispiel das Rennwagenprojekt des Running Snail Racing Teams der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden, bei dem als Embedded Controller der Cortex-M4 Prozessor STM32F407, also ein Cortex-M3 mit zusätzlicher FPU, eingesetzt werden soll.

Es ist gelungen, eine klar strukturierte, umfassend kommentierte, übersichtliche und einfach zu validierende Software mit einer Programmcodegröße von deutlich unter 20 kByte mit dem Thumb-Befehlssatz des Cortex-M3 zu realisieren. Trotz der geringen Speichergröße beinhaltet das Programm neben dem Realtime Scheduler einen vollständigen Hintergrundmonitor, eine CAN-Busanbindung nach CANOpen Standard (Minimum Bootup Node ohne SDO) sowie die für Wechselrichter notwendige Parametriermöglichkeit durch Lade- und Flashfunktionen des Hintergrundmonitors.

Es konnten alle notwendigen Programmteile platzsparend aus bisher realisierten, voll digitalisierten Wechselrichtern portiert und mithilfe des Befehlssatzes des Cortex-M3 problemfrei integriert werden. Dabei wurden fehlende Befehle durch Macrobefehle mithilfe der Macrofunktionalität des GNU ARM Assemblers nachgebildet.

Zum Leistungsnachweis wurde ein vollständig in Assembler entworfener Echtzeit-Scheduler auf einem Modellwechsler implementiert, mit dem die Algorithmen simultan von einem Antrieb bis zu maximal vier Antrieben gerechnet werden können.

## Abkürzungen

- AD Analog/Digital
- ARM Advanced RISC Machine
- CAN Controller Area Network
- CMSIS Cortex Microcontroller Software Interface Standard
- CTO Computing Time Overrun
- ISR Interrupt Service Routine
- JTAG Joint Test Action Group
- CPLD Complex Programmable Logic Device
- DMIPS Dhrystone Million Instructions Per Second
- FPU Floating Point Unit
- FSMC Flexible Static Memory Controller
- HDL Hardware Description Language
- IDE Integrated Development Environment
- IRQ Interrupt ReQuest
- NMT Network Management
- openOCD open On-Chip Debugger
- PDO Process Data Object
- RISC Reduced Instruction Set Computer
- SDO Service Data Object
- SNR Signal-to-Noise Ratio
- USART Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter

---

## Literaturverzeichnis

- [1] Frenzel, B.; Kurzweil, P.; Rönnebeck, H.: Electromobility concept for racing cars based on lithiumion batteries and supercapacitors. In: *Journal of Power Sources* 196 Elsevier (2010), S. 5364–5376
- [2] Yiu, J.: The Definitive Guide to the ARM Cortex-M3. 2nd Edition. Oxford : Elsevier, 2010.
- [3] ST MICROELECTRONICS: *STMicroelectronic STM32 32-bit ARM Cortex MCUs – STMicroelectronics*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.st.com/web/en/catalog/mmc/FM141/SC1169> [zuletzt abgerufen am: 17.03.2014]
- [4] ST MICROELECTRONICS: *STM32F10xxx/20xxx/21xxx/L1xxxx Cortex-M3 programming manual, PM0056*. Genf, 2011 15491). – Firmenschrift
- [5] ST MICROELECTRONICS: *STM32F101xx, STM32F102xx, STM32F103xx, STM32F105xx and STM32F107xx advanced ARM-based 32-bit MCUs, Reference Manual RM0008*. Genf, 2011 (13902). – Firmenschrift
- [6] HITEX DEVELOPMENT TOOLS: *The Insider's Guide To The STM32 ARM Based Microcontroller*. Coventry, UK, 2008. – Firmenschrift
- [7] ST MICROELECTRONICS: *STM32F103xC STM32F103xD STM32F103xE High-density performance line ARM-based 32-bit MCU with 256 to 512KB Flash, USB, CAN, 11 timers, 3 ADCs, 13 communication interfaces*. Genf, 2011 (14611). – Firmenschrift
- [8] TEKTRONIX: *Tektronix Logic Analyzer, TLA6000 Series Data Sheet*. Beaverton, Oregon, 2011 (25734–3). – Firmenschrift
- [9] Frenzel, B.; Kurzweil, P.; Parspour, N.: Resolver Based Position Sensing in Automotive Applications. In: *Conference Proceedings PCIM Power Conversion Intelligent Motion* (2012), S. 1639–1645
- [10] ANALOG DEVICES: *Isolated Sigma-Delta Modulator, AD7401A*. Norwood Massachusetts, 2011 (Rev. C). – Firmenschrift
- [11] ANALOG DEVICES: *Isolated, 5 kV, DC-to-DC Converter, ADuM6000*. Norwood Massachusetts, 2013 (Rev. D). – Firmenschrift
- [12] ST MICROELECTRONICS. *ST-LINK/V2 ST-LINK/V2 in-circuit debugger/programmer for STM8 and STM32*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.st.com/web/catalog/tools/FM146/CL1984/SC724/SS1677/PF251168> [zuletzt abgerufen am 17.03.2014]

- [13] LOGILINK. *LogiLink® / PCI Express Schnittstellenkarte Parallel 1x + Seriell 2x LogiLink®*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.logilink.eu/showproduct/PC0033.htm> [zuletzt abgerufen am 17.03.2014]
- [14] MENTOR GRAPHICS: *Sourcery CodeBench Lite Edition including ARM GCC IDE*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.mentor.com/embedded-software/sourcery-tools/sourcery-codebench/editions/lite-edition/> [zuletzt abgerufen am 17.03.2014]
- [15] KEIL: *Keil MDK-ARM*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.keil.com/arm/mdk.asp> [zuletzt abgerufen am 17.03.2014]
- [16] ECLIPSE FOUNDATION: *Eclipse – The Eclipse Foundation open source community website*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.eclipse.org/> [zuletzt abgerufen am 17.03.2014]
- [17] THE OPENOCD PROJECT: *Open On-Chip Debugger*. [Online] Verfügbar unter: <http://openocd.sourceforge.net/> [zuletzt abgerufen am 04.02.2014]
- [18] THE OPENOCD PROJECT: *Open On-Chip Debugger: OpenOCD User's Guide. Release 0.8.0-dev*. [Online] Verfügbar unter: <http://openocd.sourceforge.net/doc/pdf/openocd.pdf> [zuletzt abgerufen am 04.12.2013]
- [19] Frenzel, B.; Gebhard, F.; Kurzweil, P.: *Physik Formelsammlung*. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [20] Frenzel, B.; Kilger, F.: *Method for current regulation of permanently excited synchronous motors for guided missiles having an electromechanical actuating drive for the rudder*. United States Patent and Trademark Office. April 25, 2002. US20020047680A1

## Kontakt:



**Prof. Dr.-Ing. Bernhard Frenzel**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Mechatronische Systeme  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

b.frenzel@oth-aw.de

# Kontaktlose Energie- und Datenübertragung für räumlich verteilte Lasten

Kontaktloses Laden auf Großparkplätzen

Andreas Fuchs, M.Eng.  
Stefan Fuchs, M.Eng.  
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmidt

## Kurzfassung

Die Auslegung und der Aufbau einer induktiven Energie- und Datenübertragung für eine Vielzahl von stationären Lasten werden beschrieben. Der Fokus liegt auf einer stabilen Lastspannung und einer möglichst robusten Kommunikation. Als Lasten werden die kontaktlosen Batterieladeeinheiten aus der E-Mobility betrachtet, wie sie z. B. bei Parkplätzen auftreten können. Andererseits können die Lasten auch elektrische Antriebe, wie sie in der Fabrik-Automatisierung und der Intralogistik verwendet werden, sein. Ein Ersatzschaltbild mit konzentrierten Parametern wird für Systemstudien verwendet. Die Parameter für die induktiven Koppereinheiten werden mittels FEM-Rechnungen bestimmt. Die wesentlichen Auslegungskriterien werden anhand eines Labormusters in einem Modellmaßstab verifiziert.

Stichworte: Kontaktlose Energieversorgung, mehrere stationäre Lasten, Laden von Elektrofahrzeugen, Ladeinfrastruktur

## Abstract

This paper deals with the layout and design of an inductive energy and data transmission system for a variety of stationary loads, with a focus on stable load voltage and robust communication. Loads relate to the contactless battery-charging units used for e-mobility, which may occur in car parks, for example. On the other hand, loads may also refer to the electric drives used in factory automation or intra-logistics systems. An equivalent circuit diagram with concentrated parameters is used for system studies. The parameters for the inductive coupling units are determined using FEM calculations. The main layout criteria are verified in model scale by means of a laboratory model.

Key words: Contactless power supply, several stationary loads, charging of electric vehicles, charging infrastructure

## 1 Einleitung

Wir betrachten die kontaktlose elektrische Energieversorgung und den Datentransfer für eine Vielzahl von Lasten, die über eine größere Fläche verteilt sind. Solche elektrischen Lasten sind z. B. Ladeeinheiten von Elektrofahrzeugen auf Parkplätzen, in Parkhäusern oder aber auch elektrische Antriebe, wie sie vielfach in Fertigungs- und Förderanlagen verwendet werden. Betrachtet man die Topologie eines Parkplatzes, könnte man jeden einzelnen Parkplatz mit der zentralen Einspeisestation über einen separaten Lastabgang versorgen. Dieser besteht dann zumindest aus Schaltgeräten, Verkabelung und einer Leistungselektronik für die Umsetzung der Netzspannung auf die in der induktiven Energieübertragung zu verwendende Frequenz und einen Koppler. Wir schlagen vor, eine Reihe

von Parkplätzen zusammenzufassen und gemeinsam zu versorgen, zu steuern und die Verbrauchsmessung ebenfalls über eine IPT (Induktive Power-Transfer) als Kopfstation zu versorgen, wobei der einzelne Parkplatz ausschließlich mit einem Koppler und einem kommunikationsfähigem Zähler für die verbrauchte elektrische Leistung ausgestattet ist.

## 2 Systembetrachtung

### 2.1 Gesamtlayout

Das Teil des induktiven Kopplers, das in jedem einzelnen Parkplatz montiert ist, wird für eine gesamte Reihe von Parklücken jeweils an eine einzige gemeinsame verteilte Wicklung angeschlossen, die aus mehreren Windungen

bestehen kann. Diese Wicklung wird von einer IPT-Kopfstation eingespeist, die die Leistungselektronik beinhaltet um diese Wicklung mit der Frequenz der induktiven Energieübertragung zu speisen. Die Datenübertragung für die Steuerung zum „Load Balancing“ und zur Verbrauchsmessung ist ebenfalls für jede Reihe aufgebaut. Eine schematische Darstellung des Gesamtlayouts ist in Abbildung 1 dargestellt. Die identische Topologie findet man auch in bestimmten Anwendungen der dezentralen Automatisierung wie sie z. B. in der Fertigung und Intralogistik vorkommen. Auch hier sind die Lasten über eine Fläche verteilt und müssen gemeinsam koordiniert angesteuert werden [1].

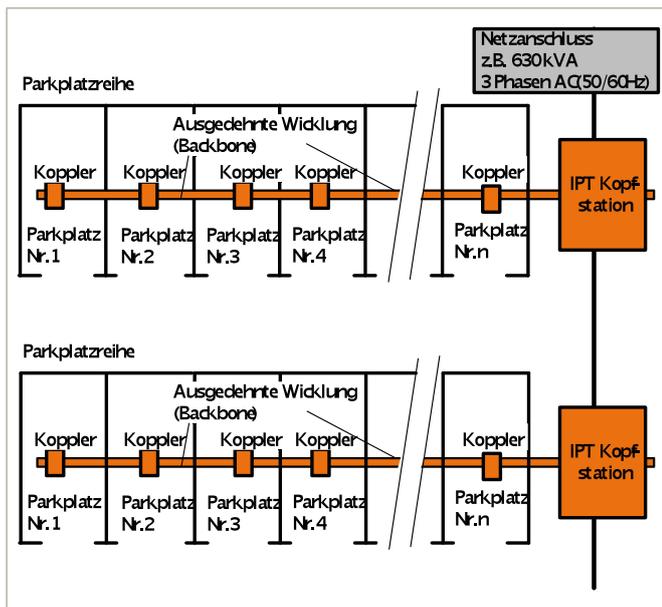


Abbildung 1: Schematische Übersicht des Systems

## 2.2 Elektrische Auslegung

Das Ziel der Auslegung für die elektrische Versorgung ist eine stabile Lastspannung. Im Hinblick auf die elektrische Versorgung stellt die hier vorgeschlagene Topologie der induktiven Energieübertragung einen Transformator mit mehreren Wicklungen dar, wobei eine Wicklung nicht konzentriert auf einen Kern geführt ist sondern sich über die zu versorgende Strecke verteilt. Da eine indirekte Einspeisung eine höhere Stabilität der Lastspannung im Vergleich zu einer direkten Einspeisung ermöglicht, verwenden wir diese Topologie [2]. Daher speisen wir von der IPT-Kopfstation über einen Koppler auf die verteilte Wicklung ein. Für diese Einspeisung verwenden wir eine gesteuerte H-Brücke anstelle eines Oszillators, sodass eine Abstimmung und Anpassung des Systems über eine Frequenzsteuerung erfolgen kann [3]. Der prinzipielle Aufbau ist schematisch in Abbildung 2 dargestellt.

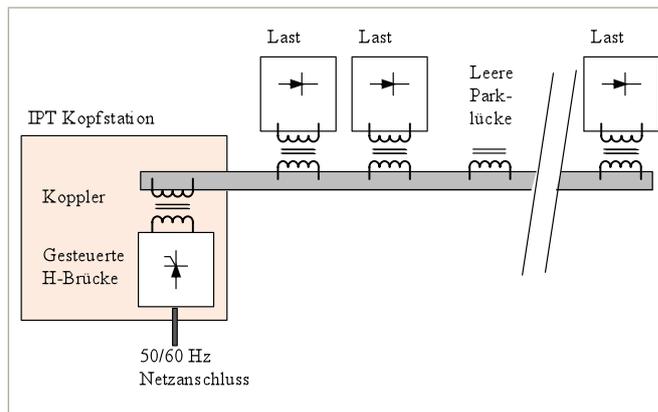


Abbildung 2: Schematische Aufbauzeichnung

Die verteilte Wicklung erstreckt sich über einige 10 bis 100 m, daher müssen die Leiter dieser Wicklung möglichst ohne Abstand verlegt werden, sodass eine elektromagnetische Verträglichkeit ermöglicht wird. Hier kann auch eine Kompensationswicklung in Betracht kommen, die ausschließlich die Feldpegel auf die in den einschlägigen Normen Bezug genommen wird, sicherstellen kann. Die resultierende parasitäre Kapazität der verteilten Wicklung kann bei den üblichen IPT-Frequenzen im Bereich von 20 bis 140 kHz die Systemauslegung maßgeblich mit beeinflussen. Dies gilt selbstverständlich insbesondere für die höheren Frequenzen, wie sie für das kontaktlose Laden von Elektrofahrzeugen in der E-Mobility relevant sind. Da diese parasitäre Kapazität im elektrischen Ersatzschaltbild als parallel geschaltet wirksam wird, wird diese Wicklung serienkompensiert. Auf der Lastseite ist eine Parallelkompensation besser zur Laststabilisierung geeignet als eine Serienkompensation, daher wird hier die Parallelvariante verwendet. Auf der Einspeiseseite, also an der IPT-Kopfstation, wird allerdings eine Serienkompensation angesetzt, um die hohen Ströme bei einer Parallelresonanz zu vermeiden.

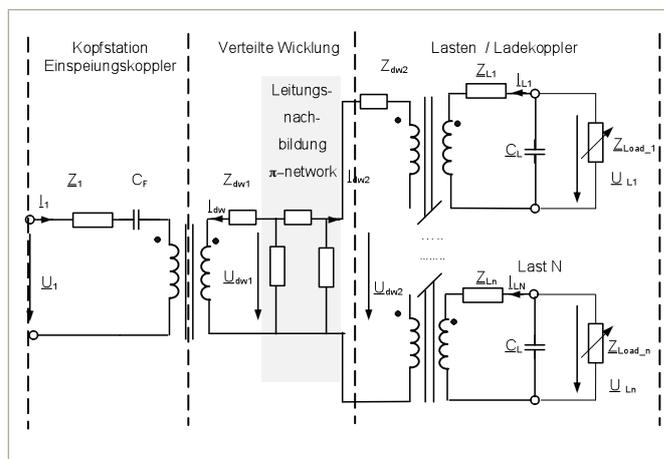


Abbildung 3: Ersatzschaltbild

Das gesamte System beschreiben wir im Ersatzschaltbild über gekoppelte Transformatoren. Der erste Transformator beschreibt die Einkopplung von der Kopfstation auf die verteilte Wicklung, wobei die verteilte Wicklung in diesem Fall die Sekundärwicklung dieses Transformators darstellt. Ein weiterer Transformator modelliert die Kopplung von dem stationären Teil des Kopplers auf den Teil des Kopplers der am Fahrzeug angebracht ist. Hier wird auch die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Wicklungen innerhalb einer Reihe von Parkplätzen mitbeschrieben. Die verteilte Wicklung wird über ein Leitungsstück modelliert und mit einem Standard-Vierpol beschrieben. In Abbildung 3 wird die elektrische Ersatzschaltung eines solchen Systems dargestellt.

Die Ersatzschaltbildung liefert ein Gleichungssystem (1), das für die Lastspannungen im Frequenzbereich gelöst wird. Diese Herangehensweise ist für lineare und für nichtlineare Lasten geeignet, die über ihre Oberschwingungen modelliert werden, solange die Ferrite der Koppler nicht in Sättigung betrieben werden. In den üblichen Anwendungen ist dies eine gerechtfertigte Annahme.

$$(1) \quad \underline{U}_1 = (\underline{Z}_1 + 1/j\omega C_F) \underline{I}_1 + j\omega M_{1dw} \underline{I}_{dw1}$$

$$\underline{U}_{dw1} = j\omega M_{dw1} \underline{I}_1 + \underline{Z}_{dw1} \underline{I}_{dw1}$$

$$\underline{U}_{dw2} = \underline{Z}_{dw2} \underline{I}_{dw2} + j\omega \sum_{i=1}^N M_i \underline{I}_{Li}$$

$$\underline{U}_{dw1} = -\underline{Z}_{\pi 11} \underline{I}_{dw1} - \underline{Z}_{\pi 12} \underline{I}_{dw2}$$

$$\underline{U}_{dw2} = -\underline{Z}_{\pi 21} \underline{I}_{dw1} - \underline{Z}_{\pi 22} \underline{I}_{dw2}$$

$$\underline{U}_{Li} = \underline{Z}_{Li} \underline{I}_{Li} + j\omega M_i \underline{I}_{dw2}$$

$$\underline{U}_{Li} = -\underline{Z}_{Load\_i} \parallel j\omega C_{Li} \underline{I}_{Li}$$

### 2.3 Einfluss der Kopplerauslegung

Im Prinzip ist eine Vielzahl von unterschiedlichen Kopplergeometrien möglich, die für eine solche Anwendung eingesetzt werden können. „Solenoid [4][5][6], „DD [7], DDQ [8], Row Coupler [9]“, aber auch andere Geometrien und Konfigurationen sind in der Literatur beschrieben. Die Koppelfaktoren variieren sehr stark und reichen von kleiner 0,2 für große Luftspalte und Versatz von Primär- und Sekundärspule bis zu größer 0,9 für einen Koppler bei dem die beiden Spulen für den Ladevorgang mechanisch fast in Kontakt gebracht werden.

Um die Parameter für die Ersatzschaltbilder der Koppler zu erhalten und deren Variationen zu beurteilen, führen wir 3D-FEM-Feldberechnungen durch. Als Beispiel sind in Abbildung 4 Feldlinien für einen sogenannten DD-Solenoid Koppler dargestellt. Hier ist ein Versatz der Primär- (DD-Spule, im Parkplatz im Boden versenkt) zur Sekundär-Spule (Solenoid am Fahrzeugboden montiert) berücksichtigt und es wurde ein Luftspalt, wie er z. B. bei SUVs üblich ist, modelliert. Weiter werden die Feldpegel für einen E-Kern Koppler dargestellt, bei dem fast kein Luftspalt vorhanden ist, da hier der E-Kern mechanisch

zum Laden an das Joch herangeführt ist. Bei den meisten Feldrechnungen ergeben sich Induktivitätswerte von einigen 10 bis einigen 100  $\mu\text{H}$ , die klarerweise von der Menge des verbauten Ferrits abhängen und mit der Windungszahl und Fläche der Spulen skalieren. Für eine tatsächliche Auslegung wählen wir ein stark gekoppeltes System mit EI-Kern als Kopplergeometrie [10].

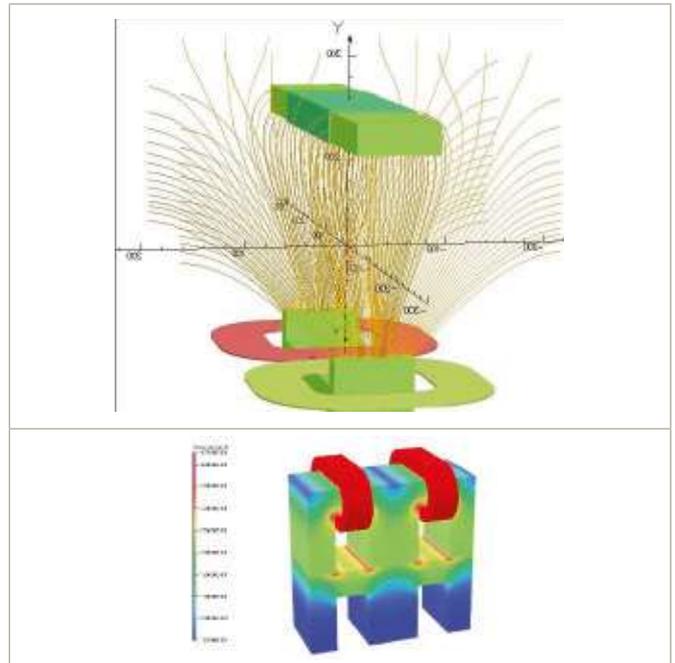


Abbildung 4: Feldlinien für eine DD-Solenoid Anordnung mit Versatz und Feldpegel für eine E-Kern Konfiguration

### 2.4 Datenübertragung

In einem ersten Schritt, der hier beschrieben wird, verwenden wir ein zweites paralleles System für die Datenübertragung. Das heißt wir verwenden eigene Koppler und eine separate Leitung anstatt die verteilte Wicklung der Leistungsübertragung zu verwenden. Ein eigens angepasstes OFDM-Verfahren (Orthogonal Frequency Devision Multiplexing) wird verwendet, um Daten zu übertragen. Mehr Details zur Datenübertragung sind in [11] zu finden. Die sehr hohen Störpegel, die durch die H-Brücken-Pulse der Leistungsübertragung bedingt sind, erfordern „Soft-Bit Decision“, optimierte Trägerallokation sowie angepasste Synchronisation für die OFDM.

### 3 Verifizierung der Auslegungsprinzipien

Im Labor wurde ein Teststand aufgebaut, bei dem eine verteilte Wicklung mit über 60 m Ausdehnung realisiert wurde. Um die IPT-Kopfstation rudimentär nachzubilden wurde ein H-Brücken Modul verwendet, das im Frequenzbereich bis zu 50 kHz und 10 kW betrieben werden kann. Zusätzlich wurde ein H-Brücken Modul mit 2 kW Leistung und einem nutzbarem Frequenzbereich bis 180 kHz aufgebaut. Als Lasten wurden an die Koppler Scheinwerfer und Antriebe angeschlossen. Die ausgedehnte Wicklung ist in Abbildung 5 dargestellt. Mit diesem Versuchsaufbau

haben wir eine unterschiedliche Zahl an Verbrauchern mit unterschiedlicher Leistung betrieben. Bei Leistungen bis zu einigen 100 Watt pro Last konnte eine stabile Lastspannung, die unabhängig von der Anzahl der Lasten und deren Leitungsbedarf ist, erreicht werden.



Abbildung 5: Laboraufbau der verteilten Wicklung

#### 4 Fazit und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass die Lastspannungsschwankungen minimiert werden, wenn die vorgeschlagene Auslegung verwendet wird. In weiteren Untersuchungen sind höhere Leistungspegel sowie die Verluste in der verteilten Wicklung im Detail zu betrachten. Weiterhin sind die Feldpegel in Bezug auf die Grenzwerte bei realistischen Leistungen von 3–10 kW pro Parkplatz zu betrachten.

---

## Literaturverzeichnis

1. H.-P. Schmidt, M. Gleißner et. Al "*Contactless Power- and Data transfer for Automation*" Proceedings International Forum Mechatronik 2011, Cham, Germany, pp. 491–503
2. M. Gleissner, Schmidt, H.-P.; "*Direct and indirect feed-in for inductive power transfer systems with multiple loads*" Proceedings AFRICON, 2011 , vol., no., pp.1–5, 13–15 Sept. 2011
3. A. Moradewicz; P. Kazmierkowski "*Contactless Energy Transfer System with FPGA Controlled Resonant Converter*" IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 57 No. 9, pp. 3181- 3190, 2010
4. C. Radkte et al "*Systematically Design and Optimisation of Inductive Power Transmission Systems*" Proceedings EIDPC-2013, Nuremberg, Germany Dec. 2013
5. R. Shimizu, Y. Kaneko, S. Abe, "*A New Hc Core Transmitter of a Contactless Power Transfer System that is Compatible with Circular Core Receivers and H-shaped Core Receivers*" Proceedings EIDPC-2013, Nuremberg, Germany Dec. 2013
6. Y. Nagatsuka, N. Ehara, Y. Kaneko, S. Abe, T. Yasuda "*Compact Contactless Power Transfer System for Electric Vehicles*" Proceedings Power Electronics Conference (IPEC), 2010
7. M. Budhia, J. T. Boys, G. A. Covic, "*Development of a Single-Sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle IPT Charging Systems*" IEEE Trans. Industrial Electronics VOL. 60, NO 1. 2013
8. Raabe, G.A. Covic "*Practical Design Considerations for Contactless Power Transfer Quadrature Pick-Ups*" Trans. Industrial Electronics VOL. 60, NO 1. 2013
9. C. Joffe, S. Ditze, A. Roßkopf "*A Novel Positioning Tolerant Inductive Power Transfer System*" Proceedings EIDPC-2013, Nuremberg, Germany Dec. 2013.
10. A. Fuchs, "*Study of a contactless power transfer system*" Master thesis, 2013, East Bavarian Technical University Amberg, Germany,
11. U. Vogl, H.-P. Schmidt "*Field Bus System with Contactless Power and Data transfer*" Proceedings KomMA, Lemgo, 2012. Jahreskolloquium Kommunikation in der Automation 3, 2012, ISBN: 978-3-9814062-2-1. German. Conference Proceeding

## Kontakt:



**Andreas Fuchs, M.Eng.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien  
und Informatik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

a.fuchs@oth-aw.de



**Stefan Fuchs, M.Eng.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien  
und Informatik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

ste.fuchs@oth-aw.de



**Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmidt**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien  
und Informatik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

h.schmidt@oth-aw.de

## Zusammenfassung

Die Firma BHS Corrugated Maschinen- und Anlagenbau GmbH in Weiherhammer stellt komplette Anlagen zur Herstellung von Wellpappe her und ist auf diesem Gebiet Weltmarktführer. Das hier beschriebene Projekt beschäftigt sich mit der Entwicklung von gut bedienbaren Benutzungsschnittstellen zur Steuerung und Überwachung der Produktionslinien.

## Summary

BHS Corrugated Maschinen- und Anlagenbau GmbH in Weiherhammer develops complete solutions for the production of corrugated cardboard and is the market leader in this field. The project described here deals with the development of easily operable user interfaces for the control and monitoring of production lines.

## 1 Ausgangssituation

Eine besondere Herausforderung bei der Steuerung von Industrieanlagen ist die zunehmende Digitalisierung der Bedienelemente. Mehr und mehr werden Maschinen im industriellen Umfeld mittels Bedienoberflächen von portablen Computern (wie Laptops, Tablets oder Handys) bedient. Dabei muss die Benutzung nicht mehr an der Maschine ausgeführt werden. Sie kann genauso gut von weit entfernten Orten aus erfolgen. Diesen Übergang, von mechanischen zu digitalen Bedienelementen, kann man als eine neue industrielle Revolution betrachten, die Chancen und Risiken birgt. Das Projekt „Mensch-Maschine-Interaktion“, eine Kooperation der Firma BHS Corrugated Maschinen- und Anlagenbau GmbH mit der Fakultät Elektro- und Informationstechnik der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden, beschäftigt sich mit diesem Thema. Ziel des Projektes ist es, die Usability (Krug 2006, S. 5) der digitalen Benutzungsschnittstellen zu erhöhen.

Um eine Basis für die Überarbeitung zu schaffen, wurde zunächst die Ausgangssituation betrachtet. Gegenstand der Untersuchung waren dabei ebenso die bisher verwendeten Benutzungsschnittstellen wie auch der Benutzungskontext und die Benutzenden selbst. Bei der Untersuchung der bestehenden Benutzungsschnittstellen war zunächst von Interesse, wie das Interaktionskonzept

aktuell implementiert ist und in welcher Art und Häufigkeit eine Interaktion stattfindet. Hierzu wurden Interviews mit an den Anlagen beschäftigten Personen geführt und diese anschließend ausgewertet. Es konnte folgendes festgestellt werden:

- Mehrere, parallel geöffnete Bildschirmmasken sind zur Bedienung geöffnet.
- Zwischen den Bildschirmmasken wird selten gewechselt.
- Es gibt keine durchgängige Gestaltung und Positionierung der Bedienelemente.
- Bildschirmmasken sind teilweise mit zu vielen Elementen überladen.
- Der/Die Bedienende kann schlecht die Übersicht behalten und ist nicht im Bilde, an welcher Stelle der Interaktion er/sie sich befindet.
- Es gibt häufige Interaktionen: das Überwachen von Maschinenwerten, die Parallelbedienung von Maschinen, das Überwachen von laufenden und kommenden Aufträgen.

Bei der Untersuchung des Benutzungskontextes wurde das Umfeld und die Situation, in der die Interaktion stattfindet, betrachtet. Es wurde festgestellt, dass die Benutzung

- in sehr schmutziger Umgebung,
- bei schwierigen Lichtsituationen und
- mit Schutzkleidung

erfolgen kann. Weiter wurde festgestellt, dass bedienende Personen in sehr lautem Umfeld arbeiten, und dies über einen langen Zeitraum hinweg (teilweise über 8 Stunden). Zudem ist es erforderlich, dass die Displays aus großer Entfernung erkennbar sind. Auch muss eine sehr schnelle Bedienung möglich sein, damit auf Fehler und Gefahren unmittelbar reagiert werden kann.

Die benutzenden Personen lassen sich in zwei Gruppen einteilen: Zum einen handelt es sich um Beschäftigte der Herstellerfirma, welche die Anlagen warten oder in Betrieb nehmen müssen. Diese sind ohnehin mit den Maschinen und den Bildschirmmasken vertraut. Zum anderen handelt es sich um das Personal des jeweiligen Kunden, welches vor der Inbetriebnahme der Maschine speziell geschult werden muss.

Beide Gruppen stellen unterschiedliche Ansprüche an das Interface. Die Mitarbeitenden der Herstellerfirma müssen die Maschinen kalibrieren und gegebenenfalls technisch komplizierte Problemstellungen angehen und benötigen daher in den meisten Fällen wesentlich detailliertere Einstellungsmöglichkeiten und Optionen als das Personal des Kunden. Dieses nutzt die Anlagen nur zur Produktion und wird, so lange es nicht zu technischen Problemen kommt, in der Regel keine Maschineneinstellungen ändern müssen.

## 2 Problemstellung und Lösungsansatz

**Unübersichtlichkeit:** Um dem Benutzenden die Interaktion zu erleichtern, fehlt ein zentrales Navigationselement, welches ihm jederzeit Aufschluss darüber gibt, wo er sich befindet oder wie er zwischen verschiedenen Bildschirmmasken wechselt. Außerdem kann der häufige Wechsel in unterschiedlich strukturierte Bildschirmmasken zusätzlich für Verwirrung sorgen.

**Informationsdichte:** In den bisher verwendeten Benutzerschnittstellen wurden teilweise sehr viele Informationen gleichzeitig dargestellt. Eine hohe visuelle Komplexität wirkt sich negativ auf die Usability aus (Müller & Schrepp 2013).

**Konsistente Gestaltung:** Elemente gleicher Funktion und Bedeutung sollten auch durchgängig einheitlich gestaltet sein. So sollte ein Button, der ein Eingabemenü öffnet, auch in jeder Bildschirmmaske gleich aussehen und über das gleiche Verhalten verfügen. Generell sollte auf eine einheitliche und konsistente Gestaltung geachtet werden (Shneiderman & Plaisant 2005, S. 74f).

Diese Probleme werden wie folgt angegangen:

Ein zentrales Navigationselement wird implementiert, damit die Benutzenden schnell und problemlos zwischen verschiedenen Eingabemasken oder Maschinensteuerungen wechseln können. Die Interaktion soll künftig in

einer zentralen Bildschirmmaske stattfinden, anstatt wie bisher in vielen verschiedenen.

Zusätzlich wird die Bildschirmmaske neu aufgeteilt. Die ursprünglichen Masken waren immer darauf ausgerichtet, seitenfüllend auf einem Monitor angezeigt zu werden. Dies bedeutet jedoch, dass für jede Maske, die parallel geöffnet wurde, ein eigener Monitor vorhanden sein musste. Im besten Fall sollte aber nur ein einziger Monitor zur Anzeige aller Informationen notwendig sein. Zu diesem Zweck wurde der zur Verfügung stehende Platz auf dem Bildschirm in fünf Bereiche unterteilt (s. Abbildung 1).

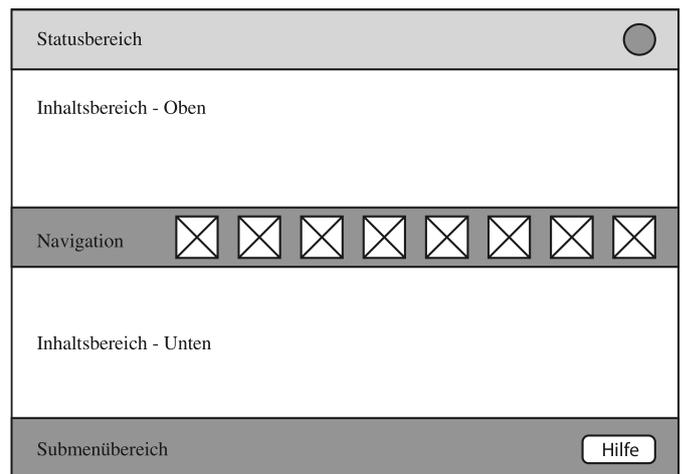


Abbildung 1: Bildschirmlayout

Der Statusbereich enthält allgemeine Informationen wie den aktuellen Betriebszustand der Fertigungslinie. Der zentrale Navigationsbereich gibt den Benutzenden die Möglichkeit, schnell zwischen verschiedenen Maschinen der Fertigungslinie zu wechseln. Er enthält zusätzlich Visualisierungen der wichtigsten Maschinenparameter. Er ist immer zu sehen, liefert einen schnellen Überblick über die gesamte Anlage und bildet daher das „Rückgrat“ der Benutzerinteraktion. Über die beiden Inhaltsbereiche lassen sich bis zu zwei Bildschirmmasken gleichzeitig nutzen, zwischen denen man schnell durch Reiter wechseln kann. Die Inhaltsbereiche kann man vergrößern (maximieren), sodass nur noch ein Inhaltsbereich angezeigt wird, dieser dafür aber entsprechend skaliert und mit mehr Informationen. Mit diesen Änderungen können die Bedienenden zur effizienten Bewältigung einer Aufgabe ohne Aufwand schnell zwischen einzelnen Teilbereichen wechseln (Herczeg 2006, S. 180).

## 3 Ausblick

Die erwähnten Lösungen wurden bereits implementiert. Im nächsten Schritt werden erste Prototypen unter realen Bedingungen getestet. Dies bietet die Möglichkeit, die ersten Erkenntnisse zu überprüfen und weitere Möglichkeiten zu identifizieren, um die Usability der Benutzerschnittstellen zu verbessern. Weitere Schritte sind zudem:

*Farbliche Konsistenz:* Zur Erhöhung der Effizienz der Oberflächen soll ein durchgängiger Farbkanon etabliert werden, in dem festgelegte Signalfarben für eine bestimmte Funktionen stehen. Zusätzlich sollen eine vereinheitlichte Schriftgröße und eine durchgängige Symbolik für mehr Ordnung sorgen.

*Benutzergruppen und Informationsbedarf ermitteln:* In diesem Zusammenhang ist zu ermitteln, ob die teilweise immer noch sehr große Informationsdichte die Bedienung erschwert. Durch Nutzerbefragungen sollen hierzu weitere Benutzergruppen und deren Informationsbedarf ermittelt werden.

---

### **Quellenangaben**

1. Herczeg, M. (2006). *Interaktionsdesign. Gestaltung interaktiver und multimedialer Systeme*. Berlin, Boston: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
2. Krug, S. (2006) *Don't make me think!* Heidelberg: Redline GmbH.
3. Shneiderman, B., & Plaisant, C. (2005). *Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction*. Boston: Pearson.
4. Schrepp, M. & Müller, K., (2013). Visuelle Komplexität, Ästhetik und Usability von Benutzerschnittstellen. In: Boll, S., Maaß, S. & Malaka, R. (Hrsg.). *Mensch & Computer 2013: Interaktive Vielfalt*. München: Oldenbourg Verlag. (S. 211–220).

### **Kontakt:**



**Bernd Gerlang, M. Eng.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien  
und Informatik  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

be.gerlang@oth-aw.de



**Prof. Dr. Dieter Meiller**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien  
und Informatik  
Studienfachberater Bachelor  
Angewandte Informatik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

d.meiller@oth-aw.de

# Potential kleiner Spritzgießmaschinen

(Projekt in Zusammenarbeit mit der Gerresheimer Regensburg GmbH)

Christoph Haller, B.Eng.  
Prof. Dr.-Ing. Tim Jüntgen

## Hintergrund

Besonders im Bereich der Medizintechnik werden immer häufiger sehr kleine Kunststoffteile mit komplexen und funktionsrelevanten Geometrien entwickelt. Zum einen steigen dabei die Anforderungen an die Bauteilqualität und zum anderen wird versucht, die Zeit und Kosten für Entwicklung, Inbetriebnahme und Produktion als wirtschaftliche Erfolgskriterien möglichst gering zu halten. Bei der Fertigung von Kunststoffbauteilen mit geringen Schussvolumina stoßen Standardspritzgießmaschinen mit Schneckenplastifizierung und -einspritzung schnell an ihre Grenzen. Beispielsweise besteht dabei die Gefahr, durch eine nicht ausreichend präzise Prozesssteuerung Bauteile mit geringerer Qualität zu produzieren. Um solche Probleme zu umgehen, müssen bei Standardspritzgießmaschinen aufwendige Werkzeuge mit mehreren Kavitäten und großdimensioniertem Anguss eingesetzt werden, was sich vor allem negativ auf die Werkzeugkosten auswirkt.

Eine alternative Möglichkeit, kleine Bauteile mit dem Spritzgießverfahren herzustellen, bieten sogenannte Mikrospritzgießmaschinen. Mit diesen speziell für kleine Schussvolumina entwickelten Maschinen ist es möglich, Kunststoffe in Kleinstmengen zu plastifizieren und präzise in die Kavität einzuspritzen [1].

Weitere positive Aspekte von Mikrospritzgießmaschinen sind geringere Investitionskosten, niedrigere Betriebskosten sowie kleinere benötigte Stellflächen im Vergleich zu Standardspritzgießmaschinen [2].

Um das technologische Potenzial einer solchen Maschine aus erster Hand untersuchen und bewerten zu können, hat die Firma Gerresheimer Regensburg GmbH im Rahmen des Kooperationsprojekts „Potenzial kleiner Spritzgießmaschinen“ dem Kunststofftechniklabor B85 der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden eine Mikrospritzgießmaschine der Firma CHRISTMANN Kunststofftechnik GmbH, Kierspe, vom Typ Babyplast 6/10 mit einem Einspritzkolbendurchmesser von 12 mm für Forschungszwecke zur Verfügung gestellt. Im Folgenden werden aktuelle Ergebnisse des Projekts vorgestellt.

## Background

Especially in the field of medical engineering, there is a growing tendency to develop very small plastics components with complex and functionally relevant geometries. In view of this situation, ever higher demands are placed on the quality of the components, while at the same time efforts are made to keep costs and time for the development, implementation and production to a minimum.

When it comes to the production of plastics components with low shot volumes, conventional injection moulding machines with screw plasticising and injection quickly reach their limits. This method entails the risk of producing, for example, components of low quality due to the imprecise process control. To avoid such problems, the conventional injection moulding machines would have to be upgraded with sophisticated tools with several cavities and a well-dimensioned sprue, with adverse effects on tool costs.

An alternative method of producing small components via injection moulding is provided by the so-called micro injection moulding machines. These machines have especially been developed for small shot volumes and make it possible to plasticise and inject even very small amounts of plastics into the cavity. Further advantages of micro injection moulding machines are lower investment and operating costs, as well as less floor space as compared to conventional injection moulding machines. In order to be able to first-hand examine and assess the technological potential of such a machine, Gerresheimer Regensburg GmbH has provided the Plastics Engineering Laboratory B85 of the OTH with a micro injection moulding machine by CHRISTMANN Kunststofftechnik (Type Babyplast 6/10, injection piston diameter of 12 mm) for research purposes as part of the cooperation project “Potential of small injection moulding machines”.

The current results of the project will be presented below.

## Technologisches Potenzial der Babyplast 6/10 Kolbenspritzgießmaschine

Erste Erfahrungen und Daten zum Thema Mikrospritzgießen und Kolbenplastifizierung konnten durch Herrn Michael Leitl im Rahmen seiner Masterarbeit an der OTH Amberg-Weiden gesammelt werden [3]. In dieser Arbeit lag der Fokus auf der Beurteilung der Qualität von Bauteilen in Bezug auf deren dimensionale Stabilität und mechanische Eigenschaften. Des Weiteren wurden Kriterien wie Energiebedarf und Rüstzeit betrachtet.

Bei der Babyplast Kolbenspritzgießmaschine erfolgt das Plastifizieren und Einspritzen über zwei unabhängige Kolben, wodurch diese beiden Vorgänge voneinander getrennt werden.

In der nachfolgenden Grafik (Abbildung 1) werden für unterschiedliche Schneckendurchmesser von Spritzgießmaschinen die Schussvolumina in Abhängigkeit vom Dosierweg dargestellt. Die Gerade für einen Durchmesser von 12 mm steht dabei für den minimalen Durchmesser für Schnecken. Die dreieckigen Markierungen auf jeder Geraden stehen für die durchmesserabhängige Mindesteinspritzmenge für Spritzgießmaschinen mit Schneckenplastifizierung und -einspritzung [6].

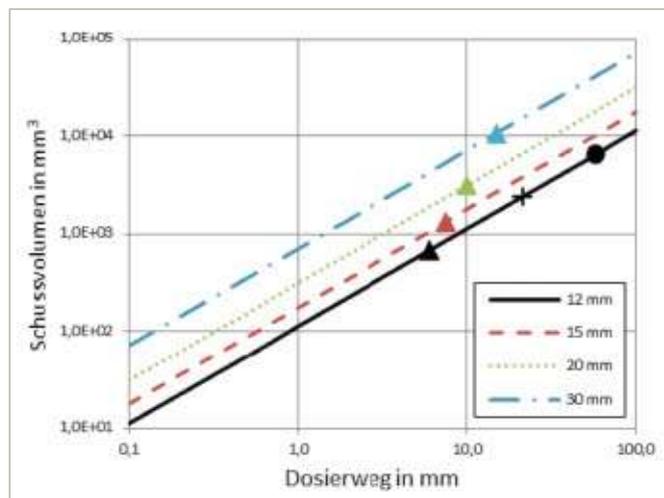


Abbildung 1: Schussvolumen in Abhängigkeit von Dosierweg und Einspritzkolben- bzw. Schneckendurchmesser

Aus Abbildung 1 geht hervor, dass die Verwendung kleinerer Durchmesser, bei konstantem Schussvolumen, in größeren Dosierwegen resultiert. Des Weiteren ist ersichtlich, dass mit einem Durchmesser von 12 mm bereits ein minimales Schussvolumen von weniger als 1000 mm<sup>3</sup> eingespritzt werden kann.

Die verwendete Babyplast-Kolbenspritzgießmaschine mit 12-mm-Einspritzkolbendurchmesser hat, entgegen einer Maschine mit Schneckenplastifizierung und -einspritzung, keine Mindesteinspritzmenge und bietet somit das Potenzial, noch geringere Schussvolumina zu realisieren [3], [6].

Mit dem vorhandenen Werkzeug können wahlweise Probekörper vom Typ 1BA oder 5A (siehe Abbildung 2) gefertigt werden. Das Schussvolumen der Probekörper beträgt mit Anguss jeweils ca. 2500 mm<sup>3</sup> (kreuzförmige Markierung in Abbildung 1) und liegt somit im idealen Einsatzbereich der Babyplast 6/10 Spritzgießmaschine, die ein maximales Schussvolumen von ca. 6500 mm<sup>3</sup> ermöglicht (kreisförmige Markierung in Abbildung 1).

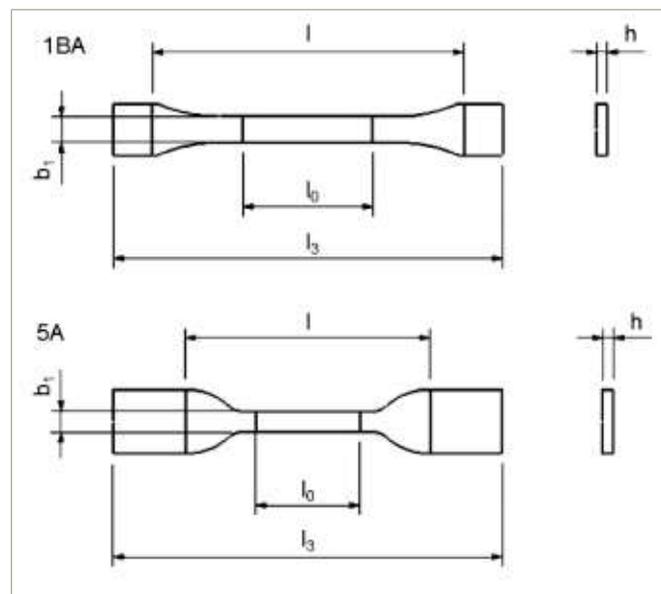


Abbildung 2: Probekörper-Geometrien [5]

Bezogen auf die Thematik der Rüstzeiten ist besonders die kompakte Bauweise der Spritzgießmaschine, die geringe Werkzeuggröße und das niedrige Werkzeuggewicht als positiv zu bewerten. Die Analyse des Energiebedarfs der Babyplast Spritzgießmaschine zeigte, dass gegenüber einer hydraulischen Standardspritzgießmaschine ein Energieeinsparpotenzial von bis zu 50 % möglich ist.

Die dimensionalen Eigenschaften der Proben wurden im Rahmen der Untersuchung mit mehreren Materialien als sehr stabil bewertet.

Die zur Beurteilung der mechanischen Eigenschaften und im Zugversuch bestimmten Zugfestigkeiten der untersuchten Materialien liegen im Bereich der jeweiligen Herstellerangaben und streuen nur geringfügig. Entgegengesetzt dazu hat sich gezeigt, dass die Dehnungswerte der entsprechenden Zugversuche deutlich, teilweise auch mehr als 100 %, über den Herstellerangaben liegen [3].

### Untersuchung und Beurteilung aktueller Zugversuche

Da im Rahmen der Kooperation mit der Gerresheimer Regensburg GmbH auf der Babyplast 6/10 Kolbenspritzgießmaschine verschiedene Materialien bemustert, kleine Probekörper für Zugversuche gefertigt und deren

mechanische Eigenschaften als Basis für Festigkeitsberechnungen kleiner medizinischer Bauteile ermittelt werden sollen, war es zunächst notwendig, mit einer detaillierten Untersuchung des Zugversuchs die Ursache für die zu hohen Dehnungswerte zu finden.

Für die Zugprüfung von Probekörpern aus Kunststoff findet an der Ostbayerischen Technischen Hochschule die Universalprüfmaschine UTS 10 T der Firma Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, Anwendung. Die Bedienung der Maschine und die Auswertung der Versuche erfolgt über die dazugehörige Software Phönix V4.20. Die Zugkraft wird über eine Kraftmessdose erfasst und die Dehnung der Probekörper über den Traversenweg der Zugprüfmaschine bestimmt. Eine Feindehnmesseinrichtung zur Bestimmung der Dehnung des eigentlichen Messbereichs eines Probekörpers ist nicht vorhanden.

Nach der Durchführung weiterer Zugversuche (Abb. 3), welche die Ergebnisse der Masterarbeit bestätigten, wurde als grundlegende Ursache für die nicht vernachlässigbaren Abweichungen der Dehnungswerte die Dehnungsmessung über Traversenweg und somit die fehlende Feindehnmesseinrichtung identifiziert.

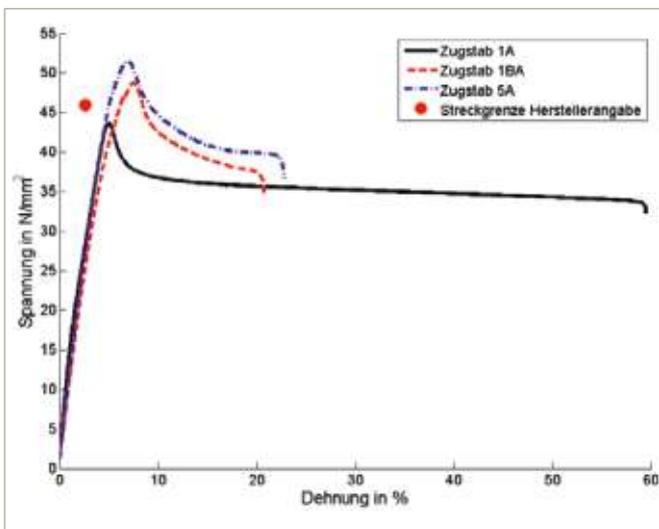


Abbildung 3: Zugversuche ABS (ELIX M203FC)

Für die Untersuchung des Zugversuchs wurden Probekörper des Typs 1A, 1BA und 5A aus dem amorphen Kunststoff M203FC (ABS) der Firma ELIX Polymers, S.L., La Canonia (Spanien), hergestellt.

Entsprechend der EN ISO 527-2 werden Probekörper vom Typ 1A als Standardprüfkörper zur Ermittlung der grundlegenden mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen durch Zugversuche verwendet. Die kleinen Probekörper (1BA und 5A) eignen sich dazu, die Einflüsse von kleinen Geometrien auf die mechanischen Eigenschaften beurteilen zu können. Zugversuchsergebnisse und Materialkennwerte von 1A- und 1BA- bzw. 5A-Zugstäben sind nicht direkt vergleichbar.

Die Probekörper vom Typ 1A wurden auf der Spritzgießmaschine der Firma ARBURG GmbH + Co KG, Loßburg, vom Typ Allrounder 370E 600 als Referenzprüfkörper hergestellt. Die Zugprüfstäbe vom Typ 1BA und 5A wurden mit der Babyplast 6/10 Mikrospritzgießmaschine gefertigt. Um bei den Zugversuchen vergleichbare Startbedingungen zu erzielen und Störgrößen bei der Anfangsphase einer Zugprüfung, wie z. B. Setzen und Rutschen der Probe in der Einspannung, vermeiden zu können, wird für jeden Probekörpertyp entsprechend des Probenmaterials eine Startkraft für die Messdatenaufzeichnung berechnet. Diese Kraft wird bei einer Dehnung von ca. 0,05 % der Messstrecke erreicht. Ebenfalls unterscheiden sich, entsprechend EN ISO 527-1/2, die Prüfgeschwindigkeiten für die Probekörper. Die Zugstäbe vom Typ 1A werden bei 50 mm/min und die kleinen Zugstäbe bei 20 mm/min geprüft [4], [5].

Tabelle 1: Abmessungen der Probekörper [5]

		1A	1BA	5A
Gesamtlänge	$l_3$ in mm	170	75	75
Einspannlänge	$l$ in mm	115	58	50
Messlänge	$l_0$ in mm	75	25	20
Breite Messbereich	$b_1$ in mm	10	5	4
Dicke Probekörper	$h$ in mm	4	2	2

Da für die Dehnungsmessung der Traversenweg der Zugprüfmaschine herangezogen wird, beinhalten die gemessenen Dehnungswerte der eigentlichen Messstrecke zwangsläufig auch die Dehnung der Übergangsbereiche A und B. Dieser Einfluss wird besonders bei der Darstellung der Spannungsverteilung im Probekörper deutlich.

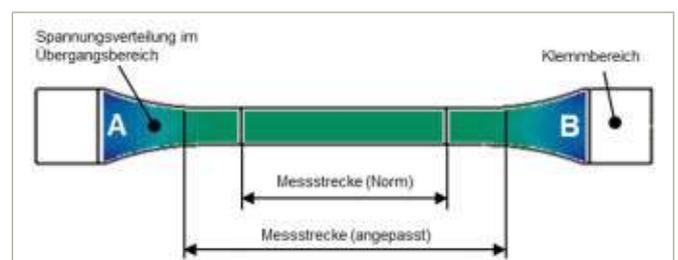


Abbildung 4: Normierte und angepasste Messstrecken einer Schulterprobe für Zugversuche

In Abbildung 4 ist ersichtlich, dass sich die Spannung und die dazugehörige Dehnung deutlich über die eigentliche Messstrecke nach EN ISO 527-2 verteilt.

Um vereinfacht beurteilen zu können, wie sich die Elastizität der Übergangsbereiche auf das Messergebnis auswirkt, wurde zum einen die Messstrecke auf die gesamte Länge des schmalen parallelen Teilstücks erweitert und zum anderen die Übergangsbereiche mithilfe von linearelastischen Ansatzfunktionen nachgebildet. Die entsprechenden Ersatzfedersteifigkeiten ( $C_A$ ) wurden

über FEM-Simulationen, mit den Materialkennwerten aus dem Herstellerdatenblatt des ABS-Kunststoffs, für jeden Probekörpertyp bestimmt.

Mit der Annahme, dass ein Zugstab über die Reihenschaltung mehrerer Federsteifigkeiten abgebildet werden kann, lässt sich anhand der Messwerte aus dem Zugversuch, Kraft und Traversenweg ( $\Delta x_{Ges}$ ), eine neue modifizierte Dehnung ( $\Delta x_M$ ) für die Messstrecke eines Probekörpers berechnen. Dazu werden die Dehnungen der Übergangsbereiche ( $\Delta x_A$  und  $\Delta x_B$ ) berechnet und vom gemessenen Traversenweg subtrahiert.

$$\Delta x_{Ges} = \Delta x_A + \Delta x_M + \Delta x_B \quad \text{mit: } \Delta x = \frac{F}{C}$$

$$\Delta x_M = \Delta x_{Ges} - \frac{2 \cdot F}{C_A}$$

Um die Auswertung automatisiert durchführen zu können, wurde über die Software Matlab R2013a der Firma MathWorks, Natick (USA), ein Auswerteprogramm realisiert, mit welchem eine beliebige Anzahl von Zugversuchsdaten eingelesen, strukturiert, die modifizierte Dehnung berechnet und grafisch dargestellt werden kann.

Den Einfluss der elastischen Übergangsbereiche auf das Messergebnis eines Zugversuchs macht die Abbildung 5 am Beispiel eines 1BA-Zugstabs deutlich.

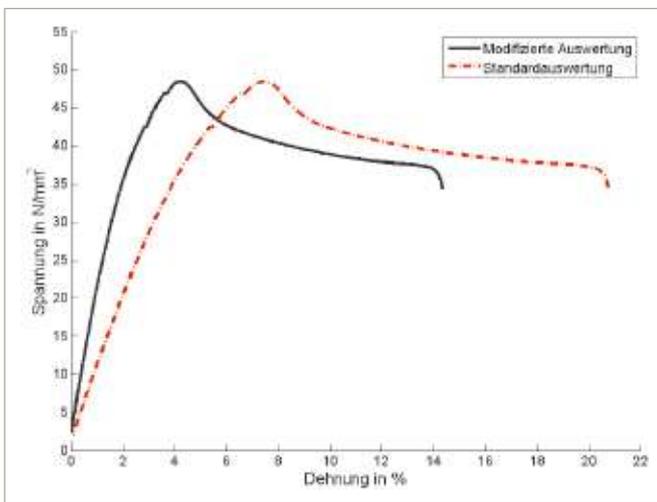


Abbildung 5: Vergleich von modifizierter Auswertung und Standardauswertung (ABS ELIX M203FC)

Die Streckdehnung beträgt bei der Standardauswertung 7,5 % und bei der modifizierten Auswertemethodik 4,6 %. Bezogen auf die Herstellerangabe von 2,6 % Streckdehnung sind die Werte im Falle der Standardauswertung um 188 % und im Falle der modifizierten Auswertung um 77 % größer als der Sollwert.

Im Rahmen der Untersuchung konnten für jeden der Probekörper zehn Zugversuche durchgeführt und anhand dieser die jeweiligen Materialkennwerte bestimmt werden.

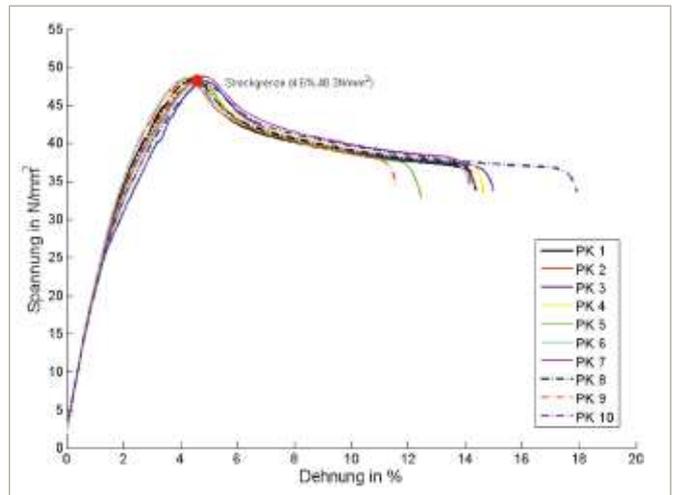


Abbildung 6: Zugversuchsergebnisse mit 1BA-Zugstäben (ABS ELIX M203FC)

Jede der Versuchsreihen zeigte dabei eine gute Reproduzierbarkeit der Zugversuche, was exemplarisch in Abbildung 6 erkennbar ist.

Im Anschluss an die Zugversuche wurden die ermittelten Materialkennwerte gegenübergestellt, um prinzipiell beurteilen zu können, in welchem Umfang die Geometrie der Probekörper die aus dem Zugversuch gewonnenen Ergebnisse beeinflusst.

In Abbildung 7 wird dabei veranschaulicht, dass bei einer Reduktion der Querschnittsfläche die ermittelte Streckgrenze zunimmt.

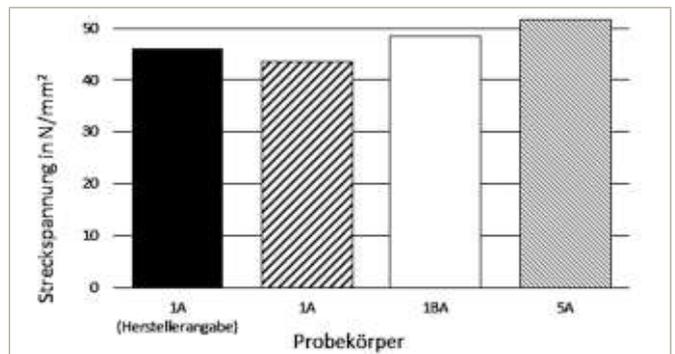


Abbildung 7: Gegenüberstellung der Streckspannungen

Zudem wurde festgestellt, dass die gemessenen Streckdehnungswerte für kleine Probenabmessungen zunehmen (Tabelle 2).

Dies bestätigt nochmals die am Anfang als Ursache für die zu großen Dehnungswerte beschriebene fehlende Feindehnmesseinrichtung. Je kleiner die Abmessungen der Probekörper, desto höhere Anforderungen werden an die Dehnungsmessung gestellt.

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Zugversuchsergebnisse

Probekörper	Streckgrenze in N/mm <sup>2</sup>	Streckdehnung in %
1A (Hersteller- angabe)	46	2,6
1A	43,7	4,1
1BA	48,4	4,6
5A	51,6	4,8

### Zusammenfassung und Ausblick

Die ersten Erfahrungen zum Thema Mikrospritzgießen aus der Masterarbeit Leitl [3] konnten im Laufe des Projekts weiter ausgebaut und vertieft werden. Auf der Babyplast-Spritzgießmaschine wurden weitere Kunststoffe abgemustert und praktische Versuche für Studienabschlussarbeiten durchgeführt. Durch die Umrüstung der Spritzgießmaschine auf eine elektrische Werkzeugtemperierung konnte deren Einsatzspektrum speziell für die Kunststoffverarbeitung bei hohen Temperaturen, Werkzeugtemperierung auf über 200 °C möglich, erweitert werden.

Neben der Abmusterung von Materialien bildet die Zugversuchsuntersuchung weiterhin eine zentrale Aufgabe im Projekt. Denn die Berücksichtigung zusätzlicher Steifigkeiten bei der Auswertung von Zugversuchen hat gezeigt, dass ohne eine spezielle Feindehnmess-einrichtung keine validen Materialkennwerte ermittelt werden können, die dem hohen Anspruch gerecht werden, als Ausgangsbasis für die Festigkeitsberechnung medizinischer Bauteile zu dienen. Um die Ergebnisqualität der Zugversuche zu verbessern, wurden bereits Recherchen zu verschiedenen Feindehnmess-einrichtungen durchgeführt. Dabei wurde ein System bereits an der Hochschule vom entsprechenden Hersteller vorgestellt und es wurden mehrere Zugversuche an Musterproben durchgeführt.

Des Weiteren ist die Realisierung eines Musterwerkzeugs geplant. Mit diesem soll anhand einer produktorientierten Bauteilgeometrie der Einfluss der Kolbenplastifizierung und -einspritzung auf den Fertigungsprozess sowie die Qualität von realen Funktionsbauteilen untersucht werden.

### Literaturverzeichnis

- [1] Jüttner, G.: *Plastifiziereinheiten für kleinste Schussgewichte*. Kunststoffe 1/2004, S. 55–53.
- [2] Tesche, M.: *Mut zu kleinen Lösungen*. Kunststoffe 10/2013, S. 172–176.
- [3] Leitl, M.: *Technologische Potenzialanalyse einer kleinen Kolbenspritzgießmaschine*. Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, Masterarbeit, 2014.
- [4] Norm EN ISO 527-1: 2012. *Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1*.
- [5] Norm EN ISO 527-2: 2012. *Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 2*.
- [6] Stitz, S.; Keller, W.: *Spritzgießtechnik*. 2. Auflage, München Wien: Carl Hanser Verlag, 2004

### Kontakt:



**Christoph Haller, B.Eng.**

Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
 Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
 Ingenieur im Projekt Potential kleiner Spritzgießmaschinen  
 Kaiser-Wilhelm-Ring 23, 92224 Amberg

ch.haller@oth-aw.de



**Prof. Dr.-Ing. Tim Jüntgen**

Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
 Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
 Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
 92224 Amberg

t.juentgen@oth-aw.de

# Analyse und Optimierung logistischer Abläufe in einem mittelständischen Groß- und Einzelhandels- unternehmen

## Zusammenfassung

Eine effiziente und effektive Logistik schafft im Groß- und Einzelhandel Wettbewerbsvorteile gegenüber Konkurrenten. Abläufe, die effizient gestaltet sind, sparen Zeit und somit auch Kosten. Ein mittelständisches Groß- und Einzelhandelsunternehmen in der nördlichen Oberpfalz hat sich die Hilfe von Studenten der Vertiefungsrichtung „Logistik“ der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden geholt, um Vorschläge zu erhalten, welche Prozesse möglicherweise optimiert werden könnten. Dabei sollten sämtliche Abläufe entlang der Prozesskette identifiziert, analysiert und Verbesserungsvorschläge ausgearbeitet werden.

## Summary

Effective and efficient logistics create a competitive advantage for wholesale and retail businesses. Processes that are efficiently designed save time and costs. A medium-sized wholesale and retail enterprise in the northern Upper Palatinate has asked students majoring in Logistics at the Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden (University of Applied Sciences) to propose possible solutions for process optimization. The task involved the identification and analysis of every stage of the entire process chain, as well as making suggestions for improvement.

## 1 Arbeitsbereiche

Vier Arbeitsgruppen bearbeiteten innerhalb dieses Projektes die Themen Sortimentsanalyse, Lagerung, innerbetriebliche Abläufe und außerbetriebliche Abläufe.

### 1.1 Sortimentsanalyse

Im Rahmen der Sortimentsanalyse wurde der Lagerbestand und das Warenangebot mithilfe einer ABC- sowie einer XYZ-Analyse analysiert und klassifiziert (1). Hieraus wurden Maßnahmen abgeleitet, wie zum Beispiel die idealtypische Ausstellung der Artikel gemäß der Klassifizierung. Durch das Herausfiltern von Bestandsreichweiten und Artikeln mit geringen Umschlagshäufigkeiten können Lagerhaltungsaufwendungen optimiert werden. So ist es möglich, Artikel günstig und sicher zu disponieren und einzukaufen oder Schwankungen auszugleichen. Mit einer Reichweitenanalyse können Bestände sortiert und die Lagerbestandsliste des Unternehmens bereinigt werden. Obergrenzen der Reichweite schaffen Risikofrüherwarnindikatoren, um die Reaktionsfähigkeit zu erhöhen (2). Im nächsten Schritt wurden Skonti und Zahlungsziele

analysiert, um Kosteneinsparungen erreichen zu können. Auch die Beachtung der termingerechten Zahlung zur Skontofrist ist dabei von großer Bedeutung. Des Weiteren gehörte die Formulierung einer Lieferantenbewertung zu den Aufgaben. Von allen Lieferanten sollten Informationen einheitlich und übersichtlich erfasst und dargestellt werden. Dies ist notwendig, um den Lieferantenstamm besser zu planen und zu entwickeln. Im Zuge der Jahresgespräche soll für wichtige Lieferanten diese Bewertung durchgeführt werden und eine Kategorisierung stattfinden (3).

### 1.2 Lagerung

Die Lagersituation und der zugehörige Kommissionierprozess wurden im Rahmen des Teilprojektes „Lagerung“ analysiert, um Füllgrade der Lager und andere wichtige Faktoren zu identifizieren. Der erste Schritt bestand in einer Untersuchung der Lagerausstattung und einer weiterführenden Ermittlung der Lagerkosten (4). Umstrukturierungen und Zusammenlegungen erhöhten den Füllgrad einzelner Lager und schafften größere zusammenhängende sowie verfügbare Flächen (5). Dem Platzmangel

durch sperrige und schwere Artikel sollte mit dem Einsatz eines Materialcontainers entgegengewirkt werden. Der so entstandene Raum kann zukünftig als Ausstellungsfläche genutzt werden. Sowohl der Kommissionierprozess als auch die Kommissionierstrategien wurden grafisch mit dem Programm ARIS aufbereitet (6). Nach einer Analyse der Probleme wurden Instrumente und Methoden erstellt, um die Prozesse zu vereinfachen und durch eine Vereinheitlichung Fehlerquellen zu reduzieren. Auch für den Retourenprozess wurde ein Ablaufdiagramm erstellt, das als strikte Arbeitsanweisung für die Mitarbeiter gelten soll. Für die Personaleinsatzplanung wurde ein Schritt-für-Schritt-Handbuch erarbeitet, um eine übersichtliche und zentrale Gestaltung der individuellen Arbeitszeiten und der Urlaubsplanungen zu unterstützen (7).

### 1.3 Innerbetriebliche Abläufe

Zeitaufnahmen der wichtigsten internen Prozesse wurden durchgeführt, um die innerbetrieblichen Abläufe zu analysieren (8). Hiermit konnten Leerwege und somit unnötige verschwendete Zeiten und Kosten entdeckt und eliminiert werden. Laufstudien vereinfachten die Untersuchung im Wareneingang und konnten zum besseren räumlichen Vorstellungsvermögen beitragen. Auch hier war es möglich, durch eine Umstrukturierung Prozesse zu optimieren und mehr Platz zu schaffen. Im Bereich der Anlieferung konnte durch ein Konzept von Zeitfenstern und durch die Einführung von elektronischen Lieferscheinen den großen Belastungen des Wareneingangs zu Stoßzeiten entgegengewirkt werden. Um ein Lager in einem weiteren kleineren Wareneingang zu entlasten, wurde eine Umstrukturierung geplant und mit dem Programm CATIA ausgearbeitet (9). Dabei wurden jeder Abteilung bestimmte Stellplätze zugeteilt und ein System mit optischen Anzeigen vorgeschlagen, welches die Mitarbeiter der jeweiligen Abteilung von der Anlieferung neuer Ware benachrichtigen soll. In diesem Rahmen wurden auch weitere Abläufe und Prozesse in allen anderen Bereichen auf Verbesserungsmöglichkeiten hin untersucht (10).

### 1.4 Außerbetriebliche Abläufe

Die Prozesse im Zusammenhang mit der Auslieferung gehörten zum Aufgabengebiet der außerbetrieblichen Abläufe. Hierbei wurden der Beladeprozess, der Buchungsprozess sowie der Auslieferungsprozess analysiert und dabei besonders die begrenzten Raumverhältnisse des Unternehmens berücksichtigt. Der technische Buchungsprozess stellte den Anfang der Untersuchung dar und weitete sich bis zu einer genauen Analyse der einzelnen Auslieferungstouren aus (11). Dabei standen Daten über die Anzahl der LKWs, der Touren und deren Aufteilung pro Tag sowie die Einteilung der Mitarbeiter im Fokus. Um die Akzeptanz der Veränderung der Bestellzeitfenster und die Zufriedenheit der Kunden mit dem Service zu prüfen, wurden zwei Kundenumfragen durchgeführt.

Eine überregionale Konkurrenzanalyse zeigte weitere Innovationspotenziale auf, die auf ihre Umsetzbarkeit untersucht gegebenenfalls und umgesetzt werden sollen (12).

## 2 Ergebnisse

Mithilfe des Projektes konnten Verbesserungen in den Bereichen der Lieferantenbewertung sowie der Sortimentsgestaltung erreicht werden. Durch Umstellungen im Verkaufsraum kann die Nutzung der Verkaufsflächen verbessert werden. Indem Laufstudien und Zeitaufnahmen angefertigt wurden, konnten Prozesse in sämtlichen Bereichen des Unternehmens optimiert werden. Umstrukturierungen und Neugestaltungen halfen, den vorhandenen Platz effizient zu nutzen und Mitarbeiter gezielter einzusetzen und damit Kosten und Zeit einzusparen. Der entstandene Kundendialog trug dazu bei, Probleme beim Kunden leichter zu identifizieren und gemeinsam zu eliminieren. Für die zukünftige Gestaltung der logistischen Prozesse dieses Unternehmens gab die Konkurrenzanalyse interessante Impulse.

---

## Quellenangaben

1. Schulte, G.; *Material- und Logistikmanagement*; München: Oldenbourg , 2001
2. Arnolds, H., Heege, F.; Tussing, W.; *Materialwirtschaft und Einkauf*; Wiesbaden: Gabler, 2013
3. Ilpesin, O. u.a.; Sortimentsanalyse; Seminarbericht „Logistiksysteme“, Weiden: OTH, 2014
4. Ten Hompel, M., Schmidt, T.; *Warehouse Management*; Berlin: Springer Verlag, 2010
5. Pfohl, H.-C.; *Logistiksysteme*; Berlin: Springer, 2010
6. Seidlmeier, H.; *Prozessmodellierung mit ARIS*; Wiesbaden: Vieweg , 2010
7. Böll, V. u.a.; Lagerung; Seminarbericht „Logistiksysteme“, Weiden: OTH, 2014
8. Gudehus, T.; *Logistik*; Berlin: Springer, 2010
9. Ziethen, D. R.; *CATIA V5*; New York, NY; McGraw-Hill, 2013
10. Hanneschläger, T. u.a.; Innerbetriebliche Abläufe; Seminarbericht „Logistiksysteme“, Weiden: OTH, 2014
11. Wannenwetsch, H., *Integrierte Materialwirtschaft und Logistik*; Berlin: Springer Vieweg, 2014
12. Baumann, M. u.a.; Außerbetriebliche Abläufe; Seminarbericht „Logistiksysteme“, Weiden: OTH, 2014

## Kontakt:



**Theresa Hanneschläger**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Betriebswirtschaft  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden



**Prof. Dr. Stefanie Abels-Schlösser**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Betriebswirtschaft  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

[s.abels-schlösser@oth-aw.de](mailto:s.abels-schlösser@oth-aw.de)

# Analyse der Partikel- emissionen von Zündstrahlmotoren im Holzgasbetrieb

Michael Hebauer, M.Eng.  
Raphael Lechner, M.Sc.  
Prof. Dr.-Ing. Markus Brautsch

## Zusammenfassung

Im Rahmen des Teilprojekts „Emissionsminderung“ im Kompetenzzentrum für Kraft-Wärme-Kopplung an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden wurden die Partikelemissionen an einem mit Holzgas betriebenen Zündstrahl-Blockheizkraftwerk (BHKW) untersucht. Bei den Versuchen wurde zwischen den Zündölen Heizöl, Rapsöl und Biodiesel variiert. Zusätzlich wurden verschiedene Zündölmengen und Einspritzzeitpunkte gewählt. Das für den Zündstrahlbetrieb erforderliche Brenngas wurde mittels einer Holzvergasungsanlage aus Holzpellets generiert. Die Messungen wurden mit einem Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) durchgeführt, was nicht nur die Messung der Anzahl von Partikeln im Abgas ermöglichte, sondern auch eine genaue Bestimmung der Größenverteilung.

## Abstract

Emission reduction is one of the major research areas of the Center of Excellence for Combined Heat and Power at the University of Applied Sciences Amberg-Weiden. Therefore, the particle emissions of a dual fuel combined heat and power (CHP) unit, which was fired with wood gas were examined. Light fuel oil, rape seed oil and biodiesel were used alternately as pilot fuel. Moreover, different amounts of pilot fuel and different injection times were chosen. A wood gasifier for wood pellets generated the needed amount of fuel gas beforehand. The measurements were conducted with a Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS). This enabled the determination of both the amount of particles and their size.

## Messprinzip

Das Funktionsprinzip des SMPS beruht darauf, dass die Größenbestimmung der Partikel mittels elektrostatischer Klassierung mit einer Zählung der Partikel je Größenklasse kombiniert wird. Dies geschieht durch einen absoluten Partikelzähler [ISO15900]. Die Probe wird dem SMPS häufig nach einer auf die Anwendung abgestimmten Probenkonditionierung zugeführt. Die erste Komponente im elektrostatischen Klassierer ist ein Vorimpaktor, in dem große, außerhalb des Messbereichs liegende Partikel definiert abgeschieden werden, um eine nachträgliche Ladungskorrektur zu ermöglichen. Vom Vorimpaktor werden die Feinstpartikel dem Aerosolneutralisator des elektrostatischen Klassierers zugeführt, in dem sie den Ladungsgleichgewichtszustand mit einer bipolaren Ladungsverteilung erreichen. Dieser elektrostatische Gleichgewichtszustand bedeutet, dass die Partikel jeweils einer Größe eine definierte Anzahlverteilung an Elementarladungen pro Partikel tragen, unabhängig von ihren

Materialeigenschaften [Wiedensohler1988]. Nach dem Aerosolneutralisator werden die Partikel in die eigentliche Klassiereinheit des elektrostatischen Klassierers, den differentiellen Mobilitätsanalysator (DMA), weitergeleitet. Der DMA ist im Wesentlichen ein Zylinder aus elektropoliertem Edelstahl mit extrem geringer Wandrauigkeit. In diesem Zylinder befindet sich eine Zentralelektrode, die von partikelfreier Schleierluft laminar umströmt wird. Die Partikel folgen zunächst der Strömung ihres Trägergases durch den Zylinder. In Abhängigkeit von ihrer elektrischen Mobilität – die eine Funktion der Partikelgröße ist – legen positiv geladene Partikel jedoch nur einen gewissen Weg zurück, bis sie aufgrund der elektrostatischen Anziehung die partikelfreie Schleierluft durchdringen und nach innen zur negativ geladenen Zentralelektrode gelangen.

Alle Partikel einer definierten elektrischen Mobilität bzw. Partikelgröße können durch Änderung der an die Zentralelektrode angelegten Hochspannung in einen kleinen Entnahmeschlitz am unteren Ende der Elektrode gesteuert

werden. Beim SMPS-System erfolgt die Messung der Größenverteilungen mittels einer patentierten Scanning-Methode. Die Klassierung und Zählung der Partikel werden kontinuierlich und ohne Lücken mit den Daten synchronisiert. Durch die kontinuierliche Änderung der Spannung wird die Klassierung der Nanopartikel in sehr enge Größenklassen mit einer echten Auflösung von 64 Klassen je Dekade realisiert. Nach der Größenbestimmung werden die Partikel dem Kondensationspartikelzähler (CPC) zugeführt, der die Partikelanzahl je Größenklasse misst. Im CPC werden die wenige Nanometer großen Partikel durch Aufkondensieren einer Arbeitsflüssigkeit in einer übersättigten Umgebung optisch vergrößert und anschließend mittels Streulichterfassung gezählt. Die Steuerung von elektrostatischem Klassierer und CPC erfolgt über einen Computer, der die Messdaten aufnimmt und auch unmittelbar als Partikelgrößenverteilung darstellt [Wiedensohler1988].

### Aufbau der Versuchsanlage

Die Partikelmessungen wurden an einem Zündstrahl-BHKW vom Modell ECO 180 der Firma Burkhardt GmbH durchgeführt. Bei dem im BHKW verwendeten Motor handelt es sich um einen Reihensechszylinder Turbodieselmotor des Typs MAN D2676, der im Zündstrahlbetrieb gefahren wird. Die Anlage weist eine elektrische Leistung von 180 kW auf, wobei sich die thermische Leistung auf etwa 200 kW beläuft. Die emittierten Abgase werden mittels eines Oxidationskatalysators nachbehandelt. Die Messungen wurden vor dem Katalysator im unbehandelten Abgas durchgeführt. Als Zündöle wurden Heizöl (DIN 51603-1), Rapsöl (DIN EN 51605) oder Biodiesel (EN 14214) verwendet. Als Hauptkraftstoff diente Holzgas aus einem Holzvergaser vom Typ V3.90 der Firma Burkhardt GmbH. Dieser arbeitet mit aufsteigender Gleichstromvergasung und stationärer Wirbelschicht. Als Brennstoff dienten Holzpellets (EN Plus A1). Die thermische Leistung des Vergasers beträgt 70 kW. Die nachfolgende Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung des Zündstrahl-BHKW.

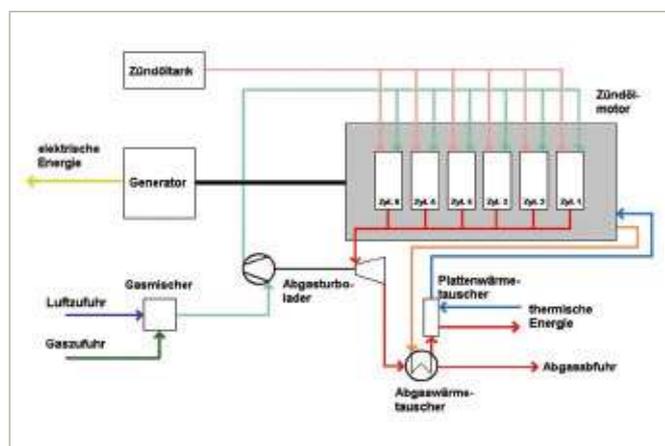


Abbildung 1: Schematische Darstellung Zündstrahl-BHKW

Fabrikat	ECO 180 Burkhardt GmbH
Betriebsweise	Netzparallelbetrieb
Elektrische Nennleistung	180 kW
Thermische Nennleistung	200 kW
Motor Hersteller/Typ	MAN D 2676
Bauart	6-Zylinder-Reihenmotor auf Zündstrahlbetrieb umgerüstet
Arbeitsverfahren	4-Takt-Diesel, Abgasturboaufladung mit Abgasrückführung und Ladeluftkühlung
Ventile	2 Einlass/2 Auslass
Einspritzsystem	Bosch Common-Rail-System
Hub/Bohrung/Hubvolumen	166 mm/126 mm/12419 cm <sup>3</sup>
Verdichtungsverhältnis	19:1
Nenn Drehzahl	1500 1/min
Generator Hersteller/Typ	Leroy Somer LSA 46.2 VL 12
Bauart	Luftgekühlter Synchrongenerator 400V 50 Hz
Holzvergaser Hersteller/Typ	Burkhardt V3.90
Thermische Leistung	70 kW

### Partikelmessungen mit dem Zündöl Heizöl

Die ersten Partikelmessungen am Zündstrahl-BHKW wurden mit dem Zündöl Heizöl durchgeführt. Der vom Holzvergaser generierte Hauptkraftstoff Holzgas setzte sich zum Zeitpunkt der Messungen aus etwa 25 Vol. % Kohlenmonoxid, 19 Vol. % Wasserstoff, 11 Vol. % Kohlendioxid und 2 Vol. % Methan zusammen. Die Abgasproben wurden etwa 1 m hinter dem Turbolader aus dem Abgasstrang mittels einer vorne um 45° abgeschrägten Edelstahlsonde entnommen. Die Messstelle befand sich noch vor dem Oxidationskatalysator. Die Abgase wurden dem SMPS mit einem Verdünnungsverhältnis von 93 zugeführt. Die Verdünnereinheit war auf eine Temperatur von 150 °C erhitzt. Die Messungen mit unterschiedlichen Einspritzzeitpunkten wurden bei einer fixen Zündölmenge (Zündölmenge 2) durchgeführt. Die Verteilungskurven der einzelnen Einspritzzeitpunkte wurden aus jeweils drei Scans des SMPS gemittelt. Das nachfolgende Diagramm 1 zeigt die Partikelgrößenverteilungen bei verschiedenen Einspritzzeitpunkten.

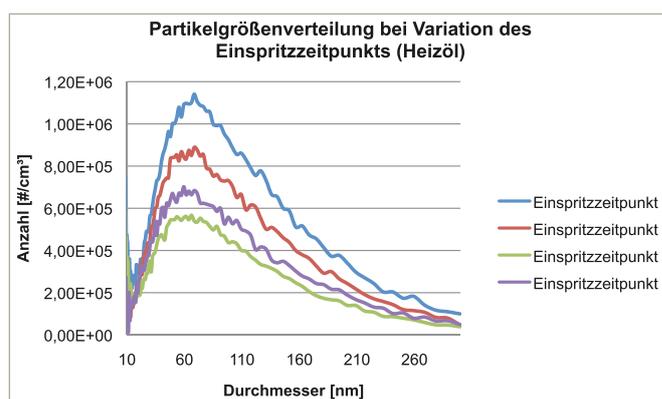


Diagramm 1: Partikelgrößenverteilung bei Variation des Zündwinkels (Heizöl)

Die Partikel im Abgas weisen eine unimodale Verteilung auf. Über alle Einspritzzeitpunkte hinweg betrachtet befindet sich der anzahlbezogene Medianwert der Partikelgrößenverteilungen im Mittel bei 56 nm und der massebezogene Medianwert bei 182 nm. Bei einer angenommenen Partikeldichte von  $1,2 \text{ g/cm}^3$  ergibt sich für die zwölf Scans des SMPS eine mittlere Staubbelastung von  $0,54 \text{ mg/m}^3$ . Die gesamte Anzahl an Partikeln im Abgas belief sich im Mittel auf  $731000 \text{ \#/cm}^3$ . Während sich die anzahl- und massebezogenen Medianwerte der Verteilungen nur sehr geringfügig zwischen den einzelnen Einspritzzeitpunkten verändern, ist in der Gesamtanzahl und Massebelastung des Abgases an Partikeln eine deutliche Differenz zu erkennen. Der Einspritzzeitpunkt 1 stellt die früheste Variante der Einspritzung von Zündöl dar. Die nachfolgenden Einspritzzeitpunkte 2–4 wandern immer näher an den oberen Totpunkt des Motors heran. Die geringsten Emissionen fährt der Einspritzzeitpunkt 3 ein, bei dem es fast zu einer Halbierung der Partikelmasse und -anzahl kommt.

Neben dem Einfluss des Einspritzzeitpunktes wurde auch der Einfluss der Zündölmenge auf die Partikelgrößenverteilung untersucht. Die Messungen mit Variation der Zündölmengen wurden bei einem fixen Einspritzzeitpunkt (Einspritzzeitpunkt 2) durchgeführt. Die Verteilungskurven der einzelnen Zündölmengen wurden wieder aus jeweils drei Scans des SMPS gemittelt. Das nachfolgende Diagramm 2 zeigt die Partikelgrößenverteilungen bei verschiedenen Zündölmengen.

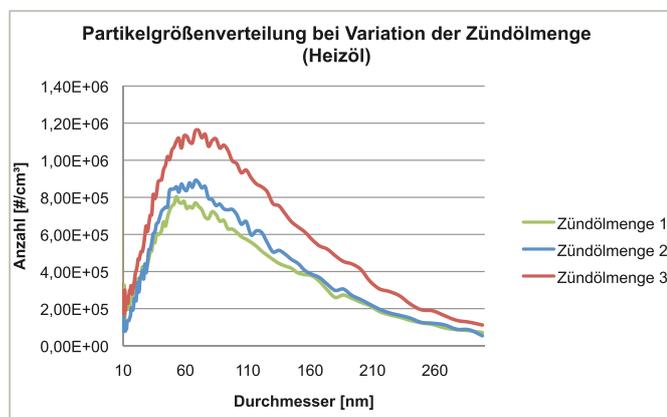


Diagramm 2: Partikelgrößenverteilungen bei verschiedenen Zündölmengen (Heizöl)

Die unimodale Verteilung der Partikel bleibt auch bei der Variation der Zündölmenge erhalten. Über alle Zündölmengen hinweg betrachtet befindet sich der anzahlbezogene Medianwert der Partikelgrößenverteilungen zwischen 52 nm und 60 nm. Tendenziell wandert der Wert mit der Einspritzmenge des Zündöls nach oben. Der massebezogene Medianwert blieb in etwa bei 184 nm konstant. Bei einer angenommenen Partikeldichte von  $1,2 \text{ g/cm}^3$  ergibt sich für die 9 Scans des SMPS eine Beladung des Abgases zwischen  $0,502 \text{ mg/m}^3$  und

$0,833 \text{ mg/m}^3$ . Die Beladung stieg wie die Partikelanzahl mit der eingespritzten Zündölmenge. Die Anzahl an Partikeln im Abgas belief sich zwischen  $706000 \text{ \#/cm}^3$  und  $991000 \text{ \#/cm}^3$ . Der Einspritzzeitpunkt 1 stellt die Variante mit der geringsten Menge an Zündöl dar. In dieser Einstellung wird auch die geringste Anzahl und Menge an Partikeln emittiert.

### Partikelmessungen mit dem Zündöl Rapsöl

Die darauffolgenden Partikelmessungen am Zündstrahl-BHKW wurden mit dem Zündöl Rapsöl durchgeführt. Der vom Holzvergaser generierte Hauptkraftstoff Holzgas beinhaltete zum Zeitpunkt der Messungen etwa die gleiche Zusammensetzung wie in den vorausgegangenen Messungen. Die Abgasproben wurden unter denselben Bedingungen wie bei den Messungen mit Zündöl Heizöl entnommen und aufbereitet. Die Messungen mit unterschiedlichen Einspritzzeitpunkten wurden bei einer fixen Zündölmenge (Zündölmenge 2) durchgeführt. Die Verteilungskurven der einzelnen Einspritzzeitpunkte wurden aus jeweils drei Scans des SMPS gemittelt. Das nachfolgende Diagramm 3 zeigt die Partikelgrößenverteilungen bei verschiedenen Einspritzzeitpunkten.

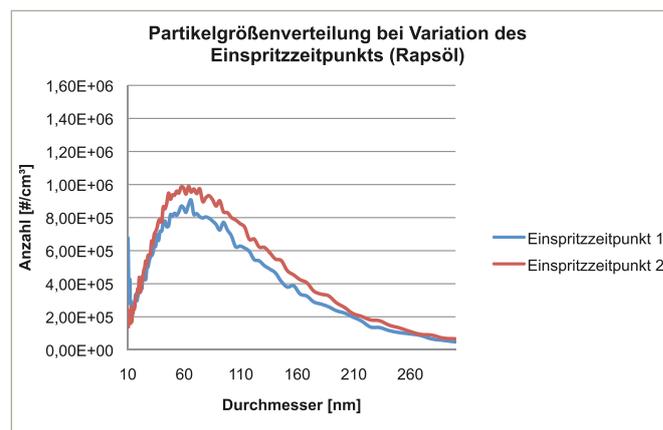


Diagramm 3: Partikelgrößenverteilung bei Variation des Zündwinkels (Rapsöl)

Die Partikel im Abgas weisen eine unimodale Verteilung auf. Über alle Einspritzzeitpunkte hinweg betrachtet befindet sich der anzahlbezogene Medianwert der Partikelgrößenverteilungen zwischen 48 nm und 57 nm, wobei der massebezogene Medianwert bei 176 nm in etwa konstant bleibt. Bei einer angenommenen Partikeldichte von  $1,2 \text{ g/cm}^3$  ergibt sich für die ersten drei Scans des späteren Einspritzzeitpunktes 1 eine mittlere Staubbelastung von  $0,49 \text{ mg/m}^3$ . Die Staubbelastung für die Scans des frühen Einspritzzeitpunktes stieg im Mittel auf  $0,6 \text{ mg/m}^3$ , wobei die gesamte Anzahl an Partikeln im Abgas bei beiden Messpunkten bei etwa  $830000 \text{ \#/cm}^3$  konstant blieb. Dies könnte seinen Grund in Koagulationseffekten haben, bei dem sich mehrere kleine Partikel bei Kontakt anlagern, was ein Anwachsen der Partikelgröße und eine Abnahme der Anzahlkonzentration zur

Folge hat. Dieser Effekt würde auch die Verschiebung des anzahlbezogenen Medianwertes in einen größeren Bereich erklären.

Neben dem Einfluss des Einspritzzeitpunktes wurde auch beim Zündöl Rapsöl der Einfluss der Zündölmenge auf die Partikelgrößenverteilung untersucht. Die Messungen mit Variation der Zündölmengen wurden bei einem fixen Einspritzzeitpunkt (Einspritzzeitpunkt 1) durchgeführt. Die Verteilungskurven der einzelnen Zündölmengen wurden wieder aus jeweils drei Scans des SMPS gemittelt. Das nachfolgende Diagramm 4 zeigt die Partikelgrößenverteilungen bei verschiedenen Zündölmengen.

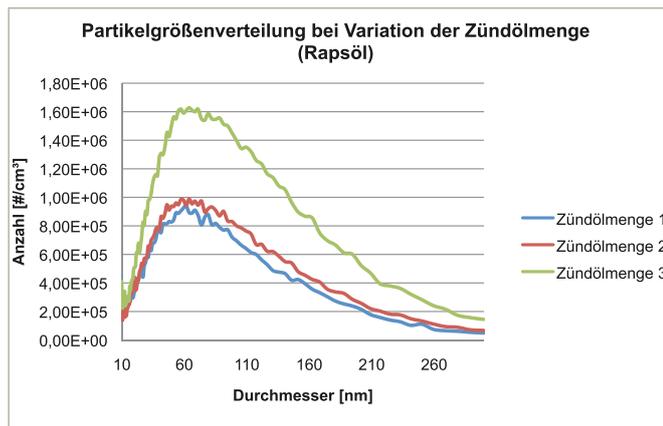


Diagramm 4: Partikelgrößenverteilungen bei verschiedenen Zündölmengen (Rapsöl)

Die unimodale Verteilung der Partikel bleibt auch bei der Variation der Zündölmenge erhalten. Über alle Zündölmengen hinweg betrachtet verschiebt sich der anzahlbezogene Medianwert der Partikelgrößenverteilungen von 52 nm über 57 nm auf 62 nm. Tendenziell wandert der Wert mit der Einspritzmenge des Zündöls nach oben. Den gleichen Trend zeigte auch der massebezogene Medianwert auf und wanderte mit einer Erhöhung der Zündölmenge von 171 nm auf 184 nm. Bei einer angenommenen Partikeldichte von  $1,2 \text{ g/cm}^3$  ergibt sich für die 9 Scans des SMPS eine Beladung des Abgases zwischen  $0,484 \text{ mg/m}^3$  und  $1,16 \text{ mg/m}^3$ . Die Beladung stieg wie die Partikelanzahl mit der eingespritzten Zündölmenge. Die Anzahl an Partikeln im Abgas belief sich zwischen  $795000 \text{ #/cm}^3$  und  $1360000 \text{ #/cm}^3$ . Die Zündölmenge 1 stellt die Variante mit der geringsten Menge an Zündöl dar. In dieser Einstellung wird auch die geringste Anzahl und Menge an Partikeln emittiert.

Durch ein Erhöhen der Zündölmenge um den Faktor 20 konnte der Hauptkraftstoff Holzgas vollständig substituiert werden und so ein reiner Flüssigkraftstoffbetrieb am selben Motor gefahren werden. Das nachfolgende Diagramm 5 zeigt die entstehenden Partikelgrößenverteilungen im Zündstrahl- und reinen Flüssigkraftstoffbetrieb, jeweils mit Rapsöl.

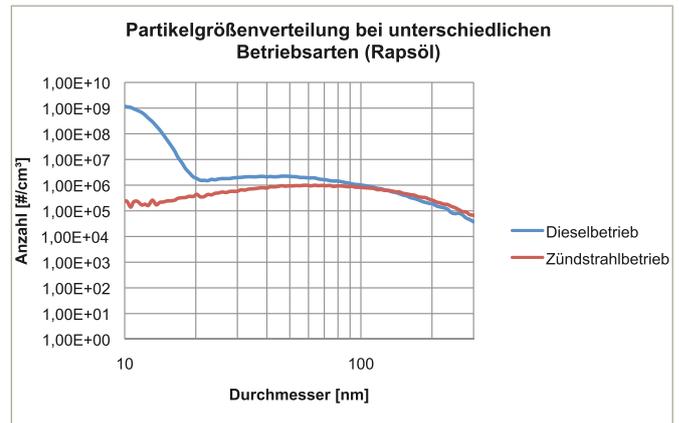


Diagramm 5: Partikelgrößenverteilungen im Zündstrahl- und Dieselbetrieb mit Kraftstoff bzw. Zündöl Rapsöl

Die Partikelgrößenverteilungen der beiden Betriebsarten weisen vor allem im Nukleationsmodus deutliche Unterschiede auf und gleichen sich erst im Akkumulationsmodus bei etwa 100 nm an. Es kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei einem gewissen Teil des Nukleationsmodus um flüssige Partikel handelt. Diese könnten aus Teilen unverbrannten Kraftstoffes entstanden sein. Die anzahlbezogenen Medianwerte unterscheiden sich deutlich. Während er sich im Zündstrahlbetrieb bei etwa 57 nm einstellte, ergaben die Berechnungen beim Dieselbetrieb einen Wert von 9,6 nm. Die Anzahlkonzentrationen wichen ebenfalls stark voneinander ab und waren im Dieselbetrieb um den Faktor 300 höher. Die Unterschiede an der Massekonzentration fielen hier nicht so deutlich aus, da die Partikel des sehr feinen Nukleationsmodus nur eine geringe Masse besitzen.

### Partikelmessungen mit dem Zündöl Biodiesel

Die dritte Messreihe wurde mit dem Zündöl Biodiesel durchgeführt. Der vom Holzvergaser generierte Hauptkraftstoff Holzgas beinhaltete zum Zeitpunkt der Messungen etwa die gleiche Zusammensetzung wie in den vorausgegangenen Messungen. Die Abgasproben wurden unter den gleichen Bedingungen wie bei den ersten beiden Messreihen entnommen und aufbereitet. Die Messungen mit unterschiedlichen Einspritzzeitpunkten wurden bei einer fixen Zündölmenge (Zündölmenge 2) durchgeführt. Die Verteilungskurven der einzelnen Einspritzzeitpunkte wurden aus jeweils drei Scans des SMPS gemittelt. Das nachfolgende Diagramm 6 zeigt die Partikelgrößenverteilungen bei verschiedenen Einspritzzeitpunkten.

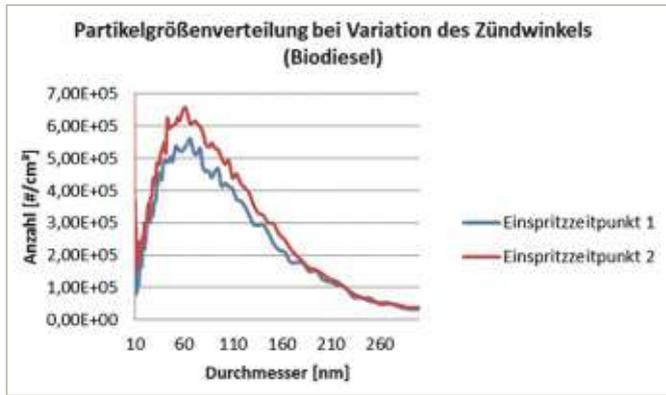


Diagramm 6: Partikelgrößenverteilungen bei verschiedenen Einspritzzeitpunkten (Biodiesel)

Die Partikel im Abgas weisen eine unimodale Verteilung auf. Die errechneten Medianwerte, bezogen auf die Anzahl und Masse, änderten sich bei der Variation des Zündwinkels nur unwesentlich. Bei einer angenommenen Partikeldichte von  $1,2 \text{ g/cm}^3$  ergibt sich für die ersten drei Scans des späteren Einspritzzeitpunktes 1 eine mittlere Staubbelastung von  $0,29 \text{ mg/m}^3$ . Die Staubbelastung für die Scans des frühen Einspritzzeitpunktes stieg im Mittel auf  $0,35 \text{ mg/m}^3$ , wobei die gesamte Anzahl an Partikeln im Abgas bei beiden Messpunkten bei etwa  $554000 \text{ \#/cm}^3$  lag.

Auch in der dritten Messreihe mit dem Zündöl Biodiesel wurde der Einfluss der Zündölmenge auf die Partikelgrößenverteilung untersucht. Die Messungen mit Variation der Zündölmengen wurden bei einem fixen Einspritzzeitpunkt (Einspritzzeitpunkt 1) durchgeführt. Die Verteilungskurven der einzelnen Zündölmengen wurden wieder aus jeweils drei Scans des SMPS gemittelt. Das nachfolgende Diagramm 7 zeigt die Partikelgrößenverteilungen bei verschiedenen Zündölmengen.

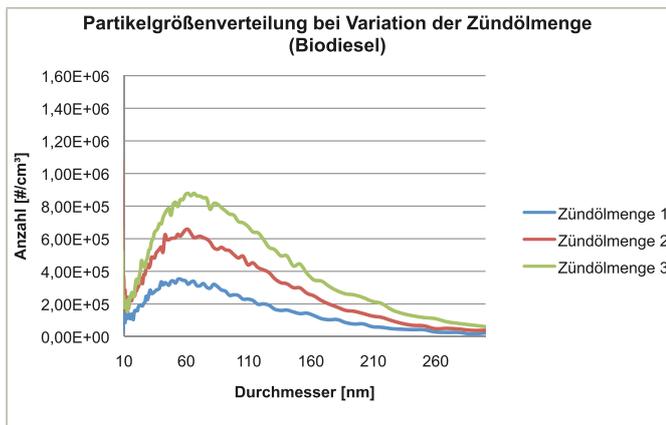


Diagramm 7: Partikelgrößenverteilungen bei verschiedenen Zündölmengen (Biodiesel)

Die unimodale Verteilung der Partikel bleibt auch bei der Variation der Zündölmenge erhalten. Über alle Zündölmengen hinweg betrachtet verschiebt sich der anzahlbezogene Medianwert der Partikelgrößenverteilungen

von  $47 \text{ nm}$  über  $52 \text{ nm}$  auf  $56 \text{ nm}$ . Tendenziell wandert der Wert, wie bereits in der zweiten Messreihe beobachtet, mit der Einspritzmenge des Zündöls nach oben. Der massebezogene Medianwert konnte in dieser Messreihe keinen eindeutigen Trend aufzeigen und bewegte sich im Mittel bei  $173 \text{ nm}$ . Die Software des SMPS errechnete bei einer angenommenen Partikeldichte von  $1,2 \text{ g/cm}^3$  für die 9 Scans des SMPS eine Beladung des Abgases zwischen  $0,231 \text{ mg/cm}^3$  und  $0,531 \text{ mg/cm}^3$ . Die Beladung stieg wie die Partikelanzahl mit der eingespritzten Zündölmenge. Die Anzahl an Partikel im Abgas belief sich zwischen  $422000 \text{ \#/cm}^3$  und  $755000 \text{ \#/cm}^3$ . Die Zündölmenge 1 stellt die Variante mit der geringsten Menge an Zündöl dar. In dieser Einstellung wird auch die geringste Anzahl und Menge an Partikeln emittiert.

## Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend wurden die sich aus den einzelnen Zündölen ergebenden Partikelgrößenverteilungen miteinander verglichen. Der Vergleich fand am Einspritzzeitpunkt 1 und 2 statt, da hier bei jeder der drei Messreihen Proben gezogen wurden. Die Zündölmenge des Vergleichs war in allen drei Varianten des Zündöls auf die Menge 2 eingestellt. Das nachfolgende Diagramm 8 zeigt den Vergleich der Zündöle am Einspritzzeitpunkt 1.

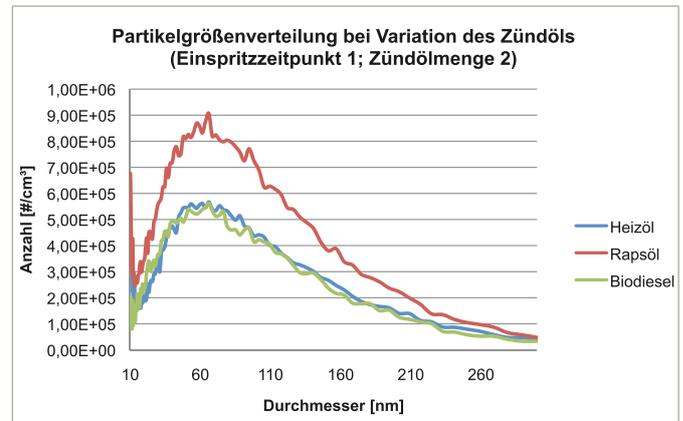


Diagramm 8: Partikelgrößenvergleich bei Variation des Zündöls (Einspritzzeitpunkt 1)

Das Diagramm lässt gut erkennen, dass sich die Partikelgrößenverteilungen im Größenbereich nur sehr geringfügig unterscheiden, jedoch in der Anzahlkonzentration Differenzen aufweisen. Während sich die Zündöle Heizöl und Biodiesel ihrer Anzahlkonzentration annähernd gleichen, ist beim Zündöl Rapsöl eine deutliche Erhöhung zu erkennen. Die hohe Anzahl an Partikeln an der unteren Messgrenze des SMPS könnte auf eine bimodale Ausprägung der Verteilungskurve im Nukleationsmodus hinweisen. Eine weitere Erklärung der Ausbildung könnten Kondensationseffekte im nicht sichtbaren Bereich des Messgerätes sein. Das nachfolgende Diagramm 9 zeigt den Vergleich der Zündöle am Einspritzzeitpunkt 2.

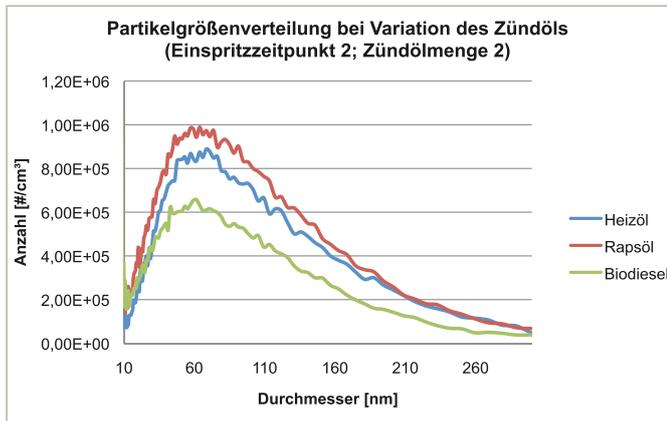


Diagramm 9: Partikelgrößenvergleich bei Variation des Zündöls (Einspritzzeitpunkt 2)

Der Vergleich der Partikelgrößenverteilungen bei verschiedenen Zündölen fällt am Einspritzzeitpunkt 2 sehr ähnlich zum ersten Vergleich aus. Die Verteilungen der einzelnen Zündöle befinden sich wiederum im annähernd gleichen Größenbereich. Den Ansatz einer bimodalen Verteilung im Nukleationsmodus zeigt hier vor allem der

Zündkraftstoff Biodiesel. Betrachtet man die Verteilungen hinsichtlich der Anzahlkonzentration am Einspritzzeitpunkt 2, fällt vor allem ein Zuwachs der Konzentration beim Zündöl Heizöl auf, während sich die Anzahl an Partikeln beim Zündkraftstoff Rapsöl leicht verringert. Trotz der Annäherung der Verteilungskurven von Heizöl und Rapsöl stellt sich bei Letzterem, wie schon im ersten Vergleich, höchste Anzahlkonzentration ein.

Für weitere Forschungsarbeiten besteht vor allem die Aufgabe darin, die bereits erhaltenen Messergebnisse zu verifizieren, z. B. über eine gravimetrische Partikelmessung nach der Richtlinie 97/68/EG. Hier werden durch den Einsatz eines Verdünnungstunnels im Gegensatz zur Methode nach VDI 2066 auch die flüssigen Bestandteile des Aerosols miterfasst und können so mit den Werten des SMPS abgeglichen werden. Ebenso muss durch eine Variation der Probenahme und Aufbereitung die Ausbildung der bimodalen Verteilungskurve des Nukleationsmodus untersucht werden, der im reinen Flüssigkraftstoffbetrieb 90 % der Partikelanzahl beinhaltet, aber nur 10 % der Partikelmasse enthält.

## Literaturverzeichnis

1. [ISO15900] ISO 15900: *Determination of particle size distribution – Differential electrical mobility analysis for aerosol particles*. Genf: International Organisation for Standardisation 2009.
2. [Wiedensohler1988] Wiedensohler, A.: *An approximation of the bipolar charge distribution for particles in the submicron size range*. J. Aerosol Sci. 19 (1988) Nr. 3, S. 387–389.

## Kontakt:



**Michael Hebauer, M. Eng.**

Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

mi.hebauer@oth-aw.de



**Raphael Lechner, M. Sc.**

Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

r.lechner@oth-aw.de



**Prof. Dr.-Ing. Markus Brautsch**

Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

m.brautsch@oth-aw.de

# Thermal models of IGBT modules.

## FOSTER TO CAUER CONVERSION

Johannes Klier

### Zusammenfassung

Das thermische Verhalten der IGBT-Module wird in den Datenblättern der Hersteller in der Regel mithilfe eines Foster-Modells beschrieben. Dieses Modell ist anhand von Messergebnissen mathematisch einfach zu erstellen. Für Stromrichterentwicklung hat dieses Modell allerdings einen entscheidenden Nachteil: es kann nicht zusammen mit einem thermischen Kühlkörper-Modell genutzt werden. Die Reihenschaltung der beiden Modelle generiert total falsche Ergebnisse.

Diese Kombination der thermischen Ersatzschaltbilder ist möglich, wenn sowohl für das Halbleitermodul als auch für den Kühler die sogenannten Cauer-Modelle verwendet werden.

Die Parameter eines Cauer-Modells des Halbleitermoduls können aus dem physikalischen Aufbau (Geometrie, verwendete Materialien) abgeleitet werden. Die  $R_{th}/C_{th}$ -Paare der thermischen Ersatzschaltung entsprechen direkt den einzelnen Schichten der Modulstruktur.

In diesem Beitrag wird eine alternative Methode der Bestimmung der Komponenten des Cauer-Modells beschrieben: die mathematische Umrechnung des Foster-Modells (das in der Regel vom Halbleiterhersteller geliefert wird).

Das Ergebnis der Umrechnung ist allerdings nicht eindeutig, sodass nachträglich eine kritische Analyse erforderlich ist.

Die auf diese Weise bestimmten Komponentenpaare  $R_{th}/C_{th}$  des Cauer-Modells entsprechen nicht mehr der physikalischen Schichtenstruktur des Moduls.

### Abstract

Manufacturers of power semiconductors usually describe the thermal behaviour of IGBT modules by means of the Foster model in their data sheets. This may be due to the fact that it is relatively easy to create this model using the results of thermal measurements.

However, for designers of converters the Foster model has a crucial disadvantage: it cannot be used together with a similar heat sink model. The series connection of these two equivalent circuits generates completely wrong results.

The series connection of thermal models is possible when using another type of the thermal equivalent circuit – the Cauer Model. Its parameters can be calculated when the mechanical design of the power device and materials used are known. In this case, the  $R_{th}/C_{th}$ -pairs of the equivalent circuit correspond directly to the layer structure of the IGBT module.

In this paper an alternative way of determining a Cauer Model will be presented: the mathematical conversion of “Foster to Cauer”.

However, the results of this conversion are ambiguous and a critical analysis of the results is necessary.

In addition, the  $R_{th}/C_{th}$  model components determined by this method do not correspond to the layers of the module's physical structure any more.

# 1 Introduction

[1] This document shows an overview of one-dimensional thermal equivalent circuit models and their properties. The thermal behaviour of semiconductors and heat sinks can be described by means of various models. *Figure 1* shows a simplified thermal equivalent circuit from junction to ambient (for a semiconductor power device and a heat sink).

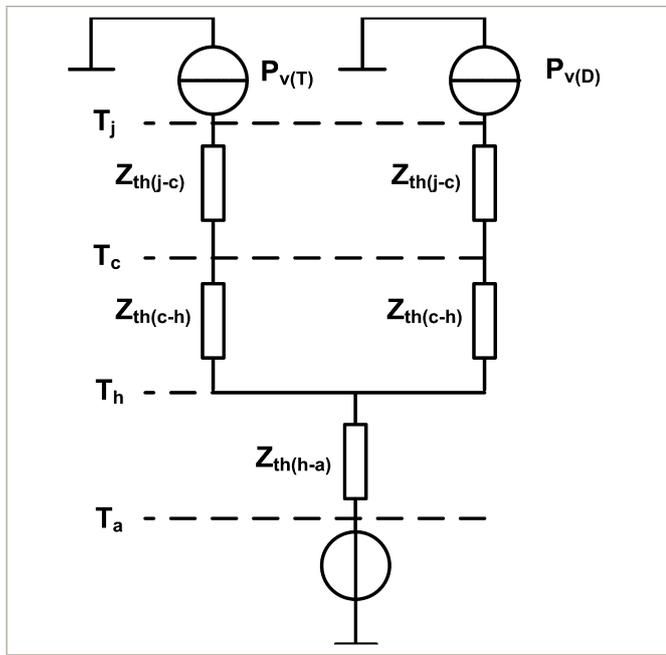


Figure 1: Simplified thermal model of IGBT and freewheeling diode in a power module [1]

The thermal Impedances  $Z_{th(x-y)}$  in Figure 1 can be usually emulated using equivalent circuits of the following two types:

- Foster Model („Partialbruchschtaltung“, „leiterförmiges Ersatzschaltbild“)
- Cauer Model („Kettenbruchschtaltung“, „kettenförmiges Ersatzschaltbild“)

The properties of these two equivalent circuit types are described in detail in Chapter 3.

The conversion of the Foster Model into the equivalent Cauer Model will be described in Chapter 4. The conversion was carried out using Matlab. Chapter 2 contains a short introduction to the thermal laws and principles.

## 1.1 Definitions

- $R_{th,j-c}$  Thermal resistance between the junction and the baseplate of the module
- $R_{th,c-h}$  Thermal resistance between the baseplate and the heatsink
- $R_{th,h-a}$  Thermal resistance between the heatsink and its ambient medium

- $C_{th,j-c}$  Thermal capacity between the junction of the semiconductor and the baseplate of the module
- $C_{th,c-h}$  Thermal capacity between the baseplate and the heatsink
- $C_{th,h-a}$  Thermal capacity between the heatsink and its ambient medium
- $Z_{th,j-c}$  Thermal impedance between the junction of the semiconductor and the baseplate of the module
- $Z_{th,c-h}$  Thermal impedance between the baseplate and the heatsink
- $Z_{th,h-a}$  Thermal impedance between the heatsink and its ambient medium
- $T_j$  Junction temperature of the power semiconductor
- $T_c$  Baseplate temperature of an IGBT-Module
- $T_a$  Ambient temperature
- $P_v$  Power dissipation ( $P_{v(T)}$  : Transistor/IGBT,  $P_{v(D)}$  : Diode)
- $H_F(s)$  Transfer function
- $Z(s)$  Impedance (Laplace domain)

## 2 Thermal laws and principles

One of the possible heat transfer mechanisms is thermal conduction. This chapter contains definitions of thermal resistance and thermal capacity.

### 2.1 Thermal resistance

The energy flow (conduction) per unit time (power) through a section of material (see Fig. 2) is given by:

$$P_{th,c} = \frac{\lambda \cdot A \cdot \Delta T}{d} \quad (2-1)$$

The direction of energy flow is from the higher temperature ( $T_1$ ) end to the lower temperature ( $T_2$ ) end.

- $\Delta T = T_1 - T_2$  temperature difference in [K]
- A cross section in [m<sup>2</sup>]
- d thickness in [m]

$$\lambda \quad \text{thermal conductivity in } \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$$

The thermal conductivity  $\lambda$  is a material constant which describes the capability of the material to transport (conduct) thermal energy.

The following equation defines the thermal resistance of this material section:

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{th,c}} \quad (2-2)$$

[2] [3] The (absolute) thermal resistance is the temperature difference across a material section when a unit of heat energy flows through it per unit time.

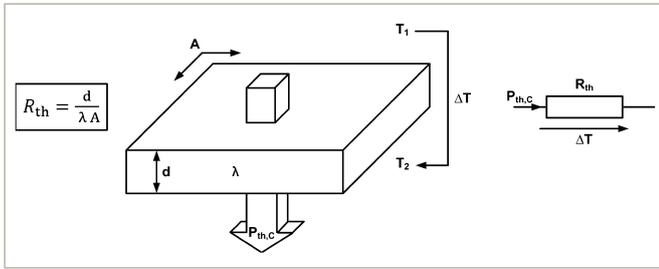


Figure 2: Thermal resistance of a flat plate [2]

The thermal resistance of a material section with cross sectional area  $A$  and thickness  $d$  equals:

$$R_{th} = \frac{d}{\lambda A} \quad \left[ \frac{K}{W} \right] \quad (2-3)$$

Sometimes another quantity will be used: the thermal conductance. It is the reciprocal of the thermal resistance  $R_{th}$ .

Figure 3 shows the analogies between quantities of electrical and thermal networks.

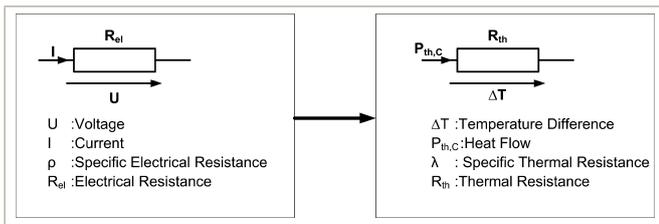


Figure 3: Thermal resistance – relations between electrical and thermal quantities [2]

## 2.2 Thermal capacity

In transient cases the thermal capacity  $C_{th}$  of the material must also be taken into consideration [2]. Thermal capacity  $C_{th}$  is very similar to its electrical counterpart  $C_{el}$ . This quantity describes the ability of material to store thermal energy. It will be defined as a quotient of the stored thermal energy and the resulting temperature rise of the material.

$$C_{th} = \frac{\Delta Q_{th}}{\Delta T} \quad \left[ \frac{Ws}{K} \right] \quad (2-4)$$

The thermal energy  $\Delta Q_{th}$  is given by:

$$\Delta Q_{th} = m \cdot c_{th} \cdot \Delta T \quad [Ws] \quad (2-5)$$

Substituting equation (2-5) into (2-4) results in an alternative definition of thermal capacitance:

$$C_{th} = m \cdot c_{th} \quad (2-6)$$

where:  
 $m$  [kg] ist the mass and

$c_{th} \left[ \frac{W \cdot s}{kg \cdot K} \right]$  is the specific thermal capacity of the material (material constant)

The thermal capacity of the material section shown in Figure 4 is given by:

$$C_{th} = c_{th} \cdot \rho \cdot d \cdot A \quad (2-7)$$

Where  $\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$  is the mass density of the plate material

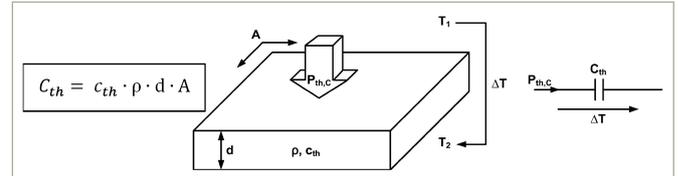


Figure 4: Thermal capacity of a flat plate [2]

Figure 5 explains further analogies between quantities of electrical and thermal networks.

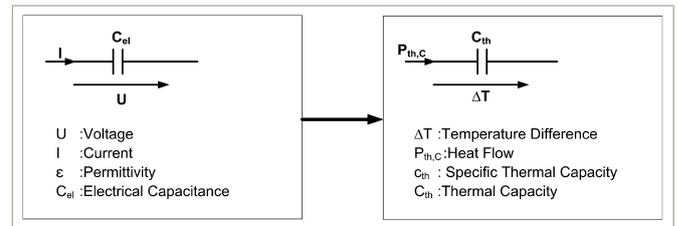


Figure 5: Thermal capacity – relations between electrical and thermal quantities [2]

Thermal resistance and thermal capacity are components of the thermal impedance  $Z_{th}$ .

## 3 Thermal models

The necessity to calculate system temperatures (for example the junction temperatures of semiconductors or heat sink temperature) in the power devices raises the question of what is the best thermal model to describe the system.

Most popular are the Foster and the Cauer Thermal Models.

At first glance both models are completely equivalent. The response to a step function (power step  $P_{V(T/D)}$ ) – see Fig. 6) will be exactly the same regardless of whether the Foster or the Cauer equivalent circuit is used for the description of the analyzed thermal system.

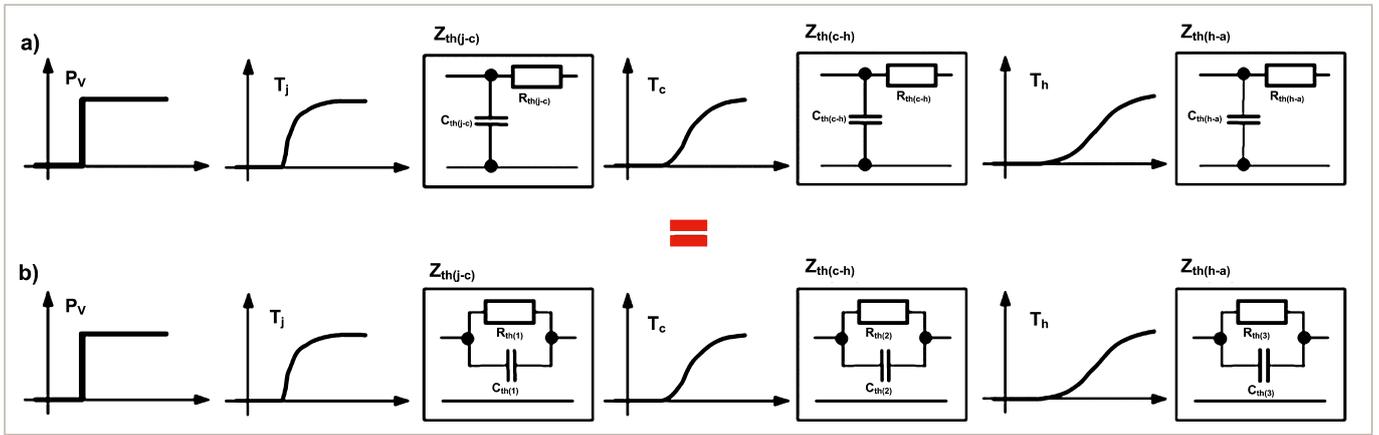


Figure 6: Interpretation of the thermal impedance by means of equivalent circuit diagrams [1]

The following chapter describes the properties of the Foster and the Cauer Model.

### 3.1 Cauer model

[1][5] The Cauer Model (see Fig. 3) reflects the real physical properties of the semiconductor/heat sink. Each RC  $\Gamma$ -section of the Cauer Model represents a physical layer and can be described with the help of material parameters. Such network allows access to internal temperatures of each layer in the thermal model. The knowledge of layer temperatures is necessary for example to calculate the lifetime of power semiconductors.

The thermal capacitances of the Cauer Model are directly connected to the ground potential (ambient temperature or in normalized notation 0 K) – see Figure 7. This location of thermal capacitances in the equivalent circuit of the module is physically correct.

The arrangement of the model sections must comply with the layer arrangement of the power device. Changing the order of layers causes an incorrect behaviour of the model.

The following figure shows the Cauer Thermal Model of a power semiconductor device and equations to calculate its thermal resistances and thermal capacitances.

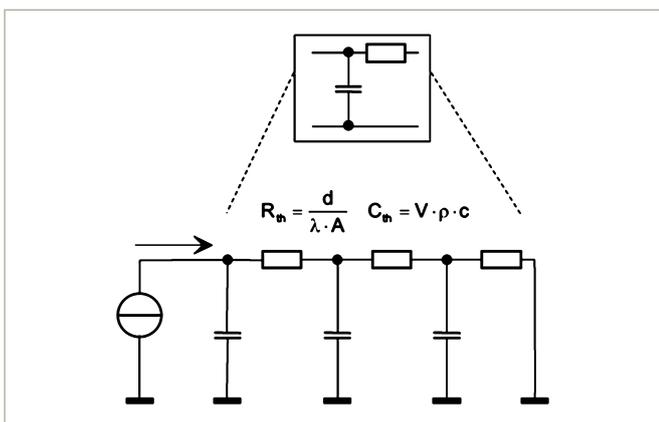


Figure 7: Cauer Model [1]

### 3.2 Foster model

[1][5] In the Foster Model the thermal capacitors are connected in parallel to the thermal resistors. The last RC pair is connected to the ground potential (ambient temperature or in normalized form 0 K). In contrast to Cauer the RC sections of the Foster Model do not represent the individual layers of the power device in a physically correct manner. The network nodes do not have any physical significance. The order of the Foster Model sections can be changed without loss of the model's correct behaviour.

The following Figure 8 shows the Foster equivalent circuit and the equation describing the thermal impedance curve.

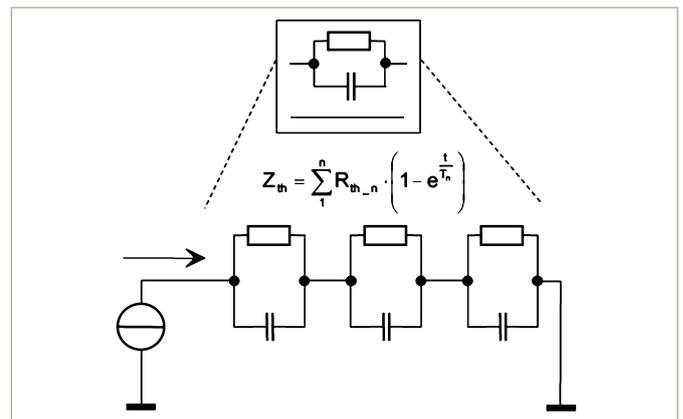


Figure 8: Foster Model [1]

The datasheets of semiconductor power devices usually contain the  $r$  and  $\tau$  values (thermal resistances and time constants) of the Foster Model sections. A typical example can be seen in Table 1.

Table 1: Parameters of the thermal Foster Model of an IGBT module (junction to case) [5]

i	1	2	3	4
$r_i$ [K/kW]: IGBT	1,56	4,25	1,26	1,44
$\tau_i$ [sec]: IGBT	0,0068	0,0642	0,3209	2,0212
$r_i$ [K/kW]: Diode	3,11	8,49	2,52	2,88
$\tau_i$ [sec]: Diode	0,0068	0,0642	0,3209	2,0212

Thermal capacitances of the model can be calculated using the following relation:

$$\tau_i = r_i \cdot c_i \quad (3-1)$$

Using equation (3-2) the thermal impedance curve (step response) of the device can be determined.

$$Z_{th(j-c)}(t) = \sum_{i=1}^n r_i \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}\right) \quad (3-2)$$

The following Figure 9 shows an example of a thermal impedance curve (IGBT and Diode).

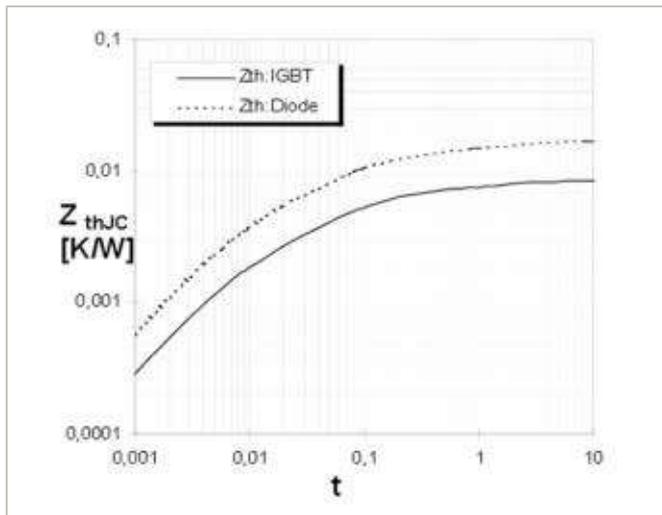


Figure 9: Thermal impedance curve (step response) [5]

#### 4 Foster to Cauer transformation

[2][4][5][6][8] Both thermal models (Foster and Cauer) have their advantages and drawbacks.

The Foster Model is mathematically easy to create – directly from the thermal step response of the device making use of equation (3-2). The parameters of the Cauer Model can be calculated using material physical data and dimensions of the device layers.

Data sheets of semiconductor devices usually contain the Foster Model (see Chapter 3.2).

To calculate the behaviour of the semiconductor power device together with a certain heat sink, it is necessary to use Cauer Models. For this type of thermal model a

series connection of equivalent circuits of the power device and of the heat sink is correct. The combination (series connection) of two Foster Models is not possible (it generates wrong results).

For a unit consisting of a power device and a heat sink the known Foster equivalent circuits of both components must be first converted into equivalent Cauer Models. Subsequently the series connection of both Cauer Models can be realized.

The transfer function of the Foster Model is given by:

$$H_F(s) = \frac{V}{I} = Z(s)_{Foster} = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{1 + sC_i R_i} \quad (4-1)$$

or alternatively:

$$H_F(s) = \frac{V}{I} = Z(s)_{Foster} = \frac{R_1}{1 + sC_1 R_1} + \frac{R_2}{1 + sC_2 R_2} + \frac{R_3}{1 + sC_3 R_3} + \dots + \frac{R_n}{1 + sC_n R_n} \quad (4-2)$$

It is of course also possible to create a Foster Model for a complete set power device – heat sink. However, using such a model only permits the calculation of the junction temperature.

Figure 10 and 11 show the Foster and Cauer Models, each consisting of n RC-sections.

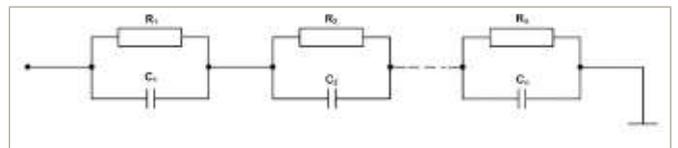


Figure 10: Foster Model with n sections

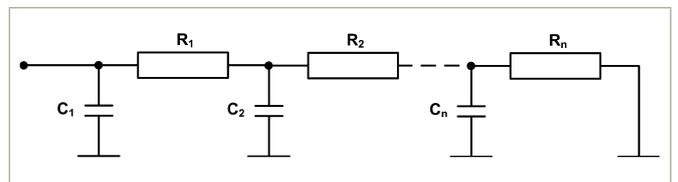


Figure 11: Cauer Model with n sections

The transfer function of the Cauer Model with n RC-sections is given by:

$$H_F(s) = \frac{V}{I} = Z(s) = \frac{1}{sC_1 + \frac{1}{R_1 + \frac{1}{sC_2 + \frac{1}{R_2 + \frac{1}{\dots + \frac{1}{sC_n + \frac{1}{R_n}}}}}}} \quad (4-3)$$

To convert the Foster into the Cauer Model the following algorithm will be used [6]:

**Step 1:**

Conversion of equation (4-2) into a rational function.

$$Z(s) = \frac{a_{n-1} \cdot s^{n-1} + a_{n-2} \cdot s^{n-2} + \dots + a_1 \cdot s + a_0}{b_n \cdot s^n + b_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + b_1 \cdot s + b_0} \quad (4-4)$$

The dominator order of the function  $Z(s)$  is higher than that of the numerator

**Step 2:**

Evaluation of the reciprocal of the function  $Z(s)$ :

$$\frac{1}{Z(s)} = Y(s) = \frac{b_n \cdot s^n + b_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + b_1 \cdot s + b_0}{a_{n-1} \cdot s^{n-1} + a_{n-2} \cdot s^{n-2} + \dots + a_1 \cdot s + a_0} \quad (4-5)$$

**Step 3:**

Splitting out of the function  $Y(s)$  of a term corresponding to the first capacitance of the Cauer Model.

$$Y(s) = sC_1 + Y'(s) \quad (4-6)$$

$$= sC_1 + \frac{(b_{n-1} - C_1 \cdot a_{n-2}) \cdot s^{n-1} + \dots + (b_1 - C_1 \cdot a_0) \cdot s + b_0}{a_{n-1} \cdot s^{n-1} + a_{n-2} \cdot s^{n-2} + \dots + a_1 \cdot s + a_0}$$

with

$$C_1 = \frac{b_n}{a_{n-1}} \quad (4-7)$$

and

$$Y'(s) = \frac{(b_{n-1} - C_1 \cdot a_{n-2}) \cdot s^{n-1} + \dots + (b_1 - C_1 \cdot a_0) \cdot s + b_0}{a_{n-1} \cdot s^{n-1} + a_{n-2} \cdot s^{n-2} + \dots + a_1 \cdot s + a_0} \quad (4-8)$$

or alternatively

$$Y'(s) = \frac{b'_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + b'_1 \cdot s + b'_0}{a_{n-1} \cdot s^{n-1} + a_{n-2} \cdot s^{n-2} + \dots + a_1 \cdot s + a_0} \quad (4-9)$$

**Step 4:**

Evaluation of the reciprocal of the residual function  $Y'(s)$ :

$$Z'(s) = \frac{1}{Y'(s)}$$

$$= \frac{a_{n-1} \cdot s^{n-1} + a_{n-2} \cdot s^{n-2} + \dots + a_1 \cdot s + a_0}{b'_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + b'_1 \cdot s + b'_0} \quad (4-10)$$

and splitting out of it a term which corresponds to the first resistance of the Cauer Model.

$$Z'(s) = R_1 + Z''(s) \quad (4-11)$$

or

$$Z'(s) = R_1 + \frac{(a_{n-2} - R_1 \cdot b'_{n-2}) \cdot s^{n-2} + \dots + (a_1 - R_1 \cdot b'_1) \cdot s + a_0 - R_1 \cdot b'_0}{b'_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + b'_1 \cdot s + b'_0} \quad (4-12)$$

with

$$R_1 = \frac{a_{n-1}}{b'_{n-1}} \quad (4-13)$$

and

$$Z''(s) = \frac{(a_{n-2} - R_1 \cdot b'_{n-2}) \cdot s^{n-2} + \dots + (a_1 - R_1 \cdot b'_1) \cdot s + a_0 - R_1 \cdot b'_0}{b'_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + b'_1 \cdot s + b'_0} \quad (4-14)$$

or

$$Z''(s) = \frac{a'_{n-2} \cdot s^{n-2} + \dots + a'_1 \cdot s + a'_0}{b'_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + b'_1 \cdot s + b'_0} \quad (4-15)$$

This procedure has to be repeated until all capacitances and resistances of the Cauer Model are determined.

In case the calculations have been carried out correctly, both  $Z_{th}$ -curves (Foster and Cauer step responses) must be identical.

This is illustrated by the following example concerning the IGBT-Modul FF600R12ME (Infineon):

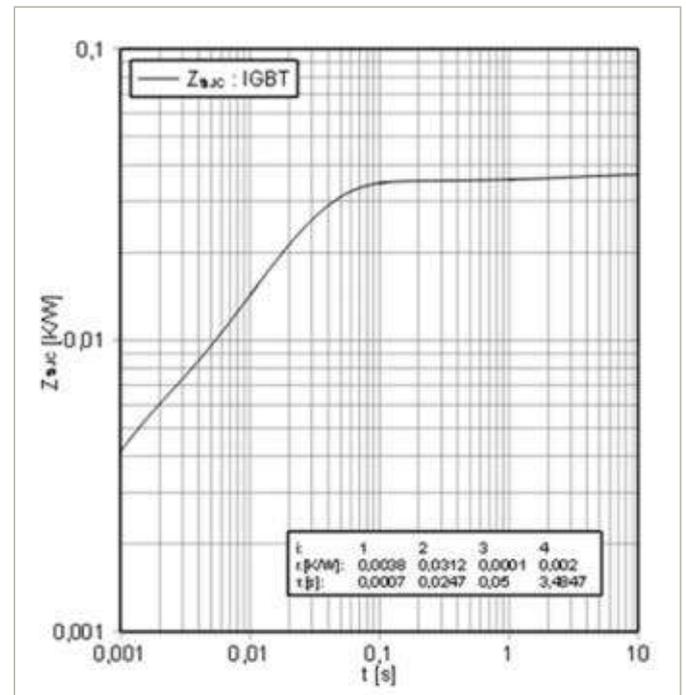


Figure 12: Datasheet parameters and  $Z_{th(j-c)}$ -curve for the IGBT part of the module FF600R12ME4 (Infineon)

The results of the Foster into Cauer conversion (Matlab calculations) are shown below.

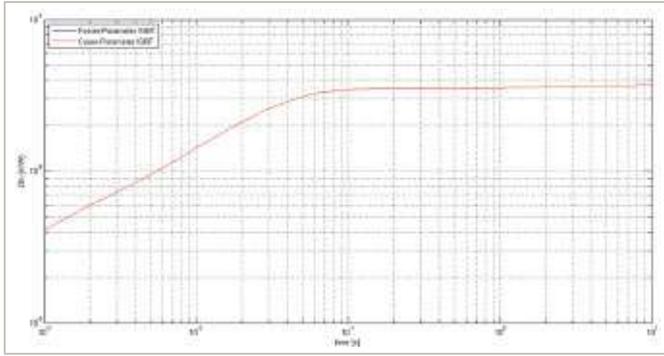


Figure 13:  $Z_{th}$  curves of the Foster and Cauer Models

Both  $Z_{th}$ -curves in Figure 9 are absolutely congruent.

Table 2: Results of the Foster into Cauer Model conversion (IGBT part of the Infineon module FF600R12ME4)

Cauer Model parameters for the IGBT part of the module	
$R_{th1}$ : 0.005741 K/W	$C_{th1}$ : 0.149381 Ws/K
$R_{th2}$ : 0.029363 K/W	$C_{th2}$ : 0.687529 Ws/K
$R_{th3}$ : 0.000112 K/W	$C_{th3}$ : 939.688236 Ws/K
$R_{th4}$ : 0.001884 K/W	$C_{th4}$ : 879.775998 Ws/K

Table 2 shows the parameters (thermal resistances and thermal capacitances) of the Cauer Model consisting of four RC sections.

[7] The results of the above described conversion “Foster to Cauer” may be wrong in one sense: The calculated total thermal capacity may be higher than the real physical capacity. Using these wrong parameters for thermal load cycle calculations may result in too low temperature values of the converter power devices. The higher the thermal resistance of the heatsink or of the thermal grease, the more significant the resulting temperature error. Therefore a correction of the results of the conversion (“Foster to Cauer”) is necessary.

The criterion for this is: The sum of all thermal capacities of the model should not be higher than the thermal capacity of the active materials used in the semiconductor power device.

Example:

The sum of the calculated thermal capacitances (Table 2) is:

$$C_{th(sum)} = C_{th1} + C_{th2} + C_{th3} + C_{th4} \quad (4-16)$$

$$C_{th(sum)} = 0.149381 \frac{Ws}{K} + 0.687529 \frac{Ws}{K} + 939.688236 \frac{Ws}{K} + 879.775998 \frac{Ws}{K} = 1820.3 \frac{Ws}{K} \quad (4-17)$$

This value is much too high.

For the analyzed power device the thermal capacitance of the half IGBT-Module baseplate can be calculated as follows:

$$C_{th} = c_{th} \cdot \rho \cdot d \cdot A \quad (4-18)$$

with

Table 3: Base plate parameters

Parameters of the base plate	
$c_{th}$ (specific thermal capacity)	$385 \frac{Ws}{Kg K}$
$\rho$ (density)	$8700 \frac{kg}{m^3}$
$d$ (thickness)	0.003 m
$A$ (area) (This is the base plate area allocated to one IGBT and one Diode)	0.003 m <sup>2</sup>

$$C_{th} = 385 \frac{Ws}{kg K} \cdot 8700 \frac{kg}{m^3} \cdot 0.003 m \cdot 0.003 m^2 = 30.15 \frac{Ws}{K} \quad (4-19)$$

Thus, it is necessary to adapt the calculated thermal capacity. The possible procedure is to integrate the thermal grease layer into the module and to assign an appropriate capacity to it.

Figure 14 and table 4 show the result of the adjustment.

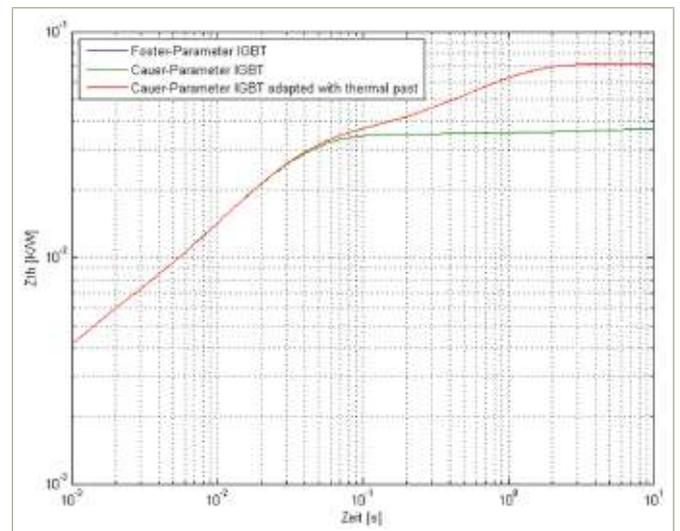


Figure 14:  $Z_{th}$ -curves of the adapted Foster and Cauer Models (with integrated thermal grease layer)

Table 4: Result of the adjustment and included thermal past

IGBT → Cauermodel incl. thermal past	
$R_{th1}$ : 0.005741 K/W	$C_{th1}$ : 0.149381 Ws/K
$R_{th2}$ : 0.029363 K/W	$C_{th2}$ : 0.687529 Ws/K
$R_{th3}$ : 0.00199 K/W	$C_{th3}$ : 18.1 Ws/K
$R_{th4}$ : 0.035 K/W	$C_{th4}$ : 0.44 Ws/K

## 5 Summary

[5] It is possible to convert the thermal Foster Model into the Cauer Model – see Chapter 4. However this conversion is ambiguous. The resulting Cauer Model is a sheer mathematical creation and its RC-sections do not represent physically the individual layers of the semiconductor power device. A merging (series connection) of Cauer Models of cooperating power device and heat sink is in principle possible. However without

a proper adaptation of the power module Cauer Model (after mathematical conversion of the Foster Model) the results of thermal calculations/simulations can be quite incorrect.

The best way to obtain a reliable model for thermal converter calculations is to measure and identify parameters of the complete thermal system from the junction to the ambient medium. However, this way is rather labour-intensive.

---

## References

- [1] Dr.-Ing. Arendt Wintrich; Dr.-Ing. Ulrich Nicolai; Dr. techn. Werner Tursky; Univ.-Prof. Dr.-Ing. Tobias Reiman; *Anwendungshandbuch Leistungshalbleiter*; 2010
- [2] Andreas Volke; Michael Hornkamp; *IGBT Modules; Technologies, Driver and Application*; Warstein 2010
- [3] Wikipedia ([http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal\\_resistance](http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_resistance)); date: 2014-04-16
- [4] *Doctoral Thesis Marc Salleras; Thermal Modeling of Microsystems and electronic Components Freixes*; Barcelona 2007
- [5] Dr. Thomas Schütze; Infineon Technologie AG AN2008–03; Warstein 2008
- [6] Schwarz J.; *Thermische Ersatzschaltbilder*. *Elektronik Journal* 7/85, S. 72–79
- [7] Dr. Scholten J.; *How to derive thermal models for converter calculation*; Bombardier 3EGM042500-2664; 2008-12-08
- [8] Dr. Schiewer; *Thermische Modelle von Halbleiterventilen [GTOs]*; Bombardier Transportation; 1995

## Kontakt:



**Johannes Klier**

Bombardier Transportation GmbH  
Dep.: GSC/NE2GE  
Neustädter Straße 62  
68309 Mannheim

M-APR-Student an der Ostbayerischen Technischen  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien und Informatik

# Langzeitstabilität elektrochemischer Speicher unter thermischer Überlast und hoher Spannung: TGA-IR-Studie an Elektrolyt-systemen

Prof. Dr. Peter Kurzweil

## Zusammenfassung

Aktuelle 50-F-Superkondensatoren von führenden internationalen Herstellern wurden im Hinblick auf Brandschutzvorschriften und allgemeine Sicherheitsrisiken in technischen Pulsleistungsanwendungen bei Temperaturen von bis zu 120 °C und Spannungen bis 4 V getestet. Über mittlerweile zehn Jahre hat unsere Arbeitsgruppe breite Testerfahrung gesammelt und diagnostische Kriterien zur Beurteilung von Langzeittest abgeleitet. Unseren Messungen zufolge kann das Alterungsverhalten von Superkondensatoren auf der Basis von Kapazitätsverlust, parasitären Nebenreaktionen und der chemischen Analyse von Alterungsprodukten quantifiziert werden. Durch fortgesetzte Beanspruchung bei hohen Temperaturen und Betriebsspannungen werden Amine, Amide und Oligomere des Acetonitrils im organischen Elektrolyten gebildet und die Kohlenstoff-Komposit-Elektroden werden zerstört.

Elektrochemische Doppelschichtkondensatoren, auch Superkondensatoren genannt, gelten als mittelfristige Lösung für Sicherheits- und Energiesysteme, Windkraftanlagen und Elektrofahrzeuge. In den letzten Jahren sind verstärkt Sicherheitsaspekte im Hinblick auf den Langzeiteinsatz ins Blickfeld gerückt, zumal sich herausgestellt hat, dass Acetonitril-basierte Elektrolyte nicht ohne Leistungseinbußen durch andere Elektrolytsysteme ersetzt werden können. Superkondensatoren altern durch schleichende Zunahme des Innenwiderstands und Degradation der Kapazität. Ausfallteile zeigen gelbbraune Rückstände durch den Austritt von Elektrolyt durch Sollbruchstellen und Gehäuseundichtigkeiten. Explosionen treten jedoch nicht auf, weil die im Kondensator enthaltene Elektrolytmenge für eine ernste Druckwelle zu klein ist.

## Abstract

State-of-the-art 50 F double-layer capacitors of leading international manufacturers were tested with respect to fire protection regulations and general safety hazards in technical pulse-power applications at temperatures of up to 120 °C and voltages of up to 4 V. Over a decade, our work group has gathered extensive experience in service life testing and has developed diagnostic criteria for the evaluation of long-time tests. Based on our measurements, the aging behavior of supercapacitors is quantified in terms of capacitance loss, parasitic side reactions and the chemical analysis of decomposition products. Amines, amides and oligomers of acetonitrile are formed in the organic electrolyte, and the carbon composite electrodes are destroyed by continual stress at high temperatures and operating voltages.

## Beschleunigte Alterung unter Übertemperatur

Wir haben die thermische und elektrochemische Stabilität und das Alterungsverhalten kommerzieller 50-F-Superkondensatoren in standardisierten Vergleichstests untersucht. Die grundlegende Frage war, ob jahrelange Lade-Entlade-Versuche durch einen verkürzten Alterungstest bei hoher Temperatur quantitativ abgebildet werden können. Dazu verglichen wir fabrikneue Bauteile mit Ausfallmustern aus mehrjährigen Lebensdauertests. Die thermische Alterung erfolgte durch Temperatureinwirkung zwischen 60 °C und 120 °C innerhalb von 144 Stunden.

Die thermische Alterung schreitet bei Neuteilen und Ausfallteilen kontinuierlich und reproduzierbar fort. Als diagnostische Kriterien für die Beurteilung von Langzeitmessungen ziehen wir die Impedanzspektren und die voltammetrische Kapazität heran (Abb. 1). Mit der Alterung

verschwindet das nahezu rechteckige Spannungsfenster der Voltammetriekurven, das den Anstieg des Innenwiderstands und den Verlust der elektrochemisch aktiven Elektrodenoberfläche abbildet. Hinsichtlich der Lebensdauer bestehen erhebliche Unterschiede zwischen den Materialklassen: Aktivkohle zeigt sich beständiger als Kohleschaum (Aerogel). Auch die Dichtigkeit des Kondensatorgehäuses spielt eine Rolle. Durch mikroskopische Studien konnten wir als wichtige Ausfallursache unter thermischer Last die Zerstörung der polymergebundenen Elektroden identifizieren. Das Fehlerbild äußert sich im praktischen Betrieb durch eine schleichende Zunahme des Kontaktwiderstands zwischen Kohleschicht und Aluminiumträger (Stromsammler) und einen Abfall der Kapazität sowie eine ungewöhnliche Gegenspannung im Lade-Entlade-Zyklentest.

## Alterung unter Überspannung

Es wurde experimentell geklärt, ob die Alterung unter hoher Spannung dieselben Schadensbilder hervorruft wie die Alterung unter thermischer Überlast. Praktischer Nutzen dieser Untersuchung sind Kennzahlen, die eine Abschätzung der Lebensdauer durch verkürzte Alterungstests unter Überlast gegenüber den jahrelangen Einzelversuchen zulässt.

Betriebsspannungen oberhalb der Zersetzungsspannung des Elektrolyten führen zu einer dramatischen Verschlechterung der Widerstands- und Kapazitätswerte. Als markantes Lebensdauerkriterium konnten wir den abrupten Anstieg des Widerstands innerhalb weniger Lade-Entlade-Zyklen identifizieren (Abb. 2).

Die unerlaubte Umpolung der Bauteile führt zu einer vorzeitigen, irreversiblen Alterung.

Die Art des Elektrodenmaterials prägt den zeitlichen Verlauf der Degradation und kann zu einer Fehlinterpretation der tatsächlichen Lebensdauer verleiten. Je nach Fabrikat überwiegt die Alterung durch Widerstandszunahme oder die Alterung durch Kapazitätsabfall. Das Fabrikat „Heter-Lampson“ übersteht trotz auffälliger Degradation über 2300 Überspannungszyklen. Vinas 3-V-Generation hält 1900 Zyklen aus (3.7 V, 7 A), während die 2,7-V-Vorläufergeneration nach 1200 Zyklen ausfällt. Einige Fabrikate zeigen erhebliche Mängel in der Dichtigkeit des Gehäuses, was einerseits der Sicherheit dient, andererseits aber einen schleichenden Elektrolytverlust nach sich zieht.

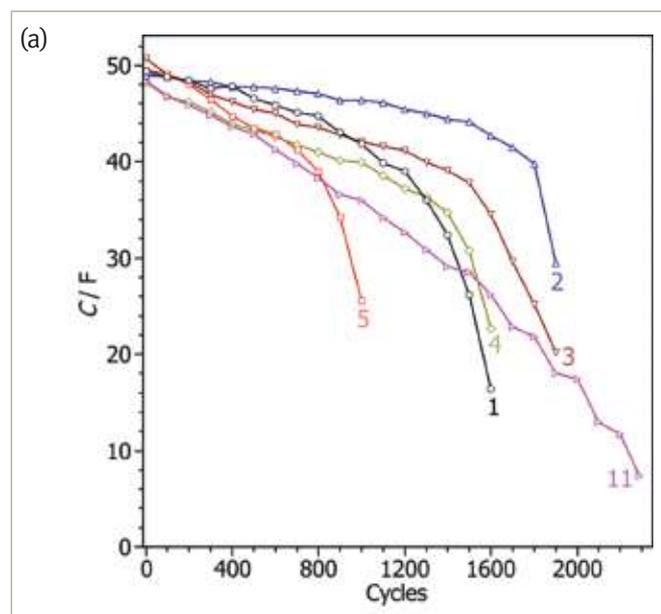
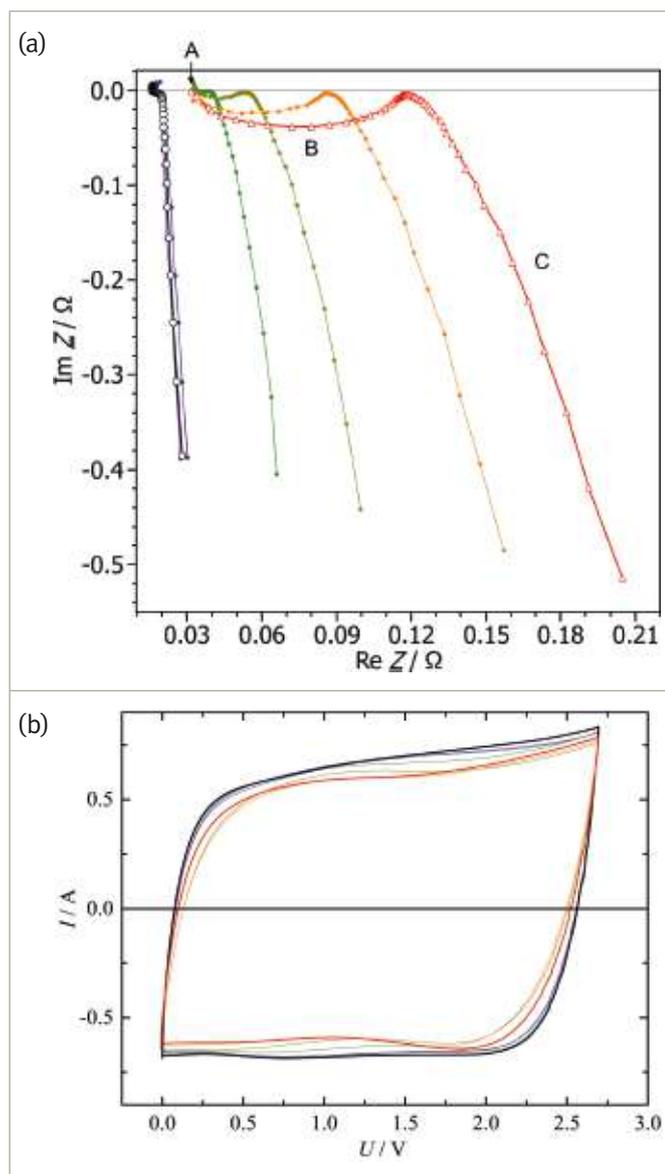


Abbildung 1: Thermische Alterung eines 50-F/2.7-V-Superkondensators (60 °C bis 120 °C in 144 h: schwarz  $\rightarrow$  rot)  
 (a) Impedanzspektren in mathematischer Konvention : A Elektrolytwiderstand, B Grenzfläche Träger/Aktivkohle, C Diffusionsimpedanz  
 (b) Voltammetrische Lade-Entlade-Kurve.

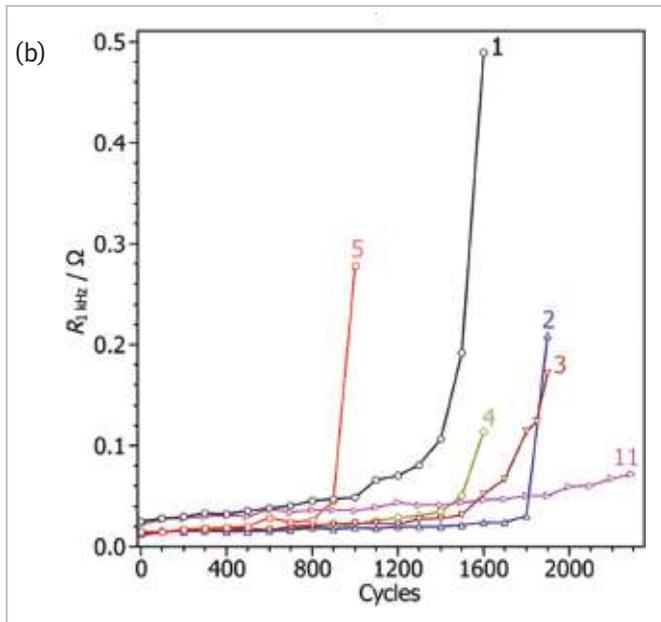
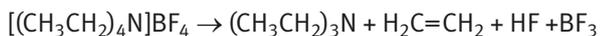


Abbildung 2: Beschleunigter Lade-Entlade-Alterungstest von 50-F-Supercapacitoren durch Laden bis 3.7 V und Entladen mit 7 A für 30 s.  
 (a) Verlust der Kapazität und  
 (b) Anwachsen des Innenwiderstands.  
 1 Nesscap, 2 Vina, 3 Vitzrocell, 4 Samwha, 5 Yec, 11 Heter-Lampson.

### Thermische Stabilität des Elektrolytsystems

Über die Art und Toxizität der thermischen und elektrochemischen Zersetzungsprodukte von Alkylammoniumsalzen in Acetonitril ist wenig bekannt. Wir haben daher organische Elektrolytsysteme mit instrumentell-analytischen Methoden untersucht, um Verbesserungen durch neuartige quartäre Leitsalze aufzufinden.

Mit der Kopplung aus Thermowaage und Infrarotspektroskopie (TGA-IR) konnten wir durch thermische Zersetzung der Leitsalze im Stickstoffstrom Ethen, Triethylamin und fluorierte Kohlenwasserstoffe, ferner Bortrifluorid und Spuren Fluorwasserstoff nachweisen (Abb. 3). Hinweise auf giftigen Cyanwasserstoff ergeben sich nicht. Hauptsächliche Zersetzungsreaktion des Leitsalzes scheint eine Hofmann-Eliminierung zu sein.



Unter Luftzutritt bilden sich Carbonylverbindungen und eine Reihe von Folgeprodukten, bis hin zu Amiden und Carbonsäuresalzen.

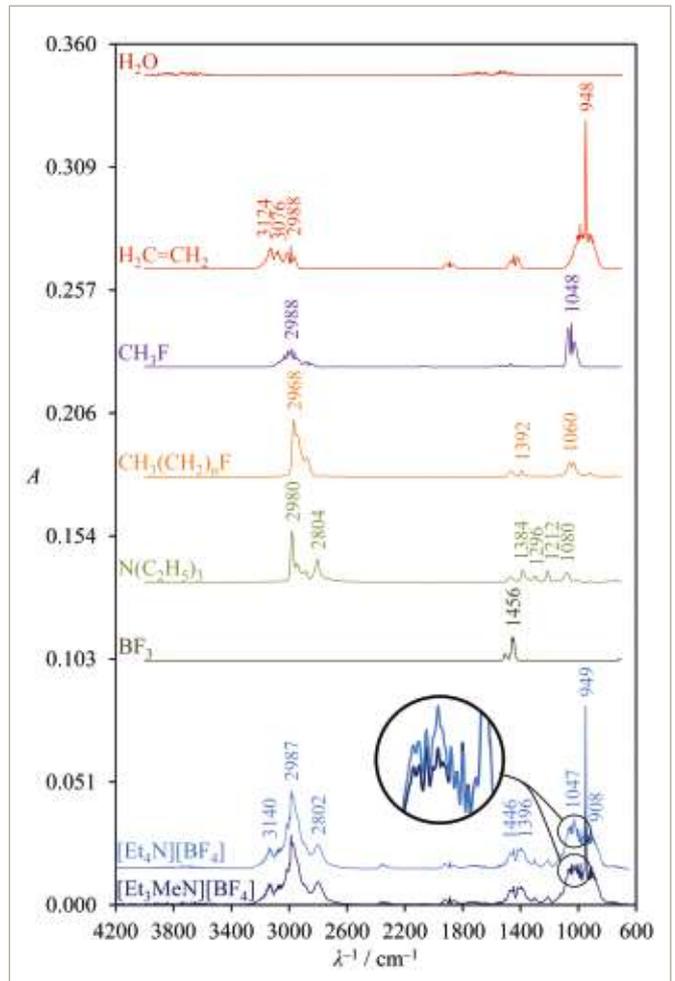


Abbildung 3: TGA-IR-Messungen an quartären Ammoniumsalzen unter Stickstoffatmosphäre und Referenzspektren bei etwa 400 °C.

Mit der Gaschromatografie-Massenspektrometrie-Kopplung (GC-MS) konnten wir heterozyklische Stickstoffverbindungen, Dimere des Acetonitrils und Reaktionsprodukte aus Acetonitril und Aminen nachweisen. Lösungen von quartären Ammoniumsalzen in Acetonitril wurden in Headspace-Gläschen bei 90 °C über mehrere Wochen ausgelagert. Als typische Zersetzungsprodukte, wie sie im Langzeitbetrieb von Supercapacitoren zu erwarten sind, treten alkylierte Amine und heterozyklische Stickstoffverbindungen auf. Problematisch erweist sich der sichere Nachweis von fluorierten Komponenten. Die Hydrohalogenierung führt theoretisch zu fluorierten Aminen. In Gegenwart von Wasser entsteht Acetamid, das neben *N,N*-Dimethylacetamid nachgewiesen wurde.

Trimethyltriazin tritt in den thermisch erzeugten Fragmenten nicht signifikant auf, kann aber durch Elektrolyse von Alkylammonium-Elektrolyten erzeugt werden. Reproduzierbar finden sich alkylierte Dihydropyrazole und Butandinitril. Bei der kathodischen Reduktion von Alkylammoniumsalzen in Acetonitril bildet sich ein Anion  $[\text{CH}_2\text{C}\equiv\text{N}]^-$ , das Ausgangspunkt einer Fülle von noch näher zu identifizierenden Reaktionsprodukten ist.

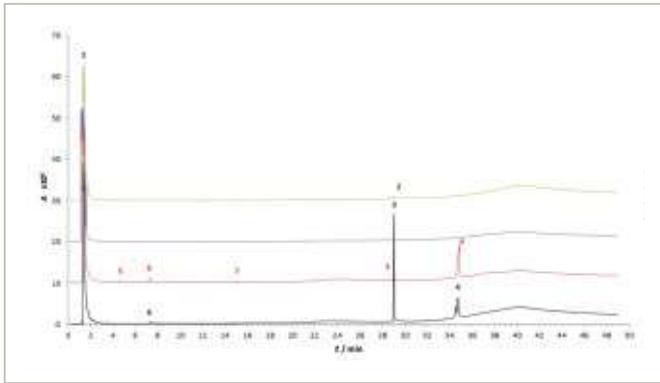


Abbildung 4: Gaschromatogramme von unstabilisiertem Elektrolyt (oben) und stabilisiertem Elektrolyt (unten), jeweils frisch und nach 76 Tagen Alterung bei 90 °C. 1: Acetonitril, 2: Triethylamin (Säulentemperatur 172 °C), 3: Dicyclohexylcarbodiimid (179 °C), 4: Dicyclohexylharnstoff (237 °C); 5: Cyclohexanon (68 °C); 6: Cyclohexanderivat (82 °C), 7: Formamidderivat (120 °C).

### Stabilisierte Elektrolyte

Literaturrecherchen empfehlen Ketone als Additive, die die Viskosität erniedrigen und die Leitfähigkeit steigern, sodass ökonomisch weniger Leitsalz eingesetzt werden kann. In stabilisierten kommerziellen Elektrolyten treten Cyclohexanon-Derivate auf (Abb. 4). Durch thermische Zersetzung von Cyclohexanon im Elektrolytssystem entstehen Derivate wie Isocyanate, Formamid, Harnstoffe und Carbodiimide, die noch näher charakterisiert werden müssen. Ferner treten fluoridierte Siloxane auf.

### Analyse von Ausfallteilen

Die weiß-braunen Ablagerungen auf Ausfallteilen, die sich im Verlauf von Lebensdauertests unter verschärften Bedingungen bilden, stellen sich in IR-Spektren wesentlich als Reste des Leitsalzes heraus. Zusätzlich treten im Elektrolytssystem aus thermisch gealterten Kondensatoren IR-Schwingungen bei 1795 und 700  $\text{cm}^{-1}$  auf. In den Massenspektren der in Acetonitril gelösten Rückstände aller Fabrikate im Temperaturbereich von 30 °C bis 300 °C finden sich Triethylamin, Dimere des Acetonitrils, fluoridierte Silane, Siloxane, Borane und Borsäuretrimethylester. Die Elektrolytssysteme aktueller Superkondensatoren sind recht ähnlich.

### Modellversuche

Durch Modellversuche mit Kohlenstoffelektroden in Acetonitril-Elektrolyt wurde versucht, die in Ausfallteilen gefundenen Überreste nachzustellen. Durch Elektrolyse werden innerhalb von Minuten braune Rückstände erzeugt. Im IR-Spektrum des reinen Acetonitrils kommt eine Bande bei 1050  $\text{cm}^{-1}$  hinzu; im Elektrolyt entstehen schwache Amin-Banden bei 3600  $\text{cm}^{-1}$ , während die Nitrilbande (2250  $\text{cm}^{-1}$ ) verschwindet. Die braunen Rückstände zeigen Amin-, Hydroxy- und Amidbanden. Im Methanolextrakt des Elektrolyserückstands sind massenspektrometrisch Borsäureester, Borane und alkylierte

Triazine nachweisbar; im Acetonitrilextrakt findet sich Triethylamin. Durch Erhitzen des Elektrolyten können die beobachteten Rückstände nicht erzeugt werden, wenn gleich IR-Banden bei 3600  $\text{cm}^{-1}$  hinzukommen. Durch mehrstündiges Kochen von Acetonitril mit Schwefelsäure unter Rückfluss wird ein in Methanol löslicher gelber Rückstand gewonnen, der im IR-Spektrum CO-Schwingungen zeigt.

### Elektrochemische Stabilität

Gesättigte Lösungen von Alkylammoniumsalzen in trockenem Acetonitril wurden mit Cyclovoltammetrie auf ihre elektrochemische Stabilität untersucht. Die Messung erfolgte in einer Apparatur aus zwei vergoldeten Kupferstempeln in fixiertem Abstand, die einem Superkondensator nachempfunden ist und ca. 2,5 ml Elektrolyt aufnehmen kann. Anders als langkettige Alkylammoniumsalze ist das Tetraethylammonium-Ion bis etwa 3 V stabil. Oberhalb 3,3 V tritt die irreversible Zersetzung des Elektrolyten ein (Abb. 5, Punkt A und B). Mit Cyclohexanon stabilisierter Elektrolyt zeigt eine verbesserte Oxidationsstabilität.

Mit Spuren von Wasser werden über Carbokationen-Zwischenstufen Alkohole, Ketone und Amide gebildet. Ein Wassergehalt von 0,001% (10 ppm) verringert das Spannungsfenster um etwa 1 V gegenüber dem trockenen Elektrolyten (80...150 mV/ppm).

Die große Oberfläche von Aktivkohle-Elektroden führt zu deutlich höheren Strömen als an den glatten Goldelektroden.

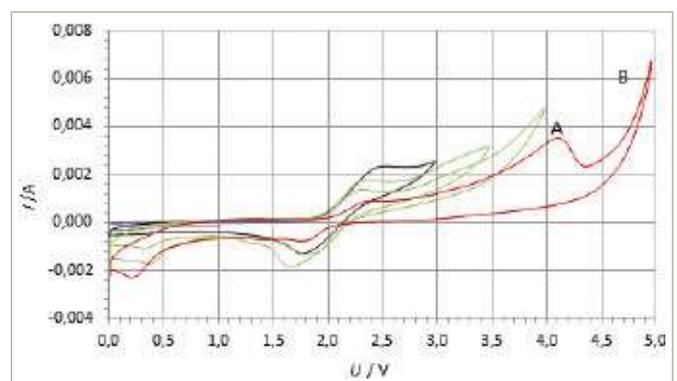


Abbildung 5: Cyclovoltogramme von Alkylammonium-Elektrolyt in Acetonitril an Goldelektroden unter wachsender Spannung (schwarz → grün → rot). A, B. Zersetzung; Elektrodenquerschnitt 6,25  $\text{cm}^2$ , Spannungsvorschub 100  $\text{mV s}^{-1}$ . Der Elektrolytwiderstand wurde korrigiert.

### Danksagung

Diese Arbeit entstand unter Mitwirkung von Franziska Eckert, B. Sc., Helmut Hartmann, B. Sc., Andreas Hildebrand, M. Eng., Dipl.-Phys. Christian Schell sowie den früheren Projektmitarbeitern Matthias Weiß, B. Eng., T. Lochner, B. Eng. und Sandra Schwindl, B. Eng.

---

## Literaturverzeichnis

- [1] P. Kurzweil, In: *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*, Elsevier, 2013, from: *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, 2009. Electrochemical Double-Layer Capacitors, S. 596–633; Carbon Materials, S. 634–648; Hybrid Capacitors, S. 658–664; Metal Oxides, S. 665–678; Polymer Capacitors, S. 679–684
- [2] P. Kurzweil, M. Chwistek, Electrochemical stability of organic electrolytes in supercapacitors: Spectroscopy and gas analysis of decomposition products. *Journal of Power Sources* 176 (2008) 555–567.
- [3] P. Kurzweil, H.-J. Fischle, A new monitoring method for electrochemical aggregates by impedance spectroscopy, *Journal of Power Sources* 127 (2004) 331–340.
- [4] S. Trasatti, P. Kurzweil, Electrochemical supercapacitors as versatile energy stores, *Platinum Metals Review* 38 (1994) 46–56.

## Kontakt:



**Prof. Dr. Peter Kurzweil**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Labor für Elektrochemie  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

p.kurzweil@oth-aw.de

## Zusammenfassung

Aus der rasant wachsenden Menge digitaler Bilder ergibt sich die große Herausforderung, diese Bilddaten effizient zu nutzen. Der Artikel gibt eine Übersicht über grundlegende Verfahren und entwickelte Applikationen zum automatischen Bildverstehen. Der Entwicklungsstand zeigt den deutlichen Trend, dass in der näheren Zukunft viele neue Technologien und Applikationen zur effizienten inhaltsbezogenen Bildauswertung zur Verfügung stehen werden. Die damit aus den Bilddaten extrahierten Informationen können mittels Datenfusion mit anderen verfügbaren Daten verknüpft werden. Damit werden Bilddaten zu einem integralen Bestandteil des „Big Data“.

## Summary

A great challenge arises from the rapidly growing amount of digital images to use these image data more efficiently. The article gives an overview of important approaches and developed applications for automatic image understanding. The state-of-the-art shows the clear trend that in the near future many new technologies and applications will be available for efficient content-based image interpretation. An extraction of relevant image content will be possible for almost every purpose of application. The information extracted from the image data can be connected with other available data by means of data fusion. Therefore image data becomes an integral component of „Big Data“.

## 1 Einführung

Das Gebiet Computer Vision befasst sich mit der automatischen Verarbeitung visueller Informationen. Die Aufgabe besteht darin, dem Computer beizubringen, Bilder zu verstehen – im Idealfall vergleichbar mit dem menschlichen Sehvermögen. Der amerikanische Wissenschaftler von Neumann entwickelte vor ca. 70 Jahren die Rechnerarchitektur, auf deren Basis bis heute Rechner gebaut werden. Zeitnah erarbeitete er erste Ideen und Konzepte für die Verarbeitung von Bildern mit Rechnern. Mit den ersten Geräten zur Bilddigitalisierung wurde es möglich, Bilder im Rechner darzustellen, zu speichern, auszuwerten und auszugeben. Die ersten Verfahrensentwicklungen ermöglichten die Realisierung von Anwendungen im Bereich der Raumfahrt, der Satellitenbildauswertung, in der Medizin, im Bankenbereich und in der Automobilindustrie.

Bis in die 90er-Jahre entstanden viele industrielle Anwendungen für scharf definierte Rahmenbedingungen. Aufgrund der teuren Technologien waren diese Systeme noch wenig verbreitet. Mit der Verfügbarkeit und der wachsenden Verbreitung des Internets und der rasanten Entwicklung digitaler Technologien hat sich das Gebiet der Computer Vision entscheidend verändert. Insbesondere stetig wachsende Bildsammlungen stellen neue Anforderungen, diese Bilddaten effizient zu verarbeiten. Umfassten bis in die 90er-Jahre einzelne Bildsammlungen maximal Millionen Aufnahmen, so entstanden ab 2000 die ersten Bildplattformen im Umfang von Milliarden Bildern. Mit dem heutigen Entwicklungsstand der Bildaufnahme ist die Verfügbarkeit von digitalen Bildern jedes Raums und jeder Zeit enorm gestiegen. In der näheren Zukunft wird die Zahl verfügbarer Bilder bis in den Zetabyte-Bereich ( $10^{21}$ ) steigen.

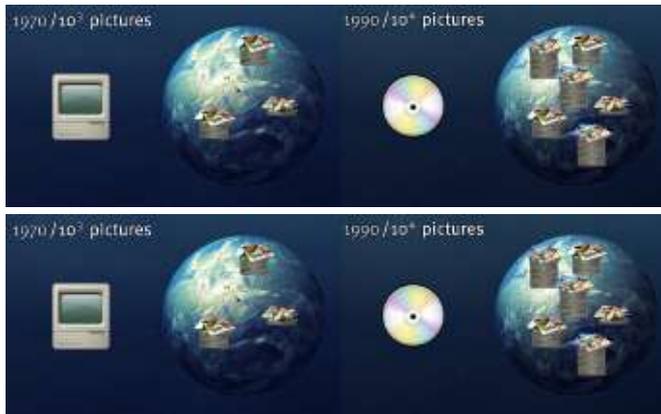


Abbildung 1: Bilddaten in Zahlen (1970, 1990, 2010, 2030)

## Wie ist der Nutzen von dieser massenhaften visuellen Information heute?

### 2 Verfügbarkeit und Nutzen von Bildern

Optische Sensoren können als Sehsinne der IT betrachtet werden. Ihr Einsatz ermöglicht eine höhere Genauigkeit bei der Szenenbeobachtung und -auswertung. Jede Bildaufnahme dokumentiert zunächst die aufgenommene Situation. Die massenhafte Verfügbarkeit digitaler Kameras ermöglicht eine KOLLEKTIVE, umfassende und massenhafte Dokumentation von beliebigen Situationen in Raum und Zeit. Durch die fortschreitende Miniaturisierung und Energie-Effizienz erweitert sich rasant das Spektrum von kamerabasierten Anwendungen nicht nur im Industriebereich, sondern in allen Lebensbereichen. Digitale Bilddaten werden mithilfe von stationären, mobilen, miniaturisierten und 3-D-Kameras erfasst.

Bilder beinhalten ca. 90 % der unseren Sinnen zugänglichen Information, jedoch wird diese Information heute noch überwiegend manuell verarbeitet. Aus diesem Grund spielt die algorithmische Inhaltsgewinnung aus einem Bild eine essenzielle Rolle, weil sich dadurch einerseits der Informationsnutzen und damit der Informationswert erhöht und andererseits eine rasante Reduktion der gespeicherten Daten erzielt werden kann. Jedoch stellt die algorithmische Auswertung verschiedenster Bilddaten nach wie vor eine große Herausforderung dar.

Betrachten wir die Satellitendatenauswertung als das älteste Gebiet im Bereich Computer Vision. Die Bildgewinnung mittels eines Satellitensystems ist eine enorme technische und finanzielle Herausforderung. Der Empfang, die Speicherung und die Pflege von Rohdaten sind sehr aufwendig, ermöglichen aber den Zugang zu Bilddaten beinahe von jedem Ort der Erdoberfläche und zu jeder Jahreszeit. Die bereits gespeicherten Rohdaten der Erdoberfläche sind von großer wirtschaftlicher Relevanz und werden als Informationsrohstoff gehandelt.

Dieser visuelle Informationsrohstoff ist entscheidend für das Monitoring (Beobachtung) der Erdoberfläche unter

klimatischen, vegetativen, historischen, ökonomischen, politischen, militärischen und ästhetischen Aspekten.

Der Nutzen von Satellitenbilddaten wird heute auch schon von kleinen Unternehmen oder Behörden gesehen und erfolgreich für Problemlösungen und Entscheidungsfindungen eingesetzt.

Im DLR-Zentrum Neustrelitz werden permanent Satellitenbilder empfangen und gespeichert, das Bildvolumen liegt im Petabytebereich –  $10^{15}$  Byte. Jedoch erfolgt nur für einen sehr kleinen Teil dieser Aufnahmen eine zeitnahe Auswertung.

Die Ursache liegt darin, dass die Extraktion von wertvollen inhaltlichen Nutzdaten sehr zeitintensiv ist und noch eine umfangreiche personen- und damit kostenintensive Aufbereitung und Auswertung erfordert.

Aus den gleichen Gründen wird auch das schnell wachsende Volumen von Bilddaten, das von Minidrohnen, mobilen Robotern, stationären und sich bewegenden Überwachungskameras aufgenommen und gespeichert wird, nur marginal ausgewertet.

**Damit besteht eine deutliche Diskrepanz zwischen dem verfügbaren Datenvolumen und dem Umfang der inhaltlichen Verwertung dieser Daten.**

Was und wie kann der **Inhalt** eines Bildes automatisch extrahiert werden?

### 3 Methoden des automatischen Bildverstehens

Die automatische computerbasierte Extraktion von Bildinhalten simuliert den komplexen und bis heute nicht ganz verstandenen Prozess des menschlichen Bildverstehens. Die Entwickler der Bildauswerteverfahren können nur ein bestimmtes Spektrum von Wahrnehmungsaspekten modellieren und programmtechnisch realisieren. An der Entwicklung dieser Verfahren sind heute Neurologen, Psychologen, Mathematiker und Ingenieure beteiligt.

Die grundlegenden Schwierigkeiten liegen in folgenden wichtigen Aspekten:

- 1) Die Bilder als optische Messdaten sind verrauscht.
- 2) Kameras liefern nur eine Pixelstruktur, ohne inhaltlichen Bezug zur aufgenommenen Szene.
- 3) Jedes digitale Bild einer mit der Kamera erfassten Situation besitzt eine strukturelle, beinahe unendliche Vielfalt.

Eine und dieselbe Szene kann mit unterschiedlichen Qualitätsmerkmalen bzgl. der Ausleuchtung, der räumlichen Anordnung und des Rauschpegels aufgenommen werden. Kontrollierte Qualitätsmerkmale kommen nur in speziell entworfenen industriellen Systemen vor, in denen die Objekte, die Gesamtszenen, die Kameras und

Aufnahmebedingungen streng definiert sind. Die Erkennungsalgorithmen basieren auf der statistischen Auswertung von Merkmalsverteilungen und der Klassifikation auf Basis von a priori angelernten Mustermerkmalen. Für die Risikominimierung und eine Erkennungssicherheit bei 99 % sind alle Systemparameter fest definiert. Zu den typischen visuellen Bildmerkmalen gehören radiometrische Merkmale wie Histogramme von Helligkeits- oder Farbwerten, Gradientenwerte, lokale spezifische Merkmale und geometrische Merkmale.

Eine der fundamentalen Aufgaben in der Computer Vision ist die Detektion von Objekten: a priori bekannten oder unbekannt, stationären oder bewegten.

Bei a priori bekannten Objekten kann ihre Beschreibung anhand charakteristischer, invarianter und für die Mehrheit aller Objekte bedeutender Merkmale erstellt werden und darauf ein geeigneter Klassifikator angepasst werden. Die Erkennungsmethoden liefern unter den scharf definierten Bedingungen gute Ergebnisse. Die Klassifikation beruht meistens auf Entscheidungsbäumen, die in der Regel manuell erstellt werden. Es werden verschiedene Kombinationen von Merkmalen auf Basis von verfügbaren Trainingsdaten analysiert und ausgewählt, Entscheidungsbäume aufgestellt und die Toleranzwerte fest definiert. Für die Lösung von komplexeren Aufgaben mit großer Variabilität und Vielfalt der Aufnahmebedingungen, Beleuchtungssituationen und Objektorientierungen liefern diese Verfahren erheblich schlechtere Erkennungsergebnisse.

Die grundlegende Ursache liegt in der begrenzten Menge von Trainingsdaten und Kombinationsvariationen sowie an fest definierten Toleranzwerten. Insbesondere zeigen derartige Methoden bei der Gesichtsdetektion ihre Grenzen.

Das 2001 entwickelte Viola-Jones-Verfahren [1] zur Gesichtsdetektion ermöglichte dagegen eine robuste und schnelle Detektion von Gesichtern. Das Verfahren basiert auf einem größeren Volumen an Trainingsdaten von positiven und negativen Objektbeispielen. Bei einem Volumen von mehreren Tausend (10<sup>4</sup>) von Objektvorkommnissen dauert die Trainingsphase bis zu 100 Stunden, die Erkennungsphase dagegen verläuft im Realzeit-Modus. Das Verfahren fand eine lawinenartige Verbreitung und löste neue Entwicklungen aus.

In der Abb. 2 sind die Erkennungsergebnisse von vorausfahrenden Fahrzeugen in einer Verkehrssituation dargestellt. ([2], [3])

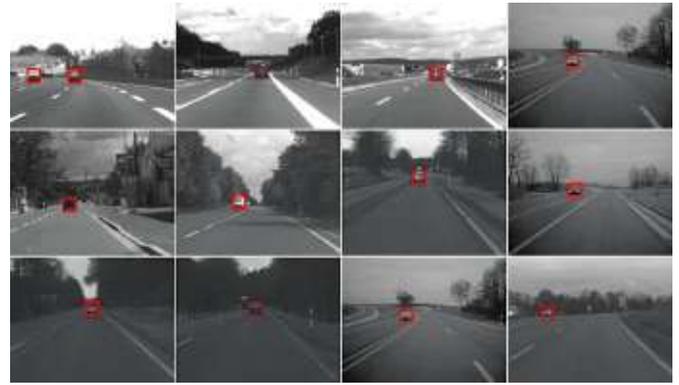


Abbildung 2: Detektion von Fahrzeugen

Ein anderer Ansatz zur Detektion von bewegten Objekten beruht auf der Tatsache, dass die Objekte und die Szene a priori nicht bekannt sind. Damit stehen keine umfangreichen a priori Trainingsdaten zur Verfügung. Mit einer bewegten Überwachungskamera, z. B. montiert auf einem bewegten Roboter oder einer Minidrohne, werden Outdoor-Szenen aufgenommen. Bei der Auswertung von derartigen Bewegtbildern besteht die Aufgabe darin, die bewegten Objekte effizient und im Realzeit-Modus vom Hintergrund für eine weitergehende Analyse zu trennen.

In Abb. 3 ist das Ergebnis einer automatischen Verfolgung eines bewegten Objektes in einer Outdoor-Szene, aufgenommen mit einer Mikrokokterkamera.

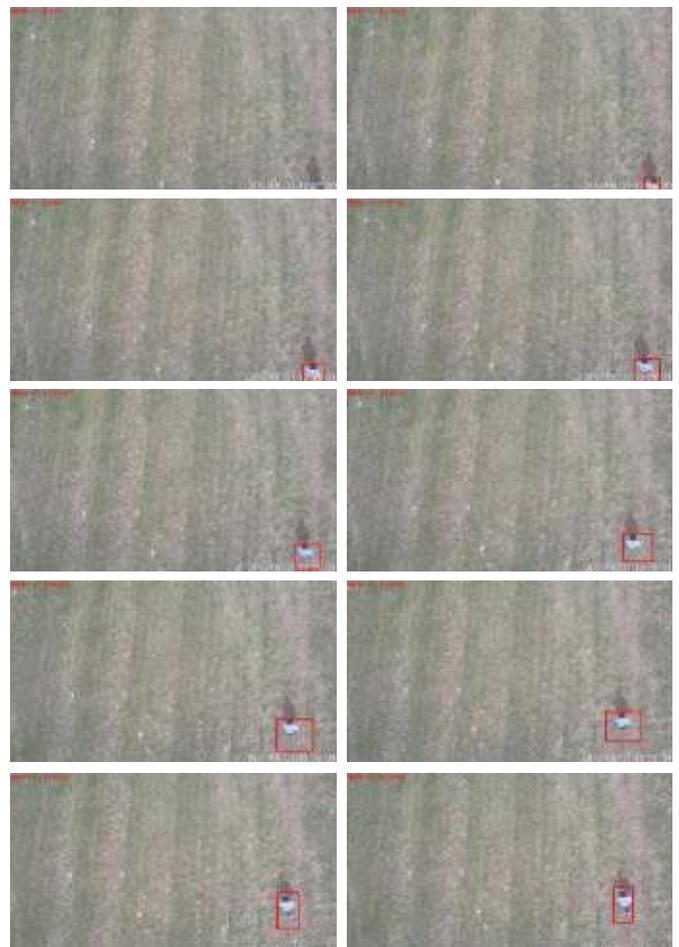


Abbildung 3: Verfolgung eines bewegten Objektes

Die Bewegungsdetektion nutzt einen Vorhersagefilter. Der 1961 von Rudolf Kálmán entwickelte Filter wird verbreitet für die Detektion von bewegten Objekten eingesetzt, ohne Unterscheidung, ob sich die Kamera oder ein Objekt bewegt. Das Verfahren basiert auf einem sukzessiv adaptierbaren Hintergrundmodell und ermöglicht damit die Trennung von bewegten Objekten vom Hintergrund [4]. Das System adaptiert sich auf der Grundlage des Feedbacks.

Die automatisch erstellten Bewegungsprotokolle können vielfältig genutzt werden: zur Verfolgung von bewegten Objekten, zur Bereinigung der Szenen von irrelevanten Bewegungen von Menschen, Fahrzeugen, z. B. bei Google Street View, zur Überwachung oder Beobachtung von Menschenmengen etc.

Eine interessante Herangehensweise bei den Erkennungsaufgaben besteht darin, auf Basis von gesammelten Trainingsdaten einen Erkennungsmechanismus automatisch – ohne manuelle Modellierung von Merkmalen – zu generieren. Als Beispiele dienten lange Zeit die neuronalen Netze. Aufgrund der Erkenntnisse, dass existierende neuronale Netze nur bestimmte einfache Funktionen approximieren und keine beliebig komplexe Aufgabenstellungen lösen können, ist in den letzten Jahren der Einsatz von neuronalen Netzen zurückgegangen. Dafür wurden seit 2000 neue interessante Methoden entwickelt.

#### 4 Biometrische Bildauswertung

Die Entwicklung von Algorithmen zur Bildauswertung wurde in den letzten 20 Jahren durch die Verfügbarkeit großer Bilddatenmengen stark geprägt. Dabei entstand eine Wechselwirkung zwischen großen Bilddatenvolumen und Algorithmenentwicklung. Einerseits erfordern die riesigen Bilddatenmengen neue effiziente und robuste Verfahren und andererseits bietet diese Bilddatenmenge eine ausreichende empirische Plattform als Trainingsdaten für die Algorithmenentwicklung.

Computer Vision ist eng verbunden mit Methoden des Machine Learning und der künstlichen Intelligenz und erlebt z. Zt. eine rasante Entwicklung. Dabei ist der folgende Trend zu erkennen: Die Steigerung des Erkennungsgrades ist mit einer Abschwächung der Anforderungen an die Genauigkeit der Datenverarbeitung verbunden.

Betrachten wir einige biometrische Anwendungen. Unter dem Begriff Biometrie versteht man, vereinfacht gesagt, das automatische Erkennen von Personen anhand körperlicher Merkmale.

#### Augenbewegungen

Das menschliche Sehen ist dadurch gekennzeichnet, dass wir nur kleine Fragmente der Szene fokussiert sehen und durch die schnellen Augenbewegungen nur bestimmte (erfahrungsgemäß) relevante Details erfassen, der Rest der Szene wird „unscharf“ wahrgenommen. Dabei hängen die Augenbewegungen von dem Ziel – was soll eigentlich gesehen werden – ab und aufgrund der Konzentration werden nur die nötigsten Details erfasst. Es ist oft sehr wichtig zu ermitteln, was, wann und wie lange der Betrachter in einer Szene beobachtet.

Ein System zum automatischen Iris-Tracking ermöglicht eine genaue und verlässliche Verfolgung von Augenbewegungen. Dafür werden spezielle Hochgeschwindigkeitskameras mit 200 fps eingesetzt und aus den Bildfolgen werden subtile Iris-Bewegungen genau erkannt und protokolliert. Die Angaben „Wann, was und wie lange“ schaut diese Person bestimmte Details der Szene an, werden zeitgenau ermittelt. Damit können folgende beispielhafte Applikationen abgeleitet werden:

- 1) Im Medizinbereich: Ein erfahrener Radiologe betrachtet eine Röntgenaufnahme auf eine bestimmte Art. Aus dem gewonnenen Protokoll kann exakt ermittelt werden, in welcher Reihenfolge und wie lange die Details angesehen wurden. Diese Kenntnisse können für die angehenden Mediziner sehr hilfreich sein.
- 2) In der Werbung: Ein Zuschauer schaut ein Poster oder eine Werbung an. Aus dem Trackingprotokoll können wertvolle Informationen zur Wirksamkeit der Werbung abgeleitet werden.
- 3) Im Pkw können aufgrund der Augenbewegungen die vorausschauenden Absichten des Fahrers abgeleitet werden. Z. B. kann bei plötzlichen schnellen horizontalen Bewegungen der Augen (links – rechts) mit einer gewissen Sicherheit abgeleitet werden, dass der Fahrer einen Spurwechsel vornehmen will. Damit können automatisch bestimmte Pkw-Einstellungen (z. B. Geschwindigkeit) angepasst werden. Bei einem starren Blick oder bei kurzzeitigem Augenschließen kann eine Warnung wegen Konzentrationsverlust oder Ermüdung ausgelöst werden.

Chronologisch gesehen wurde die Thematik zur Erkennung von Gesichtern mittels Computer Vision in den 70er-Jahren von dem amerikanischen Psychologen Paul Ekman ausgelöst. Ekman hat eine umfangreiche Untersuchung zu menschlichen Mimiken durchgeführt, eine Systematik und dazu eine Kodierung von Mimiken entwickelt [5]. Diese Kodierung basiert auf der Kombination von kleinen fragmentarischen Muskelbewegungen der einzelnen Gesichtspartien. Die Entwicklung war bahnbrechend und löste eine vielfältige Algorithmenentwicklung für die Mimikererkennung aus. Neben den prototypischen Gesichtsausdrücken, wie Freude, Ekel, Zorn etc. war es möglich, auch subtile, sog. Mikromimiken zu erkennen und zu erforschen. Damit wurde ein Werkzeug für die

Psychologen entwickelt, mit dem aus den zeit- und datenintensiven Videoaufzeichnungen von Probanden eine inhaltsbezogene, d. h. auf dem emotionalen Zustand beruhende Protokollierung oder Dokumentation erstellt werden konnte.

### Gesichtsdetektion

Der Mensch fixiert sofort Gesichter, weiß aber nicht genau, wie er diese Aufgabe mithilfe seines Sehvermögens löst. Beispielsweise kann der Mensch ohne Probleme seine Bekannten in beliebigen Fotos finden. Die Gesichtserkennung bei Menschen wird durch einen speziellen Teil des Gehirns gewährleistet. 1992 beschrieb Justyna Sergent das spezielle Gehirnsegment Fusiform Face Area (FFA) und 1997 wurde es von Nancy Kanwisher [6] eingehend untersucht. Sie beschreibt es als einen besonderen Gehirnteil, der die schnellere Erkennung von Gesichtern (und Körperteilen) als anderen Objekten durchführt. Die Schnelligkeit der Erkennungsfunktion ist dadurch bedingt, dass sie ohne Einsatz der interpretierenden Kanäle arbeitet.

Bei der biometrischen Bildauswertung wird versucht dem Computer beizubringen, automatisch Gesichter im Bild zu finden, die abgebildete Person und/oder die Emotion oder Mimik zu erkennen. Die Aufgabe ist bis heute nicht vollständig gelöst.

In den letzten 20 Jahren wurden viele Methoden zur Gesichtserkennung entwickelt. Leider ist ein Vergleich der Erkennungsqualität dieser Methoden nur bedingt möglich. Eine von vielen Ursachen liegt darin, dass die Ergebnisse der Untersuchungen nur auf den von dem Entwickler oder Erfinder geschaffenen Testdaten beruhen. Die Durchführung von seriösen und verlässlichen vergleichenden Testexperimenten erfordert eine sehr zeitintensive Programmierarbeit, die Generierung von universellen Referenztestdaten, die Anpassung von verschiedenen Algorithmen an einen vergleichbaren gemeinsam für alle Verfahren gültigen Kriterienkatalog. Die bisherigen wissenschaftlichen Publikationen basieren bzgl. der Erkennungsqualität überwiegend auf den Aussagen der Autoren.

2001 wurde eine Methode von Viola und Jones [1] publiziert, die bis jetzt als eine grundlegende Methode zur Objektsuche in Echtzeit gilt. Aufgrund variierender Aufnahmebedingungen erscheinen einzelne Objekte in unterschiedlichen Größen, Orientierung u. Ä. Die Methode basiert auf der Suche nach lokalen Objektmerkmalen mithilfe eines gleitenden Fensters (Scanning Window). Der Suchprozess besitzt ein Skalenverhalten, basierend auf einer variierenden Fenstergröße, Orientierung und Maskentopologie. Bei einer Fenstergröße (z. B. 24\*24 Maßeinheiten) werden ca. 200.000 Merkmale berechnet und analysiert. Die Methode ist bis jetzt hinsichtlich der Relation Erkennungsgenauigkeit/

Erkennungsgeschwindigkeit unübertroffen, zudem besitzt sie eine niedrige Wahrscheinlichkeit falscher Detektion von Objekten. Aufgrund der charakteristischen Merkmale besitzt die Methode eine wesentliche Einschränkung: Wenn die Objekte in der Szene zu stark verdreht sind (z. B.  $> 30^\circ$ ), werden sie nicht detektiert.

Die zahlreichen wissenschaftlichen Publikationen zur Erweiterung (Verbesserung) dieser Methode sowie die kommerzielle Applikationen, u. a. in Kameras integrierte Mimikererkennung, bestätigen den weiten Verbreitungsgrad dieser Methode. Die Detektionsgeschwindigkeit und die -rate von frontalen Gesichtern ist sehr hoch und ist für die Anwendungen in Bildsequenzen gut geeignet.

Zahlreiche Entwicklungen ermöglichen heute die Erkennung von Geschlecht, Alter, ethnischer Zugehörigkeit und Gesichtsausdruck oder Mimik.



Abbildung 4: Illustration der automatischen Gesichtsdetektion

### Mimikererkennung

Aufgrund des sich ändernden emotionalen Zustands einer Person werden seine Gesichtszüge durch die Muskelbewegungen geändert. Die Ekman'sche Kodierung von Mikroemotionen führte zu bahnbrechenden Entwicklungen von Algorithmen zur Mimikererkennung. Heute können Systeme sowohl die prototypischen Emotionen (Freude, Ekel, Zorn, etc.) automatisch erkennen [7] und mit MPEG-Standards visualisieren als auch die sehr subtilen Mimikbewegungen registrieren, die einen tieferen Einblick und Verständnis für ein bestimmtes Verhaltensmuster des Menschen ermöglichen. Dies führt u. a. zur Entwicklung von visuell basierten Lügendetektoren. Die Entwicklung der Algorithmen war u. a. aufgrund von massenhaften verfügbaren Bildern von Gesichtern im Internet so erfolgreich. Die Entwickler bedienen sich aus den Sammlungen von Facebook und anderen sozialen Netzen, schafften oft mit preiswerten Dienstleistungen die gesamten annotierten Gesichtssammlungen.

Diese und ähnliche Technologien ermöglichen zukünftig eine automatische Anpassung eines Mensch-Maschine-Interfaces in Abhängigkeit von Geschlecht und Alter des Nutzers. Oder Avatare und Roboter zu entwickeln, die Menschen verstehen und sie psychologisch komfortmäßig betreuen können.

## Gestikerkennung

Die automatische Verfolgung von Handbewegungen und die Erkennung der Gestik kann heute sehr gut mittels des Einsatzes von 3-D-Kameras durchgeführt werden. Damit können die Steuerung, Bedienung und Navigation von Geräten intuitiv einfach gestaltet werden. Eine neue Entwicklung für die Gestiksteuerung ist z. B. das portable optische Gerät LEAP, mit dem die Finger- und Handbewegungen erfasst und erkannt werden.



Abb.5 Beispiel der Bedienung eines virtuellen Geräts

## Gesichtserkennung

Die Methoden zur Gesichtserkennung sind heute bereits sehr ausgereift und werden in vielen Systemen und Plattformen eingesetzt. Die wichtigste Gesichtserkennungssoftware der NSA, das Tundra Freeze, kann Personen auch identifizieren, wenn sie sich die Kopfbehaarung abrasieren.

2014 erschien die Publikation zum Algorithmus „DeepFace“, entwickelt von Facebook [8]. Der Algorithmus vergleicht zwei unterschiedliche Bilder und bestimmt, ob die detektierten Gesichter dieselbe Person zeigen. Dabei ist der Algorithmus invariant gegenüber Ausleuchtung und Gesichtsposition. Er basiert auf dem Neuronale-Netze-Verfahren „Deep Learning“, das in großen Datenmengen bestimmte Muster zu erkennen ermöglicht. „DeepFace“ besteht aus neun Schichten von simulierten Neuronen, die über mehr als 120 Millionen Verbindungen miteinander vernetzt sind. Für das Antrainieren des NN wurden vier Millionen Gesichtsfotos von fast 4000 Menschen (überwiegend von Facebook-Nutzern) eingesetzt. Die Erkennungsqualität liegt bei 97,25 %, dies entspricht beinahe der menschlichen Leistung bei gleicher Aufgabe.

Der Erkennungsprozess verläuft in zwei Schritten:

1) Geometrische Korrektur: Unter Nutzung eines neutralen (durchschnittlichen) 3-D-Gesichtsmodells wird der Drehwinkel bestimmt und korrigiert, sodass die Person auf dem Bild genau nach vorne schaut. Damit wird die Rotations- und z. T. die Beleuchtungsinvarianz erreicht. Dabei wird auch das Herausrechnen

der Mimik durchgeführt. Dafür werden die Merkmale ausgewertet, die sich nicht durch Mimik ändern.

2) Das geometrisch korrigierte Bild wird über das Deep Learning klassifiziert.

Weitere Entwicklungen befassen sich mit der 3-D-Formerkennung eines menschlichen, unter der Bekleidung verdeckten Körpers für die genaue Ermittlung der Konsumgröße (Vermessung des Taillen-, Bauchumfangs etc.).

Bei dem heutigen dichten und verbreiteten Kameranetz beginnend vom Treppenhaus über Bahnhöfe, Busse und Geschäfte bis zu Straßen und Plätzen kann jede sich in der Stadt bewegende Person täglich optisch erfasst und ihre emotionalen Zustände zeit- und ortsrelevant dokumentiert werden.

In einem überschaubaren zeitlichen Horizont könnten Systeme für gläserne Bürger entwickelt werden, die für jede zu beobachtende Person ihr tägliches Verhalten und ihren emotionalen Zustand zu jedem Zeitpunkt erfassen und protokollieren.

## 5 Inhaltsbezogene Suche in großen Bildsammlungen

Im Internet existieren gewaltige globale und lokale Bildsammlungen auf diversen Plattformen. Die Anzahl der weltweit verfügbaren Bilder steigt täglich an. Z. B werden auf die Flickr-Plattform (Yahoo) ca. 5000 Uploads pro Minute durchgeführt. Die Plattform wird zzt. von bereits ca. 77 Millionen Personen genutzt. Sie wurde für das Ablegen, Speichern und Suchen von Bildern und kurzen Animationen konzipiert. 2007 wurden ca. 2 Milliarden Bilder ( $2 \cdot 10^9$ ) und 2011 bereits 6 Milliarden Bilder abgelegt. Seit 2014 bekommt jeder Nutzer bis zu 1 TB Speicherplatz zur freien Verfügung.

Diese massenhaft gespeicherten Daten machen das effiziente Finden von relevanten Bildern zu einem großen Problem. Eine einfache Suche nach vorgegebenen Keywords, Datum oder Namen ist nicht mehr ausreichend. Nur eine inhaltsbezogene Suche kann eine effiziente Nutzung ermöglichen.

**Aus dem heutigen Stand ergibt der Trend: Das Bilddaten-volumen steigt und die Suchqualität – gefundene Daten und Suchzeit – fällt.**

Als eine erste kommerzielle Lösung wurde 1995 QBIC von IBM entwickelt. Das System ermöglichte eine inhaltsbezogene Suche in einer Bilddatenbank, bestehend aus ca. 10.000 ( $10^4$ ) Bildern. Die Suche konnte anhand einfacher Merkmale, wie Konturen, Flächen, Farben u. Ä. durchgeführt werden [9, 10].

Eine Bildsuche wird generell nach dem Indexierungs-Prinzip aufgebaut, dabei kann der Nutzer nach

- 1) einem vorgegebenen Bild
- 2) einem ähnlichen Objekt
- 3) einer Szenenkonfiguration, d. h. einer räumlichen Objektanordnung
- 4) Inhalten (einem formellen Beschreibungsausdruck)
- 5) einer Klasse oder Kategorie suchen.

Je nach Art der Suchaktion wird eine Bildtransformation in eine kompaktere geeignete Beschreibung auf Basis von Merkmalen durchgeführt. Auf Basis der Bildbeschreibung wird ein Suchprozess gestartet, in dem die Bilder aus der Sammlung mit der vorgegebenen Bildbeschreibung verglichen werden. Dafür wird vorab die Bildsammlung indexiert, d. h. für jedes Bild wird a priori seine merkmalsbasierte Beschreibung erstellt. Der Vergleich erfolgt dann auf Basis eines effizienten Klassifikationsverfahrens.

Im Jahr 2007 wurde das Verfahren „Bag of Words“ veröffentlicht [11], das es ermöglicht, eine Bildbeschreibung in Form von kleinen einzelnen Fragmenten zu erstellen. Diese einzelnen Fragmente, genannt Visual Words, dienen als Bestandteile eines Bildes und können in anderen Bildern wie elementare Bestandteile erneut vorkommen. Visual Words können in Analogie als Worte in einer Sprache betrachtet werden, aus denen Sätze gebildet werden. Die Annotation mithilfe von Visual Words ermöglicht die Suche nach Objekten (z. B. ein Hund), nach Szenen (z. B. ein Innenraum) oder nach Kategorien (z. B. Abenddämmerung). Dabei kann die Erscheinungsform jedes Objektes, jeder Klasse oder jeder Kategorie in Abhängigkeit von Beleuchtung, Kamera und Szene sehr vielfältig sein.

Die entwickelten Methoden basieren auf ca. 200 Kategorien, max. bis 1000 Kategorien. Die Kategorisierung – Zuordnung der Bilder zu einer Kategorie – erfolgt noch manuell. Z. B. wurden einige große Bildsammlungen unter Mitwirkung der Nutzer markiert und kategorisiert.

Die Plattform **LabelMe** [12] bietet z. B. den Nutzern an, die Objekte in den Bildern mit Konturen zu markieren und sie zu benennen. Neben dieser Crowdsourcing-Plattform haben die Wissenschaftler eine Bilddatenbank mit 80 Millionen Miniaturbildern 32\*32 Pixel [13] gesammelt und einige einfache Experimente zur Bildsuche durchgeführt. Als Ergebnis der zahlreichen Experimente wurde festgestellt, dass diese große Menge der Trainingsdaten ausreichend ist, um mit einer einfachen Klassifikation auf Basis von primitiv segmentierten Gebieten gute Suchergebnisse zu erzielen.

## 6 Fazit

Die Entwicklung von neuartigen Verfahren des Computer Vision erfolgte in den letzten Jahren mit immer zunehmender Geschwindigkeit. Dieser Trend wurde von drei technologischen Entwicklungen getrieben:

- der preiswerten und umfassend verfügbaren Möglichkeit, Bilder in digitaler Form aufzunehmen und damit computerbasiert zu speichern,
- einer immer preiswerteren und größeren verfügbaren Rechenleistung und Speicherkapazität,
- der Verbreitung und weitgehend freien Verfügbarkeit riesiger Bildmengen über das Internet.

Es ist zu erwarten, dass in naher Zukunft ausreichend robuste Verfahren zur Objektsuche und Objekterkennung und damit zur Extraktion von relevanten Bildinhalten für nahezu alle Anwendungszwecke zur Verfügung stehen werden. Damit werden Bilddaten zu einem integralen Bestandteil der „Big Data“. Staatliche Einrichtungen und private Unternehmen erhalten damit die Möglichkeit, bei ausreichenden Rechen- und Speicherkapazitäten, die immensen in den Bildern enthaltenen Informationen zu sammeln und mit anderen Daten zu verknüpfen. Die Frage der näheren Zukunft wird nicht mehr sein, welche Informationen aus Bilddaten gewonnen werden können, sondern wer, in welchem Umfang und zu welchem Zweck Zugang zu diesen Informationen haben darf.

---

## Literaturverzeichnis

- [1] P. Viola, M. Jones: *Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features*, IEEE CVPR, 2001
- [2] R. Ach, N. Luth, A. Techmer: *Real-time Detection and Classification of Traffic Signs on a Multi-Core Processor*, itsc 2008, China
- [3] N. Luth, R. Ach: *Lane Departure Warning and Real-time Recognition of Traffic Signs*, AMAA 2009, Berlin
- [4] N. Luth: *Vision-Based Object Detection in mobile and static systems*, 2013, IT Conference
- [5] Ekman, P., Friesen, W.: *Manual for Facial Action Coding system*. Consulting Psychologists Press, Inc. Palo Alto, CA, 1978
- [6] Nancy Kanwisher et al: *The fusiform face area*. (1997), J Neurosci 17, 4302–4311
- [7] N. Luth: *Automated Tracking of Face Mimics*, DSV'2002, May 2002 Rostock, Springer
- [8] Y. Taigman, M. Yang und M. Ranzato, Lior Wolf: *DeepFace: Closing the Gap to Human-Level Performance in Face Verification*, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2014
- [9] M. Flickner, etl: *Query by image and video content: the QBIC system*. *IEEE Computer*, 28(9): 23–32, 1995.
- [10] N. Luth, A. Miene, P. Alshuth: *Syntactical and Semantical Description of Video Sequences*, in "Database Semantics", Kluwer Academic Publishers, 0-7923-8405-9, 8th ICDS, 1999, New Zealand
- [11] J. Philbin, O. Chum, M. Isard, J. Sivic, and A. Zisserman: *Object retrieval with large vocabularies and fast spatial matching*, CVPR, 2007
- [12] B. Russell, A. Torralba, K. Murphy, W. T. Freeman: *LabelMe: a database and webbased tool for image annotation*, IJCV, 2008
- [13] A. Torralba, R. Fergus and W. T. Freeman: *80 million tiny images: a large dataset for non-parametric object and scene recognition*

## Kontakt:



**Prof. Dr. Nailja Luth**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien  
und Informatik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

n.luth@oth-aw.de

## Hintergrund

Die Simulation von Fügeverfahren gewinnt heutzutage immer mehr an Bedeutung. Ziel ist ein besseres Prozessverständnis und die daraus resultierende Fähigkeit, Fehlerquellen bereits in der Konstruktions- und Fertigungsplanungsphase zu erkennen, mögliche Alternativen zu erarbeiten und sowohl den Fügevorgang als auch das Bauteil zu optimieren und somit zur Erhöhung der Qualität und Prozesssicherheit beizutragen.

Das Schweißen ist eine der wichtigsten nicht lösbaren Verbindungen metallischer Werkstoffe. Die Mehrzahl aller Schmelzschweißverfahren verwendet eine konzentrierte Energiequelle (z. B. Laserstrahl, Lichtbogen usw.), die zum lokalen Aufschmelzen der Fügekanten über das Werkstück bewegt wird. Das sich dabei ausbildende instationäre Temperaturfeld führt aufgrund der auftretenden plastischen Verformungen zur Ausbildung von Deformationen und Eigenspannungen, die auch nach vollständiger Abkühlung teilweise erhalten bleiben. Zusätzlich kommt es bei bestimmten Werkstoffgruppen durch eine derartige Wärmebehandlung (kurzzeitiges Aufheizen und schnelles Abkühlen) im Naht- und nahtnahen Bereich, der sogenannten Wärmeeinflusszone (WEZ), zu einer Änderung des Werkstoffgefüges.

Im Hinblick auf das Einrichten von Schweißprozessen und deren Optimierung zur Herstellung von fehlerfreien und verzugsarmen Schweißverbindungen kann die numerische Simulation mithilfe der Finiten-Elemente-Methode (FEM) aufwendige Versuche kostengünstig ersetzen. Als Hauptaufgabe ergibt sich die Berechnung der Schweißdeformation, der Gefügeausbildung und der Schweißspannungen.

## Background

Nowadays, the simulation of joining processes is constantly gaining in importance. The goal is to provide a better understanding of the processes and hence the ability to identify failures early during the design and production phase, and on the other hand, to develop viable alternatives to optimize both joining processes and components, thus contributing to an increase in quality and process safety.

Welding is one of the most important non-detachable metal-joining applications. The majority of fusion welding applications use a concentrated source of energy (e.g. laser beam, electric arc, etc.), which is moved over the workpiece to locally fuse the joint edges.

Due to the residual distortion resulting from this process, a transient temperature field is generated which leads to the development of residual stresses and deformations that partly remain even after the weld has completely cooled down. In addition, such a heat treatment (fast heating and cooling) causes a change of the material structure at the weld seam and the seam area (the so-called heat-affected zone) of some material groups.

With regard to the set-up of welding processes and their optimization to produce flawless and distortion-low weld joints, numerical simulation using the Finite Element Method (FEM) serves as an easy and cost-efficient method to replace costly and time-consuming tests. Its main task involves the calculation of welding deformations, weld structure and weld residual stress.

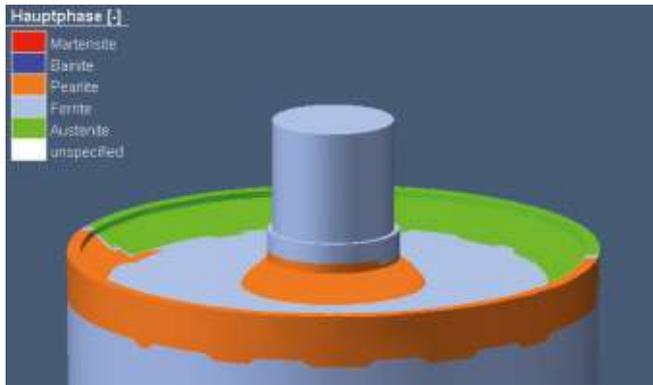


Bild 1: Gefügeausbildung während des Schweißprozesses

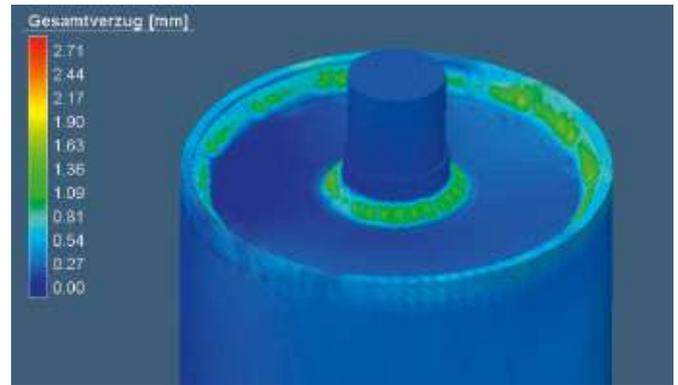


Bild 2: Darstellung des Gesamtverzuges nach Beendigung des Schweißvorganges

## Die Schweißsimulation

Die numerische Schweißsimulation stellt die Verknüpfung einer theoretischen Durchdringung der komplexen Vorgänge, die beim Schweißprozess auftreten, und einer Approximation der gekoppelten Vorgänge beim Schweißprozess mithilfe von numerischen Methoden zur Bestimmung von Temperatur, Gefüge, Eigenspannung und Verzug dar. Gegenüber einer experimentellen Untersuchung liegt ein wesentlicher und bedeutender Vorteil in der Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse.

Ziele der numerischen Schweißsimulation sind sehr breit ausgerichtet und bestehen darin, die Weiterentwicklung von Schweißverfahren, die Verbesserung von Konstruktionen, die Modifikation von Werkstoffen unabhängig von einem Anwendungsbereich zu unterstützen. Eine sinnvolle Strukturierung ergibt sich durch die Definition von drei Teilbereichen in der Schweißsimulation:

- Prozesssimulation,
- Struktursimulation,
- Werkstoffsimulation.

Eine Kopplung der Teilbereiche ist durch eine gegenseitige Abhängigkeit von verschiedenen Ein- und Ausgangsgrößen vorhanden. Die Prozesssimulation beschäftigt sich mit dem Schweißprozess und gestattet unter anderem Aussagen zu dessen Wirkungsgrad und Stabilität. Eine selbstkonsistente Modellierung des Prozesses ermöglicht beispielsweise eine realitätsnahe Bestimmung der Schmelzbadgeometrie und Schmelzbadströmung. Eigenspannungen in einer Konstruktion und der dazugehörige Verzug lassen sich in der Struktursimulation erfassen.

Daraus können die Festigkeit und Steifigkeit einer Konstruktion bestimmt werden, die sich nach einem Schweißprozess ergeben. Der Einfluss von Prozess und Werkstoff auf die Eigenspannungen sowie den Verzug ist vorhanden. Die Simulation des Werkstoffes ist wesentlich, um dessen Veränderungen infolge des Schweißprozesses zu beschreiben. Dazu zählt, insbesondere bei Stählen, die Modellierung der Gefügeumwandlung sowohl bei einlagigen als auch bei mehrlagigen Schweißnähten.

Für die numerische Schweißsimulation und insbesondere für die Berechnung von Eigenspannungen und Verzug werden die vorhandenen kommerziellen FE-Programme erweitert, um die Besonderheiten des Materials – beispielsweise Gefügeveränderungen, temperaturabhängige Werkstoffkennwerte und deren Auswirkung auf die untersuchten Größen – zu berücksichtigen.

In der wissenschaftlichen Literatur werden numerische Analysen unter Berücksichtigung der vielschichtigen Vorgänge beim Schweißen überwiegend an einfachen und kleinen Strukturen, z. B. Stumpf-, Kreuz- und T-Stoß, aufgeführt. Untersuchungen zu Einflüssen und Effekten, die sich aus einer komplexen Bauteilgeometrie ergeben, sind nur exemplarisch vorhanden.

Bei der Ausbildung des Eigenspannungszustandes sind die Umlagerungsvorgänge bei mehrlagigen Schweißnähten und Einflüsse aus der Spanntechnik von großer Bedeutung. Generell ist festzustellen, dass die Analyseergebnisse sehr stark von den verfügbaren Werkstoffkennwerten abhängen. Bei der mechanischen Simulation sind es der Wärmeausdehnungskoeffizient, der Elastizitätsmodul, die Querkontraktionszahl und die Festigkeitskennwerte, wie z. B. die Streckgrenze. Weiterhin ist das Werkstoffgesetz, das den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung beschreibt, ein wesentlicher Einflussfaktor.

Die Übersicht zu dem verfügbaren Wissen zeigt auf, dass eine Analyse des Gefüge- und Eigenspannungszustandes unter Berücksichtigung von Einflüssen, die beim Schweißprozess auftreten, möglich ist. Die numerischen Verfahren

sind geeignet auch Lösungen für komplexe und nichtlineare Vorgänge zu liefern. Für den Bereich der Schweißsimulation sind hier die Energieeinkopplung durch Lichtbogen oder Laserstrahl, die Temperaturverteilung und Strömungsvorgänge im Schmelzbad, die Temperaturverteilung im Werkstück, die Gefügeumwandlung beim Aufheiz- und Abkühlprozess sowie die Entstehung von Eigenspannung und Verzug zu nennen. Eine wesentliche Voraussetzung ist die Kenntnis der Temperaturabhängigkeit der Werkstoffkennwerte – wie bereits vorher erwähnt. Dadurch werden sowohl das Temperaturfeld während des Schweißens als auch der Eigenspannungszustand in einer Konstruktion nach dem Schweißprozess beeinflusst. Die nichtlineare Abhängigkeit der zu untersuchenden Größen – Eigenspannung, Verzug – von der Temperatur führt zur Anwendung von numerischen Methoden, um eine Lösung zu erhalten.

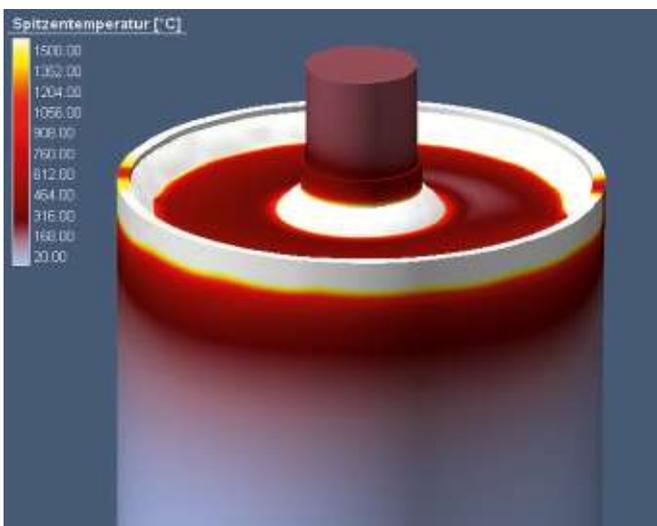


Bild 3: Temperaturverteilung während des Schweißvorganges

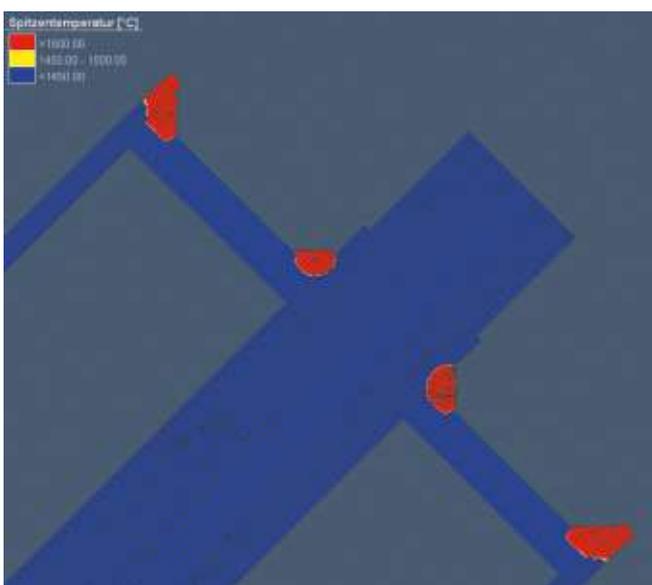


Bild 4: Schweißeinbrand und Temperatur im Schnittbild

Trotz der Vielzahl von Untersuchungen zur Simulation, die die Aktualität und die Bedeutung der Problematik verdeutlichen, ergeben sich insbesondere bei der Anwendung der numerischen Simulation an neuen Werkstoffen und bei neuen Fügetechnologien Fragestellungen, die für eine Weiterentwicklung sowohl in der numerischen Analyse als auch im praktischen Einsatz zu beantworten sind. Dies liegt nicht zuletzt an der Vielfalt der möglichen Kombinationen aus Werkstoffen – Stahl, Aluminium, Magnesium – und Schweißverfahren – MAG, WIG, Laser – und dem hinsichtlich der numerischen Simulation vorhandenen Kenntnisstand.

### Ergebnis

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass aus industrieller Sicht die Berechnung der Temperatur als unproblematisch angesehen wird. Das Hauptproblemfeld stellt vielmehr die Berechnung von Eigenspannungen und des Verzuges von komplexen Schweißkonstruktionen dar.

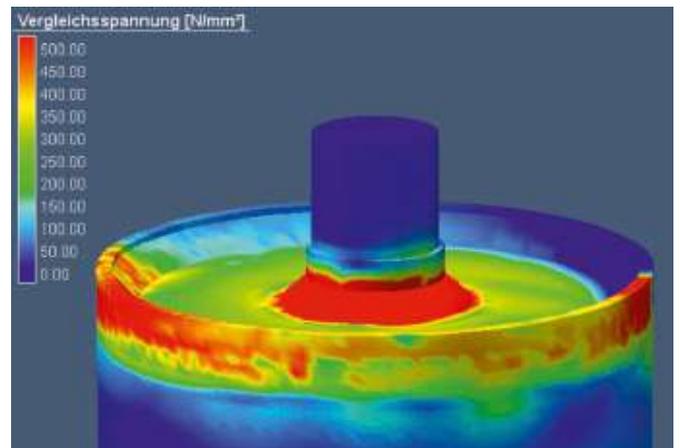


Bild 5: Darstellung der Vergleichsspannungen nach dem Schweißvorgang

Auch beim Einsatz modernster Hard- und Software sowie Strategien zur Modellbildung entsteht im Allgemeinen ein hoher Aufwand an Rechenzeit und Speicherplatz pro Modell. Hierbei sind Rechenzeiten über mehrere Tage und eine Speicherplatzbelegung im zwei- bis dreistelligen Gigabytebereich keine Ausnahme.

**Kontakt:**



**Prof. Dr. Franz Magerl**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen  
Dekan  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

[f.magerl@oth-aw.de](mailto:f.magerl@oth-aw.de)



**Reinhold Hartwich, B.Eng.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen  
Laboringenieur  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

[r.hartwich@oth-aw.de](mailto:r.hartwich@oth-aw.de)

# Reibungsverhalten von Kunststoffen bei unterschiedlichen tribologischen Kontakt- bedingungen

## Zusammenfassung

Für die Entwicklung medizintechnischer Produktanwendungen wurde das Reibungsverhalten von ausgewählten Polymer-Polymer-Kombinationen anhand eines Kugel-Platte-Prüfstandes unter den Bedingungen der Festkörperreibung untersucht. Betrachtet wurde im Schwerpunkt das tribologische Verhalten selbstschmierender Kunststoffsysteme und der Einfluss relevanter Größen wie z. B. der Normalkraft, der Gleitgeschwindigkeit sowie der Gleitmittelart und des Füllstofforts. Die Ergebnisse zeigten, dass die Reibungseigenschaften bei der Kombination gleicher Werkstoffe durch die Zugabe von Gleitadditiven deutlich verbessert werden können, insbesondere wenn der Kontaktpartner mit der größeren Lauffläche gleitmodifiziert ist. Silikonbasierte Systeme zeichneten sich durch besonders niedrige Gleitreibungswerte aus. Gleitmodifizierte Kunststoffe neigten zu fallenden Reibkoeffizienten bei steigender Gleitgeschwindigkeit. Unmodifizierte Systeme hingegen tendieren auf einen Anstieg der Reibungszahlen bei steigender Geschwindigkeit, insbesondere bei der Paarung gleicher Werkstoffe. In der Tendenz zeigen die meisten der untersuchten Materialpaarungen sinkende Reibungszahlen mit steigender Normalkraft.

## Abstract

For the development of medical devices studies were performed on the friction behaviour of polymer-on-polymer combinations under condition of dry sliding by using a pin-on-plate tribometer. The main focus was on the tribological properties of self-lubricated polymer systems and the effect of influencing factors such as loading and sliding velocity as well as lubricant nature and filler position. The results indicated that friction characteristics in case of the sliding combination of identical materials could be greatly improved by internal lubrication, in particular when the sliding component with greater contact surface is modified. Silicone-based systems showed an excellent performance to notably low coefficients of friction. Lubricated polymers tend towards decreasing coefficients of friction at increasing sliding velocities. In contrast, unmodified systems show increasing friction factors with increasing velocities, particularly in case of the pairing of identical materials. Most of the investigated material combinations tend towards falling friction values in case of increasing normal forces.

Key Words: Friction, Polymer, Stick Slip, dry sliding, solid lubricants, adhesion.

## 1 Einführung

Funktionsrelevante Baugruppen aus teilweise unterschiedlichen Werkstoffkombinationen unterliegen komplexen Belastungskollektiven. Dabei können in den Kontaktstellen durch den Reibungseinfluss eine Verschlechterung der Funktionsfähigkeit oder sogar ein vorzeitiger Ausfall auftreten. Vor diesem Hintergrund spielen Fragestellungen zum Reibungsverhalten von Werkstoffen bereits bei der Materialauswahl und der Entwicklung von Produkten eine wichtige Rolle.

Polymere und selbstschmierende Kunststoffsysteme finden einen weitverbreiteten Einsatz als Komponenten in der Kontaktkombination Kunststoff auf Kunststoff, wenn niedrige Reibungsverluste angestrebt werden und eine externe Zuführung von Gleitmitteln nicht möglich ist. Trotz der stetig zunehmenden wissenschaftlichen Basis zu tribologischen Fragestellungen können vorhandene Versuchsergebnisse in den meisten Fällen nicht für den Materialauswahlprozess in der Produktentwicklung herangezogen werden, da das tribologische Verhalten von Werkstoffen nicht im Sinne eines Werkstoffkennwertes

beschrieben werden kann. Vielmehr handelt es sich um systemgebundene Größen, die von einer Vielzahl von Parametern abhängig sind [ERH-08, KÜN-05, WOY-10].

In Zusammenarbeit mit dem Industriepartner Gerresheimer Regensburg GmbH, der auf die Herstellung medizinischer Kunststoffsysteme spezialisiert ist, untersucht die Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden das Reibungsverhalten unterschiedlicher Kunststoffkombinationen in Verbindung mit konkreten Produktanwendungen. Anhand eines exemplarisch ausgewählten Beispiels werden im Folgenden Ergebnisse dieser Forschungsarbeiten punktuell vorgestellt.

## 2 Ausgangssituation

Das folgende Fallbeispiel (Abb. 1) zeigt die exemplarisch ausgewählte Baugruppe eines Medizinproduktes, das für Diabetespatienten entwickelt wurde. Das Bauteil A dient als Druckknopf und wird unmittelbar vom Patienten betätigt. Bauteil B ist Bestandteil einer Baugruppe, die in einem Gehäuse integriert ist. Über den Punkt C treten die beiden Bauteile A und B in Kontakt, sobald der Patient den Druckknopf betätigt. Diese Kontaktstelle muss, je nach Einsatzdauer des Produkts, bis zu einige tausend Betätigungszyklen standhalten. Ein vorzeitiger Verschleiß oder zu hohe Reibwerte an dieser Stelle können zu einer merklichen Verschlechterung der Produktperformance führen. Am aktuellen Produktbeispiel bestehen die Bauteile A und B aus demselben thermoplastischen Kunststoff, wobei eines der Bauteile als Compound mit den Gleitadditiven Polytetrafluorethylen (PTFE) und Silikon umgesetzt ist. Der Füllstoffgehalt des PTFE beträgt ca. 18 % und der des Silikons ca. 2 %.

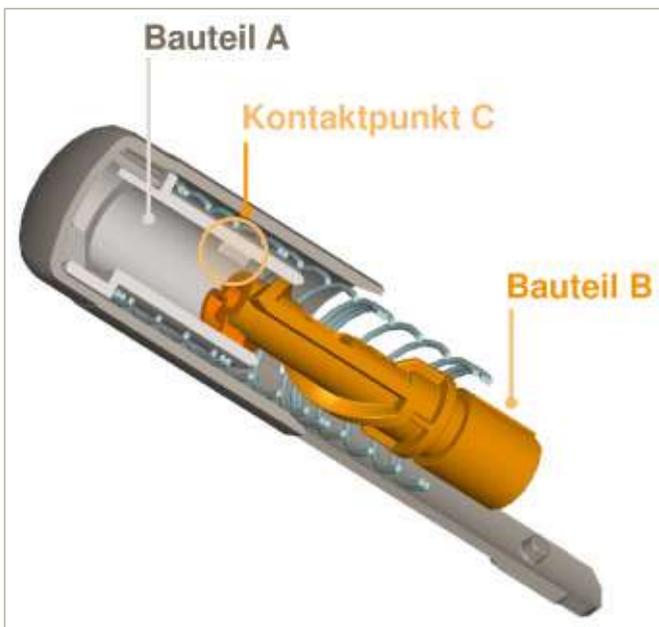


Abbildung 1: Zu untersuchende Baugruppe

Im Rahmen der Produktoptimierung stellt sich die Frage, ob die Bauteile dieser Baugruppe auch mit einer veränderten Gleitmodifizierung realisiert werden können. Dabei stehen folgende konzeptionelle Fragestellungen im Vordergrund: Ist eine Gleitmodifizierung notwendig? Würde auch eine reduzierte PTFE-Zugabe ausreichend sein? Gibt es neben PTFE-gefüllten Polymeren auch Systeme mit anderen Gleitmitteln, die ein vergleichbar gutes Reibungsverhalten aufweisen? Es werden Reibungszahlen angestrebt, die sich auf einem ähnlich niedrigen Niveau befinden, wie im Fall der bisherigen Materialkonstellation. Ein geringer Energieverlust durch Reibung ist wichtig für die Leichtgängigkeit des beispielhaft ausgewählten Produkts und sorgt im Zusammenspiel zwischen den Baugruppen für einen hohen Bedienkomfort.

## 3 Versuchsdurchführung

### 3.1 Materialien

Unter Berücksichtigung der konzeptuellen Fragestellungen wurden in einer Vorstudie Werkstoffe ermittelt, die einerseits den genannten Konzepten Rechnung tragen und andererseits unter Berücksichtigung fertigungs- und produktbezogener Fragestellungen als Alternativwerkstoffe in Betracht kommen. Folgende Polymersysteme (Tab. 1) wurden ausgewählt und im Rahmen dieser Studie untersucht. Die Werkstoffpaarung ③ entspricht dabei den aktuell im Produkt eingesetzten Kunststoffen und dient als Referenzvergleich.

Tabelle 1: Übersicht der getesteten Polymer-Polymer-Paarungen

Nr.	Kontaktpartner	
	I	II
①	TP A	TP A
②	TP A	TP B
③	TP A	TP A + 18 % PTFE + 2 % Silikon
④	TP A	TP A + 5 % PTFE + 2 % Silikon
⑤	TP A	TP A + Gleitadditiv auf PE- /Silikonbasis
⑥	TP A	TP A + Gleitadditiv auf Silikonbasis I
⑦	TP A	TP A + Gleitadditiv auf Silikonbasis II

TP = Thermoplast

Die Probekörper wurden im Spritzgießverfahren unter Berücksichtigung der jeweiligen Datenblattvorgaben hergestellt.

### 3.2 Prüfstand

Die Messungen der Reibkraft wurden an einem Kugel-Platte-Messstand durchgeführt, der lineare oszillierende Bewegungen durchführen kann. Abb. 2 zeigt den schematischen Aufbau des Prüfstandes.

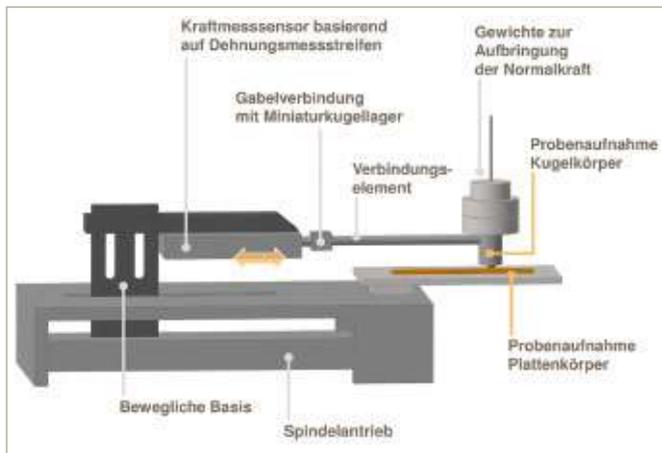


Abbildung 2: Reibungsprüfstand

Der Kraftsensor des Messstandes kann Reibkräfte von bis zu 5 N aufnehmen – in einem Geschwindigkeitsbereich zwischen 0,1 und 900 mm/min. Das Aufbringen der Normalkraft erfolgt über Zusatzgewichte, die über der Prüfkörperaufnahme platziert werden können. Die Prüfaufnahme ist für Kugeldurchmesser von bis zu 20 mm geeignet. Es wurden Kugel-Platte-Prüfkörper eingesetzt, da diese den tatsächlichen Verhältnissen im Produktbeispiel nahekommen. Ferner eignen sich nach [WOY-10] die häufig eingesetzten Kugel-Platte-Systeme [z. B. von BAR-93, JIA-07, EIS-93, LIU-06] für die Prüfung geschmierter Systeme.

### 3.3 Einflussgrößen und Messparameter

Das Reibverhalten von Werkstoffen unterliegt zahlreichen Einflussgrößen, die bei der Analyse und Untersuchung von tribologischen Systemen Berücksichtigung finden sollten. *Abb. 3* zeigt in der Übersicht recherchierte Einflüsse [BOT-98, EIS-93, ERH-08, KÜN-05, LIU-06, SON-90].



Abbildung 3: Einflussgrößen auf Reibung und Verschleiß

Im Rahmen dieser Gesamtstudie standen die Bedeutung der Füllstoffe, der Füllstoffort, die Normalkraft und die Gleitgeschwindigkeit als variierbare Größen im Vordergrund der Betrachtungen. Versuchsergebnisse zur Ermittlung des Normalkrafteinflusses werden im Rahmen dieses Berichts lediglich punktuell angeführt. Bei Durchführung der Versuchsreihe wurden folgende Einstellparameter und Versuchsbedingungen (*Tab. 2*) gewählt.

Tabelle 2: Versuchsparameter

Versuchsbedingungen	
Gleitgeschwindigkeit	1 mm/s bis 15 mm/s
Normalkraft	0,7 N bis 7,5 N
Gleitweg	10 mm
Kugeldurchmesser	10 mm
Temperatur	Raumtemperatur (20±5°C)
Feuchtigkeit	Umgebungsbedingungen
Oberflächenvorbehandlung	keine

Der Einfluss der Oberflächenrauigkeit wurde nicht berücksichtigt, da eine Veränderung der Spritzgießoberfläche zunächst nicht angestrebt war. Die mechanischen Eigenschaften sowie die Morphologie und Oberflächenenergie waren bereits durch die Vorauswahl der Werkstoffe indirekt vorgegeben. Die Wirkung von Temperaturveränderungen und Zwischenmedien sowie allen anderen Einflussgrößen spielt in der vorliegenden Produktanwendung eine untergeordnete Rolle.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Messwertbestimmung

Die Reibkoeffizienten  $\mu$  der untersuchten Materialpaarungen wurden aus den jeweiligen Reibkraftkennlinien ermittelt und rechnerisch über den Grundzusammenhang  $\mu = F_R/F_N$  ( $F_R$  = Reibkraft;  $F_N$  = Normalkraft) [z. B. KÜN-05] abgeleitet. *Abb. 4 (a)* zeigt den Auszug einer Reibungskennlinie aus der Kontaktkombination zweier gleichartiger Polymere (1, *Tab. 1*) ohne Zugabe von Gleitadditiven. Zu erkennen ist ein charakteristischer Stick-Slip-Verlauf (Ruckgleiten), bei welchem der Bewegungsablauf der berührenden Oberflächen periodisch zwischen Haft- und Gleitsequenzen wechselt. Der dynamische Reibkoeffizient (Gleitreibwert) entspricht dem durchschnittlichen Reibwertverlauf. Die statische Reibungszahl (Haftreibwert) wird durch die maximalen Reibwerte repräsentiert [KÜE-01, EIS-93]. Konform zu diesem charakteristischen Kennwertverlauf wurden die Reibkoeffizienten auch im Falle anderer Kennlinientypen bestimmt. Die *Abb. 4 (b) bis (e)*, die sich mit den Darstellungen von [EIS-93, GAO-94, SAM-09] decken, zeigen die weiteren vier Grundformen von Messwertverläufen, die bei der messtechnischen Ermittlung der Reibkoeffizienten aufgetreten sind.

Pro Materialkonstellation wurden 50 Messzyklen in dieser wegabhängigen Werterfassung wiederholt, um das Einlaufverhalten sowie die Reibwertentwicklung mit steigender Zyklenanzahl zu bewerten. Da für die vorliegende Produktanwendung insbesondere die dynamische Reibung von Bedeutung ist, zeigen die nachfolgend ausgewählten Ergebnisdarstellungen im Rahmen dieses Berichts ausschließlich die Gleitreibkoeffizienten.

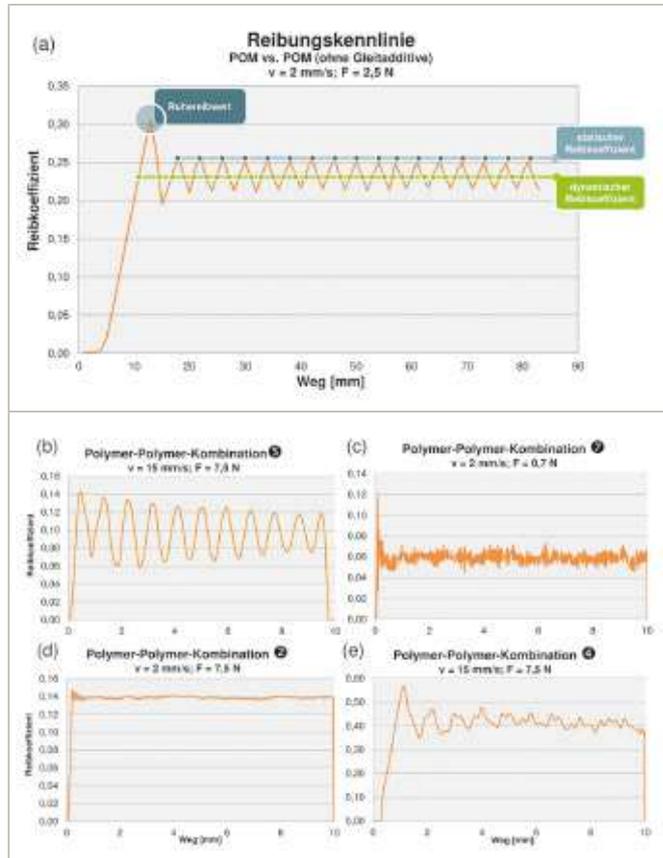


Abbildung 4: Reibwertprofile unterschiedlicher Materialpaarungen (a) Stick-Slip, charakteristische Reibungskennlinie, (b) nahezu harmonische Oszillation, (c) Single-Stick, (d) gleichförmiges Gleiten, (e) ungleichförmiger Stick-Slip

#### 4.2 Einfluss der Gleitmodifizierung

**Ergebnisse:** Abb. 5 zeigt in der Übersicht die Entwicklung der dynamischen Reibkoeffizienten  $\mu_{dyn}$  unter dem Einfluss der Gleitmodifizierung. Kombiniert wurden jeweils die in Tab. 1 genannten Werkstoffe. Die höchsten durchschnittlichen Reibwerte ergaben sich in der Materialpaarung ① mit  $\mu_{dyn} = 0,33$ . Zudem war in dieser Werkstoffkombination ein Anstieg der Reibungszahl mit steigender Häufigkeit der Kontaktberührungen erkennbar. Materialpaarungen zwischen artverschiedenen Kunststoffen bzw. gleitmodifizierten Polymeren führten hingegen zu kontinuierlich niedrigen Reibungskoeffizienten. Insbesondere silikonbasierte Systeme (⑥, ⑦) zeigten ein auffällig gutes Reibverhalten und führten zu einer Reduzierung der Reibung um bis 50 % im Vergleich zu der aktuell eingesetzten Additivkombination (③).

Vergleichbare Ergebnisse erzielte ebenso [BEN-03], der das Verhalten unterschiedlicher Füllstoffe untersuchte.

**Ergebnisdiskussion:** Die Ergebnisse in Abb. 5 machen deutlich, dass eine Kombination gleicher Polymere in tribologisch relevanten Kontaktstellen ohne Gleitadditive nicht empfehlenswert ist, zumindest im Falle polarer Kunststoffe. Die Autoren [ERH-80, KÜN-05, CZI-89, SON-90] führen dies auf eine gesteigerte Adhäsionsarbeit zurück, die aufgrund vermehrt wirkender Dispersionskräfte und Dipolwechselwirkungen zwischen den Oberflächen zustande kommt. Durch die Einbringung von Additiven mit unpolare Molekülstruktur, wie z. B. PTFE oder PE, kann die Oberflächenenergie eines Gleitpartners erniedrigt werden, wodurch der Energieverlust zur Trennung von Adhäsivkontakten während der Relativbewegung reduziert wird.

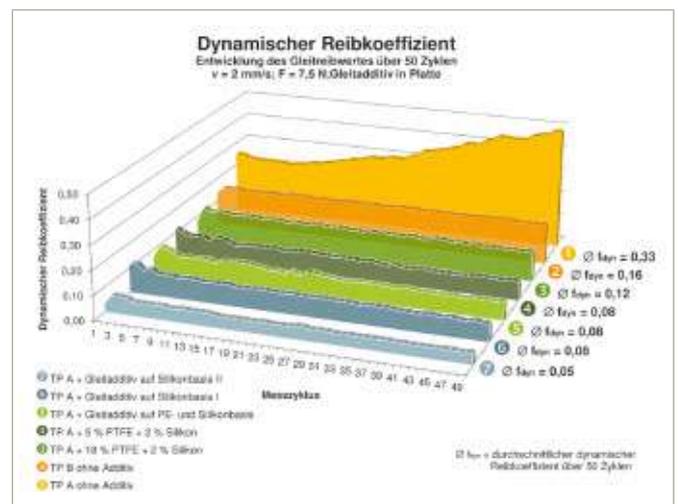


Abbildung 5: Entwicklung des dynamischen Reibkoeffizienten über 50 Messzyklen (Additiv in Plattenkörper)

**Bedeutung für die Anwendung:** Ein Verzicht auf die Zugabe von Gleitadditiven empfiehlt sich für die funktionsrelevante Kontaktstelle in Abb. 1 nicht, da die Reibungszahl auf ein deutlich höheres Niveau steigt und eine steigende Tendenz aufweist. Zudem herrscht die Gefahr eines erhöhten adhäsiven Verschleißes bedingt durch Mikroverschweißungen [KÜN-05; WOY-10] vor, der zu einem Funktionsausfall führen kann. Der Additivverzicht ist lediglich dann zu empfehlen, wenn Werkstoffe kombiniert werden, die sich in ihrer Molekülstruktur unterscheiden und nicht miteinander verschweißbar sind [KÜN-05], so wie es im Falle von Werkstoff ② der Fall ist. Trotz einer leichten Steigerung der Reibungszahl kann ein solcher Grundwerkstoff aus wirtschaftlichen Gründen interessant sein, da gleitmodifizierte Produkte i. d. R. teurer sind. Unter tribologischen Gesichtspunkten ist ein Wechsel auf eines der anderen getesteten Füllstoffsysteme denkbar. Jedoch müssten ebenso fertigungstechnische, wirtschaftliche und mechanische Aspekte zur weiteren Differenzierung herangezogen werden.

### 4.3. Einfluss des Füllstofforts

**Ergebnisse:** Für die Baugruppe in Abb. 1 stellt sich die Frage, bei welchem der Bauteile eine Gleitmodifizierung sinnvoll ist. Vor diesem Hintergrund wurde in gegenüberstellenden Messungen untersucht, ob sich die Reibungskoeffizienten verändern, wenn sich das Additiv einerseits in dem Bauteil mit der größeren Lauffläche (am Prüfstand die Platte) bzw. in der Komponente mit kleinerer Auflagefläche (am Prüfstand die Kugel) befindet. Abb. 6 (a) und (b) zeigen die Reibungswerte bei Einbindung des Füllstoffs in den Kugelkörper, Abb. 5 zeigt die Kennwerte bei Modifizierung des Plattenkörpers. Die Reibkräfte wurden dabei unter denselben Messbedingungen ermittelt.

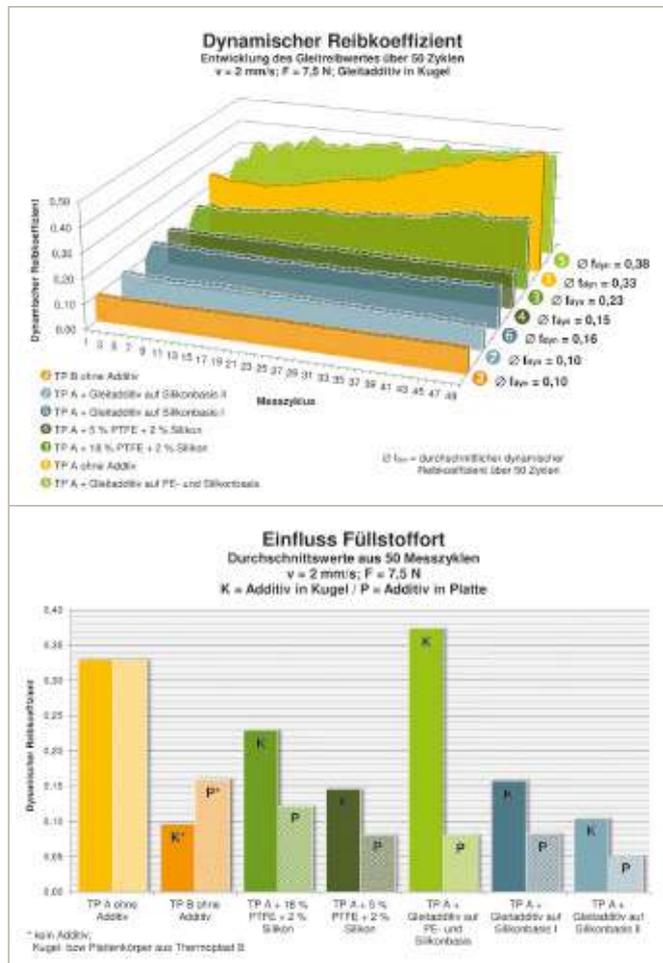


Abbildung 6: (a, oben) Entwicklung des Gleitreibkoeffizienten über 50 Zyklen (Additiv in Kugelkörper); (b, unten) Durchschnittswerte der Gleitreibkoeffizienten über 50 Zyklen aus Abbildung 5 und 6 a in Abhängigkeit des Füllstofforts

Sechs von sieben untersuchten Werkstoffpaarungen zeigen einen Anstieg des dynamischen Reibwertes. Lediglich bei der Materialpaarung ② ist ein Abfall der Reibungszahl zu verzeichnen. Dieses System enthält keine Gleitmodifizierung. Hier wurde lediglich die Art der Werkstoffpaarung zwischen den Prüfkörpern variiert.

**Ergebnisdiskussion:** Der Einfluss des Füllstofforts wurde bislang von keinem der angeführten Autoren unmittelbar untersucht. Jedoch befassten sich u. a. [BAH-00, JIN-00,

WAN-06, ZSI-02] mit dem Verhalten polymerbasierter Transferfilme, die sich zwischen den Kontaktflächen der Reibpartner ausbilden. Insbesondere PTFE neigt demnach aufgrund seiner geringen Verschleißfestigkeit zur Entstehung solcher Zwischenschichten, in die sich Gleitprozesse verlagern und aufgrund der Molekülstruktur des PTFE zu besonders niedrigen Reibungszahlen führen. Die Transferfilme kommen den obigen Berichten zufolge durch Materialabtrag zustande, der im Laufe mehrerer Gleitsequenzen zur Ausbildung eines Films führt. Es wird angenommen, dass durch die Modifizierung der Komponente mit der größeren Lauffläche der Transferfilm leichter ausgebildet wird, da in der betreffenden Lauffläche mehr Füllstoff zur Verfügung steht. Dieses Verhalten kann für PTFE-gefüllte Systeme nach den Ausführungen der oben genannten Autoren angenommen werden. Die Übertragung dieser Aussage auf silikonbasierte Modifizierungen müsste gesondert untersucht werden.

**Bedeutung für die Anwendung:** Im Falle der zu untersuchenden Kontaktstelle empfiehlt sich die Einbringung interner Gleitmittel in das Bauteil B, da dieses die größere Lauffläche aufweist. Übertragen auf den Modellversuch entspricht diese Komponente dem Plattenkörper, der bei Modifizierung ein günstigeres Reibungsverhalten aufwies als der mit Gleitadditiven versetzte Kugelkörper. Falls in der weiteren Ausgestaltung ein Konzept ohne Gleitmodifizierung verfolgt wird, ist unter tribologischen Gesichtspunkten der Einsatz von Werkstoff ② denkbar. Er liefert in der Kombination mit dem Basismaterial ein gutes Reibverhalten. Eine Verteilung der Werkstoffe auf die Bauteile A oder B (Abb. 1) muss u. a. unter Berücksichtigung der mechanischen Auslegung erfolgen.

### 4.4 Einfluss der Gleitgeschwindigkeit

**Ergebnisse:** Die Geschwindigkeit, mit welcher sich die beiden Baugruppen in Abb. 1 relativ zueinander bewegen, wird durch den Patienten bei der Produktbetätigung individuell gesteuert. Daher sind für die Anwendung konstante Reibungsverhältnisse auch bei unterschiedlichen Gleitgeschwindigkeiten von Bedeutung. Abb. 7 (a), (b) und (c) zeigen von ausgewählten Materialpaarungen die Veränderung der Reibungskoeffizienten über einen Geschwindigkeitsbereich zwischen 1 mm/s und 15 mm/s. Im Ergebnis zeigten die gleitmodifizierten Polymerpaarungen nur eine geringe Veränderung der Reibungszahl mit fallender Tendenz bei steigender Gleitgeschwindigkeit. Die unmodifizierte Materialpaarung ① führte zu einem deutlichen Anstieg der Reibwerte, wobei kein eindeutig linearer Zusammenhang vorlag. Ferner neigte diese Materialpaarung zu Stick-Slip-Geräuschen, insbesondere bei höheren Gleitgeschwindigkeiten. Auch die Werkstoffkombination ② deutete einen leichten Anstieg von ca. 13 % des Reibkoeffizienten zwischen den Extrempunkten des geprüften Geschwindigkeitsbereichs an. Im Wesentlichen zeigten die untersuchten Paarungen stabile Reibungszahlen auf, mit Ausnahme von Kombination ①.

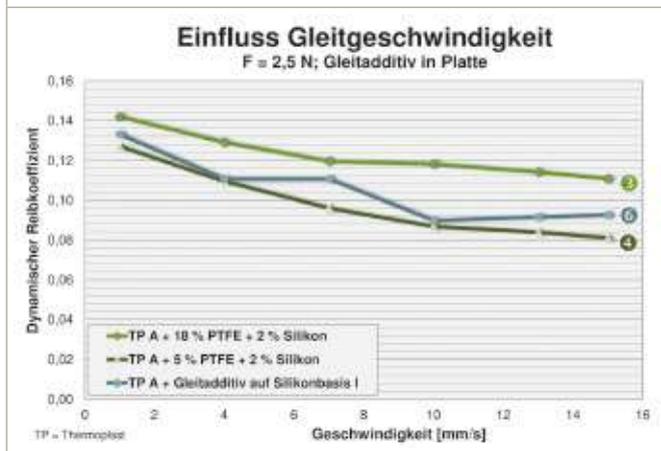
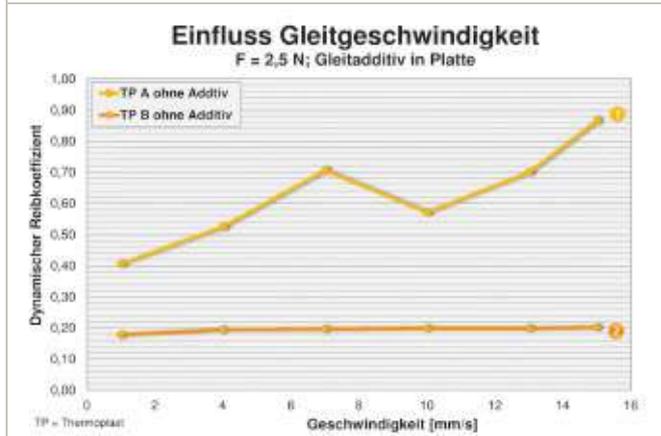
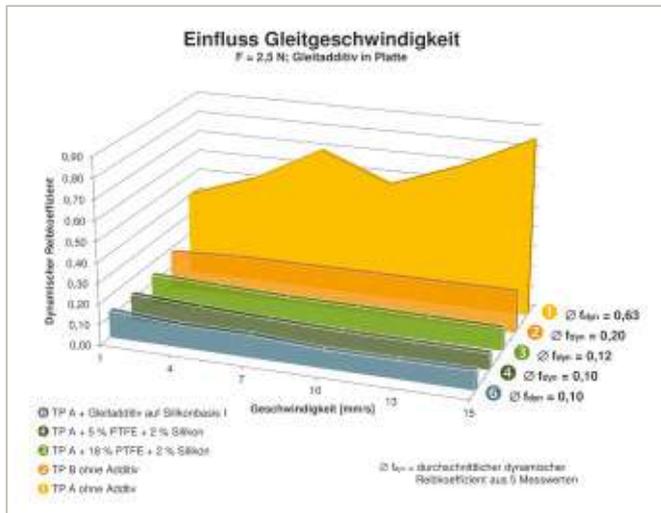


Abbildung 7: (a, oben), (b, mitte) und (c, unten) Entwicklung des Reibungskoeffizienten im Geschwindigkeitsbereich zwischen 1 mm/s und 15 mm/s

**Ergebnisdiskussion:** Nach [MYS-05] hat eine steigende Gleitgeschwindigkeit durch einen erhöhten Temperatureintrag in die Kontaktzone indirekt Einfluss auf den Reibkoeffizienten. Die Effekte von Geschwindigkeit und Temperatur seien demnach nur schwer zu trennen. Für den Bereich von bis zu 10 mm/s beschreiben die Autoren jedoch u. a. für PTFE weitestgehend geschwindigkeitsunabhängiges Reibungsverhalten, was mit den Ergebnissen in Abb. 7 korreliert. [BEN-03] zeigt vergleichbare Zusammenhänge. Auch hier neigten ungeschmierte

Materialpaarungen zu steigenden und gleitmodifizierte Systeme zu leicht sinkenden Reibungszahlen mit steigender Gleitgeschwindigkeit. Jedoch ist anzumerken, dass der Autor in einem breiteren Geschwindigkeitsbereich von bis zu 300 mm/s gearbeitet hat. Die steigenden Reibwerte im Fall unmodifizierter Systeme erklärt [BEN-03] durch Temperaturerhöhungen im Kontaktbereich, die zu einer Erweichung der Kontaktfläche führt und in der Folge eine verstärkte Interaktion der Oberflächenunebenheit erzeugt. In diesem Zusammenhang ist jedoch anzumerken, dass der Autor mit glatten Polymer-Metall-Paarungen gearbeitet hat. [BEN-03] begründet die leicht sinkenden Reibungszahlen bei den gleitmodifizierten Werkstoffen durch die Ausbildung des Transferfilms und verweist ferner, dass durch die Zugabe von PTFE in faserförmiger Struktur die Ausbildung des Transferfilms verstärkt und somit der Reibkoeffizient weiter gesenkt werden kann. [BAH-00] zeigte in seinen Untersuchungen, dass die Dicke der Transferschicht mit steigender Gleitgeschwindigkeit zunimmt. Zudem führt [BEN-03] aus, dass die Gleitmittel PTFE und Silikon zu einer Verringerung des Temperatureinflusses führen.

**Bedeutung für die Anwendung:** In dem für die Anwendung relevanten Geschwindigkeitsbereich zeigen die gleitmodifizierten Kunststoffe sowie die Werkstoffpaarung 2 nahezu konstante Reibungsverhältnisse mit lediglich geringfügigen Veränderungen. Mit Ausnahme der Werkstoffkombination 1 können alle untersuchten Materialpaarungen im relevanten Geschwindigkeitsbereich eingesetzt werden. Auch unter dem kombinierten Einfluss unterschiedlicher Normalkräfte und Gleitgeschwindigkeiten bewegen sich die Reibungszahlen auf einem niedrigen Niveau (Abb. 8), wobei bei gleitmodifizierten Kunststoffen eine deutlichere Senkung der Reibungszahlen bei steigender Normalkraft verzeichnet werden kann.

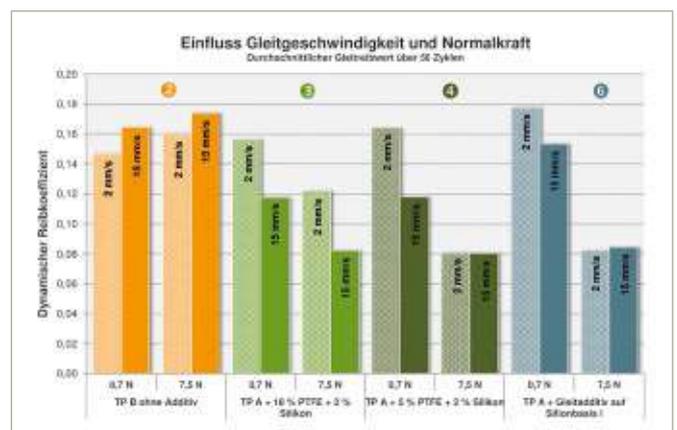


Abbildung 8: Durchschnittlicher dynamischer Reibkoeffizient bei unterschiedlichen Gleitgeschwindigkeiten und Normalkräften

## 5 Fazit

Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 2 geschilderten konzeptionellen Fragestellungen können folgende anwendungsbezogene Rückschlüsse gezogen werden.

1. Ein Verzicht auf Gleitmodifizierung ist (bei artgleichen Polymeren mit polarer Struktur) aufgrund erhöhter und steigender Gleitreibungskoeffizienten und der Gefahr von Stick-Slip-Geräuschen nicht zu empfehlen.
2. Bei Auswahl einer geeigneten Kombination unterschiedlicher, nicht miteinander verschweißbarer Polymergrade ist ein Verzicht auf Gleitadditive denkbar. In der untersuchten Materialkombination konnten Reibungskoeffizienten erzielt werden, die vergleichbar sind mit gleitmodifizierten Systemen.
3. Trotz einer Senkung des PTFE-Gehalts von etwa 18 % auf ca. 5 % lagen in dem untersuchten Geschwindigkeits- und Normalkraftbereich vergleichbare Reibungsverhältnisse vor. Ein reduzierter Einsatz von PTFE ist in der vorliegenden Anwendung ein denkbarer Ansatz.
4. Neben PTFE-gefüllten Systemen zeigten unter den gewählten Versuchsparametern auch andere Gleitmodifizierungen auf PE- und/oder Silikonbasis vergleichbar niedrige Reibungskoeffizienten. Mit den meisten Alternativwerkstoffen konnten sogar niedrigere Reibungszahlen erzielt werden.
5. Beim Einsatz von Gleitadditiven ist für die jeweilige Kontaktstelle die Modifizierung der Komponente mit der größeren Lauffläche zu empfehlen.
6. Ausgewählte gleitmodifizierte Werkstoffe zeigten einen leichten Abfall des Gleitreibungswertes mit Erhöhung der Gleitgeschwindigkeit. Geeignete unmodifizierte Materialpaarungen führten hingegen zu konstanten Reibungszahlen mit leicht steigender Tendenz.

---

### Literaturverzeichnis

- [BAH-00] Bahadur, S.: *The development of transfer layers and their role in polymer tribology*, Wear, Vol. 245, 2000, pp. 92.
- [BAR-93] Bartz, W.-J.: *Selbstschmierende und wartungsfreie Gleitlager: Typen, Eigenschaften, Einsatzgrenzen und Anwendungen*. Ehningen bei Böblingen: expert verlag, 1993
- [BEN-03] Benabdallah, H.: *Friction and wear of blended polyoxymethylene sliding against coated steel plates*. Wear Vol. 254 (2003), pp. 1239–1246
- [BOT-98] Bottenbruch, L.; Binsack, R.: *Technische Thermoplaste – Polyamide*. München/Wien: Carl Hanser Verlag, 1998
- [CZI-89] Czichos, H.; Santner E.: *Tribology of polymers*. Tribology International, 22 (2) (1989), pp.103–109
- [EIS-93] Eiss N. S., Mcann: *Frictional instabilities in polymer–polymer sliding*, Tribology Transactions, Vol. 36, 1993, pp. 686
- [ERH-08] Erhard, G.: *Konstruieren mit Kunststoffen*. München: Carl Hanser Verlag, 2008, 4. Auflage
- [ERH-80] Erhard, G.: *Zum Reibungs- und Verschleißverhalten von Polymerwerkstoffen*. Dissertation, TH Karlsruhe, 1980
- [GAO-94] Gao, Ch. et al.: *The dynamic analysis of stick-slip motion*. Wear Vol. 173 (1994), pp. 1–12
- [JIA-07] Jia B.B, Li T.S., Liu X.J., Cong P.H.: *Tribological behaviors of several polymer–polymer sliding combinations under dry friction and oil-lubricated conditions*, Wear Vol. 262, Issue 11–12, 2007, pp. 1353
- [JIN-00] Jintang, G.: *Tribochemical effects in formation of polymer transfer film*. Wear Vol. 245 (2000), pp. 100–106
- [KÜE-01] Künne, B.: *Einführung in die Maschinenelemente*. Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden: B. G. Teubner GmbH, 2001, 2. Auflage
- [KÜN-05] Künkel, R.: *Auswahl und Optierung von Kunststoffen für tribologisch beanspruchte Systeme*. Dissertation, LKT, FAU Erlangen-Nürnberg, 2005
- [LIU-06] Liu, Y.; Schaefer, J.A.: *The sliding friction of thermoplastic polymer composites tested at low speeds*, Wear Vol. 261, 2006, pp. 568–577
- [MYS-05] Myshkin, N. K.; Petrokovets, M. I.; Kovalev, A. V.: *Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer*. Tribology International Vol. 38 (2005), pp. 910–921
- [SAM-09] Samyn, P.; Tuzolana, T. M.: *Frictional stability of pure and internally lubricated polyamides on a meso-scale tribotester*. Industrial Lubrication and Tribology, 61/2 (2009), pp. 100–110
- [SON-90] Song, J.: *Reibung und Verschleiß eigenverstärkter Polymerwerkstoffe*. Dissertation, Institut für Werkstofftechnik, Gesamthochschule Kassel, 1990

- [WAN-06] Wang, Y.; Yan, F.: *Tribological properties of transfer films of PTFE-based composites*. Wear Vol. 261 (2006), pp. 1359–1366
- [WOY-10] Woydt, M.: *Reibung und Verschleiß von Werkstoffen und Dünnschichten, Bauteilen und Konstruktionen – Ursachen-Analyse-Optimierung*. Fachbuchreihe Kontakt & Studium, Band 687. Renningen: expert verlag, 2010
- [ZSI-02] Zsidai L., De Baets P., Samyn P., Kalacska G., Van Peteghem A. P., Van Parys F.: *The tribological behaviour of engineering plastics during sliding friction investigated with small-scale specimens*, Wear, Vol. 253, 2002, pp. 673.

### Kontakt:



**Prof. Dr. Franz Magerl**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen  
Dekan  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

f.magerl@oth-aw.de



**Dr. Bernhard Schmitt**

Gerresheimer Regensburg GmbH

b.schmitt@gerresheimer.com



**Sabine Binder, B.Eng.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen  
Laboringenieurin  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

sa.binder@oth-aw.de

# Untersuchung der Richtungs- ortung von akustischen Warneinrichtungen für bevorrechtigte Wege- benutzer im Innenraum von Kraftfahrzeugen

(Best Project 2014)

## Zusammenfassung

Mithilfe von Hörversuchen wurde die Fähigkeit zur akustischen Richtungs-ortung von Warnsignalen bevorrechtigter Wegebenutzer im Innenraum von Personenkraftwagen untersucht. Die Hörversuche an 75 Versuchspersonen in drei verschiedenen Fahrzeugen wurden statistisch ausgewertet und mit Messungen der die akustische Lokalisierung von Geräuschen bestimmenden auditorischen Parameter verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Führer eines Fahrzeugs mit Wegerecht gerade bei typischen Kreuzungssituationen keinesfalls davon ausgehen darf, dass er nur aufgrund des Warnsignals vom Querverkehr richtig geortet wird.

## Abstract

Listening experiments were used to assess the ability to localize acoustic warning signals of privileged road users in vehicle interiors. The listening tests, conducted with 75 test subjects in three different vehicles, were statistically evaluated and compared with measurements of the auditory parameters, that determine sound localization. The results suggest, that a privileged car driver with right-of-way cannot expect to be accurately localized by the crossing traffic at a typical intersection situation just because of the warning

## 1 Einführung

### 1.1 Ausgangssituation

Im Straßenverkehr kommt es immer wieder zu Unfällen, an denen bevorrechtigte Wegebenutzer mit eingeschalteten akustischen Warneinrichtungen (z. B. „Martins-horn“) beteiligt sind, die ursächlich mit der zu späten oder nicht vorhandenen Wahrnehmung der Warneinrichtung zusammenhängen. Auffallend ist, dass solche Unfallereignisse meistens mit Kraftfahrzeugen und nur sehr selten mit Fußgängern oder Fahrradfahrern dokumentiert sind [Golder], was auf den akustischen Einfluss der Fahrgastzelle im Zusammenspiel mit den Störschallquellen des Fahrzeugs (Motor, Fahrgeräusch, Gebläse, Radio etc.) schließen lässt. Für manches Unfallgeschehen entscheidend ist aber nicht nur die rechtzeitige Wahrnehmung des Warnsignals, sondern auch dessen korrekte akustische Ortung durch den Fahrzeugführer. Dies dürfte gerade in modernen Fahrzeugen mit zunehmender Fahrgeräuschdämpfung nach außen und hohem Diffusschallanteil

durch schallharte Grenzflächen im Innenraum und damit verbundenen mehrfachen Schallreflexionen schwierig sein [Howard]. Hinzu kommt, dass das menschliche Gehör nur sehr unzureichend in der Lage ist, Geräuschquellen mit schmalbandigem Frequenzspektrum zu lokalisieren [Withington][Blauert].

Bei diesem Projekt soll deshalb mithilfe von Hörversuchen die Fähigkeit von Fahrzeuglenkern zur akustischen Lokalisierung von Warnsignaleinrichtungen im Innenraum von verschiedenen Kraftfahrzeugen untersucht werden.

### 1.2 Räumliches Hören

Räumliches Hören bzw. die akustische Ortung von Schallquellen im Raum beruht im Wesentlichen auf 3 Faktoren:

- dem inter- oder binauralen Pegelunterschied
- interauralen Laufzeit- oder Phasenunterschieden
- Verzerrungen des Schallsignals durch Ohrmuschel, Kopf und Körper

Binaurale Pegelunterschiede können vom Gehör nur wahrgenommen werden, wenn die Wellenlänge des Schalleignisses kleiner als der Kopf ist, was ab Frequenzen von etwa 2 kHz der Fall ist [Hellbrück].

Die beiden ersten Faktoren spielen vor allem im akustischen Freifeld und in der Azimutalebene eine dominierende Rolle. Im diffusen Schallfeld und in der Medianebene dagegen wird der Einfluss von Ohr, Kopf und Oberkörper wichtiger [Böck][Hellbrück][Blauert].

Die Winkelgenauigkeit, mit der eine Schallquelle in der Azimutalebene lokalisiert werden kann, hängt von der Einfallsrichtung und der Schallart ab. Sinustöne von vorne können auf  $1-2^\circ$  genau geortet werden. Seitlich einfallende Töne auf  $\pm 10^\circ$  und Töne von hinten auf  $\pm 5^\circ$  [Fast]. Bei schmalbandigen Signalen, wie sie auch von Warnsignaleinrichtungen kommen, tritt außerdem häufig der Effekt der Inversion auf: Eine vorne liegende Schallquelle wird fälschlicherweise aus einer an der Achse zwischen den beiden Ohren gespiegelten Richtung von hinten wahrgenommen. Beispiel: Durch den Inversionseffekt wird ein Schall statt aus  $30^\circ$  von schräg vorne aus  $150^\circ$  von schräg hinten kommend wahrgenommen [Fast].

### 1.3 Signalgewinnung [FHVR]

Die bei den Hörversuchen verwendeten Warnsignale wurden unter annähernd Freifeldbedingungen an der FHVR aufgenommen und akustisch vermessen. Gemessen wurden verschiedene, an unterschiedlichen Fahrzeugen verbaute Warnanlagen [FHVR]. Das für die Hörversuche letztendlich verwendete Signal stammt von einer Warnanlage der Fa. Hella, Modell RTK7, verbaut in einem uniformierten BMW 3er Touring, Erstzulassung: März 2012 (Abbildung 1).



Abbildung 1: Versuchsanordnung zur Messung und Aufnahme der verwendeten Warnsignale

### Signalkette

Abbildung 2 zeigt schematisch den Versuchsaufbau für die Hörversuche mit den kreisförmig um das Versuchsfahrzeug angeordneten acht Lautsprechern.

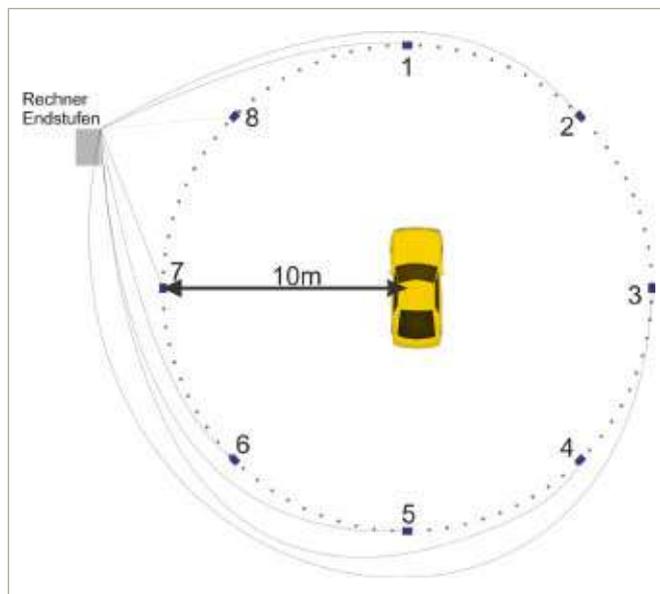


Abbildung 2: Versuchsaufbau Hörversuche schematisch

Das aufgenommene Warnsignal wurde mithilfe der Software LogicX zu sogenannten „Songs“, bestehend aus 16 identischen Warnsignalen mit 7 s Dauer und 5 s Pause, die auf die 8 Lautsprecherkanäle zufällig verteilt wurden, zusammengestellt. Um Seriationseffekte zu vermeiden, erfolgte die Verteilung nach dem Prinzip von zufällig generierten lateinischen Quadraten.

Die Pegelunterschiede der einzelnen Boxen wurden nach der Einmessung der Lautsprecher vor Ort an jedem Versuchstag noch einmal abgeglichen, damit alle den gleichen Schalldruckpegel aufwiesen. Die Unterschiede ergeben sich dabei durch die einzelnen Kanäle der Verstärker, aber auch durch unterschiedliche Längen der Lautsprecherkabel.

Ebenso wurden die zuvor im Labor entzerrten Lautsprecher an jedem Versuchstag noch einmal einzeln vor Ort entzerrt.

### 1.5 Messaufbau

Die Schallmessungen fanden am Versuchsort jeweils vor Beginn der Hörversuche statt. Gemessen wurde bei jedem Fahrzeug mit einem Außenmikrofon 20 cm über dem Fahrzeugdach an der Fahrerposition und mit einem Kunstkopfmesssystem am Fahrersitz (Abbildung 3). Bei den Messungen wurde zunächst aus jedem der acht Lautsprecher ein Rosa Rauschen abgespielt und anschließend das Warnsignal.



Abbildung 3: Messaufbau an Fzg. 2, aus [FHVR]

## 1.6 Versuchsablauf [FHVR]

Im Mittelpunkt des Kreises befindet sich die auf dem Fahrersitz eines Personenkraftwagens sitzende Versuchsperson (VP). Der Kreis fasst einen Durchmesser von 20 Metern. Auf der Kreislinie befinden sich 8 zum Kreismittepunkt ausgerichtete koaxiale Lautsprecherboxen (Abbildung 4).



Abbildung 4: Lautsprecheranordnung und Versuchsfahrzeug 2, aus [FHVR]

Die Lautsprecherboxen sind im 45°-Winkel angeordnet und wurden mithilfe eines Theodoliten ausgerichtet. Bei dem übertragenen Signal handelt es sich um die Aufnahme des Landsignals der RTK7-Warkeinrichtung der Fa. Hella. Das Signal wird pro Versuchsperson in zwei Lautstärken von 75 dB(A) und 80 dB(A) – gemessen über dem Autodach – abgespielt. Pro Lautstärke wird jede Lautsprecherbox in zufälliger Reihenfolge zweimal angesteuert. Die Versuchsperson hört insgesamt 32 Sequenzen von je 7 Sekunden Dauer. Nach jeder Sequenz hat die Versuchsperson 5 Sekunden Zeit die wahrgenommene Richtung in einen Tablet Computer mit Touchscreen einzugeben (Abbildung 5). Die eingegebenen Richtungen werden vom Eingabeprogramm in Zahlen von 1 bis 8 codiert (1=vorne, im Uhrzeigersinn umlaufend) und in einer Textdatei gespeichert, die zur Auswertung in das Statistikprogramm SPSS eingelesen und mit den in den Songs festgelegten Lautsprecherabfolgen verglichen werden kann.



Abbildung 5: Eingabemaske auf dem Tablet Computer

Die 75 Versuchspersonen (25 für jedes Fahrzeug) rekrutierten sich im Wesentlichen aus Personal und Auszubildenden der FHVR und waren zwischen 21 und 54 Jahre alt. 15 Personen waren weiblich.

## 2 Ergebnisse

### 2.1 Hörversuche

Die statistischen Auswertungen und grafischen Darstellungen der Ergebnisse der Hörversuche wurden mit dem Programm IBM SPSS Statistics Vers. 22 erstellt.

#### 2.1.1 Alle Fahrzeuge

Zunächst sollen die Ergebnisse der statistischen Auswertungen aller Versuche ohne Unterscheidung der Fahrzeugtypen dargestellt werden, um allgemeine Aussagen über die Ortbarkeit des Warnsignals machen zu können. Zur Auswertung kamen 75 Versuchspersonen, denen je 32-mal das Signal mit zwei verschiedenen Lautstärken (75 und 80 dB(A) gemessen außen am Fahrzeugdach über der Fahrerposition) aus einem der acht Lautsprecher vorgespielt wurde (2400 Signale). Dabei wurde jeder Lautsprecher mit Ausnahme von LS 1 (vorn, 306-mal) und LS 7 (links, 294-mal) wegen eines Fehlers im Versuchsablauf gleich oft (300-mal) angesteuert.

Abbildung 6 zeigt die Verteilung der Richtungsangaben aller Versuchspersonen. Die Ungleichverteilung ist statistisch signifikant bei einem Signifikanzniveau von 0,05. Zum Beispiel wird der Lautsprecher links hinten doppelt so oft genannt wie die Richtung rechts. Die Richtungen schräg nach hinten wurden deutlich häufiger gewählt als alle anderen, obwohl alle Richtungen gleich oft angespielt worden waren. Dieser Befund lässt sich möglicherweise mit dem in 1.2 beschriebenen Inversionseffekt erklären. Eine genaue Analyse der Verteilung der Fehlortungen für

jeden Lautsprecher bestätigte jedoch nur für die Richtung links vorn eine Tendenz nach der gespiegelten Richtung links hinten – für die Richtung rechts vorn dagegen nicht.

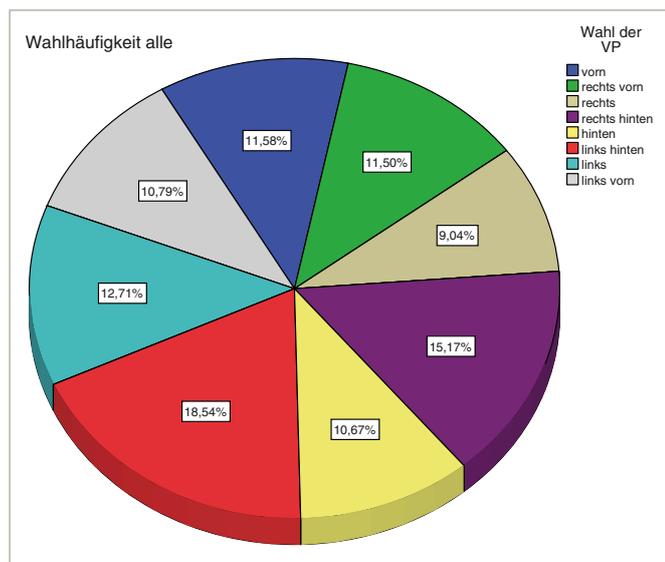


Abbildung 6: Verteilung der Richtungsangaben bei allen Versuchen

Abbildung 7 zeigt das Streudiagramm zwischen dem tatsächlich angespielten Lautsprecher und der Richtungsangabe der Versuchspersonen. Treffer befinden sich auf der Bilddiagonale (blau). Die Breite der Balken ist ein Maß für die Wahlhäufigkeit. Man erkennt, dass korrekte Ortungen und Abweichungen von 45° überwiegen.

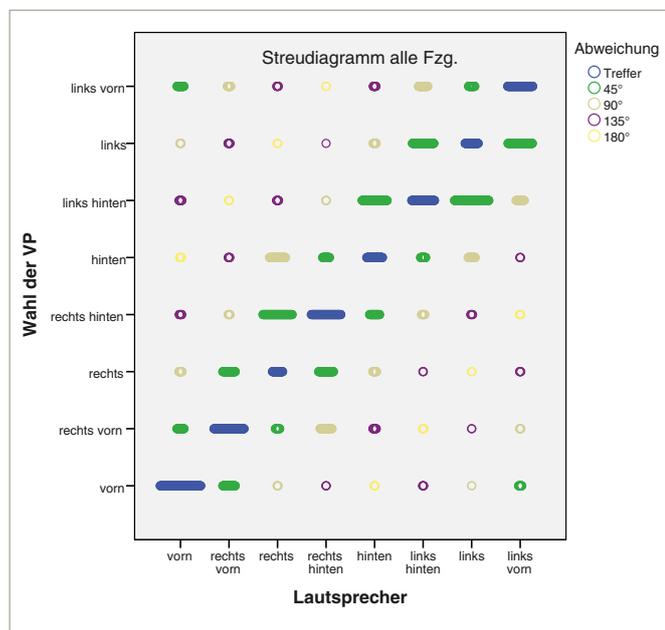


Abbildung 7: Streudiagramm der Richtungsangaben

Abbildung 8 zeigt ein Histogramm der Treffer und Abweichungen für alle Versuche für jede Richtung. Es ist zu erkennen, dass Abweichungen von 45° häufiger auftreten als Treffer, größere Abweichungen aber eher selten sind und erwartungsgemäß mit zunehmender Abweichung abnehmen. Insgesamt kann eine grobe Richtungserkennung festgestellt werden. Allerdings sind die Fehlortungen

sehr stark richtungsabhängig. Während das Signal von vorne kommend häufig richtig geortet wurde, werden besonders die Richtungen querab nur selten richtig erkannt. Beim Lautsprecher rechts (Balken beige) ist eine Fehlortung von 90° sogar wahrscheinlicher als ein Treffer. Bei den seitlichen Lautsprechern ist zudem eine klare Tendenz nach hinten zu erkennen, das Signal von hinten wird häufiger als von links hinten kommend geortet.

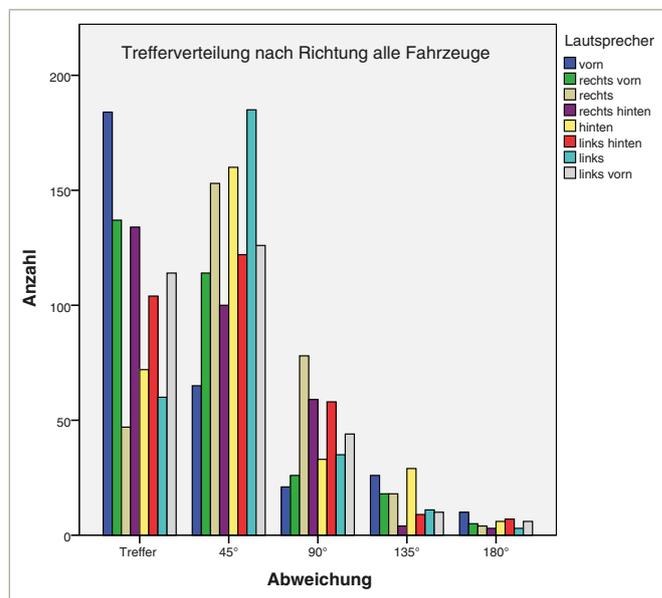


Abbildung 8: Treffer- und Abweichungsverteilung für alle Versuche

Abbildung 9 zeigt einen Vergleich der Trefferverteilung für die beiden verschiedenen Lautstärken der dargebotenen Signale. Erwartungsgemäß ist die Trefferquote beim lauterem Signal höher und Fehlortungen mit Abweichungen von mehr als 45° seltener als beim leiserem Signal. Die Pegelangaben beziehen sich auf die Lautstärke außen über dem Fahrzeug.

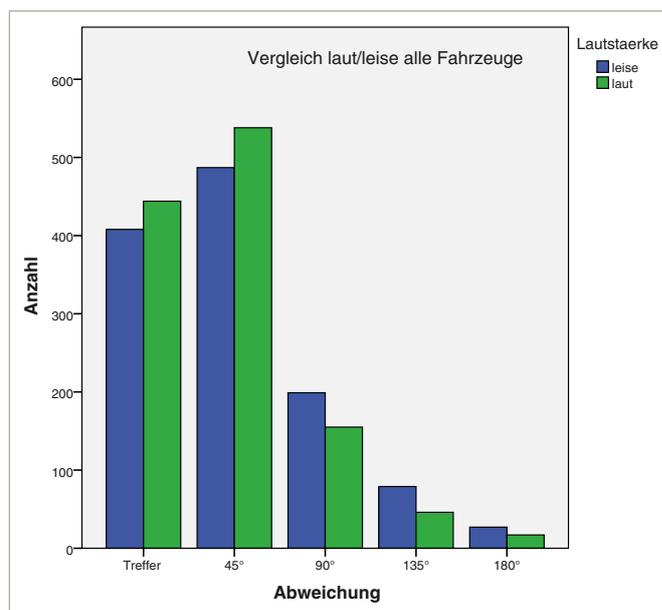


Abbildung 9: Vergleich der Trefferverteilung zwischen lautem und leisem Signal bei allen drei Fahrzeugen

### 2.1.2 VW T5



Abbildung 10: Fahrzeug 1, VW T5

Abbildung 11 zeigt die Verteilung der Richtungsangaben der Versuchspersonen. Die Ungleichverteilung ist statistisch signifikant bei einem Signifikanzniveau von 0,05. Auch hier wurden die Richtungen schräg nach hinten deutlich häufiger gewählt, obwohl alle Lautsprecher gleich oft angespielt worden waren.

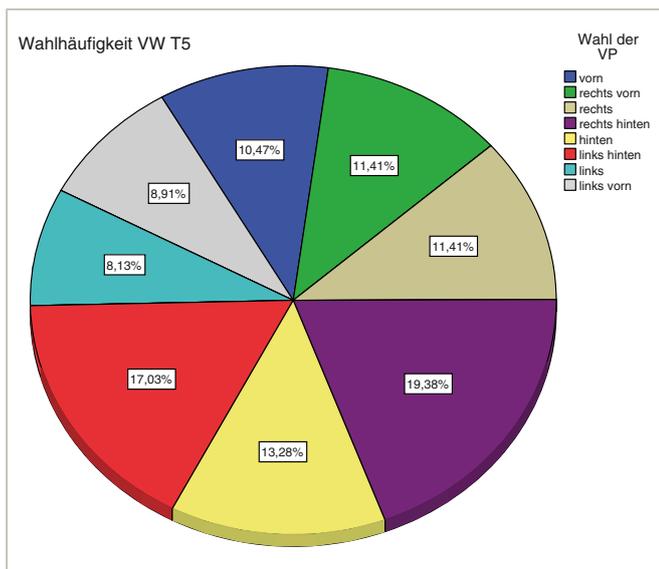


Abbildung 11: Verteilung der Richtungsangaben bei Fahrzeug 1 (VW T5)

Abbildung 12 zeigt die Verteilung von Treffern und Abweichungen bei den Hörversuchen mit Fahrzeug 1 (VW T5). Hier überwiegen bei fast allen Richtungen – außer von hinten rechts – die Fehlortungen um 45°. Der Lautsprecher rechts wird sogar am häufigsten mit einer Abweichung von 90° falsch lokalisiert.

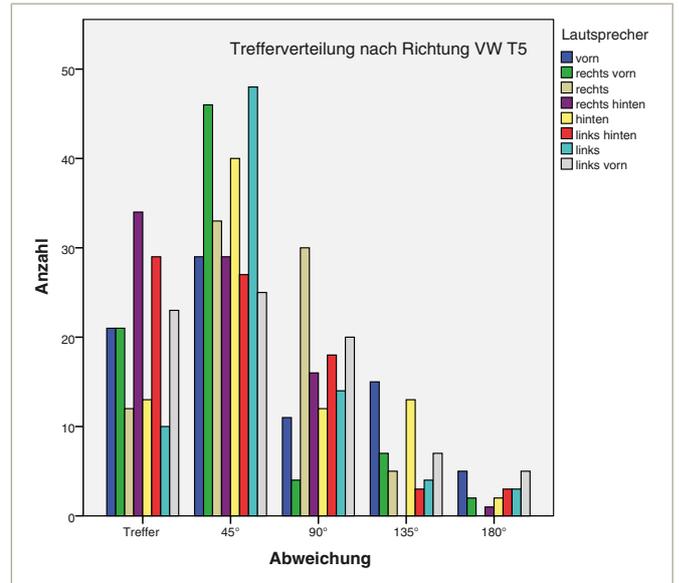


Abbildung 12: Treffer- und Abweichungsverteilung VW T5

Vergleicht man die Trefferverteilung bei lautem und leisem Signal, ergibt sich für Fzg. 1 eine fast identische Verteilung wie bei allen Fahrzeugen (Abbildung 13).

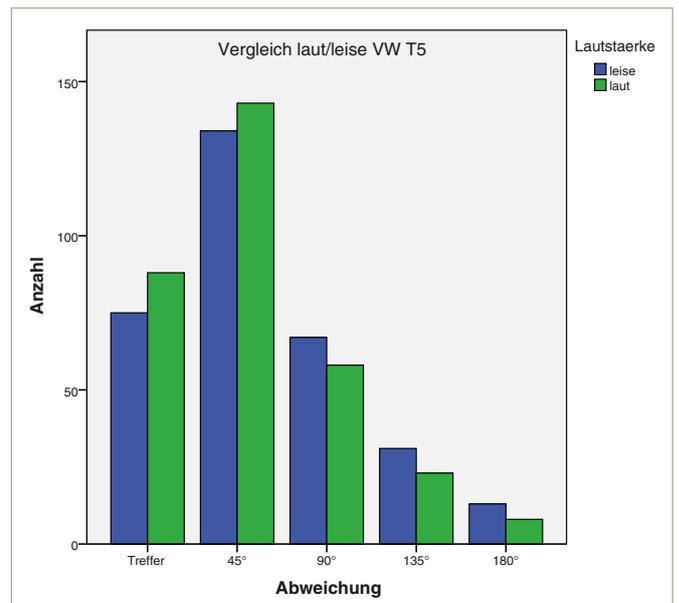


Abbildung 13: Vergleich der Trefferverteilung zwischen lautem und leisem Signal bei Fzg. 1 (VW T5)

### 2.1.3 BMW 3er Kombi



Abbildung 14: Fahrzeug 2, BMW 3er-Reihe Kombi

Abbildung 15 zeigt die Verteilung der Richtungsangaben der Versuchspersonen. Die Ungleichverteilung ist auch bei diesem Fahrzeug statistisch signifikant bei einem Signifikanzniveau von 0,05. Auch hier wurden die Richtungen schräg nach hinten deutlich häufiger gewählt, obwohl alle Lautsprecher gleich oft angespielt worden waren. Im Vergleich zu Fzg. 1 ist hier eine Lokalisierungstendenz nach links zu erkennen.

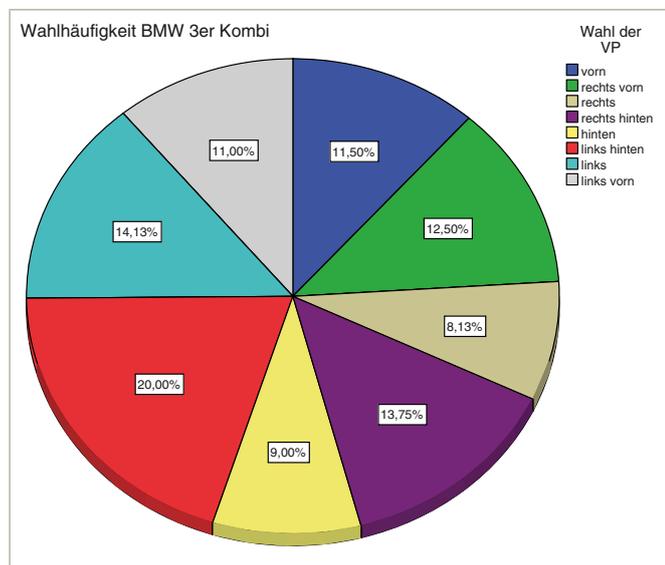


Abbildung 15: Verteilung der Richtungsangaben bei Fahrzeug 2 (BMW 3er)

Abbildung 16 zeigt die Verteilung von Treffern und Abweichungen bei den Hörversuchen mit Fahrzeug 2 (BMW 3er). Hier zeigt sich im Vergleich zu Fzg. 1 eine deutlich höhere Trefferquote, insbesondere beim Signal von vorne. Die seitlichen Lautsprecher werden hier am häufigsten mit einer Abweichung von 45° lokalisiert.

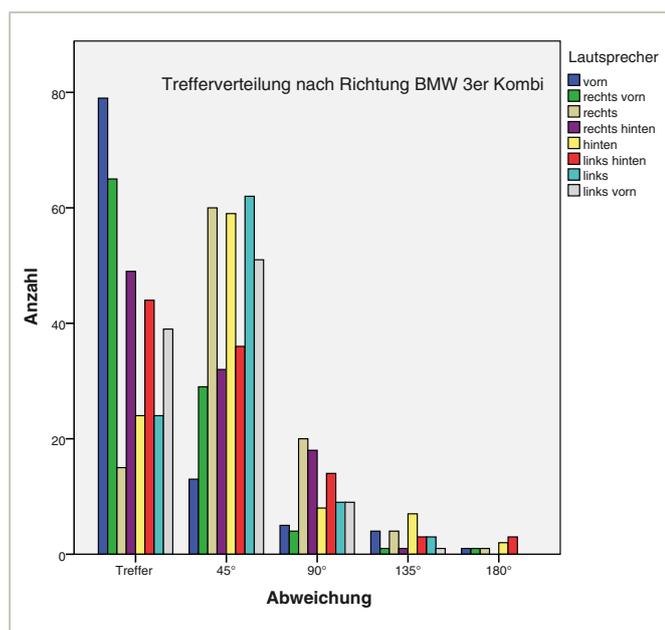


Abbildung 16: Treffer- und Abweichungsverteilung Fzg. 2 (BMW 3er)

Vergleicht man die Trefferverteilung bei lautem und leisem Signal, ergibt sich für Fzg. 2 eine fast identische Verteilung wie bei allen Fahrzeugen (Abbildung 17).

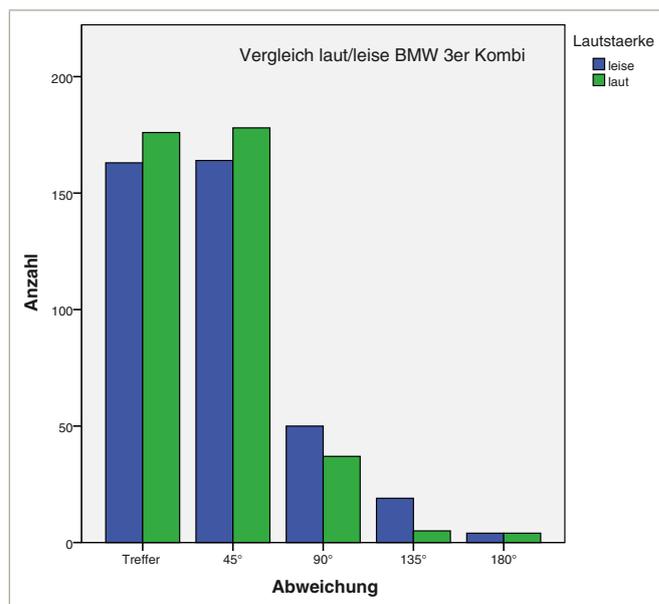


Abbildung 17: Vergleich der Trefferverteilung zwischen lautem und leisem Signal bei Fzg. 2 (BMW 3er)

#### 2.1.4 Opel Corsa

Die Ergebnisse bei diesem Fahrzeug waren fast identisch mit den Ergebnissen bei Fahrzeug 2 und werden deshalb nicht weiter erläutert.

#### 2.1.5 Vergleich der Fahrzeuge

Um die Ergebnisse der Hörversuche in den einzelnen Fahrzeugen besser untereinander und mit den im nächsten Abschnitt beschriebenen Innenraummessungen vergleichen zu können, wurde für jede Richtung und jedes Fahrzeug getrennt die mittlere Winkelabweichung  $\overline{\Delta\alpha}$  (Richtung, Fzg.) der Richtungsangaben der Versuchspersonen vom Sollwert (= Richtung) bestimmt (Abbildung 18):

$$\overline{\Delta\alpha}(\text{Richtung}, \text{Fzg.}) = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} |\text{Richtung}(i) - \text{Richtungsangabe}(i)|$$

Man erkennt eine deutlich schlechtere Ortung bei allen Richtungen im VW T5, während sich Opel Corsa und BMW kaum unterscheiden. Signale von hinten, links und rechts querab werden bei allen Fahrzeugen mit den größten Abweichungen also am schlechtesten lokalisiert, während Signale von vorne und rechts hinten am genauesten geortet werden.

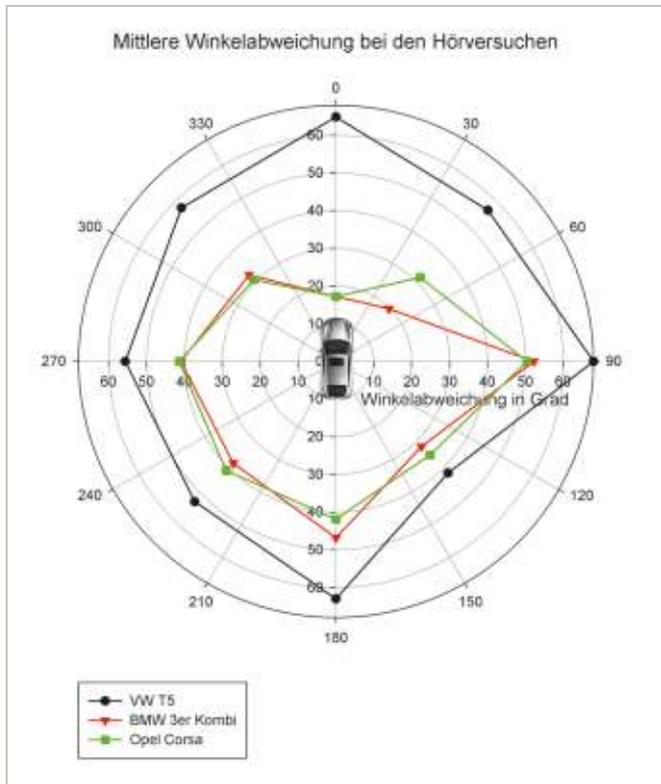


Abbildung 18: Vergleich der mittleren Winkelabweichungen der Hörversuche

### 2.1.6 Lerneffekt, individuelle Streuung und Selbsteinschätzung

Die in 2.1.5 definierte mittlere Winkelabweichung  $\bar{\Delta\alpha}$  der Richtungsangaben der Versuchspersonen lässt sich auch dazu verwenden, zu untersuchen, ob die Versuchspersonen die Signale mit zunehmender Versuchsdauer besser lokalisieren können:

$$\bar{\Delta\alpha}(\text{Signalnummer}) = \frac{1}{75} \sum_{i=1}^{75} |\text{Richtung}(i) - \text{Richtungsangabe}(i)|$$

In Abbildung 19 ist  $\bar{\Delta\alpha}(\text{Signalnummer})$  von allen 75 Versuchspersonen gegen die Signalnummer (= Versuchsabfolge) aufgetragen. Bei den ersten 16 – wohlgerneht zufällig ausgewählten, für jede VP aus einer anderen Richtungen – vorgespielten Signalen ist eine signifikante Verbesserung der Lokalisierung festzustellen, was auch an der Steigung der eingezeichneten Regressionsgerade sichtbar wird. Bei diesen Signalen handelt es sich um die leiseren. Abbildung 20 zeigt die Verhältnisse bei den jeweils letzten, den lauterer Signalen. Hier ist keine Verbesserung der Ortungsfähigkeit mehr festzustellen, die Steigung der Regressionsgeraden ist praktisch null. Es gibt also offensichtlich einen gewissen Lern- oder Gewöhnungseffekt bei den ersten Signalen.

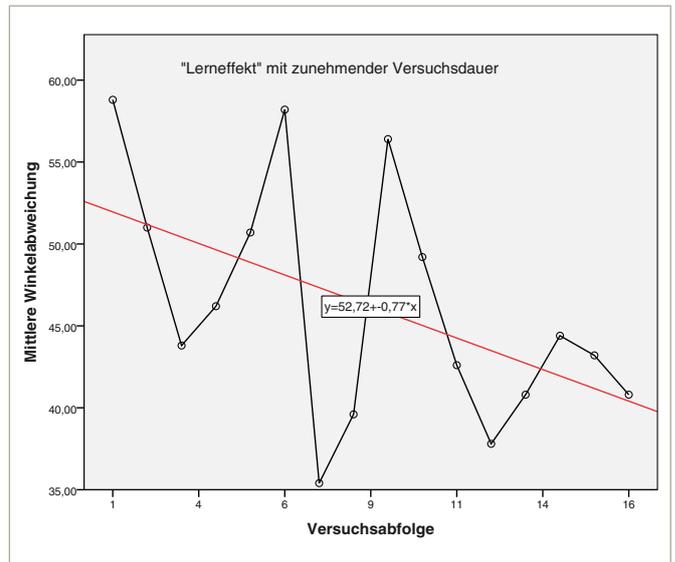


Abbildung 19: Mittlere Winkelabweichung bei den ersten 16 Signalen

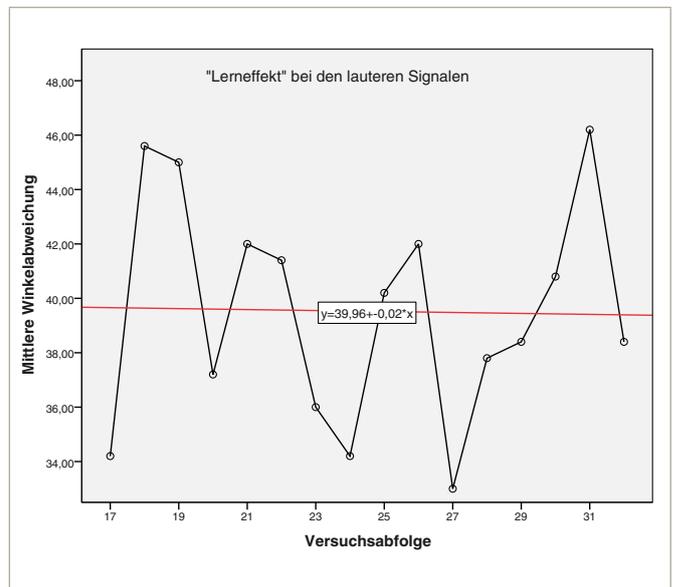


Abbildung 20: Mittlere Winkelabweichung bei den letzten 16 Signalen

Berechnet man die mittlere Winkelabweichung für jede einzelne Versuchsperson  $\bar{\Delta\alpha}(VP)$ , kann man Aussagen über die Streuung der individuellen Ortungsfähigkeit machen:

$$\bar{\Delta\alpha}(VP) = \frac{1}{32} \sum_{i=1}^{32} |\text{Richtung}(i) - \text{Richtungsangabe}(i)|$$

Abbildung 21 zeigt die Häufigkeitsverteilung der in 5°-Intervallen einsortierten mittleren Winkelabweichungen für die 75 Versuchspersonen. Die „beste“ VP hat eine mittlere Winkelabweichung von nur 17°, die beiden „schlechtesten“ von über 90°. Diese – auch von der Statistik als Ausreißer identifizierten Fälle – gaben im Fragebogen (siehe Anhang) an, unter einer leichten Gehörschädigung (z. B. Altersschwerhörigkeit) zu leiden. Im Mittel der VP liegt die Abweichung bei 41°.

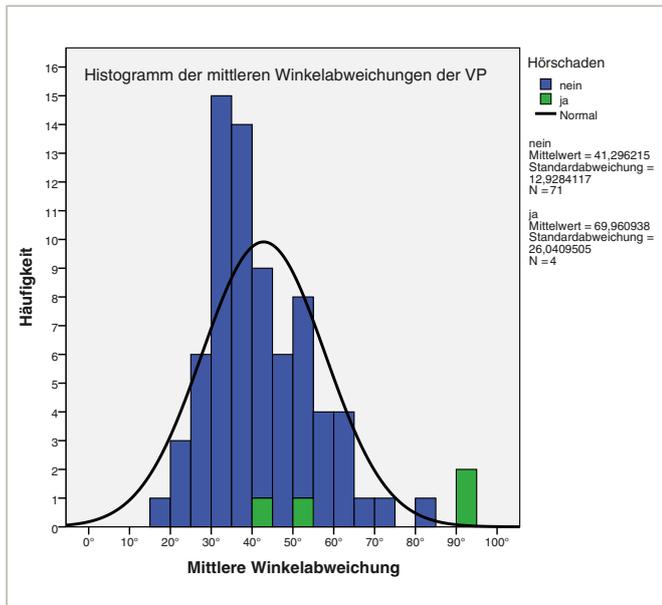


Abbildung 21: Häufigkeitsverteilung der mittleren Winkelabweichungen je Versuchsperson mit und ohne Hörschäden in 5°-Intervallen mit von SPSS berechneter Normalverteilung

Nach dem Hörversuch hat jede VP einen Fragebogen ausgefüllt, in dem unter anderem nach dem empfundenen Schwierigkeitsgrad der Ortungsaufgabe gefragt wurde. Auf einer fünfteiligen Skala von „sehr leicht“ bis „sehr schwer“ sollten entsprechende Selbsteinschätzungen gemacht werden [FHVR]. Abbildung 22 zeigt das auf eine Zahlenskala (-2 = sehr leicht, -1 = eher leicht, 0 = neutral, 1 = eher schwer, 2 = sehr schwer) übertragene Ergebnis für jede Versuchsperson im Vergleich zur individuellen mittleren Winkelabweichung  $\bar{\alpha}_i$  (VP). Man erkennt, dass auch in der persönlichen Einschätzung die Lokalisierung in Fzg. 1 (VP 1–25) als am schwersten empfunden wurde.

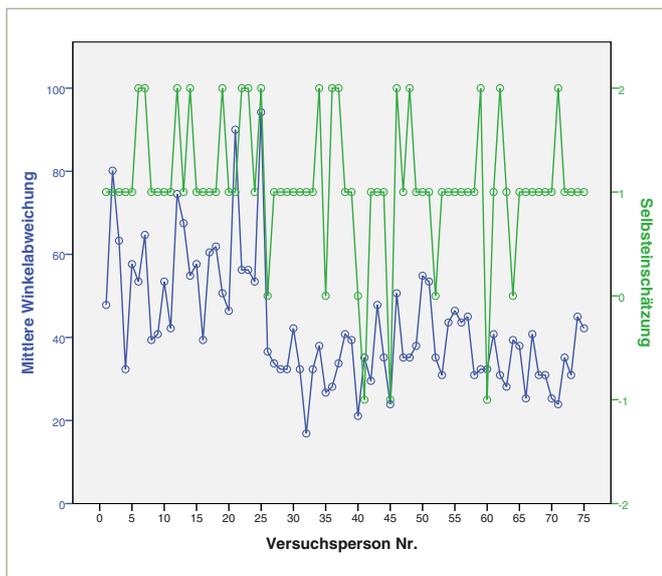


Abbildung 22: Korrelation zwischen Ortungsfähigkeit und Schwierigkeitsgrad bei allen VP (VP 1–25: VW T5, VP 26–50: BMW 3er Kombi, VP 51–75: Opel Corsa)

Untersucht man mit statistischen Korrelationsrechnungen den Zusammenhang zwischen dieser Selbsteinschätzung und dem Lokalisierungsergebnis in Form der mittleren Winkelabweichung, erhält man eine statistisch signifikante Korrelation. Das heißt, dass Versuchspersonen, welche die Testaufgabe als eher leicht empfunden haben, auch ein besseres Ortungsergebnis erzielten und umgekehrt.

## 2.2 Innenraummessungen

### 2.2.1 VW T5

In Abbildung 23 ist die richtungsabhängige Dämpfung der Fahrzeugkarosserie für ein Rosa-Rausch-Signal und das Warnsignal dargestellt. Angegeben sind jeweils die Differenzen zwischen den A-bewerteten äquivalenten Dauerschallpegeln ( $L_{Aeq}$ ), gemessen am linken und rechten Kunstkopfkanal im Fahrzeuginnenraum und dem Außenpegel, gemessen über dem Dach an Fahrerposition.

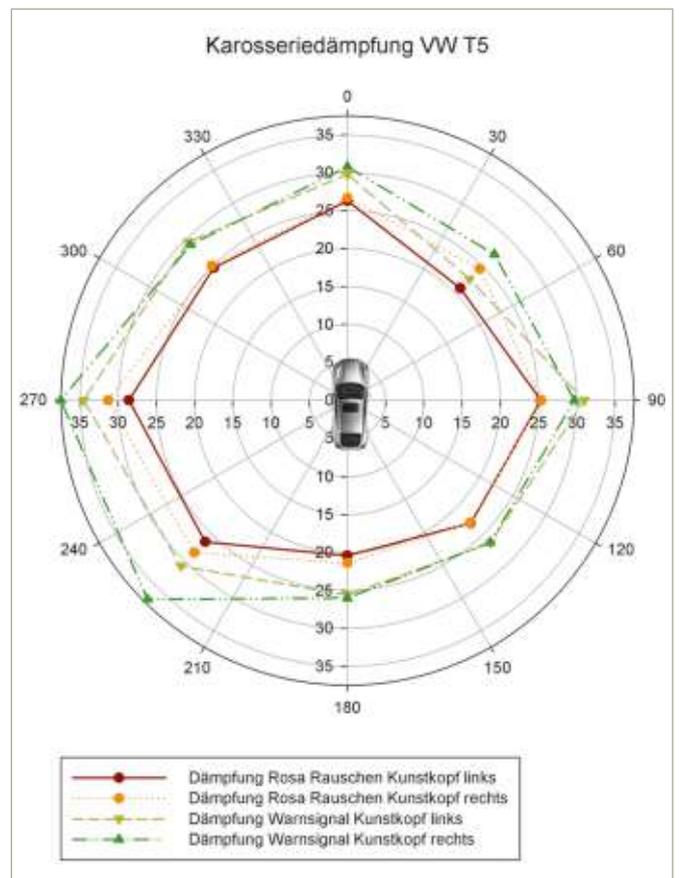


Abbildung 23: Dämpfung der Fahrzeugkarosserie bei Fzg. 1 in dB bei Rosa Rauschen und Warnsignal

Deutlich zu erkennen, dass das hochfrequente Warnsignal stärker gedämpft wird als das Rauschen und dass die Dämpfung richtungsabhängig ist: Signale von links werden z. B. um etwa 10 dB stärker gedämpft als Signale von hinten. Ebenso sind Pegelunterschiede zwischen linkem und rechtem Ohr festzustellen, wobei bei fast allen Richtungen der Pegel am rechten Ohr kleiner (= größere Dämpfung) ist als am linken.

Abbildung 24 zeigt die gemessenen A-bewerteten 12tel-Oktavspektren von einem Rosa-Rauschsignal (schwarze Linie, am Versuchsort ohne Fahrzeug gemessen), über dem Dach an Fahrerposition (grün), im Fahrzeuginneren am linken Kunstkopfkanal (blau) und am rechten Kunstkopfkanal (rot) bei Fahrzeug 1. Die Spektren stellen über 7,5 s gemittelte äquivalente Dauerschallpegel dar. Auffallend sind die nichtlinearen richtungsabhängigen Verzerrungen des Signals über dem Autodach, die durch Abschattungs- und Absorptionseffekte der Karosseriefleichen und durch Schallbeugung an den Karosseriekanten entstehen dürften. Im Fahrzeuginnenraum ist bei allen Richtungen eine starke Schalldämpfung bei hohen Frequenzen ab 5 kHz festzustellen. Bei allen Frequenzen sind zum Teil erhebliche Pegelunterschiede zwischen linkem und rechtem Ohr von bis zu annähernd 20 dB (z. B. Richtung rechts vorn bei ca. 350 Hz) zu beobachten, deren Ursache in den akustischen Eigenschaften der Karosserie zu suchen sind. Besonders Reflexionen an schallharten Oberflächen in der Nähe des Kunstkopfes (Seitenfenster, Windschutzscheibe), Ausbildung von stehenden Wellen und Absorptionen dürften hier maßgeblichen Einfluss haben.

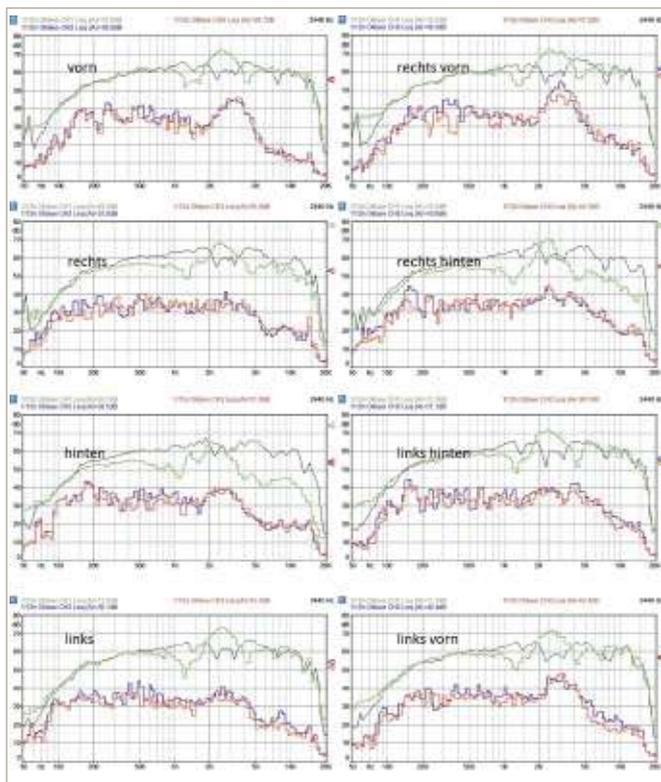


Abbildung 24: Rauschspektren Fzg. 1 (schwarz: ohne Fahrzeug, grün: Außenmikrofon über dem Dach, blau: Kunstkopf links, rot: Kunstkopf rechts)

Abbildung 25 zeigt die über 5 Wechseltonperioden gemittelten äquivalenten Dauerschallpegelspektren des Warnsignals bei Fzg. 1 für die verschiedenen Richtungen. Die Grundtöne des Signals (360 und 480 Hz) treten bei diesem Fahrzeug wahrscheinlich aufgrund

des hohen Daches bei manchen Richtungen bereits am Außenmikrofon kaum in Erscheinung. Die Obertöne des Signals über 4 kHz werden durch die Karosserie fast vollständig gedämpft, es dominieren die Harmonischen zwischen 2 und 3 kHz. Zum Teil treten in einzelnen Frequenzbändern erhebliche binaurale Pegelunterschiede von bis zu 15 dB auf (z. B. Richtung von hinten bei ca. 1450 Hz).

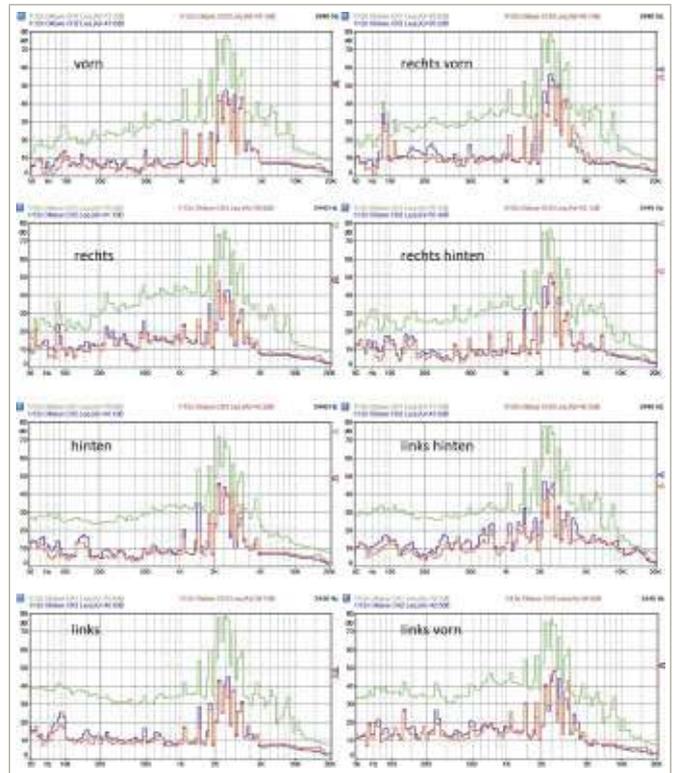


Abbildung 25: Warnsignalspektren Fzg. 1 (grün: Außenmikrofon über dem Dach, blau: Kunstkopf links, rot: Kunstkopf rechts)

Bei den anderen beiden Fahrzeugen sind die Messergebnisse ähnlich, allerdings ist die Karosseriedämpfung bei Fzg. 2 deutlich größer als beim VW T5. Auffallend ist, dass die nichtlinearen richtungsabhängigen Verzerrungen des Signals über dem Autodach, die durch Abschattungs- und Absorptionseffekte der Karosseriefleichen und durch Schallbeugung an den Karosseriekanten entstehen dürften, bei Fahrzeug 2 (BMW 3er Kombi) wesentlich geringer sind als beim VW T5. Bei allen Frequenzen sind zum Teil erhebliche Pegelunterschiede zwischen linkem und rechtem Ohr von bis zu 15 dB zu beobachten, die bei diesem Fahrzeug jedoch wesentlich breitbandiger ausfallen als bei Fzg. 1.

Die Obertöne des Warnsignals über 5 kHz werden durch die Karosserie bei Fahrzeug 2 fast vollständig gedämpft, es dominieren die Harmonischen zwischen 2 und 4 kHz. Bei Fzg. 3 (Opel Corsa) ist die Karosseriedämpfung etwas kleiner als bei Fzg. 2, ansonsten sind die Ergebnisse der Innenraummessungen ähnlich wie bei Fzg. 2.

## 2.3 Korrelationen

### 2.3.1 Karosseriedämpfung – Winkelabweichung Hörversuche

In Abbildung 26 ist die mittlere Winkelabweichung aus den Hörversuchen und die Karosseriedämpfung in dB gemessen am rechten Kunstkopfkopf gegen die Richtung des Warnsignals in Fzg. 2 aufgetragen. Die beiden Größen korrelieren: Man findet eine größere Winkelabweichung, wenn die Dämpfung groß ist, das Signal am rechten Ohr also vergleichsweise leise ist.

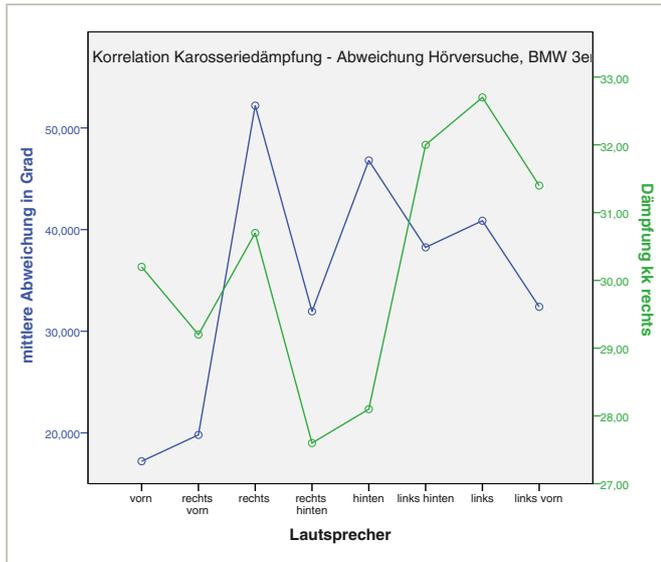


Abbildung 26: Mittlere Abweichung aus den Hörversuchen  $\bar{\Delta\alpha}$  (Richtung, Fzg. 2) (blau) und Karosseriedämpfung (grün)

Statistische Korrelationsrechnungen bestätigen einen signifikanten Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson, der einen linearen Zusammenhang zwischen normalverteilten Variablen annimmt, beträgt 0,72, der Fehler ist kleiner als 5 %. Andere Größen wie die Innenraumpegel korrelieren nicht mit der Winkelabweichung. Bei den anderen beiden Fahrzeugen findet man mit den gleichen Methoden jedoch keine statistischen Zusammenhänge zwischen den genannten Schallmessgrößen und den Hörversuchen, weshalb ein Kausalzusammenhang zwischen der richtungsabhängigen Karosseriedämpfung und der Ortbarkeit eines Warnsignals nicht angenommen werden kann.

### 2.3.2 Interaurale Pegeldifferenz – Winkelabweichung Hörversuche

Einer der wichtigsten Einflussfaktoren beim Richtungs hören ist der inter- oder binaurale Pegelunterschied  $\Delta L$  (Richtung) zwischen den beiden Ohren ([Fastl], [Hellbrück]). Er wurde für jede Signalrichtung aus den über 7 s gemittelten, am Kunstkopf an Fahrerposition

gemessenen äquivalenten Dauerschallpegeln nach folgender Vorschrift sowohl für die Warnsignale als auch für das Rosa Rauschen bestimmt:

$$\Delta L(\text{vorn}, \text{hinten}) = |L_{eq}(\text{KK links}) - L_{eq}(\text{KK rechts})|$$

$$\Delta L(\text{vorn rechts}, \text{rechts}, \text{hinten rechts}) = L_{eq}(\text{KK rechts}) - L_{eq}(\text{KK links})$$

$$\Delta L(\text{vorn links}, \text{links}, \text{hinten links}) = L_{eq}(\text{KK links}) - L_{eq}(\text{KK rechts})$$

Für eine korrekte Ortung sollten die Pegeldifferenzen für Signale von vorn und hinten möglichst klein sein. Positive  $\Delta L$  ergeben sich nach dieser Vorschrift, wenn das dem Signal zugewandte Ohr einen höheren Pegel registriert als das abgewandte, negative, wenn das Signal am abgewandten Ohr lauter ist.

Abbildung 27 bis Abbildung 29 zeigen die so berechneten Pegelunterschiede im Vergleich zu den Ergebnissen aus den Hörversuchen. Zur besseren Darstellung wurden die mittleren Winkelabweichungen aus den Hörversuchen durch 10 geteilt.

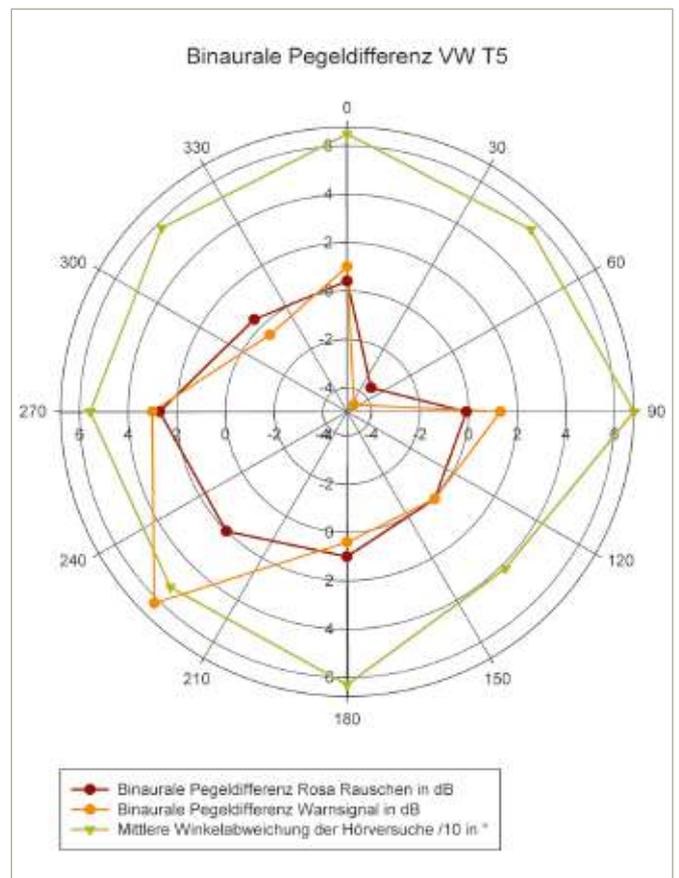


Abbildung 27: Am Kunstkopf gemessene interaurale Pegeldifferenzen  $\Delta L$  und Ortungsabweichung aus den Hörversuchen bei Fzg.1

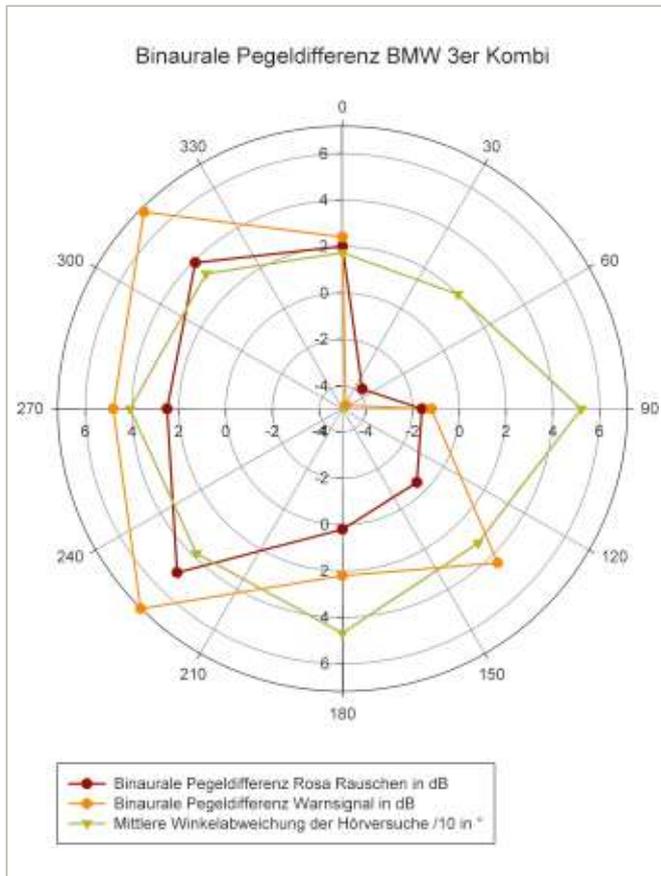


Abbildung 28: Am Kunstkopf gemessene interaurale Pegeldifferenzen  $\Delta L$  und Ortungsabweichung aus den Hörversuchen bei Fzg. 2

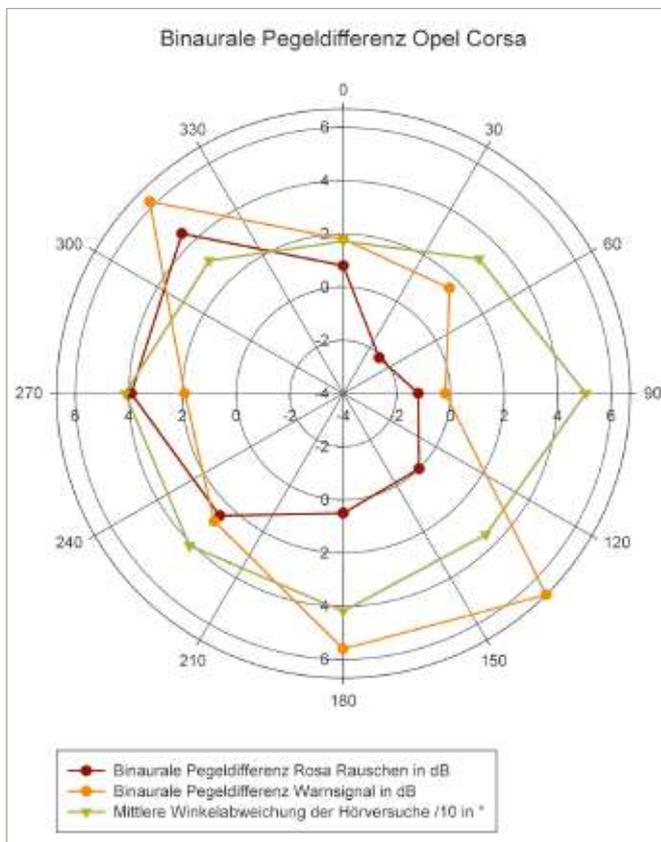


Abbildung 29: Am Kunstkopf gemessene interaurale Pegeldifferenzen  $\Delta L$  und Ortungsabweichung aus den Hörversuchen bei Fzg. 3

Es fällt auf, dass die Signalrichtung „vorn rechts“ ( $45^\circ$ ) bei allen Fahrzeugen negative Pegeldifferenzen an der Fahrerposition erzeugt, d. h., das Signal ist am linken Ohr lauter als am rechten. Hier spielt vermutlich die Schallreflexion an der Seitenscheibe nahe am linken Ohr eine entscheidende Rolle. Dies wird unterstützt durch die Tatsache, dass Signale von links fast immer positive Differenzen ergeben. Trotzdem ist die mittlere Abweichung bei Signalen von links nicht signifikant kleiner als von rechts, was den Schluss zulässt, dass die interaurale Pegeldifferenz bei der Lokalisierung von Geräuschen im Innenraum von Fahrzeugen keine große Rolle spielt. Auch die Trefferverteilung ist für Signale aus der linken Hemisphäre trotz günstiger Pegeldifferenz nicht besser als für Schall von rechts (vgl. Abbildung 8). Lediglich die Häufigkeit, mit der Lautsprecher aus der linken Hemisphäre genannt wurden (Abbildung 6), ist mit 42 % größer als aus der rechten (36 %). Hinzu kommt, dass den Versuchspersonen bei den Hörversuchen nicht verboten wurde, zur besseren Ortung den Kopf zu drehen, um ein möglichst realistisches Ergebnis zu bekommen. Viele machten davon auch Gebrauch, sodass die statisch mit dem Kunstkopf gemessene Pegeldifferenz mit den Hörversuchen wenig korrelieren kann.

Offensichtlich müssen andere Mechanismen des Richtungshörens hinzukommen, welche die Quellenortung in diesem Fall ermöglichen. Infrage kommen interaurale Laufzeitunterschiede (Präzedenzeffekt, Gesetz der ersten Wellenfront) oder die richtungsabhängige Filterung der Signale durch Ohrmuschel, Kopf und Körper, also die aus der Literatur [Hellbrück] bekannte kopfbezogene Übertragungsfunktion (HRTF, Head Related Transfer Function).

## 2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

- Die Richtungsangaben der Versuchsteilnehmer bei den Hörversuchen sind nicht gleichverteilt, es besteht eine Tendenz nach hinten
- Die Treffer- und Abweichungsverteilung hängt von der Einfallrichtung des Schalls ab, Signale von der Seite ( $90^\circ$ ) werden besonders schlecht lokalisiert, Signale von vorn besonders gut.
- Lautere Signale werden besser geortet als leisere.
- Die Treffer- und Abweichungsverteilung hängt vom Fahrzeug ab: Im Kleinbus ist die Ortung deutlich schlechter als in den kleineren Fahrzeugen.
- Während der Hörversuche tritt anfänglich ein Lerneffekt ein: Die ersten Signale werden schlechter geortet als die letzten.
- Die Fähigkeit zur Richtungsortung der Signale unterliegt einer großen individuellen Streuung und korreliert mit der Selbsteinschätzung der Versuchspersonen.
- Die akustische Dämpfung der Fahrzeugkarosserie ist richtungs-, frequenz- und fahrzeugabhängig.

- Das Warnsignal wird durch Reflexion, Absorption und Interferenz des Schalls im Fahrzeuginnenraum erheblich verzerrt, es treten falsche binaurale Pegeldifferenzen auf.
- Die statisch (ohne Kopfbewegung) gemessene interaurale Pegeldifferenz an der Fahrerposition trägt nicht zur Richtungsartung bei.

### 3 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Studie wurden mit Versuchspersonen unter Versuchsbedingungen erzielt. Die Versuchspersonen waren auf die Signaleinwirkung vorbereitet, unabgelenkt und darauf konzentriert, das Signal richtig zu orten. Im Fahrzeug und auch von außerhalb gab es praktisch keine Nebengeräusche. Akustisch herrschten im Außenraum annähernd Freifeldbedingungen. Unter diesen im realen Verkehrsgeschehen nur äußerst selten auftretenden Bedingungen wurden die in Abschnitt 2.4 zusammengefassten Ergebnisse erzielt.

**Die korrekte Lokalisierung eines herannahenden, ein akustisches Warnsignal führenden Fahrzeugs allein aufgrund der auditorischen Information ist im Innenraum von Fahrzeugen in realen Verkehrssituationen als eher unwahrscheinlich zu betrachten. Die Ergebnisse implizieren insbesondere, dass der Führer eines Fahrzeugs mit Wegerecht gerade bei typischen Kreuzungssituationen keinesfalls davon ausgehen darf, dass er aufgrund des Warnsignals vom Querverkehr richtig geortet wird. Erst wenn eindeutiger Sichtkontakt besteht, sollte das Wegerecht ausgeübt werden. Die akustische Warneinrichtung ist nur dazu geeignet, Aufmerksamkeit bei den Verkehrsteilnehmern zu erregen. Die Lokalisierung eines bevorrechtigten Fahrzeugs kann mit ausreichender statistischer Sicherheit nur visuell erfolgen.**

### 4 Ausblick

Um die bei der auralen Richtungsartung in akustisch problematischen Umgebungen wirkenden auditorischen Mechanismen zu erforschen, sollten Hörversuche unter Aufzeichnung der intuitiven Kopfbewegung von Versuchspersonen unternommen werden. Dies sollte zunächst unter Freifeldbedingungen in einem hallarmen Messraum signalrichtungsabhängig erfolgen. Es wäre zu untersuchen, ob sich einheitliche Bewegungsmuster erkennen lassen. Sollte dies der Fall sein, könnte die Bewegung in der gleichen akustischen Umgebung robotisch mit einem Kunstkopfmesssystem nachgefahren werden und dabei ebenfalls signalrichtungsabhängig die interauralen Pegel- und Laufzeitunterschiede sowie Frequenzverzerrungen durch die HRTF gemessen werden. Anschließend könnte untersucht werden, ob Korrelationen zwischen Bewegungsmustern, Messergebnissen und richtigen oder falschen Richtungsartungen der Versuchspersonen

bestehen. Die Versuche könnten in anderen akustischen Umgebungen, z. B. auch in Fahrzeuginnenräumen, wiederholt werden.

Die beschriebenen Hörversuche könnten mit einem anschwellenden Signalpegel, ähnlich einem sich annähernden Fahrzeug, wiederholt werden. Hierbei sollten die VP eine Ortungsaussage erst dann machen, wenn sie glauben, die Signalrichtung sicher lokalisiert zu haben. Pegel und Zeit, bei der die Aussage erfolgt, sollten aufgezeichnet werden und können anschließend mit der Winkelabweichung der Richtungsangaben korreliert werden.

Interessant wäre natürlich auch noch die Untersuchung anderer Fahrzeugtypen (Lkw, Cabrio ...), der Einfluss verschiedener Fremdgeräusche (Radio, Sprache, Lüftungs- und Motorengeräusche) sowie die Verwendung anderer Signale, z. B. aus dem Ausland [FHVR].

### Danksagung

Mein Dank gilt zuallererst der Projektgruppe der Fachhochschule für öffentliche Verwaltung und Rechtspflege in Bayern (FHVR) unter Leitung von Christian Hecht und fachlicher Betreuung von Polizeidirektor Stefan Beil für die überaus konstruktive und reibungslose Zusammenarbeit, besonders bei der Planung und Durchführung der Hörversuche.

Meinem Laboringenieur, Jürgen Schafberger, gilt mein Dank für die ideenreiche und kompetente Instrumentierung des Versuchsaufbaus und seine ausdauernde Hilfsbereitschaft in allen Phasen des Projekts.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei der Hochschulleitung der FHVR für die organisatorische Unterstützung und die Zurverfügungstellung des Versuchsgeländes.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich beim Vorstand der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden für die großzügige finanzielle Förderung des Projekts im Rahmen des „Best Project“-Programms der Hochschule.

---

## Literaturverzeichnis

1. [Blauert] Blauert, J.: *Spatial Hearing*, Cambridge, MA: MIT Press. (1997)
2. [Böck] Dennis Böck, Jürgen Schafberger, Matthias Mändl: *Richtungshören in der Medianebene unter Modifizierung der Einflüsse von Schultern und Oberkörper*, DAGA Oldenburg, 2014
3. [Fastl] Hugo Fastl, Eberhard Zwicker: *Psychoacoustics – Facts and Models*, Springer, 2007
4. [FHVR] Projektabschlussbericht zum Thema: *Untersuchung der Richtungsörtung von akustischen Warneinrichtungen für bevorrechtigte Wegebenutzer im Innenraum von Kraftfahrzeugen*, Jahrgang 2011/14B, Fachhochschule für öffentliche Verwaltung und Rechtspflege in Bayern, Fachbereich Polizei, Sulzbach-Rosenberg, Mai 2014
5. [Golder] Golder: *Unfälle mit Fahrzeugen mit Sonderrechten*, VRR 9/2008
6. [Hellbrück] J. Hellbrück, W. Ellermeier: *Hören*, Hogrefe Verlag, Göttingen 2004
7. [Howard] Carl Q. Howard, Aaron J. Maddern and Elefterios P. Privopoulos: *Acoustic Characteristics for Effective Ambulance Sirens*; Vol. 39 August (2011) No. 2 Acoustics Australia
8. [Withington] Deborah J. Withington: *Localisable Alarms*, Extract from Human Factors in Auditory Warnings – Edited by Neville A Stanton & Judy Edworthy, Published by Ashgate Publishing Ltd 1999

## Kontakt:



**Prof. Dr. Matthias Mändl**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Labor für Akustik und Schallanalyse (LAuS)  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

[m.maendl@oth-aw.de](mailto:m.maendl@oth-aw.de)



**Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Schafberger**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Labor für Akustik und Schallanalyse (LAuS)  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

[j.schafberger@oth-aw.de](mailto:j.schafberger@oth-aw.de)

# Entwicklung von Kiosk-Systemen für ein Technikmuseum in Verbindung mit einer virtuellen Ausstellung im Web

Prof. Dr. Dieter Meiller  
Dr. Ulrike Laufer  
Sebastian Abele  
Daniel Kaiser

## Zusammenfassung

Für die Dauerausstellung „Made-in-Ostbayern“ des Industriemuseums im Kultur-Schloss Theuern wurden ein Webauftritt und Präsentationen auf Medienstationen mit Touch-Screen erarbeitet.

## Summary

An internet presence and presentations on touch-screen media stations were developed for the permanent exhibition “Made in Eastern Bavaria” of the Industrial Museum “Kultur-Schloss Theuern”.

## 1 Ausgangssituation

Das 1978 eröffnete Bergbau- und Industriemuseum in Theuern hat das Ziel, den Bergbau und die Industrie des gesamten ostbayerischen Raumes zu erforschen, zu dokumentieren und darzustellen. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt eine Neugestaltung der Ausstellung zum Thema „Made in Germany – Made in Ostbayern“, die die Geschichte der Industrie in der Oberpfalz im Zeitraum von 1800 bis heute beleuchtet und abbildet. Da das Internet heute eine große und immer wichtigere Rolle spielt und mittlerweile zu dem am meist genutzten Medium gehört, soll die Ausstellung auch durch einen ansprechenden Webauftritt präsentiert und unterstützt werden. Aber auch die Ausstellung an sich soll mit berührungsgesteuerten Medienstationen ausgestattet werden, die dem Besucher gewünschte und wichtige Informationen näherbringen. Ebenso bilden die Medienstationen einen kleinen Interaktionspunkt, der die Geschichte „greifbarer“ und so auch für die jüngere Generation interessanter macht. Die Umsetzung dieser Aufgabenstellung erfolgt in Kooperation mit der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden, welche dieses Thema sowohl in Bachelor- als auch in Projektarbeiten betreut.

## 2 Webseite

Ein Ziel des Projektes war die Erstellung einer Webseite, die dem Benutzer die Inhalte der Ausstellung ansprechend und umfassend erklären. Gerade die Vermittlung von Informationen über Ereignisse und deren Zusammenhang in Bezug auf Raum und Zeit soll dem Besucher einfach präsentiert werden. Ein weiteres Augenmerk liegt auf der Nutzbarkeit der Webseite auf mobilen Endgeräten. Wichtige Ausstellungsstücke sollen mit passenden oder entsprechenden Seiten verlinkt werden, damit diese von den Besuchern direkt auf ihren Endgeräten benutzt werden können. Um dies zu gewährleisten, müssen alle Inhalte unkompliziert erreichbar sein und auf allen Plattformen den gleichen Inhalt bieten. Benutzer von Smartphones sollen in der Ausstellung auf die selben Informationen zurückgreifen können, die auch der Benutzer eines Desktop-PCs erhält (Marcotte 2011). Die für das Web generierten Inhalte sollen von Suchmaschinen leicht zu erfassen sein und zu einer entsprechend guten Bewertung führen, um ein großes Spektrum an Interessierten zu erreichen. Dafür war eine genaue Analyse und Anwendung gängiger Techniken der Suchmaschinenoptimierung nötig (Pelzer 2013).

Die Umsetzung dieser Aufgaben sowie das Erstellen des HTML- und CSS-Grundgerüsts erfolgte durch Herrn Sebastian Abele, der dies in seiner Bachelorarbeit umsetzte. Die Einpflegung der Inhalte erfolgte dann im Rahmen des praktischen Studiensemesters von Daniel

Kaiser, das er im Kultur-Schloss Theuern ableistete. In enger Absprache mit der Museumskuratorin, Frau Dr. Laufer, und der Museumsleitung wurden die Texte erarbeitet und zusammen mit Bildmaterial eingefügt und so die Webseite komplettiert und online gebracht.



Abbildung 1: Homepage <http://made-in-ostbayern.de>

### 3 Medienstationen

Einige besondere Inhalte sollen während der Ausstellung auch auf sogenannten Medienstationen präsentiert werden und benutzbar sein. Dazu zählen Biografien, Videos und eine Version der Webseite zur Ausstellung. Da aus Kostengründen hier keine teuren, kommerziellen Kiosksysteme angeschafft wurden, sondern kleinere Minicomputer (Raspberry Pi), werden die Inhalte in einem Web-Browser angezeigt, der den Kioskmodus unterstützt (Raspberry Pi Foundation 2014). Dieser verhindert das Aufrufen einer Navigationsleiste oder sonstiger Elemente des Browsers, wodurch ein Surfen durch das Netz unmöglich gemacht wird. Besonders eignen sich hierfür Chrome von Google und der Browser Firefox von Mozilla.

Hauptinhalt der Medienstationen sind zum einen Videoportraits über erfolgreiche Unternehmensgründer in der Oberpfalz. Diese wurden von Daniel Kaiser interviewt und zu ihrem privaten und geschäftlichen Werdegang befragt. Des Weiteren haben Studenten im Rahmen einer Projektarbeit vertiefende Inhalte zu den einzelnen Kapiteln der Ausstellung erstellt. So wurde zum Beispiel ein Zeitzeuge interviewt, der seine Geschichte über seine Flucht und den Wiederaufbau nach dem Krieg erzählt. Hörspiele und Zusammenschnitte von Bildern und Dokumenten untermalen weitere Kapitel der Ausstellung. Durch den Einsatz dieser digitalen Medien wird die Ausstellung modern und interessant, auch für junge Besucher.

---

## Quellenangaben

1. Webseite Made-In-Ostbayern (2014). URL: <http://made-in-ostbayern.de>
2. Marcotte, E. (2011): *Responsive Webdesign*. A Book apart. ISBN: 978-0-9844425-7-7
3. Pelzer, G., Düssel, M. (2013). *Online-Marketing mit Google – Mit SEO und SEA werden Sie gefunden*. Pearson. ISBN: 978-3-8273-3184-7
4. Raspberry PI Foundation (2014). Raspberry PI URL: <http://www.raspberrypi.org>

## Kontakt:



**Prof. Dr. Dieter Meiller**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien  
und Informatik  
Studienfachberater Bachelor  
Angewandte Informatik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

[d.meiller@oth-aw.de](mailto:d.meiller@oth-aw.de)



**Dr. Ulrike Laufer**

Kultur-Schloss Theuern  
Bergbau- und Industriemuseum  
Ostbayern  
Portnerstraße 1  
92245 Kümmersbruck

[ulrike.laufer@museumtheuern.de](mailto:ulrike.laufer@museumtheuern.de)



**Sebastian Abele**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien  
und Informatik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

**Daniel Kaiser**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien  
und Informatik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

## Zusammenfassung

Im Forschungsprojekt „Rohstoffbedarf erneuerbarer Energien“ des *Technologie- und Wissenschaftsnetzwerks Oberpfalz (TWO)* wird der Bedarf mineralischer und metallischer Rohstoffe für den globalen Ausbau der erneuerbaren Energien untersucht. Auf Grundlage von Materialbilanzen entsprechender Energieanlagen und dem prognostizierten Ausbaupotenzial regenerativer Technologien wurde der globale Rohstoffbedarf der Windenergie, der Photovoltaik und der Elektromobilität für den Zeitraum von 2012 bis 2030 abgeschätzt. Dabei zeigte sich, dass der Mengenbedarf der fünf Elemente Dysprosium, Kobalt, Lithium, Neodym und Silber mehr als zehn Prozent ihrer kumulierten Jahresproduktion beträgt. Die zu den Seltenen Erden gehörenden Elemente Dysprosium und Neodym werden für die Herstellung von Hochleistungsmagneten benötigt, die in Windenergieanlagen und Elektrofahrzeugen verbaut werden. Lithium und Kobalt finden in den Batterien von Elektromobilen Verwendung. Der prognostizierte Bedarf an Silber erklärt sich aus dem Einsatz als Kontaktmetall bei der Solarmodulproduktion.

Aufgrund der begrenzten Produktionskapazitäten Seltener Erden wird empfohlen, Permanentmagnete nur dort einzusetzen, wo ihr technologischer Nutzen unverzichtbar ist. Da die Magnete vor allem zu Einsparungen bei Gewicht und Baugröße von Generatoren und Elektromotoren führen, ist deren Einsatz in Offshore-Windanlagen und Elektromobilen als sinnvoll zu erachten. Bei Windenergieanlagen an Land sollte auf alternative Anlagenkonzepte gesetzt werden, die ohne Seltene Erden auskommen. Für Lithium sind potenziell ausreichende Reserven vorhanden, um eine steigende Nachfrage in den nächsten Jahren abzudecken. Die Entwicklung der Kobaltreserven sollte jedoch genau beobachtet werden, da derzeit ein Großteil in politisch instabilen Regionen gefördert wird. Aufgrund der sehr geringen Reichweite und den negativen Umweltauswirkungen bei der Gewinnung von Silber ist eine Substitution des Edelmetalls unbedingt anzustreben.

## Abstract

The research project „Raw Material Demand of Renewable Energies“ carried out by the Technology and Science Network Upper Palatinate (TWO) investigates the demand of mineral and metallic raw materials for the global development of renewable energies. On the basis of material balances of respective energy systems and the forecast development potential of regenerative energies, the global raw material demand resulting from wind energy, photovoltaics and electromobility was estimated for the period from 2012 to 2030. The study found that the required quantity of the five elements dysprosium, cobalt, lithium, neodymium and silver accounted for more than 10% of their accumulated annual production. The rare earth elements dysprosium and neodymium are required for the production of high-performance magnets used for wind energy plants and electric vehicles while lithium and cobalt are used for the batteries in electric vehicles. The forecast demand for silver results from its application as a contact metal for the production of solar modules.

In view of the limited production capacities of rare earth elements, it is recommended that permanent magnets are only applied in those areas where their technological benefit is indispensable. As the magnets help to reduce the weight and size of generators and electric motors, their application in offshore wind turbines and electric vehicles is deemed reasonable. For onshore wind turbines, however, alternative design concepts should be considered that can do without rare earths. There are potentially sufficient reserves of lithium to satisfy the demand within the next years. The development of cobalt reserves, however, should be carefully observed since a large proportion of it is mined in politically unstable regions. Due to the limited range of silver and the negative impact of silver extraction on the environment, its substitution is strongly recommended.

## 1 Einleitung

Für den Übergang hin zu einer ressourceneffizienten und umweltverträglichen Wirtschaft leisten Zukunftstechnologien einen unverzichtbaren Beitrag. Insbesondere Erneuerbare Energien, Elektromobilität und Effizienztechnologien sind von großer Bedeutung für das Gelingen der Energiewende. Neben den etablierten Industrienationen setzen auch wirtschaftlich aufstrebende Staaten wie China inzwischen vermehrt auf Wind- und Sonnenenergie, um ihren Energiebedarf zu decken und den Umweltschutz voranzutreiben [1]. Allerdings sind grüne Technologien rohstoffintensiv in ihrer Herstellung und gerade in Deutschland und den EU-Staaten stark abhängig von Importen [2]. Aufgrund der weltweit zunehmenden Konkurrenz um knappe Güter wurde deshalb die zukünftige Versorgungssicherheit mit Technologierohstoffen für die Energiewende auch und gerade für den Wirtschaftsstandort Deutschland zu einem relevanten Thema [3]. Ziele und Realisierungspläne des künftigen Energiesystems dürfen sich folglich nicht nur an den Potenzialen zur energetischen Nutzung von Biomasse, Wind, Solarstrahlung, Geothermie und Wasserkraft orientieren. Die weltweit vorhandenen natürlichen Vorkommen an metallischen und mineralischen Rohstoffen, die aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften breite und vielfache Verwendung in komplexen Hightech-Anwendungen finden, sind ebenfalls nicht unbegrenzt verfügbar und rücken konsequenterweise immer mehr in den Blickpunkt [4 – 9]. Im laufenden TWO-Projekt „Exemplarische Untersuchungen zum Rohstoffbedarf der Energiewende“ wird der

Rohstoffbedarf ausgewählter Technologien zur Nutzung Erneuerbarer Energien betrachtet und mit der gesamten globalen Förderung sowie den bekannten natürlichen Vorräten verglichen. Bei den hier dargestellten Ergebnissen handelt es sich zu großen Teilen um Auszüge aus einem in Druck befindlichen Artikel der *Chemie Ingenieur Technik*, in dem zusätzlich noch Aspekte zur politischen und ökologischen Situation der Rohstoffförderländer einfließen.

## 2 Methodik

Im Projekt werden insbesondere die Technologien Windenergie, Photovoltaik und Elektromobilität genauer untersucht. Im Hinblick auf Art und Menge der eingesetzten Rohstoffe unterscheiden sich diese drei Technologien relativ deutlich von Anlagen zur Nutzung der übrigen erneuerbaren Energieträger Biomasse, Wasserkraft und Geothermie, bei denen im Wesentlichen konventionelle Stahl- und Verbundwerkstoffe, z. B. Kesselstähle, zum Einsatz kommen. Die Abschätzung des zukünftigen Bedarfs an mineralischen Rohstoffen beruht auf Daten aus Ökobilanzen, in denen die in den Anlagen verbauten Materialien inventarisiert vorliegen. Außerdem dienen Prognosen aus einschlägigen Studien über den zu erwartenden Ausbau dieser Technologien als Datengrundlage. Mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse ist es möglich, nach Abgleich mit den Fördermengen und den Reserven der betreffenden Rohstoffe eventuelle Mengenrestriktionen und Nutzungskonflikte beim Ausbau erneuerbarer Energien aufzuzeigen.

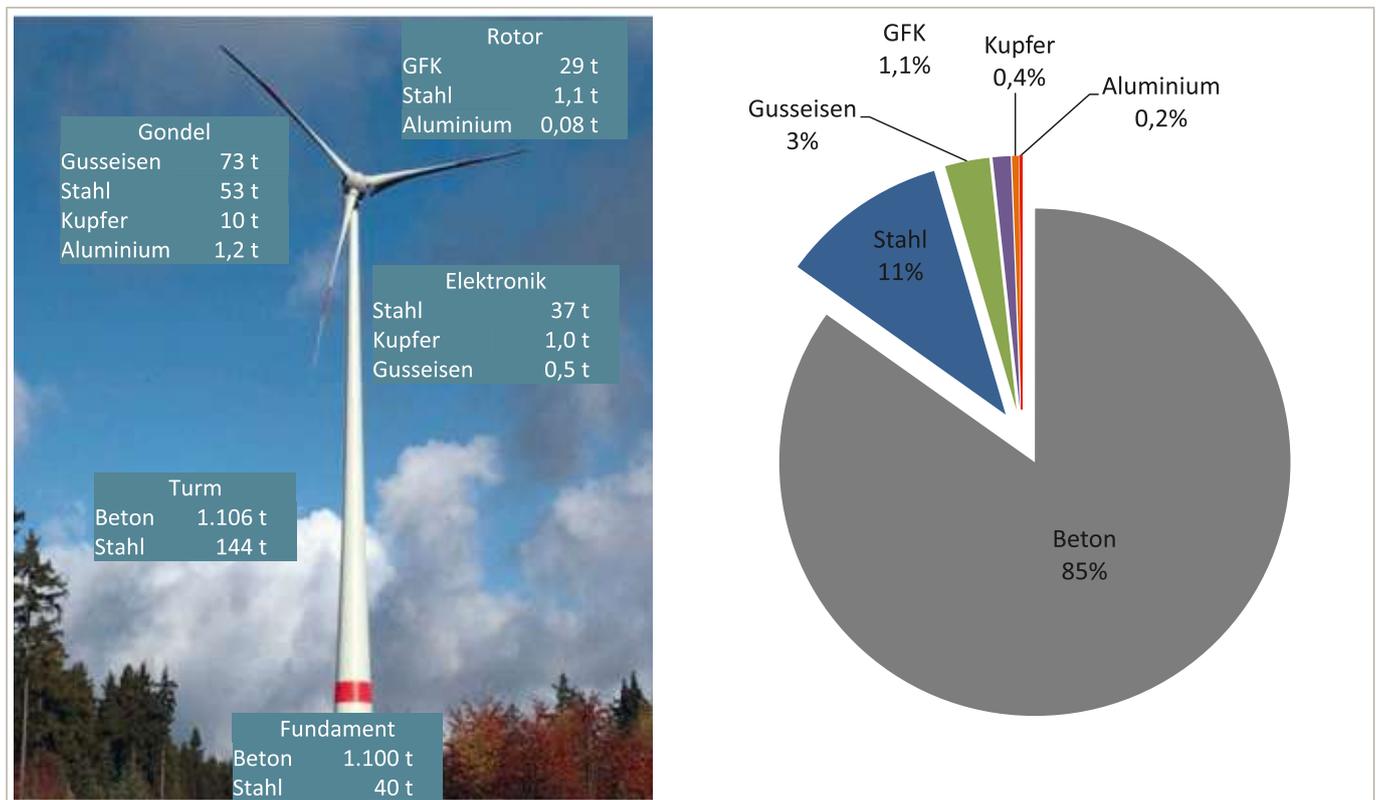


Abbildung 1: Materialbilanz einer Windenergieanlage in Witzlricht bei Freudenberg (Oberpfalz), [10] und eigene Daten

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Windenergieanlagen

Zunächst wurde der Stand der Kenntnis über den Rohstoffbedarf von Windenergieanlagen ermittelt. Dazu erfolgte eine detaillierte Literaturrecherche, insbesondere von Ökobilanzen und Lebenszyklusanalysen. Die Informationen wurden inhaltlich und graphisch aufbereitet. Als Referenzanlagen wurden zwei regionale Windenergieanlagen in Witzlricht bei Freudenberg in der Oberpfalz rohstofflich bilanziert. Dabei handelt es sich um zwei Enercon Anlagen des Typs E82 E2. Als Bilanzgrenze wurde der Netzanschlusspunkt gewählt. In Abbildung 1 sind die Ergebnisse der Materialbilanzierung dargestellt. Ein besonderes Augenmerk galt außerdem dem Bedarf an Seltenen Erden für permanenterrregte Generatoren. Hierbei dienten die Ökobilanzen zweier Windparks mit Anlagen der Firma Vestas als Quelle.

Abbildung 2 stellt exemplarisch die wesentlichen Materialkomponenten dieser Windenergieanlagen gegenüber. Die Hauptgewichtskomponenten sind Beton und Stahl für Fundament und Turm. Die Anlagen des Typs V112 der Firma Vestas und des Typs E82 E2 von Enercon enthalten außerdem erhebliche Mengen Aluminium und Kupfer. Besonderes Interesse gilt dem Generator der Vestas-Anlage, in dem rund 0,5 Tonnen Permanentmagnete verbaut sind. Man geht davon aus, dass diese Magnete etwa 30 Prozent Neodym und drei Prozent Dysprosium enthalten. In der Drei-Megawatt-Anlage sind somit 150 Kilogramm Neodym und 15 Kilogramm Dysprosium verbaut [11, 12]. Die Enercon-Anlage kommt im Gegensatz dazu ohne den Einsatz Seltener Erden aus. Sie verfügt über einen getriebelosen, elektrisch erregten Generator, der allerdings im Vergleich mit Permanentmagnetgeneratoren mehr Kupfer enthält [10, 13].

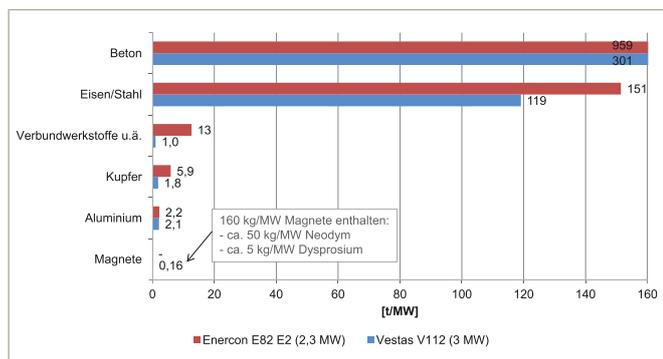


Abbildung 2: Rohstoffbedarf einer Enercon E82-E2 und einer Vestas V112 Windenergieanlage, Daten: [10, 12]

#### 3.2 Photovoltaik

Bei der Materialanalyse von Photovoltaikanlagen wurde in Zusammenarbeit mit der Firma *Grammer Solar* eine klassische 5-Kilowatt-Hausdachanlage und eine größere

Freiflächenanlage mit 1,6 Megawatt bilanziert. Weitere Datengrundlagen lieferte eine umfassende Literaturrecherche. Vor allem in Berichten zum Thema Modulrecycling fanden sich dabei Informationen bezüglich der Zusammensetzung kristalliner Module. Zusätzliche Detailinformationen konnten außerdem über den Modullieferanten der Solarmodule Aleo Solar und den Montageentwickler und Installateur *Bosch Rexroth* gesammelt werden.

Bei den Solaranlagen sind im Wesentlichen drei Hauptkomponenten zu unterscheiden: der Generator, das Montagesystem und die Verkabelung. Weitere Bestandteile wie Frequenzumrichter oder Transformatoren wurden noch nicht betrachtet. Der Generator umfasst die Summe aller verbauten PV-Module. In dem in Abbildung 3 dargestellten Fall einer Freiflächenanlage handelt es sich dabei um Module auf der Basis von kristallinem Silizium. Den größten Anteil am Gewicht der Anlage haben Stahl und Aluminium für das Montagesystem und das Solarglas der Module. Außerdem enthalten Kabel und Kontakte der Anlage 1,4 Tonnen Kupfer und 50 Kilogramm Silber. Silber wird häufig in Kontaktpasten bei der Herstellung von Solarzellen verwendet, wobei ein Bedarf von ca. 120 Milligramm Silber pro Solarzelle entsteht [14].

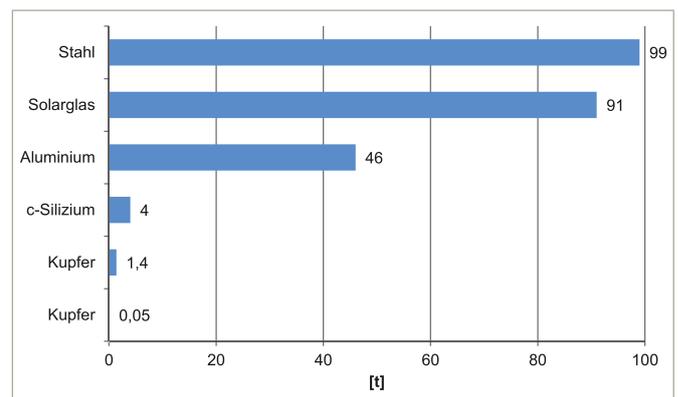


Abbildung 3: Rohstoffbilanz einer Freiflächenanlage mit 1,6 MW Nennleistung.

Abbildung 4 zeigt die wesentlichen Rohstoffkomponenten einer Hausdachanlage. Enthalten sind die Module, das Montagesystem, die Verkabelung der gesamten Anlage und der Wechselrichter. Die Module wurden auf ein zweilagiges Schienensystem aus Aluminium montiert. Das Gesamtgewicht der Anlage beträgt ca. 560 Kilogramm. Die Hauptgewichtskomponenten sind Solarglas und Aluminium. Bei Aluminium entfallen ca. 105 Kilogramm auf die Montage und ca. 75 Kilogramm auf die Modulrahmen. Die restlichen 20 Kilogramm sind im Wechselrichter enthalten. Das Wafermaterial der Solarzellen besteht aus insgesamt 13 Kilogramm kristallinem Silizium. Verkabelung und Wechselrichter der Anlage enthalten insgesamt acht Kilogramm Kupfer. Für die Kontaktierung der Module wurde ca. 160 Gramm Silber benötigt.

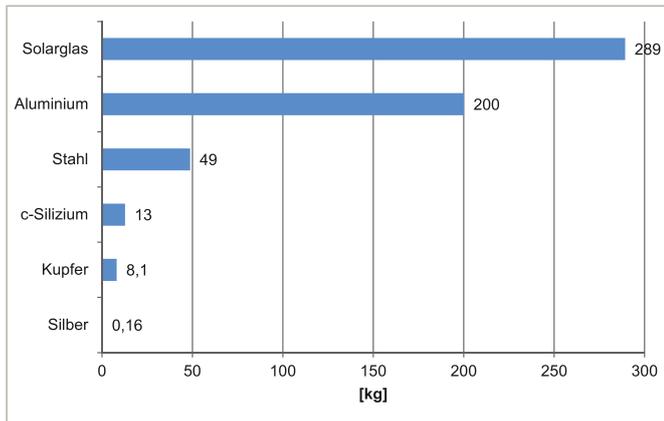


Abbildung 4: Rohstoffbilanz einer Hausdachanlage mit 5 kW Nennleistung

Das Projekt umfasste neben der möglichst ganzheitlichen Bilanzierung von erneuerbaren Energieanlagen auch die Analyse ausgewählter Kernkomponenten. In diesem Rahmen wurde die rohstoffliche Zusammensetzung eines PV-Wechselrichters genauer untersucht. Dazu wurde der Wechselrichter in seine Bestandteile zerlegt. In Abbildung 5 ist die bestückte Hauptplatine des Wechselrichters zu sehen. Die elektronischen Bauteile wurden demonstert und inventarisiert. Mithilfe von Herstellerangaben konnte anschließend die rohstoffliche Zusammensetzung des Wechselrichters nahezu vollständig nachvollzogen werden.

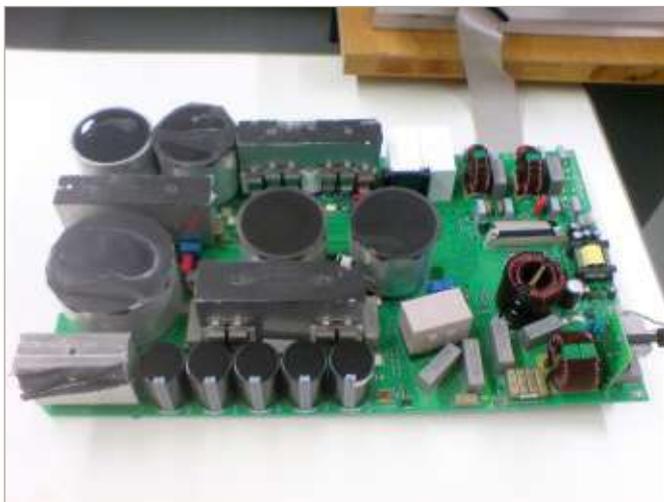


Abbildung 5: bestückte Leiterplatte des untersuchten Photovoltaik-Wechselrichters.

Abbildung 6 zeigt die Rohstoffbilanz des Wechselrichters. Hauptgewichtskomponente sind Aluminium, Kupfer und Eisenwerkstoffe. Neben Zinn sind in der Elektronik unter anderem auch geringe Mengen Gold, Silber, Chrom und Kobalt enthalten.

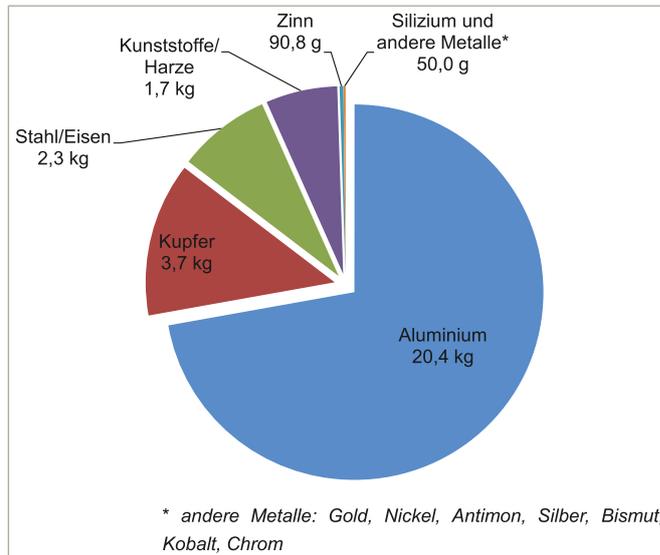


Abbildung 6: Materialbilanz des PV-Wechselrichters

### 3.3 Elektromobilität

Die für diese Untersuchung entscheidenden Komponenten von Elektrofahrzeugen sind der Elektromotor und das elektrische Speichersystem. Bei den Motoren handelt es sich meist um permanentmagnetisch erregte Antriebsmaschinen, in denen genauso wie in Generatoren von Windenergieanlagen Seltene Erden enthalten sind. Man geht davon aus, dass pro Motor ca. zwei Kilogramm Magnetmaterial verbaut werden, in dem ca. 600 Gramm Seltene Erden enthalten sind [15]. Des Weiteren enthält der Elektromotor eines elektrisch betriebenen PKW ca. zehn Kilogramm Kupfer [16]. In den Batterien werden meist Lithiummetalloxide als Kathodenmaterial eingesetzt. Zudem enthalten die Speichersysteme Kupfer für Kontakte und Steuerelektronik. Das elektrische Speichersystem eines klassischen PKW wiegt insgesamt etwa 200 Kilogramm [17], der Motor mit Wechselrichter und Stromverteilersystem kann mit ca. 80 Kilogramm veranschlagt werden [16]. In Tabelle 1 ist der Rohstoffgehalt von Antriebsaggregat und Batteriesystem eines typischen Elektrofahrzeugs aufgelistet. Das Kathodenmaterial der Batterie besteht in dem Fall aus einem Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (Li-NMC).

Tabelle 1: Wesentliche Rohstoffkomponenten in Antriebsaggregat und Batterie [16–18].

Antriebsaggregat		Batteriesystem	
<i>Motor, Wechselrichter, PDU*, Ladebatterie</i>		<i>Kathodenmaterial (li-NMC), Verkabelung</i>	
Stahl	35, kg	Lithium	2,8 kg
Aluminium	22,7 kg	Kobalt	7,8 kg
Kupfer	10,6 kg	Mangan	7,2 kg
NdFeB-Magnete	1,8 kg	Nickel	7,8 kg
Neodym	0,54 kg	Kupfer	15,8 kg
Dysprosium	0,054 kg		
<i>*power distribution unit (Stromverteilersystem)</i>			

### 3.4 Ausbauszenarien

Um den zukünftigen Rohstoffbedarf der aufgeführten Technologien abschätzen zu können, müssen Annahmen über das künftige Ausbaupotenzial getroffen werden. Bei den hier vorgestellten Ergebnissen wird mit relativ hohen Zuwächsen bei Windenergie, Photovoltaik und Elektromobilität bis ins Jahr 2030 gerechnet. Als Referenz für den Ausbau von Windenergie und Photovoltaik dient die Greenpeace-Studie »Energy Revolution – a sustainable world energy outlook« [19]. Das darin vorgestellte Szenario geht unter anderem davon aus, dass die erneuerbaren Energien einen elementaren Beitrag zum Klimaschutz leisten werden, und deshalb in den nächsten Jahrzehnten einen globalen Boom erfahren. Konkret rechnet Greenpeace mit einem Ausbau der installierten Leistung durch Windenergieanlagen auf ca. 2900 Gigawatt bis 2030. Zum selben Zeitpunkt sollen Photovoltaikanlagen weltweit eine Gesamtleistung von 1760 Gigawatt Strom produzieren [19].

Bezüglich des Potenzials der Elektromobilität im globalen Maßstab gibt es nur wenige klare Abschätzungen. In Deutschland zum Beispiel ist es politisches Ziel bis 2030 sechs Millionen Elektrofahrzeuge auf die Straßen zu bringen [20]. Schätzungen im globalen Maßstab gehen davon aus, dass bis 2030 knapp sechzig Millionen Elektrofahrzeuge und Plug-In-Hybridfahrzeuge verkauft werden [21].

### 3.5 Abschätzung des Rohstoffbedarfs

Für die Abschätzung des Rohstoffbedarfs der betrachteten Technologien bis 2030 wurden einige vereinfachende Annahmen getroffen. Bei der Betrachtung von Windenergie wurden Getriebeanlagen mit Permanentmagnetgenerator als dominierende Technologie angenommen. Dementsprechend wurde der Anteil dieser Anlagen an der gesamten installierten Leistung auf 60 Prozent geschätzt. Die restlichen 40 Prozent der weltweiten Onshore-Windenergie bis 2030 werden in dem Szenario durch getriebe-lose, fremderregte Anlagen bereitgestellt. Für den Ausbau der Photovoltaik wurde festgelegt, dass die kumulierte Anlagenleistung zur einen Hälfte von Hausdachanlagen und zur anderen von Freiflächenanlagen generiert wird. Dies ist vor allem in Bezug auf den Materialbedarf für die Montage relevant, da auf Freiflächenanlagen wesentlich mehr Stahl und Aluminium verbaut wird als auf Dachanlagen [22]. Ferner erfasst das Modell ausschließlich den Rohstoffbedarf für PV-Zellen auf der Basis von kristallinem Silizium. Andere Technologien wie etwa Dünnschichtzellen wurden hierbei vernachlässigt, da deren Marktanteil seit einigen Jahren bei rund zehn Prozent stagniert [23]. Aufgrund ihres spezifischen Rohstoffbedarfs (z. B. an Gallium, Indium, Cadmium, Tellur), der bereits in anderen Arbeiten untersucht wurde, ist die

weitere Marktentwicklung dieser Technologien allerdings aufmerksam zu beobachten und ggf. zukünftig zu berücksichtigen [4, 24]. Der Rohstoffbedarf der Elektromobilität beruht im Wesentlichen auf den in Tabelle 1 dargestellten Daten.

Die Modellrechnung zeigt einen hohen Bedarf an bestimmten mineralischen und metallischen Rohstoffen auf. Zu diesen versorgungskritischen Rohstoffen zählen den Ergebnissen zufolge vor allem die Seltenen Erden Neodym und Dysprosium sowie Lithium, Kobalt und Silber. In Abbildung 7 sind die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchung dargestellt. Dabei wird zum einen der Anteil des Bedarfs der betrachteten Technologien an der kumulierten Produktion im gewählten Betrachtungszeitraum ausgewiesen. Unter der kumulierten Produktion sind hierbei die im Zeitraum von 2012 bis 2030 insgesamt geförderten Mengen des jeweiligen Rohstoffs zu verstehen. Dabei wurde vereinfachend angenommen, dass sich die Fördermengen von 2012 an statisch verhalten. Zum anderen wird der Bedarf auch als Anteil an den derzeitigen Reserven berechnet.

Deutliche Ausschläge liefern dabei die Seltenen Erden Neodym und Dysprosium. Es handelt sich dabei um den Bedarf für die Produktion von Permanentmagneten für Windenergieanlagen und Elektrofahrzeuge. Der Bedarf an der kumulierten Produktion beträgt in diesem Modell bei Neodym 26 Prozent, bei Dysprosium über 30 Prozent. Der Anteil an den Reserven liegt bei den Seltenen Erden im Promillebereich. Der hohe Bedarf an Lithium und Kobalt, der jeweils um die 25 Prozent der Fördermengen verein- nahmt, lässt sich von der Produktion von 60 Millionen Elektrofahrzeugen bis 2030 ableiten. Der hohe Bedarf an Silber, der über 13 Prozent der Produktion und fast 12 Prozent der Reserven ausmacht, ist der Kontaktierung von PV-Zellen zuzurechnen.

Etwas über drei Prozent der weltweiten kumulierten Produktion von Kupfer wird schätzungsweise für die hier betrachteten Erneuerbaren Energien Verwendung finden. Da somit das Kritikalitätsmerkmal der wirtschaftlichen Bedeutung nicht erfüllt ist, wird dieses Element in den weiteren Darstellungen außer Acht gelassen. Dennoch ist dieses Ergebnis in Anbetracht der vielseitigen Anwendungen des Metalls und der hohen Verbrauchsmenge ein beachtlicher Wert. Es wird bei Kupfer zwar nicht mit Versorgungsengpässen gerechnet, doch könnte die erhöhte Nachfrage durch Erneuerbare Energien eine Steigerung des Kupferpreises bewirken. Damit wäre im Fall von Kupfer zumindest mit wirtschaftlichen Auswirkungen auf die Herstellung von entsprechenden Energieerzeugungsanlagen zu rechnen.

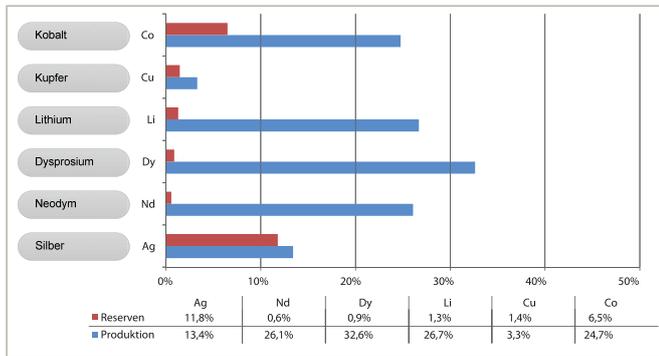


Abbildung 7: Relativer Rohstoffbedarf von Windenergie, Photovoltaik und Elektromobilität bis 2030.

#### 4 Diskussion und Fazit

Die Untersuchungen zeigen, dass der Ausbau der Erneuerbaren Energien in den nächsten Jahren neben der Verwendung biogener Rohstoffe auch mit einem hohen Bedarf mineralischer Rohstoffe einhergehen wird. Längerfristige Prognosen zum globalen Ausbaupotenzial der betrachteten Technologien sind zwar mit Unsicherheiten verbunden und von vielen Faktoren abhängig. Ferner beruhen die Betrachtungen auf der Annahme einer statischen Rohstoffproduktion bezogen auf das Jahr 2012. In der Realität hat man es jedoch mit dynamischen Rohstoffmärkten zu tun, die auf die steigende Nachfrage erfahrungsgemäß mit einer Erhöhung der Fördermengen, einer Erschließung neuer Vorräte und auch mit einer Substitution knapper Rohstoffe reagieren.

Ein weiteres Problem sind lückenhafte Datengrundlagen, was sich insbesondere bezüglich der Beurteilung Seltener Erden auswirkt. Die 17 Elemente dieser Rohstoffgruppe werden in sechs hauptsächlichen Anwendungsgebieten genutzt (Hochleistungsmagnete, Katalysatoren, Batterien, Schleifmittel, Legierungen, Gläser) [9]. Unter anderem aufgrund der gemeinsamen Verarbeitung in Koppelproduktion nehmen nur wenige Quellen eine eindeutige Zuordnung der Produktions- und Verwendungsmengen zu einzelnen Elementen vor.

Trotz dieser Einschränkungen liefern die Ergebnisse Hinweise auf mögliche Kritikalitäten bei der Rohstoffversorgung und die daraus zu ziehenden Schlüsse. Bei Hochleistungspermanentmagneten sind Verfügbarkeitseinschränkungen insbesondere für Dysprosium zu erwarten [25]. Weiterhin sollten Hochleistungspermanentmagnete bevorzugt dort Einsatz finden, wo sie besondere Vorteile bringen. Hinsichtlich Baugröße und Gewicht ist dies vor allem bei der Elektromobilität der Fall, bei Offshore-Windkraftanlagen kommt auch die geringere Stör- und Wartungsanfälligkeit von permanenten getriebelosen Generatoren zum Tragen. Demgegenüber bestehen bei Windkraftanlagen an Land durchaus bewährte technologische Alternativen zum Einsatz von Permanentmagneten.

Erhebliche Anteile von jeweils weit über 20 Prozent der kumulierten Produktion wird die Verwendung von Kobalt und Lithium in den Akkumulatoren von Elektrofahrzeugen in Anspruch nehmen, falls der gewünschte Ausbau dieses Mobilitätssegmentes Realität werden sollte. Dabei sind für Lithium durchaus ausreichende Reichweiten vorhanden, sodass hier eher geringere Verfügbarkeitseinschränkungen zu erwarten sind. Demgegenüber bestehen bei Kobalt erhebliche Versorgungsrisiken, zumal knapp 50 Prozent der aktuellen Produktion aus der Demokratischen Republik Kongo stammen [26]. Hier bestehen allerdings mehrere Möglichkeiten, dieses kritische Element in den Elektrodensystemen von Lithium-Ionen-Akkus zu substituieren [27].

Bei der Photovoltaik dominiert derzeit die Verwendung von Zelltypen auf Basis von kristallinem Silizium [23]. Zur Kontaktierung wird Silber verwendet, das eine sehr geringe Reichweite und die höchsten Umweltauswirkungen bei der Rohstoffgewinnung aufweist. Die Weiterentwicklung von silberfreien Kontaktpasten ist deshalb ausdrücklich zu empfehlen [28]. Eine verstärkte Anwendung von Dünnschichttechnologien würde den vermehrten Einsatz von Cadmium, Gallium, Indium und Tellur nach sich ziehen. Diese Bauart ist derzeit noch von untergeordneter Bedeutung, weshalb die Elemente hier nicht explizit betrachtet wurden. An anderer Stelle vorgenommene Abschätzungen ihrer Verbrauchsmengen sollten in Abhängigkeit von der weiteren Marktentwicklung periodisch validiert und aktualisiert werden [24].

Generell charakterisieren sich Rohstoffmärkte durch dynamischen Wandel und unterliegen laufenden Preis-, Angebots- und Lieferschwankungen. So stößt auch diese Untersuchung – wie sämtliche Kritikalitätsstudien – an ihre Grenzen. In diesem Zusammenhang wird auf die Notwendigkeit hingewiesen, sämtliche Ergebnisse vor diesem Hintergrund zu bewerten und aufgrund ihrer statischen Annahmen in regelmäßigen Abständen neu zu überprüfen und nachzujustieren.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass sich mögliche Nutzungskonkurrenzen keineswegs auf den Einsatz einzelner Rohstoffe in Erneuerbaren Energien oder sonstigen »grünen Technologien« beschränken. Eine vielbeachtete Analyse von 32 Zukunftstechnologien, darunter auch Informations- und Kommunikationstechnik sowie Medizintechnik, kam zu dem Schluss, dass der Rohstoffbedarf für solche modernen Technologien im Jahr 2030 bei einzelnen Elementen mehr als das Sechsfache der bisherigen Jahresproduktion betragen könnte, wobei Verbrauchssteigerungen von konventionellen Einsatzgebieten noch gar nicht berücksichtigt wurden [4]. Der Untersuchungsrahmen in dem noch laufenden Projekt wurde daher auf die Verwendung von seltenen

Rohstoffen in Produkten jenseits der Erneuerbaren Energien erweitert. Zurzeit wird dafür die analytische Ausstattung an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden ergänzt, um die entsprechenden Elemente in diesen Produkten auch nachweisen zu können.

## Danksagung

Die hier dargestellten Forschungsarbeiten wurden mit finanzieller Unterstützung des Technologie- und Wissenschaftsnetzwerks Oberpfalz (TWO) durchgeführt.

---

## Literaturverzeichnis

- [1] Hong, L., Zhou, N., Fridley, D., Raczkowski, C.: *Assessment of China's renewable energy contribution during the 12th Five Year Plan*, Energy Policy. 62 (2013), S. 1533–1543
- [2] Huy, D., Andruleit, H., Babies, H.-G., Homberg-Heumann, D., Meßner, J., Neumann, W., Röhling, S., Schauer, M., Schmidt, S., Schmitz, M., Sievers, H.: *Deutschland – Rohstoffsituation 2012*, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover 2013
- [3] Mocker, M., Faulstich, M.: *Strategische Rohstoffe für den Ausbau der Erneuerbaren Energien*, in: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e. V. (Hrsg.), 26. Symposium Fotovoltaische Solarenergie. (02.-04. März 2011, Kloster Banz, Bad Staffelstein), Tagungsband, OTTI, Regensburg 2011, S. 554–560
- [4] Angerer, G., Erdmann, L., Marscheider-Weidemann, F., Scharp, M., Lüllmann, A., Handke, V., Marwede, M.: *Rohstoffe für Zukunftstechnologien*, ISI-Schriftenreihe »Innovationspotenziale«, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2009
- [5] Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K.-H., Haberl, H., Fischer-Kowalski, M.: *Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century*, Ecological Economics 68 (2009), S. 2696–2705
- [6] Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (Hrsg.): *Kritische Rohstoffe für Deutschland*, Berlin 2011
- [7] Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU): *Umweltgutachten 2012: Verantwortung in einer begrenzten Welt 2012*, Erich Schmidt Verlag, Berlin 2012
- [8] United Nations Environment Programme (Hrsg.): *Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure*, Nairobi 2013.
- [9] Zepf, V., Reller, A., Rennie, C., Ashfield, M., Simmons, J.: *Materials critical to the energy industry*, BP, Augsburg 2014
- [10] Zimmermann, T.: *Parameterized tool for site specific LCAs of wind*, International Journal of Life Cycle Assessment 18 (2013), S- 49–60.
- [11] Moss, R., Tzimas, E., Kara, H., Willis, P., Kooroshy, J.: *Critical Metals in Strategic Energy Technologies*, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport, Luxemburg 2011
- [12] D’Souza, N., Gbegbaje-Das, E., Shonfield, P.: *Life Cycle Assessment of Electricity Production from a Vestas V112 Turbine Wind Plant*, PE North West Europe ApS, Copenhagen 2011
- [13] Enercon GmbH: *Enercon Anlagen erzeugen ohne Neodym sauberen Strom* – Pressemitteilung, Aurich 2011
- [14] Fuhs, M.: *Kupfer statt Silber*, www.photovoltaikeu, Berlin 2012, [http://www.pv-magazine.de/nachrichten/details/beitrag/pvsec-kupfer-statt-silber\\_100009117/](http://www.pv-magazine.de/nachrichten/details/beitrag/pvsec-kupfer-statt-silber_100009117/) [Zugriff am 12.08.2014]
- [15] Berkel, M.: *Abschied von Seltenen Erden*, www.heise.de, Hannover 2013. <http://www.heise.de/tr/artikel/Abschied-von-den-Seltenen-Erden-1827791.html> [Zugriff am 12.08.2014].
- [16] Habermacher, F.: *Modelling material inventories and environmental impacts of electric passenger cars*, Master Thesis an der ETH Zürich, Zürich 2011
- [17] Buchert, M., Jenseit, W., Merz, C., Schüler, D.: *Ökobilanz zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterien (LithoRec)*, Öko-Institut e.V., Freiburg 2011
- [18] Dunn, J.B., Gaines, L., Barnes, M., Sullivan, J., Wang, M.: *Material and energy flows in the materials production, assembly, and end-of-life stages of the automotive lithium-ion battery life cycle*, Argonne National Laboratory, US Department of Energy, Oak Bridge 2012
- [19] Teske, S.: *Energy Revolution – a sustainable world energy outlook*, 4th ed., Greenpeace International, European Renewable Energy Council, Global Wind Energy Council, Amsterdam 2012
- [20] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.): *Elektromobilität – Deutschland als Leitmarkt und Leitanbieter*, Berlin 2011
- [21] International Energy Agency (Hrsg.): *Technology Roadmap Electric and plug-in hybrid electric vehicles*, Paris 2009

- [22] Siemer, J.: *Arbeit an der Schnittstelle – Marktübersicht Montagesysteme für Solarstromanlagen*, Aachen 2006
- [23] REN21 Secretariat (Hrsg.): *Renewables 2014 Global Status Report*, Paris 2014
- [24] European Photovoltaic Industry Association, Greenpeace International (Hrsg.): *Solar Generation 6 – Solar photovoltaic electricity empowering the world* Brüssel 2011
- [25] Elsner, H.: *Kritische Versorgungslage mit schweren Seltenen Erden – Entwicklung „Grüner Technologien“ gefährdet?*, Commodity Top News Nr. 36, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover 2011
- [26] United States Geological Survey (Hrsg.): *Mineral Commodity Summaries 2014* Reston 2014
- [27] Kurzweil, P., Brandt, K.: Overview, in: Garcke, J., Dyer, C., Moseley, P., Ogumi, Z., Rand, D., Scrosati B. (Hrsg.): *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, Vol 5, Elsevier, Amsterdam 2009, S. 1–26
- [28] SEMI PV Group (Hrsg.): *International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV)* 5th Ed., Berlin 2013

## Kontakt:



**Prof. Dr. Mario Mocker**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

m.mocker@oth-aw.de



**Jonathan Aigner, M.Eng.**

Fraunhofer-Institut für Umwelt-,  
Sicherheits- und Energietechnik  
UMSICHT  
An der Maxhütte 1  
92237 Sulzbach-Rosenberg

Liebe Leserin, lieber Leser,

„Was hat ein Comic in einem Forschungsbericht zu suchen?!“ werden Sie sich fragen. Tja – Comic hat eben auch mit Forschung zu tun. Sonst wäre dieser Comic ja nicht in diesem Forschungsbericht.

Bei Wikipedia findet man zum Thema „Comic“ folgendes: „...das Medium Comic vereint Aspekte von Literatur und bildender Kunst, wobei der Comic eine eigenständige Kunstform und ein entsprechendes Forschungsfeld bildet. Gemeinsamkeiten gibt es auch mit dem Film. Als genre-neutraler Begriff wird auch „sequenzielle Kunst“ verwendet, ...“ Dieses breite Forschungsfeld war Thema der Veranstaltung „Methoden der Visualisierung“ im

Masterstudiengang „Medientechnik und Medienproduktion“ an der Fakultät „Elektrotechnik, Medien und Informatik“.

Das Lehrziel war, dass jeder Kursteilnehmer einen eigenen Comic erstellen sollte. Das Thema lautete: „Superhero-Comic“. Der Schauplatz des Comics sollte Amberg sein.

Unter den zahlreichen gelungenen Comicwerken der Kursteilnehmer habe ich die Arbeit von Karin Janwlecke (Studierende im Masterstudiengang „Medientechnik und Medienproduktion“) ausgewählt.

Viel Vergnügen bei der Lektüre.  
Prof. Karlheinz Müller

## Kontakt:



**Prof. Karlheinz Müller**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien und Informatik  
Design Digitaler Medien  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

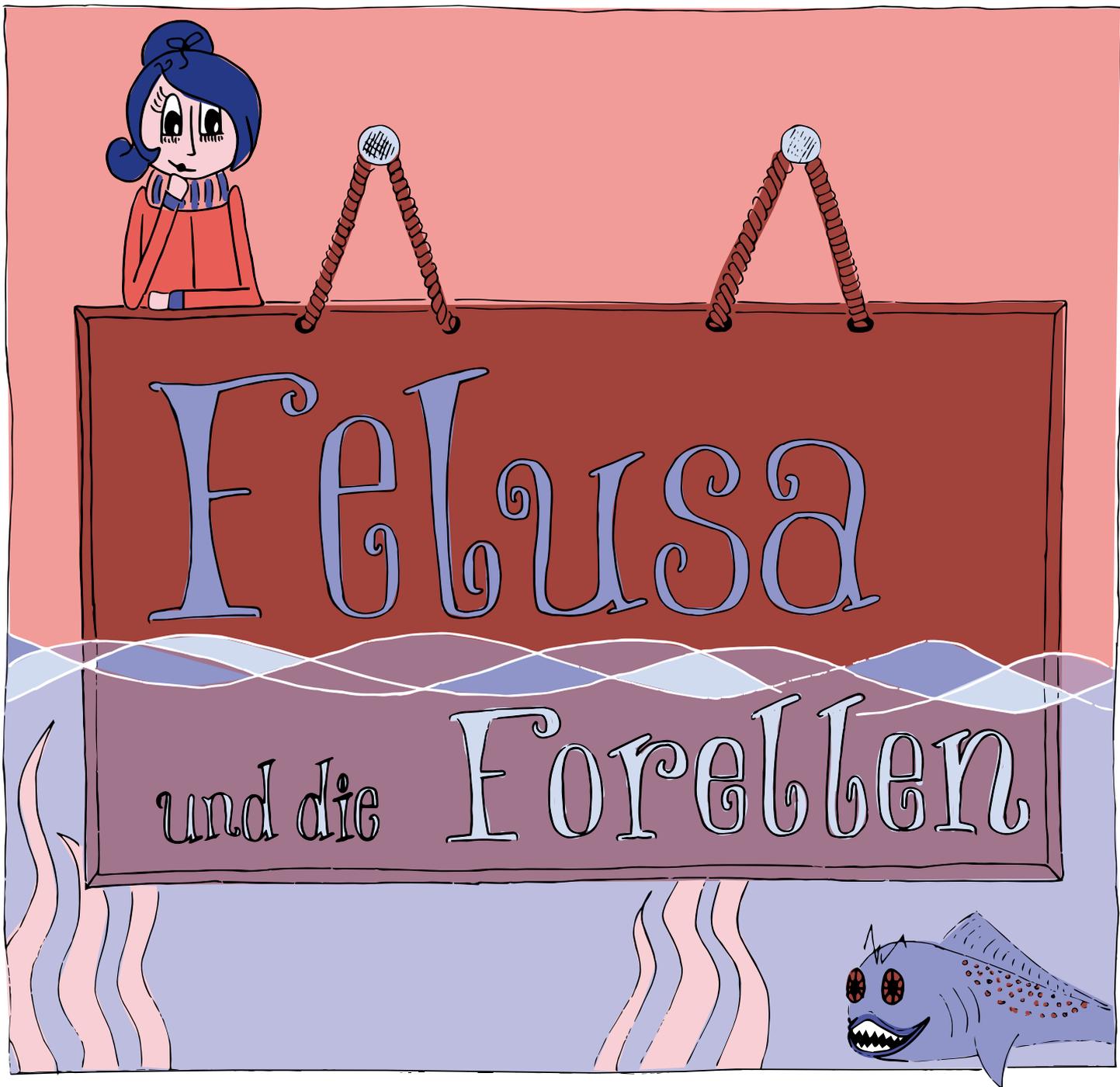
k.mueller@oth-aw.de



**Karin Janwlecke**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien und Informatik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

Studentin im Masterstudiengang  
„Medientechnik und Medienproduktion“

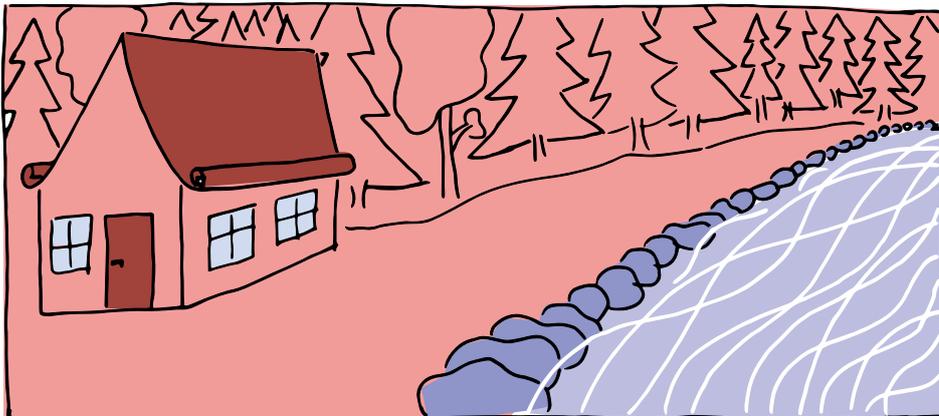


In einem kleinen Haus an der Vils lebt eine ältere Dame. Eines Tages hört sie ein Geräusch, das vom Fluss zu kommen scheint. Als sie dem Geräusch nachgeht und noch denkt, dass es wohl ein Frosch oder seltener Vogel sein wird, der dieses rasseln Geräusch von sich gibt, entdeckt sie ein Baby mit blauen Locken. Erschrocken stellt sie fest, dass das Geräusch von der Rassel des Babys kommt. Das kleine Mädchen sitzt mitten im Fluss auf einem Stein und rasselt fröhlich vor sich hin. Gott sei Dank ist die Vils hier nur flach, sodass die alte Dame, zwar wackelig aber heil bei dem Baby in der Mitte des Flusses ankommt. Das kleine Mädchen strahlt die Dame an und streckt die Arme nach ihr aus. Mit dem Kind auf dem Arm geht die Dame zurück

durch den Fluss auf ihr Haus zu. Sie schaut sich noch ein mal um und ruft, ob jemand da sei, aber sie bekommt keine Antwort. Im Haus befühlt sie die Wangen und Füßchen des Mädchens. Sie fühlen sich ganz normal an. Die Dame fragt sich, wie es sein kann, dass ein Baby in einem eiskalten Fluss sitzen kann, ohne zu unterkühlen. Und dann diese blauen Haare... Doch das kleine Mädchen ist aufgeweckt und zufrieden. Schnell entschließt sich die Dame das Kind bei sich zu behalten, falls es vermisst würde, würde sie schon davon erfahren. Und falls nicht, hätte das Mädchen es bei ihr eh besser. So entschließt sie sich das Mädchen Felusa zu nennen, so wie die Vils bei den Germanen hieß. Im Laufe der Zeit merkt die Dame, dass an ihrem kleinen



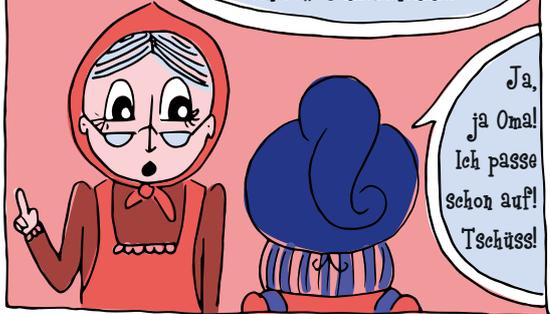
Mädchen nicht nur die Haare anders sind. Auch ihr Verhältnis zu Wasser ist ein sehr besonderes. Gar von Zauberkraften kann man hier sprechen. Denn durch pure Willenskraft kann Felusa das Wasser kontrollieren. Und so gehen am Amberger Stadtrand die Jahre ins Land und mit Felusa wachsen auch ihre Kräfte. Immer besorgt, dass jemand etwas von diesen Kräften mitbekommt, warnt die alte Dame Felusa das Geheimnis zu wahren. Felusa jedoch hält sich nicht ganz an den Ratschlag ihrer Oma - so nennt sie die alte Dame seit je her - und erzählt es ihrer besten Freundin. Die Mädchen sind mittlerweile 16 Jahre alt und fast ganz normale Teenager, aber eben auch nur fast ...



Morgens im Haus an der Vils

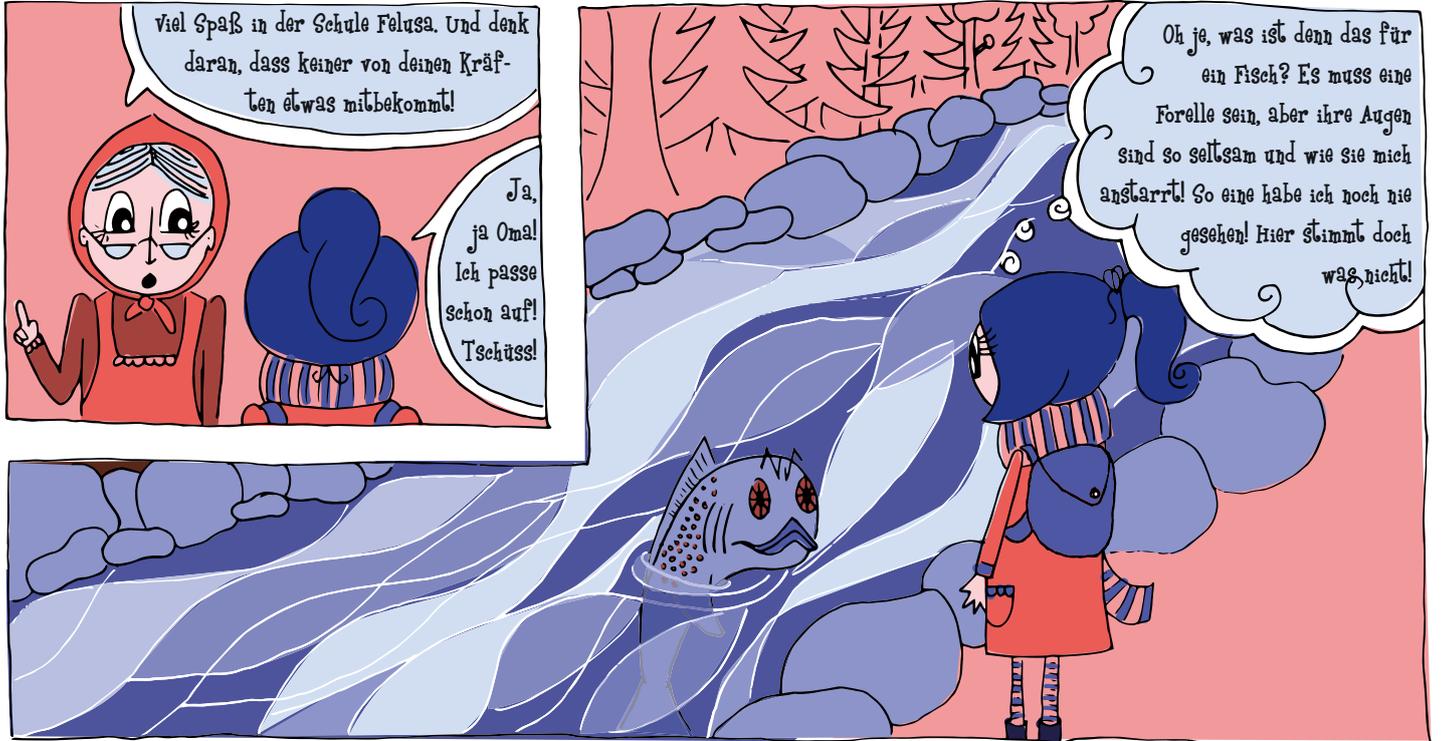


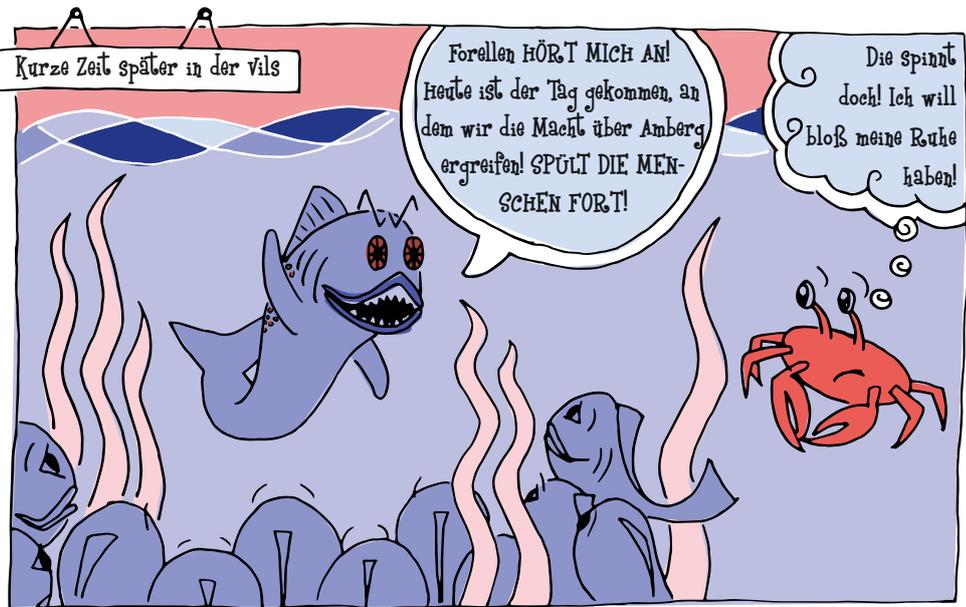
viel Spaß in der Schule Felusa. Und denk daran, dass keiner von deinen Kräften etwas mitbekommt!

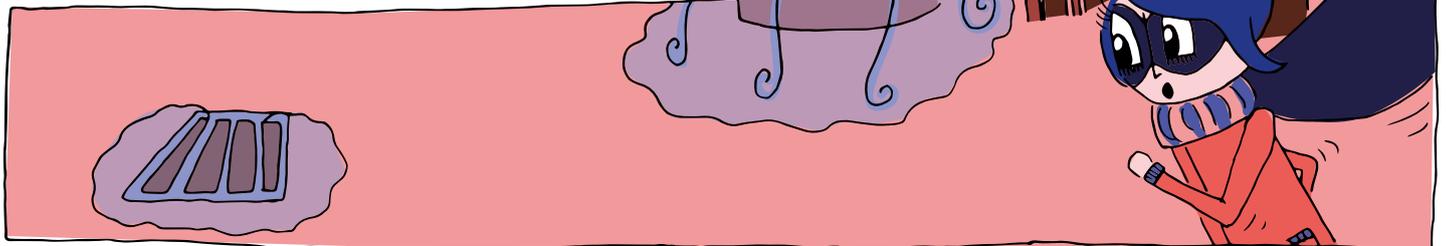
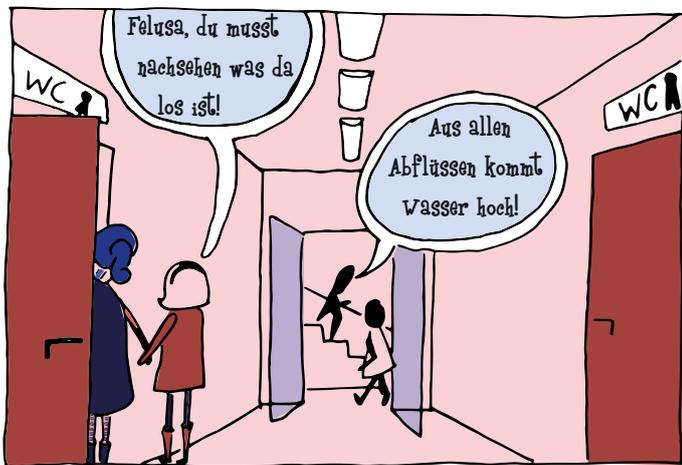


Ja, ja Oma! Ich passe schon auf! Tschüss!

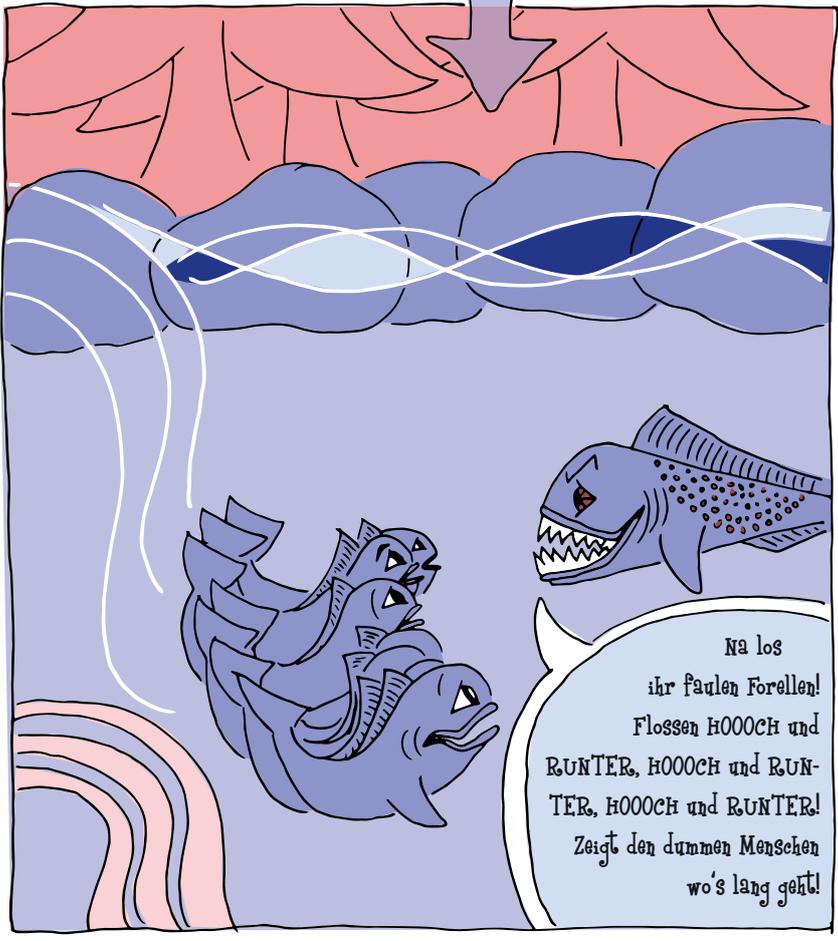
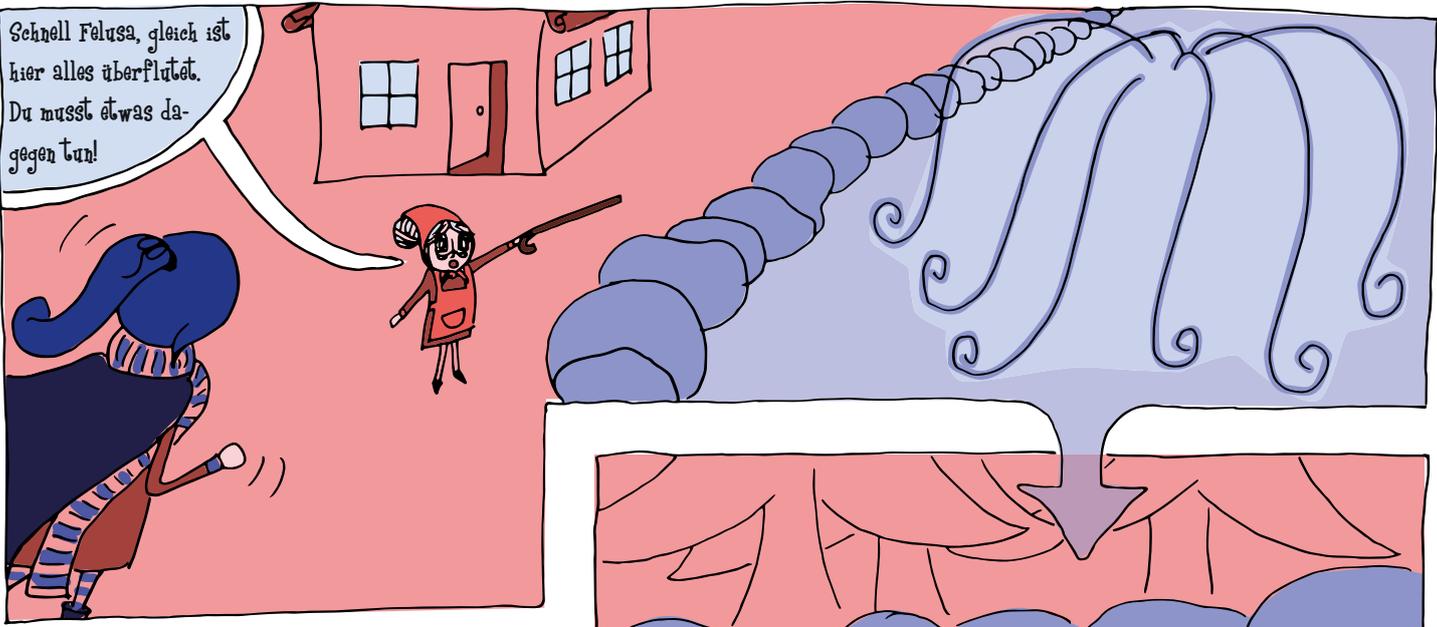
Oh je, was ist denn das für ein Fisch? Es muss eine Forelle sein, aber ihre Augen sind so seltsam und wie sie mich anstarrt! So eine habe ich noch nie gesehen! Hier stimmt doch was nicht!



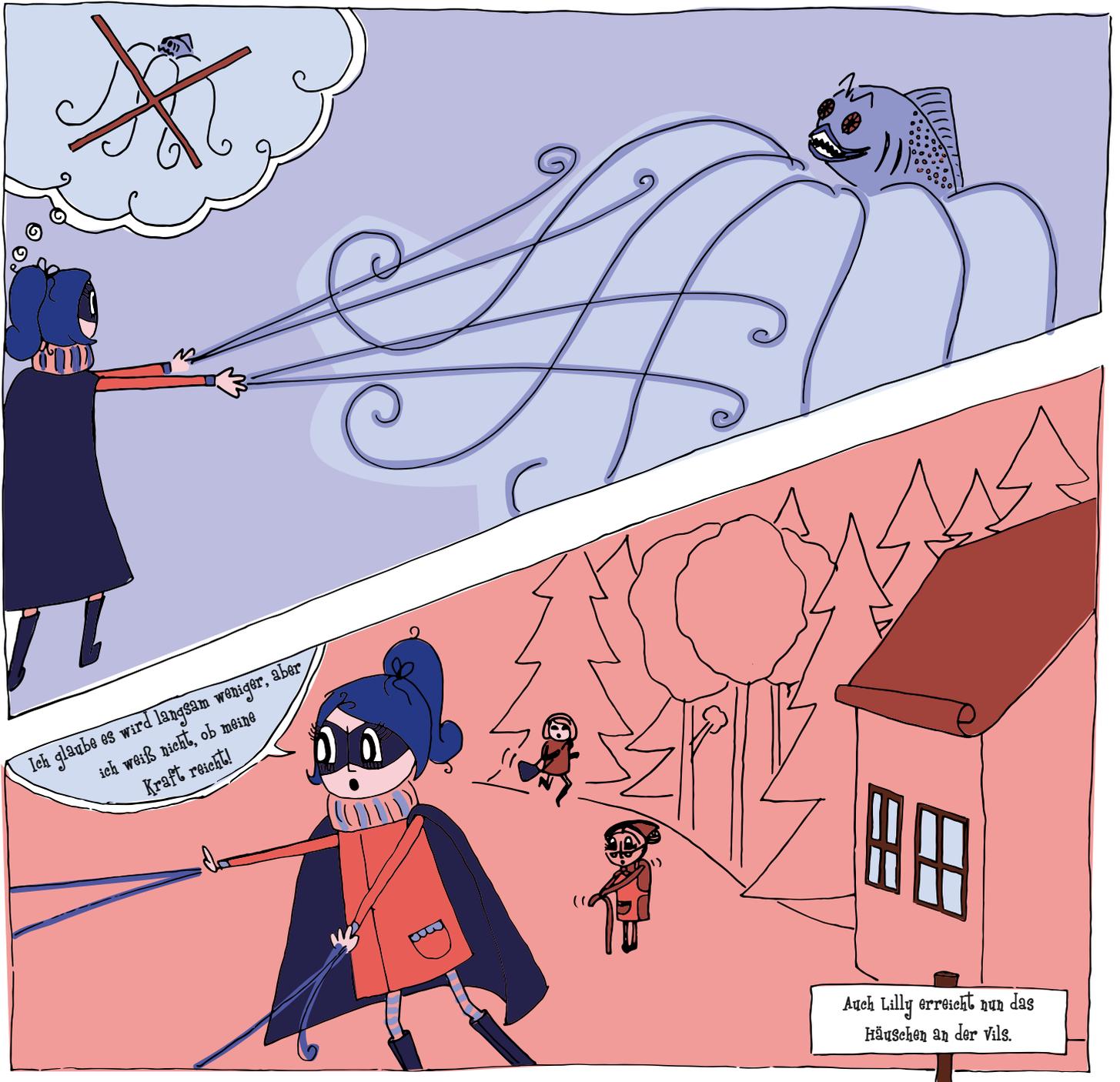


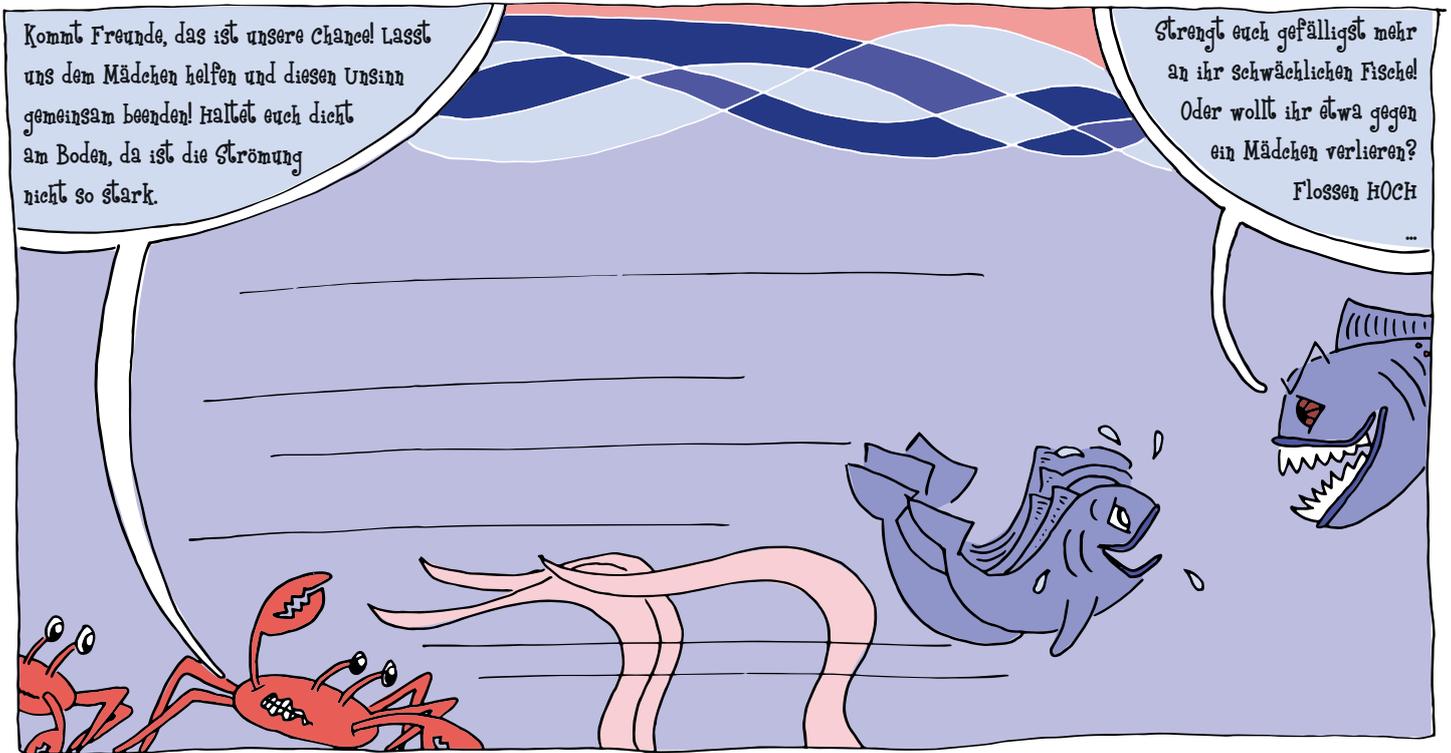


Schnell Felusa, gleich ist hier alles überflutet. Du musst etwas dagegen tun!



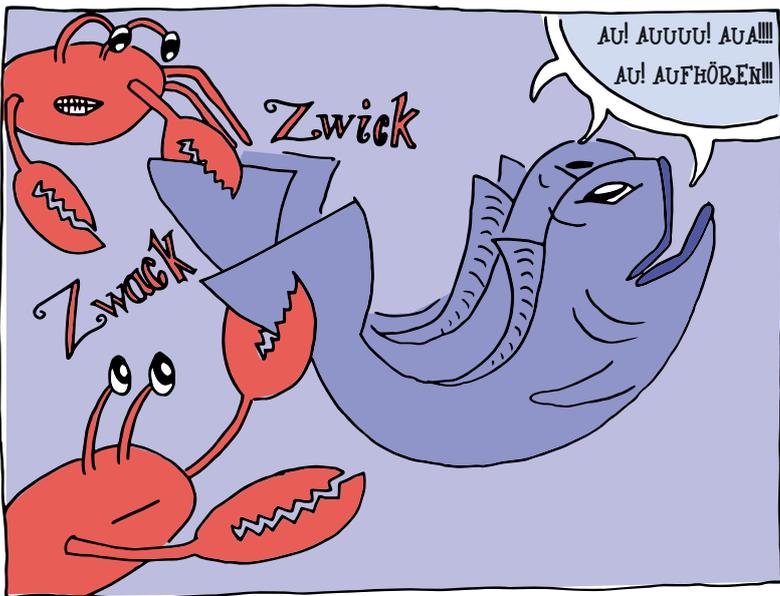
Na los  
ihr faulen Forellen!  
Flossen HOOCH und  
RUNTER, HOOCH und RUN-  
TER, HOOCH und RUNTER!  
Zeigt den dummen Menschen  
wo's lang geht!





Kommt Freunde, das ist unsere Chance! Lasst uns dem Mädchen helfen und diesen Unsinn gemeinsam beenden! Haltet euch dicht am Boden, da ist die Strömung nicht so stark.

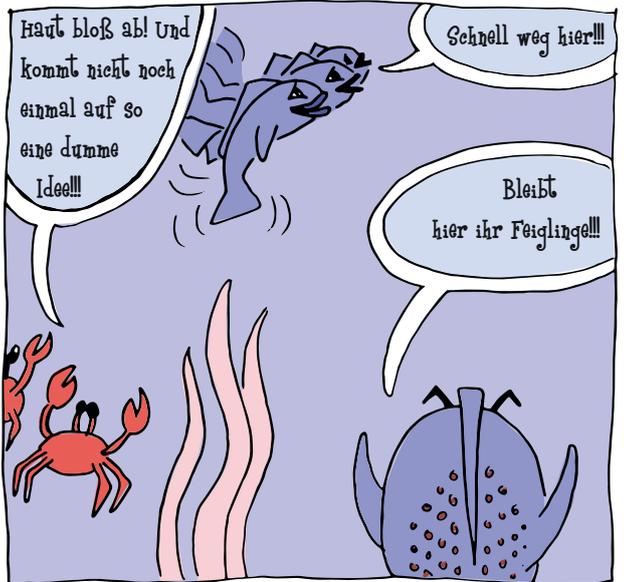
Strengt euch gefälligst mehr an ihr schwächlichen Fische! Oder wollt ihr etwa gegen ein Mädchen verlieren? Flossen HOCH



AU! AUUUU! AU! AU!!!  
AU! AUFHÖREN!!!

Zwick

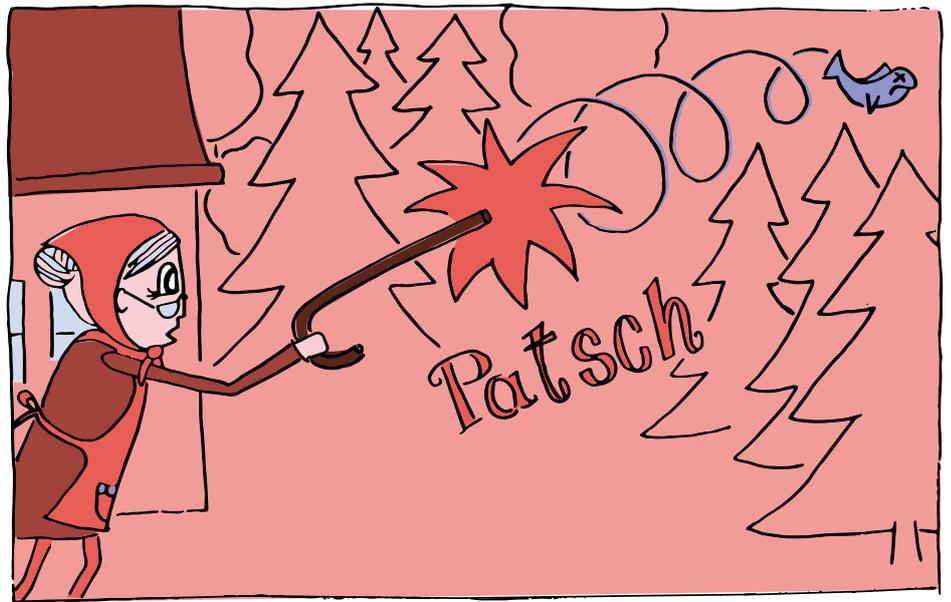
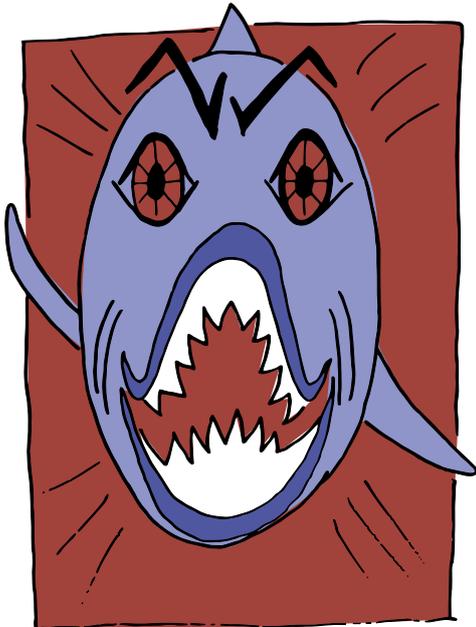
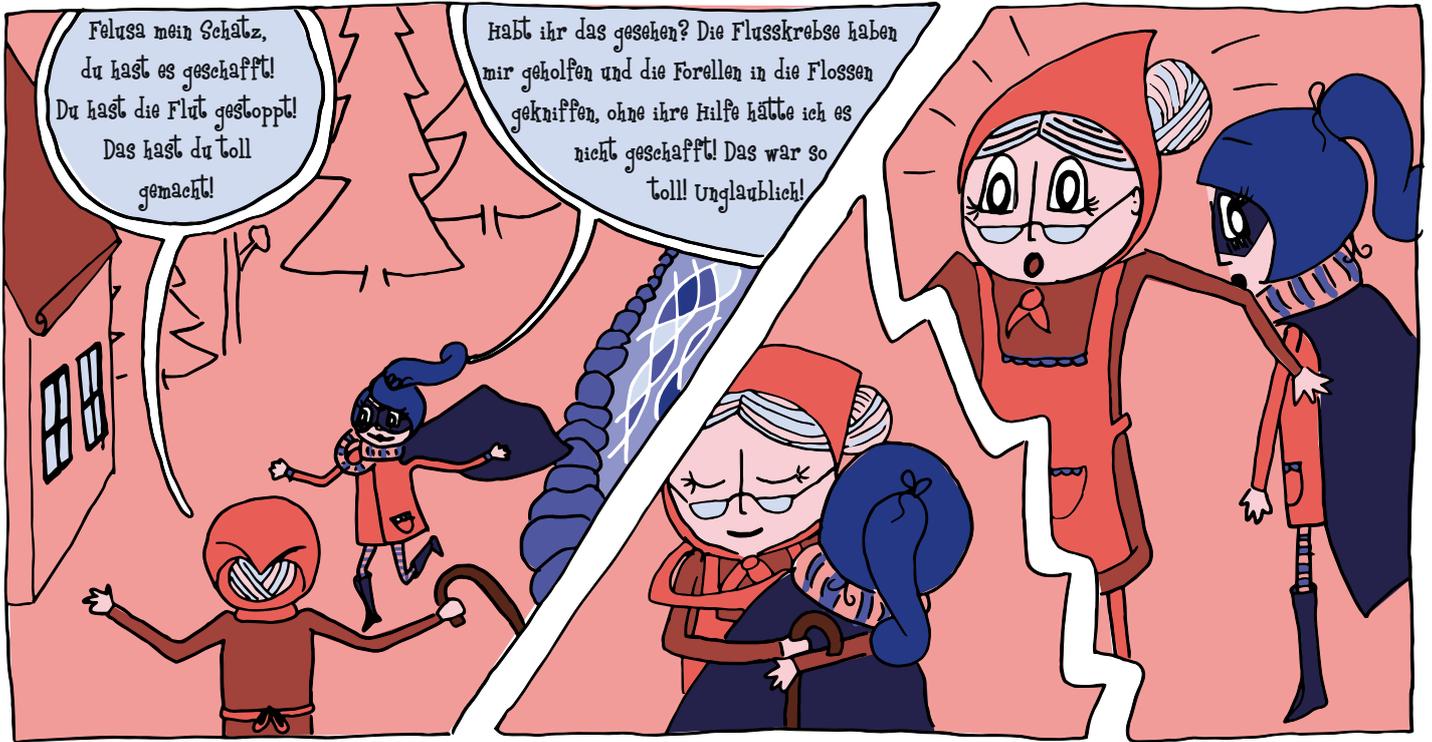
Zwack



Haut bloß ab! Und kommt nicht noch einmal auf so eine dumme Idee!!!

Schnell weg hier!!!

Bleibt hier ihr Feiglinge!!!





Noch mal so gerade gut gegangen!

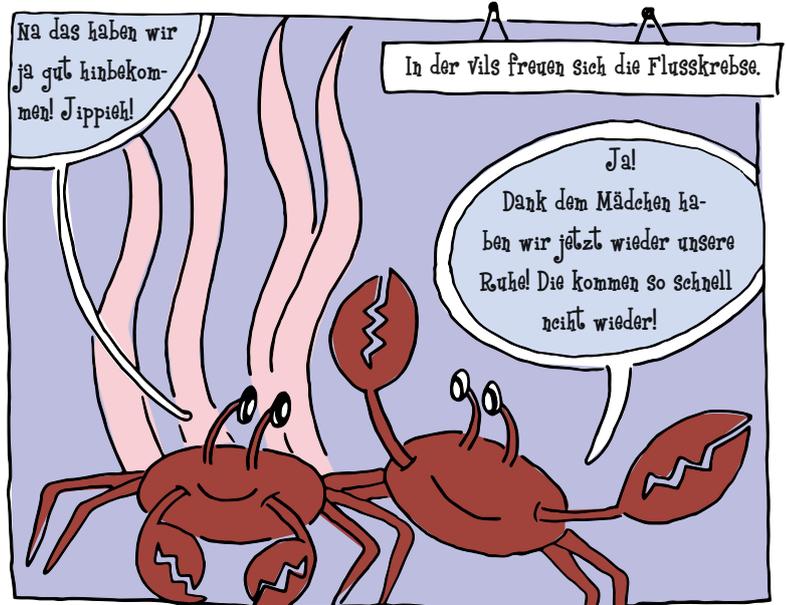
Wow, das war ja vielleicht ein Schlag! Klasse Oma! Das WAR die böse Forelle!

So ein bösesartiges Ding habe ich in meinem langen Leben hier an der Vils noch nie gesehen!



In der Stadt wundern sich die Menschen darüber, dass das Wasser verebt...

Wo kam das ganze Wasser her und wo ist es wieder hin?

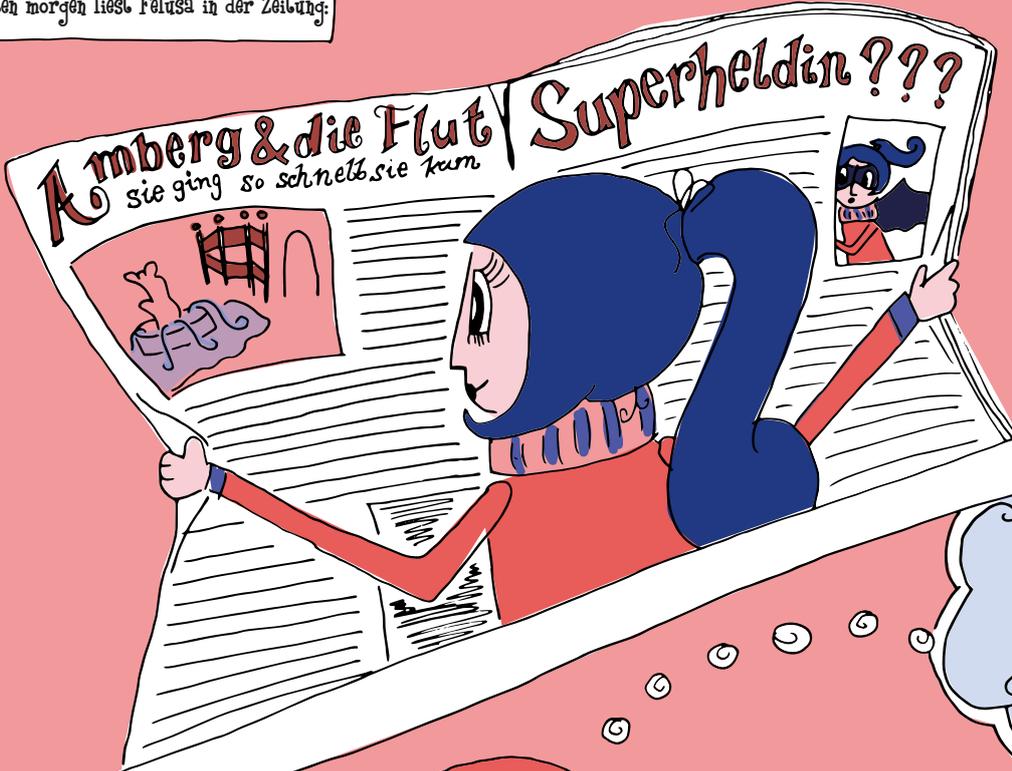


Na das haben wir ja gut hinkommen! Jippieh!

In der Vils freuen sich die Flusskrebse.

Ja! Dank dem Mädchen haben wir jetzt wieder unsere Ruhe! Die kommen so schnell nicht wieder!

Am nächsten morgen liest Felusa in der Zeitung:

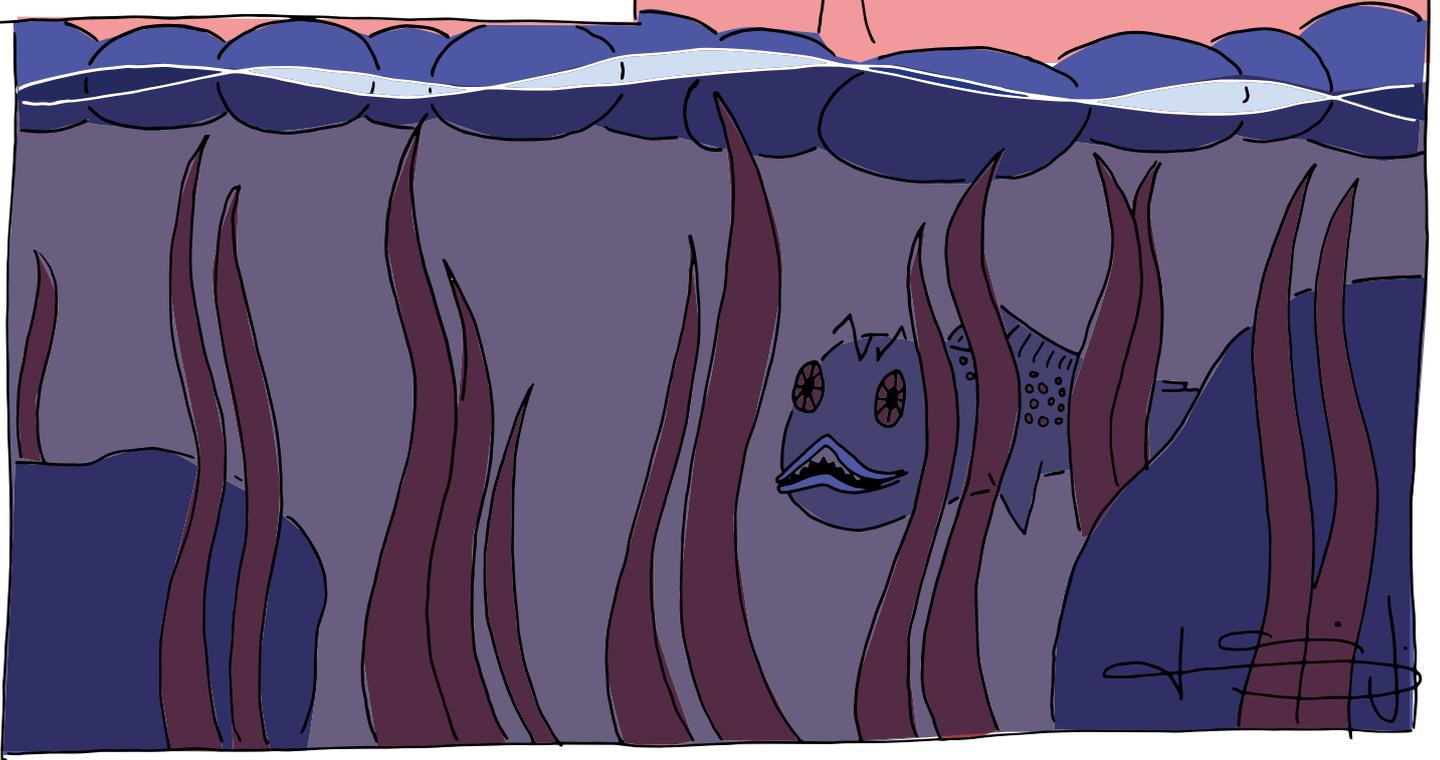


Ich bin so stolz auf mein Mädchen, dass sie den Ruhm nicht für sich beansprucht. Sie ist meine persönliche Superheldin!



Beim Frühstück freuen sich die drei über den Erfolg des Vortages. Amberg ist nun wieder sicher ... ENDE

Doch in einem dunklen Teich, tief im Wald leuchten  
zwei bekannte, böse Augen auf ...



© Karin Janwlecke 2014  
OIH - Methoden der Visualisierung

# Vergleich des Verbrennungs- und Emissionsverhaltens von hocheffizienten Blockheizkraftwerken

Dipl.-Ing. (FH) Nicholas O'Connell  
Raphael Lechner, M.Sc.  
Prof. Dr.-Ing. Markus Brautsch

## Zusammenfassung

Die Stromerzeugung in Blockheizkraftwerken aus gasförmigen Brennstoffen spielt beim Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung in der Bundesrepublik Deutschland eine bedeutende Rolle. Dabei wird es immer wichtiger eine hohe Stromausbeute zu erzielen. Ein möglicher Ansatz zur Steigerung der elektrischen Effizienz ist der Einsatz von wirkungsgradoptimierten Motoren als Antriebsaggregate für Blockheizkraftwerke. Am Kompetenzzentrum für Kraft-Wärme-Kopplung der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Energietechnik (IfE) zwei unterschiedliche Motorenkonzepte für erdgasbetriebene Blockheizkraftwerke, die Gas-Otto- und die Zündstrahltechnologie, im Hinblick auf das Verbrennungs- und Emissionsverhalten untersucht. Die Untersuchung des Verbrennungsverhaltens zeigt die hohe Ausgereiftheit des Gas-Otto-Motorenkonzepts, das die am weitesten verbreitete Technologie für gasbetriebene Blockheizkraftwerke darstellt. Die Zündstrahltechnologie wird derzeit lediglich für Nischenanwendungen eingesetzt, bietet jedoch bei Feinabstimmung des Verbrennungsverhaltens interessante Potenziale zur weiteren Steigerung der Effizienz und Reduzierung der Emissionen. Die Emissionsanalyse zeigt bei beiden Motorenkonzepten weiteren Entwicklungsbedarf im Hinblick auf die Reduzierung der Abgasemissionen, insbesondere der bisher gesetzlich nicht-limitierten Methanemissionen, unter Beibehaltung der hohen Energieeffizienz.

## Abstract

The electric power supply provided by CHP plants from gaseous fuels has an important role to play in the development of the field of cogeneration in the Federal Republic of Germany. Thereby it is becoming more and more important to achieve a high yield of electricity. A possible approach in increasing the electric efficiency is the use of engines with economically optimized performance as drive units for CHP plants. At the Center of Excellence for Combined Heat and Power at the University of Applied Science Amberg-Weiden two varying engine concepts for CHP plants (spark-ignited gas engines and dual fuel engines) were examined regarding combustion and emission behaviour. The combustion analysis showed that spark-ignited gas engines are well-engineered and essentially fully developed and are therefore the most widely used technology available on the market. In contrast dual fuel engines are currently only used for less common applications. However this technology offers potentials in the further increase of efficiency and reduction of exhaust emissions by fine tuning the combustion. The analysis of the exhaust emissions showed that both engine concepts require further development in regard to reducing the emission output, especially the currently non-restricted methane emissions, while maintaining a high degree of energy efficiency.

## Einführung

Für die zukünftige Entwicklung des Energiemarktes wird der Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) eine wichtige Rolle spielen. Zielvorgabe der Bundesregierung ist die Erhöhung des Anteils der Stromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplung in der Bundesrepublik Deutschland auf 25 Prozent im Jahr 2020 [KWKG2009]. Dabei werden aufgrund ihrer geringen Abschreibungsdauer und ihrer flexiblen Einsatzmöglichkeiten zur dezentralen Energieversorgung Blockheizkraftwerke (BHKW) eine große Rolle spielen [DLR IWES IFEN2012].

Heutzutage erfolgt der überwiegende Anteil der Stromerzeugung in Blockheizkraftwerken aus gasförmigen Brennstoffen, sowohl leitungsgebunden (Erdgas, Biomethan) als auch nicht-leitungsgebunden (Biogas, Deponiegas, Klärgas). Den größten Anteil an den zur Stromerzeugung eingesetzten Brennstoffen nimmt Erdgas ein, gefolgt von Biogas, Deponiegas und Klärgas [DLR IWES IFEN2012].

Im Hinblick auf die Ausbauziele zur KWK-Stromerzeugung, die zunehmenden Brennstoffpreise und den steigenden Wert der elektrischen Energie wird es immer wichtiger die Stromausbeute von Blockheizkraftwerken zu steigern. Eine Möglichkeit hierfür ist der Einsatz von wirkungsgrad-optimierten Motoren als Antriebsaggregate für gasbetriebene Blockheizkraftwerke. Zurzeit sind zwei unterschiedliche Motorenkonzepte auf dem Markt verbreitet, die interessante Ansätze zur Effizienzsteigerung aufweisen.

Der Vier-Takt Gas-Otto-Motor stellt die aktuell meist verbreitetste Motortechnologie für gasbetriebene Blockheizkraftwerke dar. Aufgrund des geringeren Verdichtungsverhältnisses des Ottomotors fällt üblicherweise der elektrische Wirkungsgrad dieser Anlagen im Vergleich zu flüssigkraftstoffbetriebenen Blockheizkraftwerken auf Basis von Dieselmotoren geringer aus. Allerdings wurden in letzter Zeit aufgrund der steigenden Brennstoffpreise und der Nachfrage höherer Stromausbeute große Fortschritte in Sachen Effizienzsteigerung von Gas-Otto-Motoren verzeichnet. Moderne, hocheffiziente Gas-Otto-BHKWs können somit je nach Leistungsklasse elektrische Wirkungsgrade jenseits der 40 Prozent-Marke erreichen. Eine interessante Alternative zu Gas-Otto-Motoren stellt die Zündstrahltechnologie dar, bei der ein gasförmiger Brennstoff durch die Einspritzung einer geringen Menge an Flüssigkraftstoff gezündet und verbrannt wird. Zündstrahlmotoren basieren auf Dieselmotoren und können bedingt durch ihre Bauart sehr hohe elektrische Wirkungsgrade erreichen. Ursprünglich wurde die Zündstrahltechnologie für die motorische Nutzung von Schwachgasen mit niedrigem Methangehalt und schwankender Qualität entwickelt und konnte sich mittlerweile im Biogasbereich als Alternative zu Gas-Otto-Motoren etablieren. Mit zunehmender Bedeutung elektrischer Energie wird die Zündstrahltechnologie aufgrund ihrer potenziellen Wirkungsgradvorteile jedoch auch für

erdgas- oder biomethanbetriebene Blockheizkraftwerke interessant. Ein weiterer Vorteil der Zündstrahltechnologie ist die Flexibilität in der Wahl des Brennstoffs. Je nach Bedarf können die Motoren mit 100 % Flüssigkraftstoff oder mit nahezu 100 % gasförmigen Brennstoffen betrieben werden (bis auf die zur Zündung erforderliche geringe Zündölmenge). Damit ist auch bei Unterbrechung der Gasversorgung ein Weiterbetrieb möglich, z. B. zur Notversorgung oder bei Gasabschaltverträgen.

Am Kompetenzzentrum für Kraft-Wärme-Kopplung der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Energietechnik beide Motorenkonzepte im Hinblick auf das Verbrennungs- und Emissionsverhalten experimentell untersucht. Der vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse der Messungen gegenüber.

## Untersuchte BHKW-Anlagen

Um einen aussagekräftigen Vergleich der beiden unterschiedlichen Motorenkonzepte durchführen zu können, wurde jeweils ein Gas-Otto-BHKW und ein Zündstrahl-BHKW mit annähernd gleichen Leistungsdaten untersucht. Es handelt sich in beiden Fällen um turboaufgeladene 6-Zylinder-Reihenmotoren mit etwa 12 Litern Hubraum, die mit hohem Luftüberschuss betrieben werden (Magermotorkonzept). Beide Motoren wurden für die Versuche mit Erdgas-H betrieben, beim Zündstrahlmotor wurde teileraffiniertes Rapsöl als Zündöl eingesetzt (energetischer Anteil < 8 %). Die technischen Daten der beiden Anlagen sind in der Tabelle dargestellt. Beide Aggregate spiegeln den aktuellen Stand der Technik in ihrer Leistungsklasse wieder.

Tabelle: Technische Daten der Versuchsanlagen

BHKW-Typ	Gas-Otto-BHKW	Zündstrahl-BHKW
Bauart (Motor)	6-Zylinder-Reihenmotor	6-Zylinder-Reihenmotor
Hubraum	12 l	12,4 l
Elektrische Nennleistung	250 kW	240 kW
Thermische Nennleistung	264 kW	240 kW
Elektrischer Wirkungsgrad	42,5 % <sup>1</sup>	42 % <sup>2</sup>
Thermischer Wirkungsgrad	44,9 %	42 %

<sup>1</sup> Nach DIN ISO 3046-1, Toleranz Brennstoffverbrauch + 5 %

<sup>2</sup> Gemessen, nicht nach DIN ISO 3046-1 korrigiert

## Verbrennungsanalyse Referenzzylinder

Die Verbrennungsanalyse beider BHKW wurde bei Nennlast und Standardeinstellungen (Serienzustand) durchgeführt. Hierfür wurden mithilfe eines Indiziermesssystems die Druckverläufe in den Zylinder der untersuchten Motoren in Echtzeit erfasst und analysiert. Aus den gemessenen Zylinderdruckverläufen wurde mittels

einer thermodynamischen Analyse der Heizverlauf als Maß für den zeitlichen Verlauf der Energiefreisetzung berechnet. Die dafür eingesetzten Rechenverfahren sind z. B. in [Pischinger 2002] [Merker 2009] [Heywood 1988] dokumentiert. Im ersten Schritt wurde von beiden Motoren jeweils der Druck- und Heizverlauf für einen Referenzzyylinder im Detail analysiert. Danach wurden die Verbrennungsparameter aller Zylinder (Vollindizierung) untersucht, um eine Beurteilung des gesamten Motors zu ermöglichen.

Abbildung 1 zeigt den Zylinderdruckverlauf für die Referenzzyylinder des Gas-Otto-Motors und des Zündstrahlmotors. Um einen repräsentativen Verlauf zu erhalten, wurde jeweils eine gemittelte Kurve aus 100 Einzelverläufen gebildet. Die Messwerte wurden auf den höchsten auftretenden Druck beim Zündstrahlmotor normiert (Spitzen- druck Zündstrahlmotor = 100 %). Man erkennt, dass beim Zündstrahlmotor ein höherer Spitzendruck auftritt als beim Gas-Otto-Motor, welcher zudem zu einem früheren Zeitpunkt erreicht wird. Außerdem erkennt man, dass beim Zündstrahlmotor eine höhere Drucksteigerungs- rate auftritt und dass die Verbrennung schneller abge- schlossen ist (Zylinderdruck fällt schneller ab).

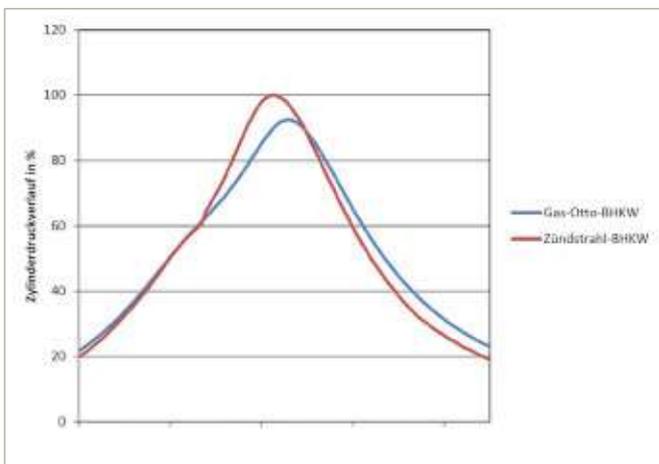


Abbildung 1: Vergleich der Zylinderdruckverläufe der untersuchten Motoren

Das Indiziersystem liefert zusätzlich zum gemessenen Druckverlauf den berechneten Heizverlauf der Verbrennung. Der Heizverlauf stellt die dem Arbeitsmedium zugeführte Energie in Abhängigkeit der Kolbenposition dar. Im Unterschied zum sogenannten Brennverlauf werden dabei die Wandwärmeverluste im Brennraum nicht berücksichtigt.

Abbildung 2 zeigt den Heizverlauf für den Referenzzyylinder beider Motoren im Vergleich, wiederum normiert auf den höchsten auftretenden Wert beim Zündstrahlmotor. Betrachtet man den Heizverlauf des Zündstrahlmotors, so erkennt man eine vorzeitige Spitze, die Verbrennung beginnt schlagartig. Diese stellt die Verbrennung des eingespritzten Zündöls dar. Erst kurze Zeit später

entzündet sich das im Zylinder befindliche Brenngas-Luft-Gemisch. Die Hauptverbrennung bildet sich bei beiden Motoren in etwa gleichzeitig aus, wobei die Energieumsetzung beim Zündstrahlmotor etwas schneller erfolgt. Es ist außerdem zu erkennen, dass die Verbrennung beim Gas-Otto-Motor insgesamt etwas länger dauert und dass die maximale Umsatzrate höher ist.

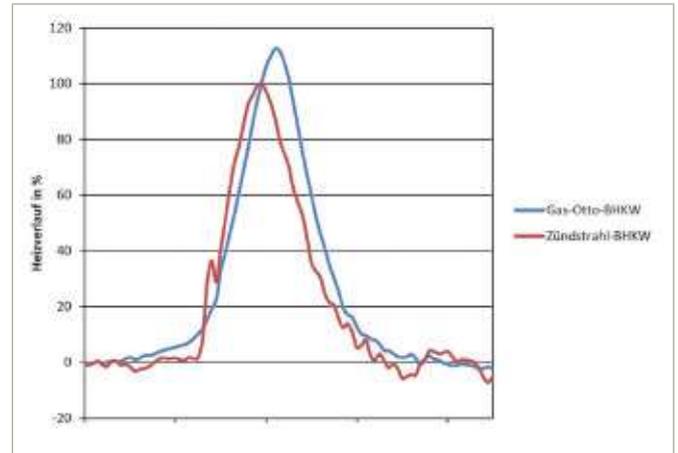


Abbildung 2: Vergleich der Heizverläufe der untersuchten Motoren

### Verbrennungsanalyse für alle Zylinder (Vollindizierung)

Abbildung 3 zeigt die Zylinderspitzen drücke aller sechs Zylinder beider Motoren im Vergleich. Wie bei den Druck- und Heizverläufen wurden hier Mittelwerte aus 100 Zyklen ermittelt, zusätzlich sind die Maximal- und Minimalwerte dargestellt, um die Streuung der Messwerte zu verdeutlichen. Die Werte sind jeweils auf den maximal auftretenden gemittelten Spitzendruck beim Zündstrahlmotor normiert.

Man erkennt, dass sich beim Gas-Otto-Motor die gemittelten Spitzendrücke der einzelnen Zylinder nur geringfügig voneinander unterscheiden, was darauf hindeutet, dass die Verbrennung im Mittel gut aufeinander abgestimmt ist. Betrachtet man hingegen die Maximal- und Minimalwerte, so ist eine vergleichsweise große Streuung zwischen den einzelnen Verbrennungszyklen zu erkennen.

Beim Zündstrahlmotor liegen die Spitzendrücke der Verbrennung insgesamt höher als beim Gas-Otto-Motor, allerdings sind hier auch erhebliche Druckunterschiede zwischen den einzelnen Zylindern zu erkennen und zudem erhebliche Unterschiede bei der Streuung der Werte. So weist z. B. Zylinder 3 nur eine geringe Streuung des Spitzendrucks um den Mittelwert herum auf, während Zylinder 4 und 5 erhebliche größere Druckschwankungen zwischen den einzelnen Verbrennungszyklen aufweisen. Insgesamt ist die Verbrennung beim Zündstrahlmotor weniger gut zwischen den einzelnen Zylindern abgestimmt.

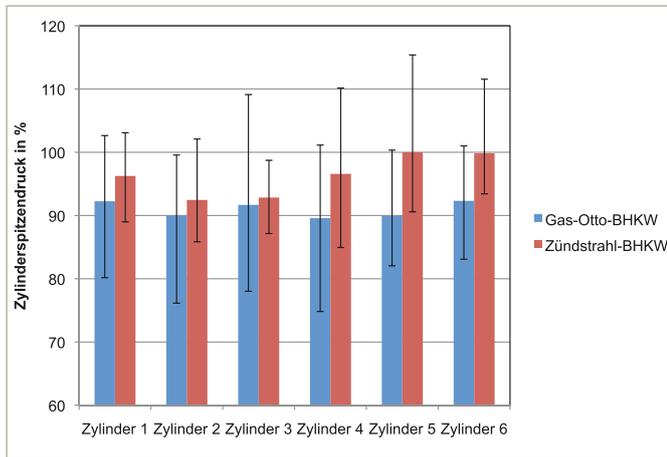


Abbildung 3: Vergleich der Zylinderspitzen drücke der untersuchten Motoren

Zusätzlich zum Zylinderspitzen druck wurden zwei wichtige Verbrennungsparameter untersucht: der Verbrennungsschwerpunkt und die Brenndauer. Der Verbrennungsschwerpunkt gibt den Zeitpunkt an, zu dem 50 % des eingesetzten Brennstoffs umgesetzt worden sind. Mithilfe des Verbrennungsschwerpunkts kann eine Aussage über die zeitliche Lage der Verbrennung getroffen werden. Die Definition der Brenndauer ist abhängig von der Interpretation des Brennbeginns und des Verbrennungsendes. Für die Auswertung wurde der Brennbeginn bei 10 % Brennstoffumsatz und das Verbrennungsende bei 90 % Brennstoffumsatz definiert.

Abbildung 4 zeigt den über 100 Zyklen gemittelten Verbrennungsschwerpunkt aller Zylinder beider Motoren im Vergleich sowie die jeweiligen Maximal- und Minimalwerte. Es ist zu erkennen, dass der Verbrennungsschwerpunkt beim Zündstrahlmotor generell früher liegt als beim Gas-Otto-Motor. Zudem ist beim Zündstrahlmotor eine geringere Streuung der Werte festzustellen, d. h. die Lage des Verbrennungsschwerpunkts ist im Vergleich zum Gas-Otto-Motor stabiler.

Analog zum Verbrennungsschwerpunkt ist die Brenndauer aller Zylinder beider Motoren in Abbildung 5 dargestellt, normiert auf den maximal auftretenden Mittelwert des Zündstrahlmotors. Hier erkennt man, dass beim Gas-Otto-Motor die mittlere Brenndauer im Vergleich der einzelnen Zylinder untereinander annähernd gleich lang ist, was auf eine gute Abstimmung des Motors hindeutet. Im Vergleich dazu treten beim Zündstrahlmotor große Unterschiede der Brenndauer zwischen den einzelnen Zylindern auf, insbesondere bei Zylinder 1 bis 4 gegenüber Zylinder 5 und 6. Dies lässt im Vergleich der beiden Motorenkonzepte auf weiteres Potenzial zur Verbrennungsoptimierung des Zündstrahlmotors schließen.

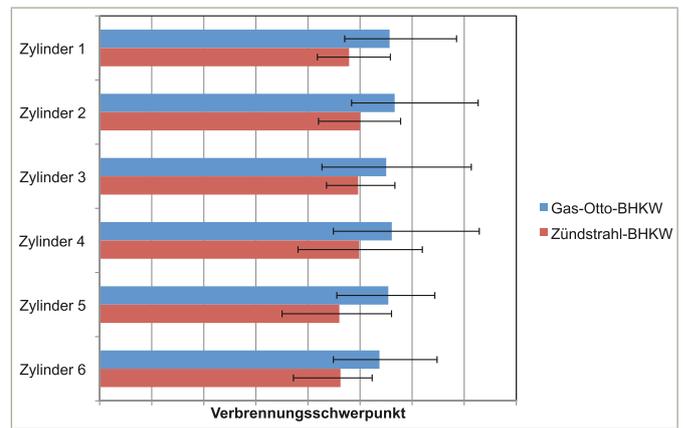


Abbildung 4: Vergleich des Verbrennungsschwerpunkts der untersuchten Motoren

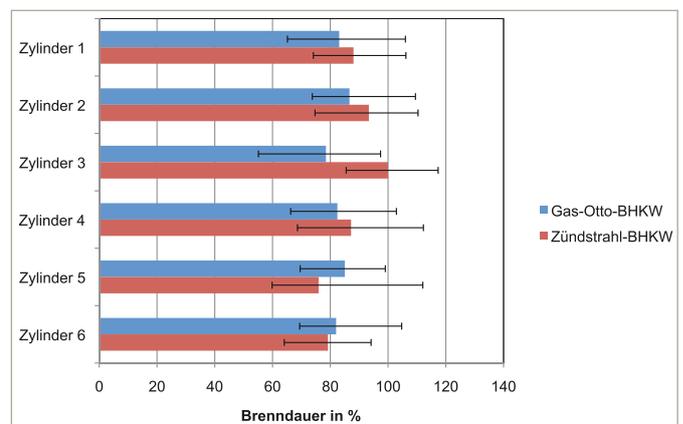


Abbildung 5: Vergleich der Brenndauer der untersuchten Motoren

## Emissionsverhalten

Neben der Verbrennungsanalyse wurden parallel die Abgasemissionen der beiden Motoren mithilfe eines Fourier-Transform-Infrarotspektrometers gemessen. Die Messstelle des Abgasanalysegerätes wurde jeweils vor den Katalysatoren der Blockheizkraftwerke gewählt (Rohabgas). Die Abgasemissionswerte wurden entsprechend den Vorschriften der TA Luft [TA Luft 2002] auf einen Sauerstoffgehalt von 5 Vol-% im Abgas bezogen. Abbildung 6 stellt die Abgasemissionen der beiden Motoren gegenüber, normiert auf den maximal auftretenden Emissionswert beim Zündstrahlmotor.

Hier ist zu erkennen, dass die Kohlenmonoxidemissionen bei beiden Motorenkonzepten in etwa gleich hoch ausfallen. Dies gilt auch für die Formaldehydemissionen. Die CO-Emissionen sind als nicht außergewöhnlich hoch zu bewerten und lassen sich mithilfe eines Oxidationskatalysators vergleichsweise einfach reduzieren. Betrachtet man die Stickstoffoxidemissionen ( $\text{NO}_x$ ), so erkennt man, dass beim Zündstrahlmotor erheblich höhere Konzentrationen an  $\text{NO}_x$  im Abgas auftreten. Dies ist durch die Bauart des Motors bedingt, da aufgrund der höheren Verdichtung des Zündstrahlmotors höhere Spitzentemperaturen bei der Verbrennung des Brennstoffs auftreten. Diese hohen Temperaturen fördern die Entstehung von „thermischen

NO<sub>x</sub>“ nach dem Zeldovich-Mechanismus. Das Niveau der NO<sub>x</sub>-Emissionen des Zündstrahl-BHKWs ist insgesamt als hoch zu bewerten. Eine Minderung der Stickstoffoxid-emissionen ließe sich beispielsweise mithilfe eines SCR-Katalysators realisieren.

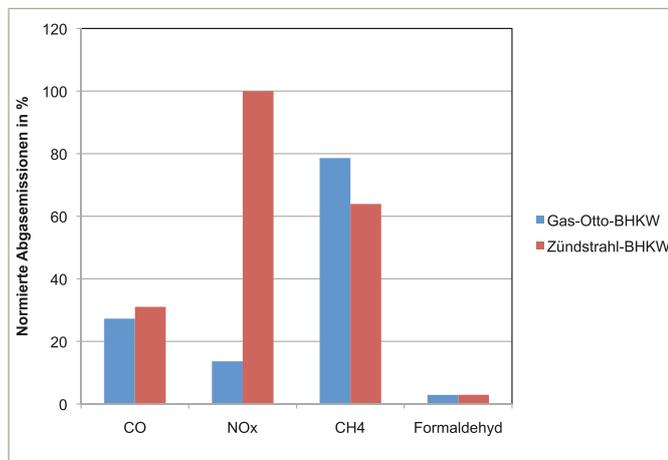


Abbildung 6: Vergleich der Abgasemissionen beider Motoren

Eine weitere Abgaskomponente, die bei beiden Motoren in hohen Konzentrationen auftritt ist Methan (CH<sub>4</sub>). Die Ursache der hohen Methanemissionen wurde noch nicht näher untersucht, es ist jedoch zu vermuten, dass es sich dabei in erster Linie um unverbrannten Brennstoff handelt, der während des Ladungswechsels aufgrund der Ventilüberschneidung direkt vom Saugrohr in den Abgaskrümmer gelangt (Methanschleupf). Bisher ist Methan als Abgaskomponente nicht gesetzlich limitiert, wirkt sich aufgrund seiner hohen Treibhauswirkung jedoch negativ auf die Emissionsbilanz von Blockheizkraftwerken aus. Die Methanemissionen lassen sich zum einen konstruktiv durch Änderung der Ventilsteuerzeiten oder durch Abgasnachbehandlungsmaßnahmen (Oxidationskatalysator) mindern.

### Fazit und Zusammenfassung

Heutzutage erfolgt der überwiegende Anteil der Stromerzeugung in Blockheizkraftwerken aus gasförmigen Brennstoffen. Dabei hat es sich aufgrund von steigenden Brennstoffpreisen und dem steigenden Wert der elektrischen Energie als wichtig erwiesen die Stromausbeute weiter zu erhöhen. Ein möglicher Lösungsansatz ist der Einsatz von wirkungsgradoptimierten Antriebsaggregaten. Der Gas-Otto-Motor stellt die aktuell am meisten verbreitete Motortechnologie für gasbetriebene Blockheizkraftwerke dar. Moderne, hocheffiziente Gas-Otto-BHKWs können je nach Leistungsklasse elektrische Wirkungsgrade jenseits der 40 Prozent-Marke erreichen. Eine interessante Alternative zur Gas-Otto-Technologie stellt die Zündstrahltechnologie dar, die ursprünglich für motorische Nutzung von Schwachgasen entwickelt wurde und mit der sich ebenfalls sehr hohe elektrische Wirkungsgrade > 40 % erreichen lassen.

Am Kompetenzzentrum für Kraft-Wärme-Kopplung der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Energietechnik das Verbrennungs- und Emissionsverhalten der beiden konkurrierenden Technologien experimentell untersucht. Für die Vergleichsmessungen wurden je eine BHKW-Anlage mit Gas-Otto-Motor und eine mit Zündstrahlmotor ausgewählt, die den aktuellen Stand der Technik in der Leistungsklasse 250 kW<sub>el</sub> widerspiegeln.

Die Ergebnisse der Verbrennungs- und Emissionsanalyse zeigen für den Zündstrahlmotor weiteres Potenzial für Optimierungen, insbesondere durch bessere Abstimmung der Verbrennung in den einzelnen Zylindern aufeinander und innermotorische Absenkung der NO<sub>x</sub>-Emissionen. Demgegenüber ist der Gas-Otto-Motor bereits gut abgestimmt. Dies bestätigt den derzeitigen Entwicklungsvorsprung der Gas-Otto-Motorentechnologie im Vergleich zum Nischenprodukt Zündstrahlmotor. Dennoch zeigt sich die Zündstrahltechnologie als attraktive Alternative dar, da die erreichbaren elektrischen Wirkungsgrade bereits heute konkurrenzfähig sind und durch Feinabstimmung der Motoren noch beträchtliche Potenziale zur Effizienzsteigerung und Emissionsminderung umsetzbar sind.

Auffällig bei beiden Motorenkonzepten sind die hohen Methan-Emissionen, die die Klimabilanz von Blockheizkraftwerken deutlich verschlechtern können. Bisher sind die Methanemissionen aus Verbrennungsmotoren gesetzlich nicht limitiert, weshalb sie nicht im Fokus der Entwicklungen stehen. Für künftige Entwicklungen wäre jedoch eine Minimierung der Methanemissionen aus Blockheizkraftwerken anzustreben, um die Potenziale der Kraft-Wärme-Kopplung zur Reduzierung der klimaschädlichen Emissionen aus der Energieerzeugung voll auszuschöpfen.

---

## Quellenangaben

1. [DLR IWES IFNE 2012] Arbeitsgemeinschaft: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE): *Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global* – Schlussbericht; 2012
2. [Heywood 1988] HEYWOOD, John B.: *Internal Combustion Engine Fundamentals*; 1. Aufl.; New York; 1988; ISBN 978-0-07-028637-5
3. [KWKG 2009] Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz)
4. [Merker 2009] MERKER, Günter; SCHWARZ, Christian (Hrsg.): *Grundlagen Verbrennungsmotoren*; 4. Aufl.; Wiesbaden; Vieweg + Teubner; 2009; ISBN 978-3-8348-0740-3
5. [Pischinger 2002] PISCHINGER, Rudolf; KLELL, Manfred; SAMS, Theodor: *Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine*; 2. Aufl.; Springer; Wien; 2002; ISBN 3-211-83679-9
6. [TA Luft 2002] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) Vom 24. Juli 2002

## Kontakt:



**Dipl.-Ing. (FH) Nicholas O'Connell**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

n.oconnell@oth-aw.de



**Raphael Lechner, M.Sc.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

r.lechner@oth-aw.de



**Prof. Dr.-Ing. Markus Brautsch**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

m.brautsch@oth-aw.de

# Kortikale Schmerzverarbeitung bei mentalem Stress – Visualisierung mit funktioneller Magnetresonanztomografie (fMRT)

Prof. Dr. Ralf Ringler  
Prof. Dr. Clemens Forster

## Differences in cortical activation patterns during pain with short and long durations and the effect of mental stress

Erschienen in: 268.13/VV18. 2013 Neuroscience Meeting Planner. San Diego, CA: Society for Neuroscience, 2013. Online. R. RINGLER<sup>1</sup>, P. V. D. KEYLEN<sup>2</sup>, K. DETMAR<sup>3</sup>, R. LOOSE<sup>3</sup>, C. FORSTER<sup>2</sup>;  
1 Univ. of Appl. Sci. Amberg-Weiden, Weiden, Germany; 2 Inst. of Physiol. 1, Univ. of Erlangen, Erlangen, Germany; 3 Radiology, Clin. Ctr. of Nuremberg, Nuremberg, Germany

### Introduction

Painful stimuli as well as stress induce autonomic responses which should depend on the type and duration of the painful stimulus. On the other hand if both stimuli are simultaneously applied, a stressful task can divert from pain resulting in reduced pain intensity. To assess the difference of the response of the autonomic nervous system to different durations of painful stimuli, this study combined pain and stress and examined the effects on autonomic reflexes, pain ratings and cortical responses during each task alone and during simultaneous execution. Deep pain was induced by cold pressure (CP) by immersing a foot into ice water. This maneuver evokes deep and dull pain accompanied by cardiovascular and other autonomic reflexes. Stress was induced by a Stroop task which involved naming the print color of a written color name. The intention of the study was to monitor the pain experience with and without distraction and to analyze corresponding changes in the cortical processing of pain and autonomic reflexes.

### Einleitung

Autonome Reflexe im Menschen werden durch schmerzhafte Reize und Stress ausgelöst. Die Art der Reize löst dabei unterschiedliche Reaktionen im vegetativen Nervensystem hervor. Werden Stress und Schmerz parallel präsentiert lenkt der Stress oft von der schmerzhaften Wahrnehmung ab und der Schmerz wird weniger stark empfunden. Um diese unterschiedliche Wahrnehmung von Schmerz darzustellen wurde diese Studie mit verschiedenen Kombinationen der Reizpräsentation durchgeführt. Die veränderte Schmerzwahrnehmung wurde durch die gleichzeitige Registrierung des Ratings, der Herzfrequenz und der kortikalen Verarbeitung mittels funktioneller Magnetresonanztomografie (fMRT). Der Cold Pressure Test (CP) löst durch Eintauchen des Fußes in Eiswasser einen Tiefenschmerz aus. Der Schmerz durch CP lässt sich als dumpfer, bohrender Schmerz beschreiben, was in der Regel reflektorisch das Herz-Kreislauf-System aktiviert und autonome Reflexe im Allgemeinen auslöst. Der Falschfarbentest – Stroop Test – löst dagegen Stress beim Probanden aus. Beim Stroop Test muss der Proband die Farbe der Buchstaben des Wortes in schneller Abfolge benennen – nicht die Farbe die das Wort beschreibt. Ziel der fMRT-Studie war die kortikale Schmerzverarbeitung und die Aktivierung kortikaler Strukturen durch die autonomen Reflexe mit und ohne Ablenkung durch Stress zu analysieren.

## Materials and methods

In this study mental stress was induced by a false color Stroop pattern to decrease the pain perception in subjects during cold pressure test (CP). The modulation and cortical representation of pain processing during short term CP (stCP) and long term CP (ltCP) stimuli was studied using psychophysical methods and BOLD-fMRI. Stroop (ST) was then used for stCP and ltCP to further discriminate the effect of mental stress.

## Materials and methods

14 healthy subjects (3 m/11 f, mean age 23.4y±2.9y) participated. Ethics committee approval was granted. In a first experiment, psychophysical data (rating, blood pressure, heart rate) were recorded. In the second experiment, fMRI was assessed using a block design with alternating stimulus and baseline of different time intervals. Short-term: ST 30s and stCP, stCP+ST 60s. Long-term: ltCP and ltCP+ST 120s. All stimuli ST, CP or CP+ST were alternately repeated 2 times applied with baselines in between. During baseline and ST the right foot was surrounded by “warm” water at 14°C (57°F) while under CP and CPS by “cold” water at 4°C (40°F). The Stroop task used was a false color task. fMRI data were acquired on a 1.5 T Siemens. All data were normalized to Talairach and transformed to a MPRAGE data set. fMRI was analyzed using a group study GLM design with BrainVoyager QX.

## Results

Pain rating was given continuously during the whole fMRI session on a visual analog scale from 0 – 100 (no pain to maximum pain). There is a significant decrease of pain perception during the first painful stimulus of long term ltCPS compared to ltCP alone. The second painful CP stimulus was less painful than the first stimulus (Figure 1). This is effect was observed during the short-term (st) stimuli in the same way (Figure 2).

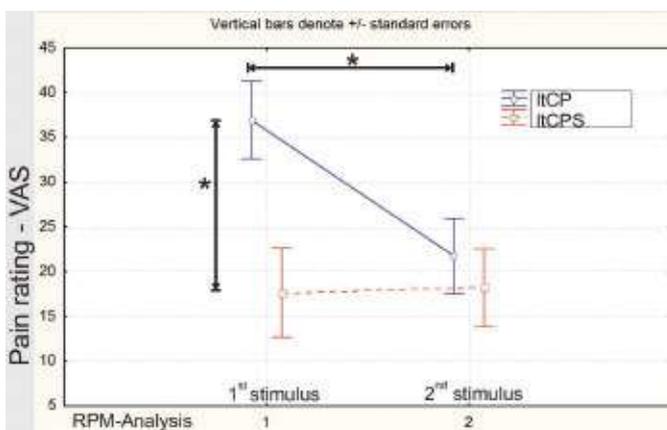


Figure 1: Pain perception during first and second stimulus. Comparison between long-term cold pressure and long-term cold pressure with Stroop.

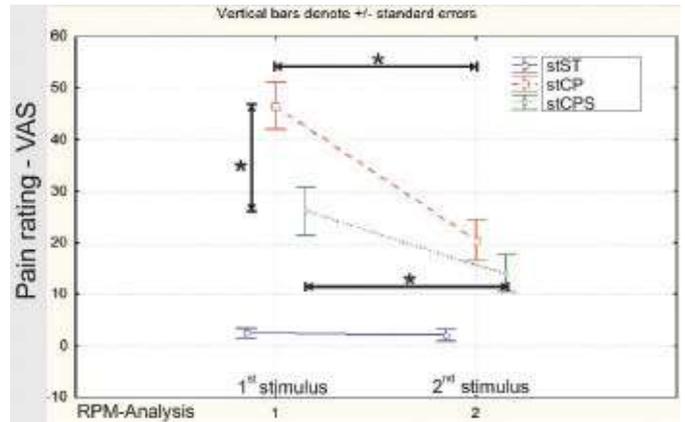


Figure 2: Pain perception during first and second stimulus. Comparison between short-term cold pressure and short-term cold pressure with Stroop.

Blood pressure was increased during the painful stimuli of CP.

During the stCP positive BOLD activation clusters were of smaller size (number of activated voxels) and a lower correlation value compared to long-term cold pressure. Only during the stCP negative BOLD clusters were found in BA 4 (precent. Gyrus), BA 6 (Middle Frontal Gyrus, MFG) and BA 8 (Sup. Front Gyrus) but not during the ltCP. Both stimuli lead to positive BOLD clusters in pain-specific areas such as ACC, BA 44 and in the anterior insula on both hemispheres (only for ltCP) and medial insula for ltCP and stCP. The effect of the Stroop task on the ltCP and stCP induced activations was tested by a contrast analysis in the general linear model (GLM contrast analysis with CP (+), CPS (-) for long & short-term stimuli). Activation in the BA 6 is stronger for CPS compared to CP. The cluster in BA6 is of greater magnitude during ltCPS than stCPS. The statistical t-values are vice versa (Figure 3).

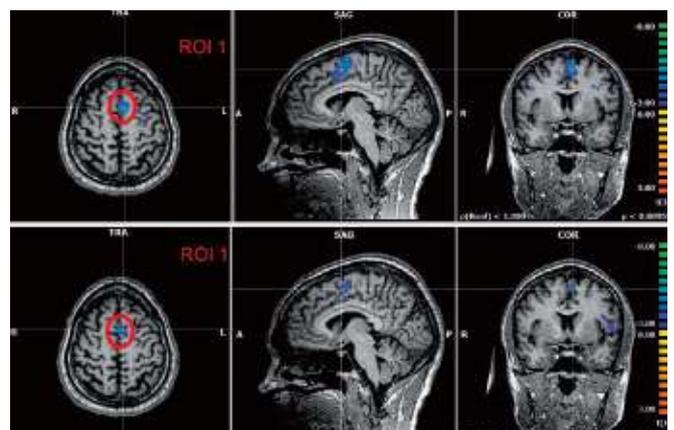


Figure 3: ROI 1: Upper row – long-term stimuli, lower row – short-term stimuli

Activation in the precentral gyrus is stronger for CPS compared to CP. The cluster size in the preCG is of greater magnitude during ltCPS than stCPS, as well as the statistical t-values (Figure 4).

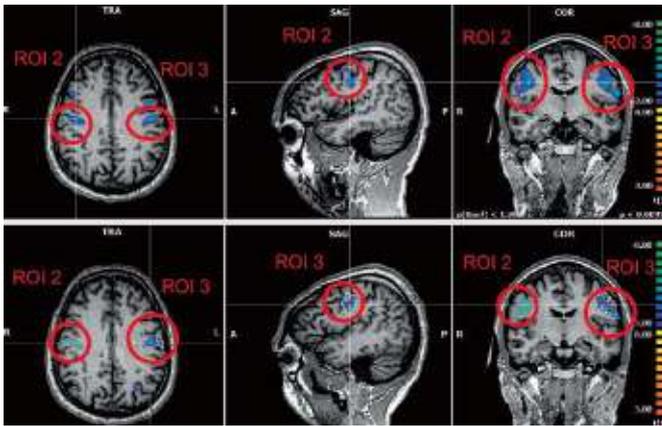


Figure 4: ROI 2-3: Upper row – long-term stimuli, lower row – short-term stimuli

The analysis with VOI-template (volume of interest) was performed with GLM of selected regions of region of interest (ROI). Pain-specific areas like S2 were activated more pronounced during all four stimuli compared to other cortical areas. The anterior and posterior cingulum show negative t-values whereas the medial part results in positive t-values. This effect was seen in right and left hemisphere. Insula was activated most during both stimuli CPS and CP (see Figure 5 and Figure 6)

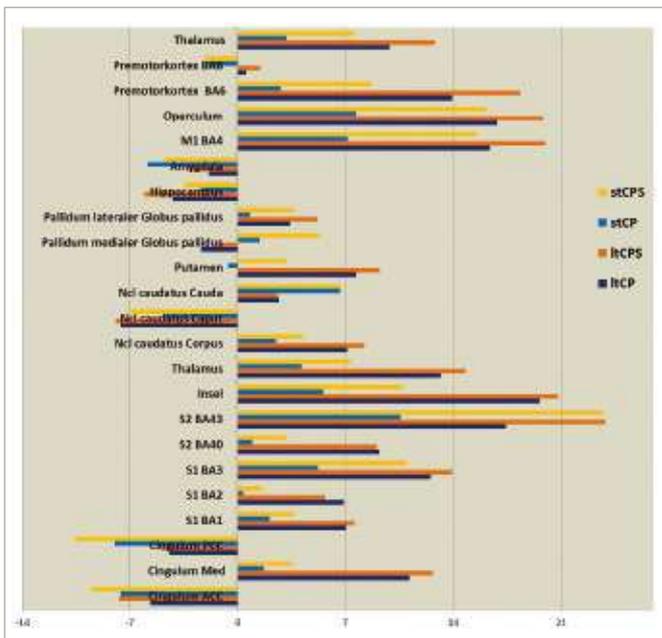


Figure 5: t-values for a ROI analysis using a template. This template uses predefined volumes of anatomical regions of the left cerebral cortex.

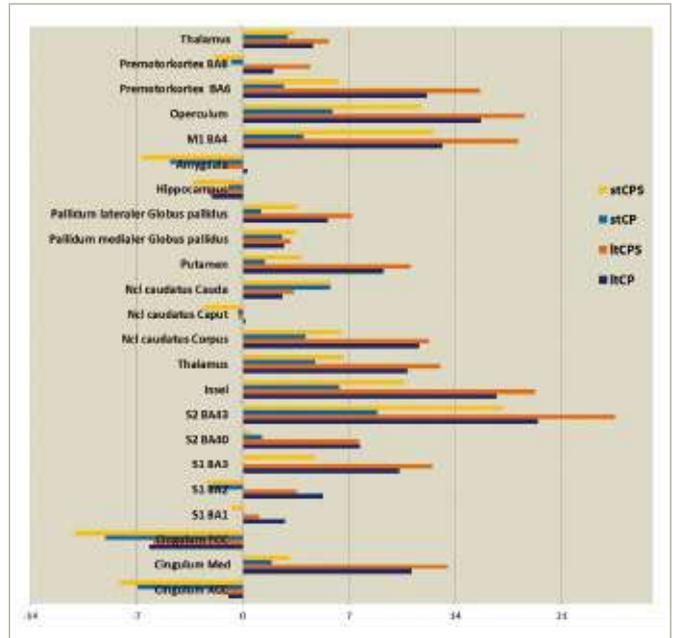


Figure 6: t-values for a ROI analysis using a template. This template uses predefined volumes of anatomical regions of the right cerebral cortex.

## Conclusion

Mental stress induced by a Stroop task effectively reduced the pain ratings of both long-term and short-term cold pressure tests. The changes of the BOLD signals of many pain-related brain areas were more pronounced during the long-term stimulus indicating a stronger integration of the affected areas with increasing pain duration. Negative BOLD changes in mid-frontal and orbito-frontal regions during short-term cold pressure stimuli can be interpreted as a sign of deactivations due to a reduced emotional rating of these pain stimuli, which are known to be only short in duration.

Distraction by the Stroop task significantly reduced the rating of pain induced by CP. The effect is independent of the stimulus duration (long or short-term). Pain induced by short-term stimuli is rated more intense than that induced by long-term stimuli. During long-term stimuli, stress induced by the simultaneous presentation of a Stroop task and cold pressure pain (CPS) increases the heart rate significantly more than the pain stimuli (CP) itself.

The reduction of pain by stress seems to be mediated by the anterior insular cortex and frontal areas. The cingulate cortex is involved in the differentiation of short versus long-term stimulation during both conditions: With and without distraction task.

Keyword(s): FMRI PAIN STRESS COLD-PRESSURE-TEST

**Kontakt:**



**Prof. Dr. Ralf Ringler**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen  
Medizintechnik/Medizinische Physik  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

[r.ringler@oth-aw.de](mailto:r.ringler@oth-aw.de)



**Prof. Dr. Clemens Forster**

Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg  
Institut für Physiologie und  
Pathophysiologie  
Schlossplatz 4  
91054 Erlangen

[forster@physiologie1.uni-erlangen.de](mailto:forster@physiologie1.uni-erlangen.de)

# Elektrischer Radnabenmotor für den Formula Student Rennwagen der OTH Amberg-Weiden

Prof. Dr.-Ing. Horst Rönnebeck

## Zusammenfassung

Bei dem neu entwickelten Radnabenmotor für den Rennwagen der Saison 2014 wurde ein Konzept verfolgt, das gegenüber aktuell eingesetzten Radnabenmotoren eine deutlich erhöhte Integrationsdichte aufweist und damit eine deutlich niedrigere Masse verspricht. Wesentliches Merkmal dieses Konzeptes ist, dass der Rotor direkt über dem Stator gelagert wird. Dadurch entfällt die sonst erforderliche seitliche Herumführung des Rotors um den Stator. Das Felgenbett einer mehrteiligen Rennsportfelge wird direkt an den Rotor verschraubt. Die Anbindung des neuartigen Radnabenmotors an das Chassis erfolgt über Querlenker am äußeren Rand des Stators. Der Stator übernimmt damit die Funktion des Achsschenkels. Dadurch werden die Radaufstandskräfte direkter in die Querlenker und in das Chassis geführt, was die Konstruktion steifer macht und damit die Fahrdynamik günstig beeinflusst.

Durch den Wegfall der seitlichen Umlenkung des Rotors wird in der Radnabenmitte erheblich Platz gewonnen, der dazu genutzt wird den Bremssattel und die Bremsscheibe aufzunehmen. Auf diese Weise können auch die Bremskräfte direkter in die Felge eingeführt werden als bei den bislang üblichen Konstruktionen.

Bei einem herkömmlichen, im Fahrzeug befindlichen Motor werden die Räder über ein Differenzial angetrieben, das dafür sorgt, dass das kurvenäußere Rad schneller laufen kann als das kurveninnere. Diese Funktion übernimmt bei Radnabenmotoren eine elektronische Ansteuerung, die Torque Vectoring genannt wird und erhebliche Freiheitsgrade gegenüber einem mechanischen Differenzial aufweist.

## Summary

The newly developed wheel hub motor for the 2014 season offers a significantly higher integration density than the wheel hub motors currently in use, thus permitting a significantly smaller mass. An essential characteristic of this concept is that the rotor is guided directly above the stator, making the lateral deflection of the rotor around the stator to the bearings situated within the stator obsolete. The rim of a multi-piece racing wheel is bolted directly to the rotor. This novel type of wheel-hub motor is connected with the chassis via wishbones at the outer edge of the stator. Thus, the stator takes on the task of the upright. This in turn causes the vertical wheel forces to be directly transmitted to the wishbones and the chassis, which makes the construction more rigid and hence positively influences the driving dynamics.

By eliminating the lateral deflection of the rotor, extra space in the centre of the wheel hub is gained, which is used to hold the brake calliper and disk. This way, the braking forces can be more directly transmitted into the rim than is the case with conventional constructions.

In a conventional engine located inside the vehicle, the wheels are driven via the differential, which ensures that the outer wheel turns faster than the inner wheel. In wheel-hub motors, this function is performed by specific electronic closed-loop control (called torque vectoring), which offers considerable degrees of freedom as compared to a mechanical differential.

## 1 Einführung

Im Rahmen der Teilnahme des Running Snail Racing Teams der OTH Amberg-Weiden bei der Formula Student Weltmeisterschaft wurde für den zweiten rein elektrisch angetriebenen Rennwagen ein elektrischer Radnabenmotor entwickelt, der an allen vier Rädern des Rennwagens eingesetzt wird.

Elektrische Radnabenantriebe werden bereits längere Zeit in verschiedenen Fahrzeugen eingesetzt. So entwickelte Ferdinand Porsche bereits 1899 sein erstes Elektrofahrzeug mit Radnabenmotor – den sogenannten Lohner-Porsche. War das damals eingesetzte Motor-konzept noch sehr schwer, so versprechen die heute eingesetzten permanent erregten Synchronmotoren ein deutlich verbessertes Leistungsgewicht. Radnabenmotoren ergeben eine deutlich verbesserte Antriebsdynamik gegenüber Rädern, die über herkömmliche Antriebswellen und im Chassis untergebrachte Elektromotoren angetrieben werden. Allerdings sind die Radmassen noch deutlich höher, was die Anpassung des Fahrwerkes und deren Dämpfersysteme erforderlich macht.

Alle neuartigen Radnabenantriebe setzen auf den permanent erregten Synchronmotor als sogenannter Außenläufermotor. Beispiele hierfür sind der Radnabenmotor von Protean Electric und Schaeffler.



Abbildung 1: Links: Radnabenmotor von Protean Electric [1] im Brabus 4WD Full electric  
Rechts: Radnabenmotor von Schaeffler [2] im Ford Fiesta E-Wheel Drive

Ein wesentliches Merkmal all dieser Motoren ist, dass sich die Lager zur Bewegungstrennung von Stator und Rotor innerhalb des Stators befinden und deshalb der Rotor seitlich um den Stator herumgeführt werden muss, damit dieser auf den Innenringen der Wälzlager aufgenommen werden kann. Dies hat den Vorteil, dass damit herkömmliche Felgenkonstruktionen angebunden werden können, den gravierenden Nachteil jedoch, dass die Konstruktion unnötig schwer wird und andere Komponenten wie das Bremssystem einschließlich Bremscheibe außerhalb der Radnabe angebunden werden müssen. Hinzu kommt, dass die Anbindung an das Fahrwerk in der Nähe der Drehachse erfolgt, was zu einer starken Umlenkung der

Radaufstandskräfte führt: Zunächst werden die Radaufstandskräfte im Kontaktpunkt des Reifens mit der Fahrbahn in das System eingeleitet, anschließend über die Umlenkung auf die Innenringe der Wälzlager geführt und von dort aus über Wälzlageraußenringe in den Nabenflansch. Von dort geht es über ein Achsschenkel-Querlenkersystem an das Fahrzeug. Diese starke Umlenkung führt zu Zusatzbeanspruchungen, die nur durch steifere, in der Regel schwere Konstruktionen abgefangen werden können.

## 2 Beschreibung des neuartigen Radnabenantriebes

Bei den neuentwickelten Radnabenmotoren wird der Rotor des permanent erregten Synchron-Außenläufermotors oberhalb des Stators gelagert. Dadurch entfällt die sonst erforderliche seitliche Herumführung des Rotors um den Stator. Die Felgen werden ohne Felgenstern direkt an den Rotor verschraubt. Hierzu wird das bereits in den vergangenen Jahren entwickelte Felgenbett aus kohlefaserverstärktem Kunststoff eingesetzt, das deutlich leichter als herkömmliche Felgen mit Felgenstern ist. Die Anbindung des neuartigen Radnabenmotors an das Chassis erfolgt über Querlenker am äußeren Rand des Stators. Der Stator übernimmt damit die Funktion des Achsschenkels. Dadurch werden die Radaufstandskräfte direkter in die Querlenker und in das Chassis geführt, was die Konstruktion steifer macht und damit die Fahrdynamik günstig beeinflusst. Damit handelt es sich um ein in der Formula Student bislang einzigartiges Konzept. Hinzu kommt, dass es sich um einen sogenannten Direktantrieb handelt, bei dem auf ein Getriebe verzichtet wird und das Drehmoment des Motors direkt auf das Rad wirkt. Diese Maßnahme reduziert die Anzahl der rotierenden und damit der zu lagernden Bauteile im Fahrzeug drastisch. Im Rennwagen der Saison 2014 sind insgesamt nur zwölf Wälzlager verbaut: Vier werden für die Lenkung benötigt und acht für die Räder, d.h. jeweils zwei pro Rad. Ebenfalls kann auf den Einsatz von Zahnrädern zur Drehzahlwandlung im Antrieb komplett verzichtet werden. Beide Maßnahmen erhöhen die Zuverlässigkeit der Konstruktion wesentlich, da Reibung und damit Verschleiß deutlich reduziert werden.

In Abbildung 2 sind die Ansichten von außen und innen sowie eine Explosionsansicht dargestellt. Im Wesentlichen besteht der Radnabenmotor aus folgenden Komponenten: Der Stator (9) aus verklebten Trafoblechen mit eingeklebten Aluminiumröhrchen (10) zur Führung des Kühlwassers. Diese Aluminiumrohre erfüllen zwei Aufgaben: Zum einen kann das Kühlwasser nicht direkt durch Bohrungen in den Statorblechen geführt werden, da die Gefahr besteht, dass Wasser zwischen die Bleche eindringt und zusätzlich Korrosion auftritt. Zum anderen wurde der Außendurchmesser der Aluminiumrohre so groß wie möglich gewählt, um durch den Ersatz von Stahl durch Aluminium Gewicht zu sparen. Der Einspareffekt hierdurch ist beträchtlich und beträgt ca. 500 g pro Motor.

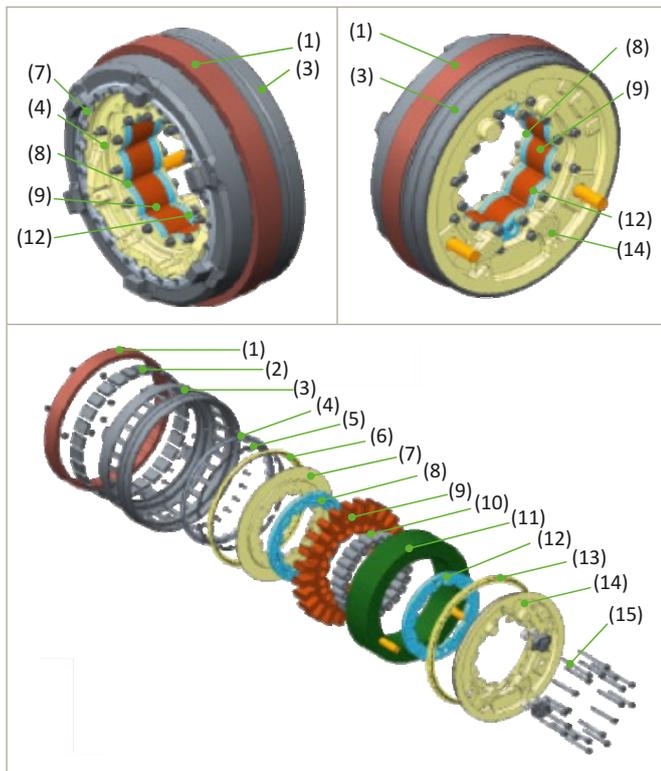


Abbildung 2: CAD-Model des Radnabenmotors – von außen, von innen, Explosionsdarstellung [3]

Das Spulenpaket (11), das um die 14 Statorpolpaare gewickelt ist und anschließend zum mechanischen Schutz der Wicklungen mit Vergussmaterial umgossen wurde.

Jeweils außen und innen am Stator liegen die Kühlringe (8), (12) an, die Kühlwasser abwechselnd vom einen Kühlrohr in das andere umlenken. Dabei wird das Kühlwasser von unten zugeführt in einem Verteiler auf die linke und rechte Seite des Motors aufgeteilt und wird dann mäanderförmig nach oben geleitet, wo das erwärmte Kühlwasser durch einen weiteren Verteiler wieder zusammengeführt und schließlich über Kühlschläuche zum Kühler geleitet wird.

Das Innengehäuse (14) stützt zum einen das innere Wälzlager (13) ab und dient zum anderen zur Befestigung der Aufnahmen für den unteren und oberen Querlenker sowie der Spurstange. Die Formgebung wurde dabei so gewählt, dass der Radnabenmotor an jeder beliebigen Stelle am Fahrzeug – also sowohl links als auch rechts, vorn wie hinten - eingesetzt werden kann. Dies reduziert einerseits die Teilevielfalt und andererseits können Reservemotoren ohne Umbaumaßnahmen an beliebiger Stelle am Fahrzeug montiert werden.

Das Außengehäuse (7) nimmt im Fall der Vorderräder zwei, bei den Hinterrädern einen Bremssattel auf. Auch hier wurde die Formgebung so gewählt, dass der Radnabenmotor an beliebiger Stelle am Fahrzeug montiert werden kann.

Der Stator, der innere und der äußere Kühlring sowie Innen- und Außengehäuse werden mit zwölf Passschrauben (15) miteinander verbunden. Diese Passschrauben haben drei Aufgaben:

1. Zentrierung der Bauteile zueinander. Diese Aufgabe hätte auch durch Zentrierabsätze gelöst werden können. Dadurch hätte aber die Innenkontur der Bauteile weiter nach innen gezogen werden müssen, wodurch die Konstruktion schwerer geworden wäre. Durch die geschwungene Innenkontur der Bauteile, die sich damit enger an die Kühlungsrohre im Stator schmiegen, konnten pro Motor etwa 400 g eingespart werden. Fertigungstechnisch ist diese Lösung jedoch aufwendiger und erfordert sehr genaue Positionstoleranzen der Passbohrungen in den einzelnen Teilen. Eine besondere Herausforderung bestand zudem darin, dass die Teile bei drei verschiedenen Partnerunternehmen gefertigt wurden und somit die Passbohrungen nicht nach vorherigem Ausrichten sämtlicher Teile und Durchreiben der Bohrungen hergestellt werden konnten.
2. Die wichtigste Aufgabe der Passbolzen ist das Abstützen des Drehmomentes des Motors gegenüber dem Innengehäuse, an dem die Radträger montiert sind. Anderenfalls hätte die Gefahr bestanden, dass nicht etwa der Rotor und damit das Rad angetrieben worden wäre, sondern sich der Stator mitsamt Wicklungspaket zwischen den Gehäusehälften verdreht hätte, wodurch das Stromversorgungskabel an der Durchführung durch das Innengehäuse abgeschert worden wäre.
3. Schließlich bringen die Passschrauben gemeinsam mit weiteren Schrauben eine Axialkraft auf, die notwendig ist, sämtliche Dichtflächen sicher zu verschließen.

Der sogenannte Preloadingring (4) wird über einen Absatz des Außengehäuses (7) geschoben und nimmt das äußere Wälzlager (6) auf. In der folgenden Schnittdarstellung (Abb. 3) wird die Funktion deutlicher.

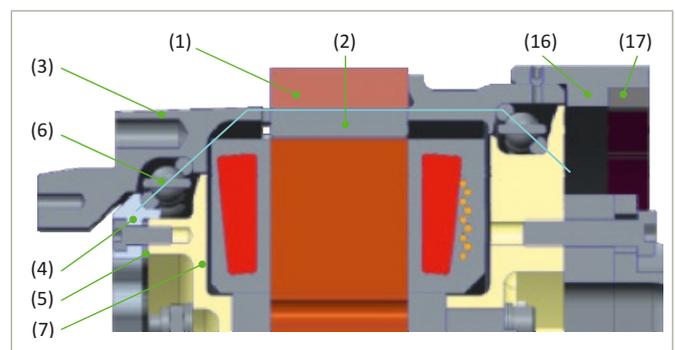


Abbildung 3: Teilschnitt durch oberen Teil des Radnabenmotors [3]

Zwischen Preloadingring (4) und Außengehäuse (7) werden Distanzplättchen (5) eingeschoben, wodurch das Lagerspiel der Wälzlager eingestellt werden kann. In dieser Abbildung ist zusätzlich der Lastpfad durch die

Drahtringlager (6) hellblau eingezeichnet, anhand dessen die O-Anordnung der Schrägkugellager deutlich wird. Die Drahtringlager sind eine Entwicklung der Firma Franke GmbH aus Aalen. Bei diesen laufen die Kugeln auf speziell geschliffenen Drähten. Dadurch können Lagerkonstruktionen realisiert werden, die außerordentlich schmal sind und damit zu einer erheblichen Reduktion der Masse der gesamten Konstruktion führen.

Auf das Rotorgehäuse (3) wird der Rückschlussring (1) geschoben, der wie der Stator aus aufeinander geklebten dünnen Trafoblechen besteht. Von innen werden durch entsprechende Aussparungen im Rotorgehäuse die Permanentmagnete (2) gegen den Rückschlussring eingelegt und verklebt. An das Rotorgehäuse wird von außen die Bremsscheibe (im Bild nicht dargestellt) aufgeschoben. Axial ist die Bremsscheibe über speziell konstruierte Federbleche schwimmend befestigt, wodurch diese die Bewegungen der Bremskolben mitmachen kann, ohne dass Zwangskräfte entstehen. Direkt auf das Rotorgehäuse wird das Felgenbett des Rades von außen montiert. Schließlich wurde von innen der sogenannte Sensorring (16) auf das Rotorgehäuse geschoben und mithilfe von mehreren, auf dem Umfang verteilten Gewindestiften gegen Verdrehen und axiales Verschieben gesichert. In dem Sensorring aus Aluminium ist wiederum der sogenannte Scanring (17) aus Stahl eingeschrumpft. Dieser Scanring übernimmt eine für die Funktion des Elektromotors entscheidende Aufgabe: Mithilfe dieses Ringes wird die Information des Winkels des Rotors gegenüber dem Stator an den Inverter weitergegeben, der diese für die Regelung der Drehbewegung benötigt. Hierzu ist auf der Innenseite des Scanringes eine sinusförmige Kontur eingearbeitet, die über zwei im Winkel von  $45^\circ$  angeordnete induktive Wegaufnehmer abgetastet wird. Auf diese Weise ist der Winkel des Rotors gegenüber dem Stator eindeutig bestimmbar. Der zweite Sensor ist für die Bestimmung der Drehrichtung erforderlich. Ändert sich das Signal des ersten Sensors z. B. sinusförmig, so ändert sich das des zweiten gemäß einer Cosinusfunktion. Wie sich in der Erprobungsphase herausstellte, wurden die Genauigkeitsanforderungen an diesen Aufbau unterschätzt, sodass noch während der Testphase ein völlig anderes Messverfahren an den Radträger appliziert werden musste, das später beschrieben wird.

### 3 Weitere konstruktive Besonderheiten

Die Wälzlager im Radnabenmotor haben unterschiedliche Durchmesser. Dies war aus Montagegründen zwingend erforderlich. Weiterhin werden in den Drahtringlagern statt herkömmlicher Stahlkugeln solche aus Keramik eingesetzt. Obwohl dieser Einsatz von der Firma Franke für die Serie noch nicht freigegeben ist, wurden bereits in den vergangenen Saisons positive Erfahrungen am Rennwagen gesammelt. Neben der verringerten Reibung und dem geringeren Gewicht gegenüber Wälzlagerkugeln aus Stahl wird durch die geringere Wärmeleitfähigkeit der

Keramikkugeln der Wärmeeintrag von den Außen- bzw. Innenringen auf den Wälzlagerkäfig reduziert. Dieser stellt nämlich eine Schwachstelle in der Konstruktion dar, da er aus Polyamid 12 gefertigt ist, der schon ab ca.  $80^\circ\text{C}$  merklich seine mechanischen Eigenschaften einbüßt.

Zur Vermeidung des Eindringens von Schmutz in die Wälzlager werden Spaltdichtungen eingesetzt. Diese bieten zwar keinen vollständigen Schutz, sind aber im Rennsport üblich, da sie einerseits besonders platzsparend und damit leicht sind und andererseits gegenüber gleitenden Dichtungen den Vorteil haben keine Reibung aufzuweisen. Hinzu kommt, dass in Anbetracht der großen Durchmesser an den Dichtungsstellen die Umfangsgeschwindigkeit sehr hoch ist, wodurch nur sehr hochwertige Dichtungsmaterialien infrage kommen. Schließlich konnte nur eine Sonderanfertigung derartiger Dichtungen in Betracht kommen, da vorkonfektionierte einen zu hohen Platzbedarf aufweisen.

Eine Montage des Motors ohne spezielle Montagevorrichtung verbietet sich, da es von Hand nicht möglich ist, den Stator exakt konzentrisch in den Rotor einzuschieben. Aufgrund der enormen Kräfte der Magnete würde dadurch der Stator schlagartig gegen die Permanentmagnete des Rotors gezogen werden und wäre von Hand nicht mehr von dort loszubringen.

Deshalb wurde eine Montagevorrichtung konstruiert und gefertigt, die in Abbildung 4 zu sehen ist.



Abbildung 4: Montagevorrichtung für den Radnabenmotor

Der Rotor ist auf einem Ring an der Vorrichtung fest verschraubt, während die Statoreinheit (Eisenkern mit Wicklungspaket zusammen mit den bereits verschraubten Kühlringen sowie Außen- und Innengehäuse) mithilfe einer Trapezgewindespindel langsam in den Rotor geschoben wird. Das äußere Wälzlager befindet sich samt Preloadring bereits innerhalb des Rotors. Bevor die Statoreinheit komplett in den Rotor abgesenkt wird, wird das innere Wälzlager eingelegt und von unten der Preloadring mit den dazwischen gelegten Distanzplättchen gegen das äußere Lagergehäuse geschraubt.

#### 4 Auslegung des Radnabenmotors

Das Herzstück des Radnabenmotors stellen der Stator mit seinem Wicklungspaket sowie der Rotor mit Permanentmagneten und Rückschlussring dar. Diese Komponenten wurden gemeinsam mit der Firma Fischer Elektromotoren in Billigheim entwickelt. Als wesentliche Zielgrößen waren Drehmoment und Leistung auf der einen Seite und Bauraumbeschränkungen sowie möglichst niedriges Gewicht auf der anderen Seite zu beachten. Lag die Auswahl und Auslegung der Permanentmagnete, der Trafobleche für Stator und Rückschlussring sowie der Wicklung in der Hand der Firma Fischer Elektromotoren, wurde die überwiegende geometrische Gestaltung der Konstruktion durch die Studierenden verantwortet. So wurde schließlich die Idee entwickelt, den Motor durch entsprechende Erweiterungen des Stators nach innen und Durchlenkung des Kühlwassers durch Aluminiumröhrchen zu kühlen.

Die gemessenen Daten des Motors sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 1: Technische Daten des Radnabenmotors

Nennmoment	157	Nm
Spitzenmoment	218	Nm
Nennleistung	17,14	kW
Spitzenleistung	22,18	kW
Drehmomentkonstante	5,11	Nm/A
Gesamtmasse	16,8	kg

Die Auslegung der übrigen Komponenten nahm einen großen Raum ein und wurde komplett von den Studierenden durchgeführt. Zum Einsatz kamen neben analytischen Methoden insbesondere Finite Elemente Berechnungen zur Ermittlung der Spannungen und Verformungen sowie der Erwärmung des Motors unter Berücksichtigung der Wasserkühlung. Zwei dieser Analysen seien exemplarisch herausgegriffen.

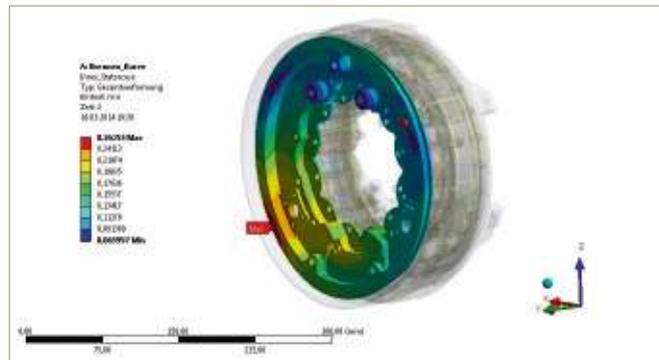


Abbildung 5: Verformungsanalyse mithilfe von ANSYS Workbench [3]

In Abbildung 5 ist das Ergebnis einer Beanspruchungsanalyse mithilfe von ANSYS Workbench dargestellt. Der Aufbau dieses Modells und das dazugehörige Netz waren außerordentlich komplex und konnten nur mit entsprechenden sogenannten Research-Lizenzen des Softwarepakets ANSYS Workbench realisiert werden, die Formula Student Teams von der Firma ANSYS im Rahmen eines Sponsoringvertrages kostenfrei zur Verfügung gestellt werden. Die Rechenzeit belief sich trotz des Einsatzes eines leistungsfähigen Rechners (Dell Precision T7600 mit zwei Intel Xeon E5-2680 Prozessoren und 32 Kernen sowie 128 GB Arbeitsspeicher) auf mehrere Tage. Im obigen Beispiel wurde als Extremfall eine Vollbremsung in Kurvenfahrt simuliert. Insbesondere war dabei die Verformung in der Nähe der Lagerstellen interessant. Nach konstruktiven Optimierungen in den Gehäusehälften belief sich diese im Bereich von 2,5 Zehntel Millimetern. Dieser Wert wurde in Anbetracht des angenommenen Extremfalles als akzeptabel eingestuft.

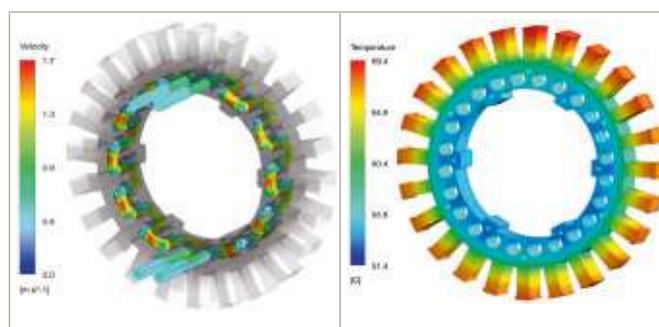


Abbildung 6: Strömungsgeschwindigkeit des Kühlwassers und Erwärmung des Stators [4]

In Abbildung 6 sind links die Strömungsgeschwindigkeit des Kühlwassers durch den Stator und rechts die Erwärmung des Stators infolge der ermittelten Verlustleistung des Radnabenmotors abgebildet. Als Ergebnis dieser Untersuchungen wurde der Druckverlust zwischen Kühlwasserein- und -austritt sowie die Erwärmung infolge der Verluste als annehmbar angesehen. Weiterhin wurden die Ergebnisse zur Auslegung der Kühlwasserpumpe und des Kühlers verwendet.

## 5 Fertigung der Motoren

Die Fertigung der Motoren wurde aufgrund der teilweise erheblichen Komplexität der Bauteile überwiegend durch Partner des Running Snail Racing Teams vorgenommen. Das Rennwagenprojekt der OTH Amberg-Weiden kann sich glücklich schätzen, derart viele leistungsfähige Unternehmen als Partner zu haben. Dadurch konnten die komplexen Fertigungsarbeiten auf viele Schultern verteilt werden. Die Parallelisierung von Fertigungsarbeiten sparte auf der einen Seite Zeit, auf der anderen Seite war der logistische Aufwand seitens der technischen Leitung des Teams beträchtlich. Es wurde ein Projektplan erarbeitet und während der Fertigungsphase täglich auf dem neusten Stand gehalten. So konnte stets rechtzeitig auch auf unvorhergesehene Ereignisse adäquat reagiert und die Arbeiten der insgesamt 13 an der Fertigung der Radnabenmotoren beteiligten Unternehmen koordiniert werden.

## 6 Inbetriebnahme und Erprobungsphase

Die Inbetriebnahme der Radnabenmotoren nahm einen deutlich größeren Zeitraum in Anspruch als dies ursprünglich geplant war. Ursache war insbesondere die von Studierenden selbst entworfene Schaltung, die die Signale der induktiven Wegaufnehmer in amplitudenmodulierte Signale mit einer vom Wechselrichter gelieferten Trägerfrequenz umwandelt und diesen für das Sinus- und das Cosinussignal zur Verfügung stellt. Es bedurfte einiger Modifikationen und unzähliger Stunden an Testzeit bis sich der Radnabenmotor erstmals drehte. Viele weitere Tage vergingen, bis sich erstmals alle vier Radnabenmotoren am Rennwagen drehten und der Rollout des Fahrzeuges in Angriff genommen wurde. Dieser und auch weitere Testfahrten mit dem Rennwagen waren ernüchternd: Die Motoren erzeugten bereits bei moderaten Geschwindigkeiten derart starke Vibrationen, dass ab ca. 40 km/h der Fahrer den Rennwagen nicht mehr ausreichend genug kontrollieren konnte, da sein Gesichtsfeld aufgrund der enormen Vibrationen verschwamm. Schließlich wurde das Konzept zur Erfassung der Winkellage (Resolver) als Ursache für die starken Vibrationen identifiziert. Dies war besonders deshalb ärgerlich, da damit die gesamte Zeit für die Inbetriebnahme der Resolverschaltung vergebens war.

Der Fehlschlag des ursprünglichen Resolverkonzeptes hatte folgende Ursachen: Die Anforderung des Inverters bezüglich der Genauigkeit der Winkellageinformation des Rotors liegt bei etwa 10 Winkelminuten. Die induktiven Wegaufnehmer haben einen auswertbaren Entfernungsbereich von 2 mm. Um auf der sicheren Seite zu sein, wurde in den Scanning eine sinusförmige Kontur eingearbeitet, die eine Höhendifferenz von 1,6 mm aufweist. Damit aber die Genauigkeitsforderung von 10 Winkelminuten noch eingehalten werden kann, müsste allein

die zulässige Formabweichung der Kontur knapp unter  $0,75\ \mu\text{m}$  liegen. Dieser Wert war mit dem vorgesehenen Fertigungsverfahren – dem Drahterudieren – nicht realisierbar. Die Angabe der Formabweichung auf der Zeichnung, die dem Fertiger vorgelegt wurde, lag bei  $2\ \mu\text{m}$  und war durchaus schon ambitiös. Eine weitere Problematik ist die Tatsache, dass nach Angaben des Herstellers die Toleranz der Wegaufnehmer in der Größenordnung von  $\pm 10\ \mu\text{m}$  liegt. Die beiden Ungenauigkeiten in Summe führten dazu, dass während der Rotor sich drehte, der Inverter leicht schwankende Winkelsignale erhielt, die er versuchte auszuregulieren, wodurch entsprechende Vibrationen erzeugt wurden.

Somit musste praktisch über Nacht ein gänzlich anderes Resolverkonzept erarbeitet werden. Schwierigkeit war insbesondere, dass zwar für permanent erregte Synchronmotoren mit Innenläufern sehr viele Resolver zugekauft werden können, bei Außenläufer-Motoren aber die Anbindung der Resolver an den außen rotierenden Rotor schwierig ist. Eine Anbindung des Resolvers an den Rotor in Höhe der Innengehäuseebene kam aufgrund von Kollisionen mit den Querlenkern überhaupt nicht in Betracht, sodass schließlich eine Anbindung nur außerhalb, noch vor den Bremscheiben übrig blieb. Hierbei musste zudem eine Einschränkung des Reglements beachtet werden, nach der kein Bauteil des Fahrzeuges außerhalb der seitlichen Reifenkontur herausragen darf. Die konstruktive Lösung ist in Abbildung 7 dargestellt.



Abbildung 7: Radnabenmotor mit neu entwickelter Resolverlösung

Der Resolver (2) ist über eine vierarmige Platte (1) zentrisch mit dem Stator verbunden. Der rotierende Teil des Resolvers ist über eine kleine Kupplung mit dem Dreiarmling (3) verbunden, der seinerseits mit der Felge verschraubt ist. Besondere Herausforderung war, dass die neue Konstruktion komplett in der Hochschule gefertigt werden musste, damit möglichst schnell die Konstruktion erprobt werden konnte. Nach etwa einem Tag Konstruktionsarbeiten und weiteren drei Tagen Fertigung sowie Kaufteilbeschaffung konnte am Prüfstand und wenig später am Fahrzeug der Nachweis erbracht werden, dass das neue Resolverkonzept seine Funktion erfüllt.

Kurz nach der ersten erfolgreichen Fahrt wurde das selbstentwickelte Regelungsmodell für das Torque Vectoring im Fahrzeug implementiert, das das mechanische Differenzial in seiner Funktion nachbildet. Allerdings bestehen erhebliche regelungstechnische Freiheiten, die dazu genutzt wurden, die Kurvendynamik des Rennwagens zu verbessern und die Lenkkräfte zu reduzieren.

## 7 Fazit

Der vorgestellte Radnabenmotor, der innerhalb eines halben Jahres von Studierenden der OTH Amberg-Weiden entwickelt wurde, konnte am Rennwagen unter Beweis stellen, dass er zumindest prinzipiell seine Funktion erfüllt. Allerdings konnten nicht alle Erwartungen an dieses Konzept erfüllt werden. Insbesondere hat er zum derzeitigen Zeitpunkt nicht nachweisen können, dass er eine ausreichende Zuverlässigkeit aufweist, das Ausdauerrennen einer Formula Student Weltmeisterschaft zu überstehen. Auf der anderen Seite beeindruckt sein konstruktives Konzept, vor allem wenn man bedenkt, dass der gesamte Motor von Studierenden im dritten Semester ihres Maschinenbaustudiums entwickelt, konstruiert, gebaut und erprobt worden ist. Dies hat auch viele Wettkampfrichter und Teams anderer Hochschulen in Hockenheim beeindruckt.

Ungeklärt ist bislang die Ursache für den kapitalen Schaden in der fünften Runde des Ausdauerrennens in Hockenheim, bei dem die Lager des vorderen, rechten Radnabenmotors versagten, Kugeln aus dem sich öffnenden Spalt austraten und schließlich der Rotor komplett auf dem Stator blockierte. Es liegt die Vermutung nahe, dass die Verformungen der Gehäusescheiben während der Kurvenfahrt doch größer als zulässig sind, wodurch die Kugeln aus den Führungsdrähten springen und damit eine korrekte Bewegungstrennung nicht mehr stattfinden kann. Derzeit finden Messungen mithilfe von Dehnungsmessstreifen an den Gehäusescheiben statt, die hier Klarheit bringen sollen. Darüber hinaus konnten inzwischen höhere Temperaturen im Rotor nachgewiesen werden, als die im Rahmen der Simulation berechneten.

Dies kann schlimmstenfalls die Lagerkäfige aus PA12 zum Schmelzen bringen, wodurch ebenfalls ein Versagen auftreten kann.

Das vorgestellte Konzept des Radnabenmotors wird in der kommenden Rennsaison nicht weiterverfolgt, da es sich nicht bewährt hat. Auch die im Vergleich zu schnelllaufenden Innenläufermotoren deutlich höheren ungefederten Massen sind Grund für diese Entscheidung. Dies mag auf den ersten Blick bedauerlich sein, da es sich um ein interessantes Konzept handelt, das durchaus Potenzial für Optimierungen besitzt. Auf der anderen Seite ist die Grundidee des Formula Student Wettbewerbes, ein wettbewerbsfähiges Fahrzeug zu entwickeln und nicht allein nur interessante Konzepte. Dieser Grundgedanke entspricht ingenieurmäßigen Vorgehen, bei dem am Ende nicht die Idee allein zählt, sondern ihre erfolgreiche Umsetzung und damit der technische und wirtschaftliche Erfolg.

---

## Quellenangaben

- [1] Terry A. Miller in Technology Tell: „*Protean Electric Unveils Production In-Wheel Electric Drive System*“, [http://www.technologytell.com/in-car-tech/files/2012/12/Protean\\_in\\_Wheel\\_with\\_Micro\\_Inverters-BLR.jpg/](http://www.technologytell.com/in-car-tech/files/2012/12/Protean_in_Wheel_with_Micro_Inverters-BLR.jpg/), abgerufen 15. Januar 2015
- [2] SCHAEFFLER AG, FRANKFURT/HERZOGENAURACH: „*Der Antrieb für das Stadtauto von morgen – Schaeffler präsentiert Ideenauto mit E-Wheel-Drive*“, <http://www.schaeffler.com/content.schaeffler.de/de/press/press-releases/press-details.jsp?id=36973192>, abgerufen 15. Januar 2015
- [3] Baumann, B.; Dorsch, J.; Flierl, S.; Grajer, J.: Ausarbeitung zur Studienarbeit „*Konstruktion des Antriebes des Rennwagens für die Formula Student 2014*“ im Fach Konstruktion II, OTH Amberg-Weiden, März 2014
- [4] Scherbl, F.; Sippl, D.: Ausarbeitung zur Studienarbeit „*Entwicklung und Konstruktion der Kühlung des Rennwagens für die Formula Student 2014*“ im Fach Konstruktion II, OTH Amberg-Weiden, März 2014
- [5] Bildquelle: Scheuplein, FSG

## Formula Student

Seit zehn Jahren entwickeln, konstruieren, bauen und erproben Studierende der Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden Rennfahrzeuge für die Formula Student Weltmeisterschaft, dem größten und anspruchsvollsten studentischen Konstruktionswettbewerb der Welt. Seit zwei Jahren wird ein Rennwagen mit rein elektrischem Antrieb entwickelt.

Der Ablauf des Wettbewerbes, der in vielen Ländern auf der Welt stattfindet, gliedert sich in zwei Abschnitte: den sogenannten statischen und den dynamischen Events:

Bei den **Static Events** müssen die Studierenden in drei Teilwettbewerben einer Jury von Experten aus Industrie und Wirtschaft Rede und Antwort stehen. Die Wettbewerbssprache ist dabei Englisch.

### Design Event

Die konstruktive Umsetzung des Rennwagens wird durch eine Jury aus Ingenieuren kritisch begutachtet und das Wissen der Studierenden geprüft.

### Cost Event

Der zuvor eingeschickte Cost Report listet die Kosten des Rennwagens bis ins kleinste Detail auf. Das wirtschaftlich überzeugendste Fahrzeug gewinnt.

### Presentation Event

Mit einem Geschäftsplan und einem Vortrag muss eine fiktive Investorengruppe aus Wettkampfrichtern für die Vermarktung des Rennwagens gewonnen werden.

In den **dynamischen Events** zeigt sich, ob die Ideen der Studierenden in eine überzeugende Performance des Rennwagens umgesetzt wurden. Bevor der Rennwagen an diesen Wettbewerben teilnehmen kann, muss er eine intensive Untersuchung überstehen, bei der überprüft wird, ob er in jeder Weise dem Regelwerk entspricht.

### Acceleration

Beschleunigungsrennen über 75 Meter

### Skid Pad

Ein enger Kurs in Form einer liegenden Acht.

### Autocross

Ein anspruchsvoller Handlingskurs mit Schikanen und Haarnadelkurven über 800 m.

### Endurance

Der anspruchsvollste Wettbewerb. Hier muss der Rennwagen 22 km durchhalten. Nach 11 km erfolgt ein Fahrerwechsel.

### Energy Efficiency

Der Rennwagen mit dem geringsten Energieverbrauch bei bester Performance im Endurance-Rennen gewinnt.



Abbildung 8: Das Running Snail Racing Team der OTH Amberg-Weiden bei der Formula Student Weltmeisterschaft 2014 in Hockenheim [5]

Das Running Snail Racing Team der Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden wird von über 100 Unternehmen unterstützt. Hierfür bedankt sich das Team ganz herzlich. Insbesondere folgende Firmen unterstützten das Team bei der Fertigstellung des Radnabenmotors:



**Kontakt:**



**Prof. Dr.-Ing. Horst Rönnebeck**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

[h.roennebeck@oth-aw.de](mailto:h.roennebeck@oth-aw.de)

Prof. Dr.-Ing. Horst Rönnebeck: Seit 1999 Professor an der OTH Amberg-Weiden für das Lehrgebiet Konstruktion. Seit zehn Jahren Faculty Advisor des Running Snail Racing Teams.

# Die empirischen Determinanten des Suizidverhaltens in den OECD-Ländern

## Hintergrund

Seit Beginn der Finanz- und Wirtschaftskrise in Europa kommt es immer wieder zu Befürchtungen, dass in den von der Krise am stärksten betroffenen Ländern sich der Gesundheitszustand der Bevölkerung verschlechtern und die Neigung zur Selbsttötung zunehmen könnte. In diesem Zusammenhang findet vor allem auch der starke Anstieg der Arbeitslosigkeit in den südeuropäischen Ländern eine besondere Beachtung (WHO 2009). Die Soziologie, Psychologie und Ökonomie beschäftigen sich schon seit Langem mit den Determinanten des Suizids. Der Beitrag dieser Studie zur empirischen Forschung auf diesem Gebiet beruht vor allem auf zwei Punkten: Sie erweitert den Beobachtungsumfang gegenüber ähnlichen Studien deutlich, indem sie ein Panel mit 25 Ländern nutzt, die teilweise bis zu 40 Jahre beobachtet werden. Da der moderne Wohlfahrtsstaat die individuelle Betroffenheit von Arbeitslosigkeit abmildert, wurde die empirische Literatur auch um diesen Punkt erweitert. Potenzielle Hypothesen zu den Wirkungen der Arbeitsmarktinstitutionen Kündigungsschutz und Arbeitslosenunterstützung in Bezug auf die Suizidraten werden ausführlich diskutiert.

Schlüsselworte: Paneldaten, Suizid, Arbeitslosigkeit, Kündigungsschutz, Arbeitslosenunterstützung  
JEL Classifications: C 23, E 24, I 10, J 65

## Background

Since the beginning of the financial and economic crisis in Europe, there have been concerns that in those countries most affected by the crisis the population's state of health may deteriorate and the inclination towards suicide may increase. In this context, special attention has been paid to the sharp rise in unemployment in Southern European countries (WHO 2009). Sociologists, psychologists and economists have been concerned with the determinants of suicide for a long time. This study contributes to the empirical research made in this area by mainly concentrating on two aspects: Firstly, by using a panel of 25 countries that have partly been observed for up to 40 years, the scope of research has been considerably expanded. Secondly, since modern welfare systems alleviate the individual consequences of unemployment, the empirical literature has been extended to include this point. Hypotheses regarding the possible effects of labour market institutions (e. g. dismissals protection or unemployment compensation) on suicide rates will be discussed in detail.

Key words: Panel data, suicide, unemployment, dismissals protection, unemployment compensation

## Einleitung

Seit Beginn der Finanz- und Wirtschaftskrise in Europa kommt es immer wieder zu Befürchtungen, dass in den von der Krise am stärksten betroffenen Ländern sich der Gesundheitszustand der Bevölkerung verschlechtern und die Neigung zur Selbsttötung zunehmen könnte. In diesem Zusammenhang findet vor allem auch der starke Anstieg der Arbeitslosigkeit in den südeuropäischen Ländern eine besondere Beachtung (WHO 2009).

Die Soziologie und Psychologie beschäftigt sich schon seit Langem mit den Determinanten des Suizids. Durkheim (1951) stellte bereits im 19. Jahrhundert fehlende soziale Integration als einen den Suizid fördernden Faktor heraus. Ebenso wie Wagner (1864) wies er auf die Bedeutung der Religion im Zusammenhang mit dem Suizidgeschehen hin. Sie stellten mit ihren empirischen Untersuchungen auch fest, dass bei der katholisch gegenüber der protestantisch geprägten Bevölkerung die Suizidraten niedriger sind. Soziologen betonen insbesondere den Verlust an sozialen Bindungen oder die Zerstörung sozialer Netzwerke als mögliche Faktoren für höhere Suizidraten. Deshalb integrieren empirische Studien beispielsweise Fertilitäts- und Scheidungsraten als erklärende Variablen, um die sozialen Interaktionen in einer Gesellschaft zu berücksichtigen (z. B. Chuang/Huang 1997, Durkheim 1951).

Hamermesh und Soss (1974) sowie Becker und Posner (2004) haben eine ökonomische Theorie des Suizids entwickelt. Dabei wird Suizid als ein in die Zukunft gerichtetes nutzenmaximierendes Verhalten eines rationalen Agenten modelliert. Tendiert der abdiskontierte erwartete Lebenszeitnutzen unter eine bestimmte persönliche Schwelle, nimmt die Wahrscheinlichkeit eines Suizids zu. Der persönliche Lebenszeitnutzen hängt entscheidend von den zukünftigen Konsummöglichkeiten ab. Empirische Studien berücksichtigen deshalb die Arbeitslosenquote, das BIP pro Kopf beziehungsweise das Wachstum als Einflussfaktoren. Die (Gefahr der) Arbeitslosigkeit führt aus ökonomischer Sicht zu einem niedrigeren (unsicheren) Einkommensstrom, womit der zukünftige Nutzen des Agenten eingeschränkt wird. Zudem ist Arbeitslosigkeit stark damit verbunden, dass die Individuen aus ihrer gewohnten sozialen Umgebung und ihren Netzwerken gerissen werden. Dem wirkt allerdings entgegen, dass die Individuen in Boomphasen weniger Zeit haben, präventive gesundheitliche Maßnahmen zu ergreifen sowie die familiären und privaten Bindungen zu pflegen (Chuang/Huang 1997, Neumayer 2004). Andere Autoren betonen auch, dass Arbeitslosigkeit oder die Befürchtung arbeitslos zu werden Stress- und Angstzustände hervorrufen, das Vertrauen reduzieren, den Gesundheitszustand verschlechtern sowie schwerwiegende Krankheiten, wie Depressionen, bewirken kann und somit die Gefahr eines Suizids steigen lässt (Neumayer 2004, Ruhm 2000, Noh 2009). Bis auf wenige Ausnahmen haben die meisten

empirischen Studien eine signifikant positive Beziehung zwischen den Suizidraten und der Arbeitslosigkeit gefunden (Breuer 2014, Kuroki 2010, Milner u. a. 2013, Ruhm 2000, Stuckler u. a. 2009).

Aufgrund der Studien von Helliwell (2007) und Neumayer (2003) ist davon auszugehen, dass es in jeder empirischen Studie auf diesem Gebiet zudem eine Vielzahl an nicht beobachtbaren oder unbeobachteten Einflussfaktoren gibt, die zwischen den Ländern differieren. So variieren beispielsweise das Klima, die Sonnenscheindauer, die geografische Lage, die Religiosität und gesellschaftliche Normen zwischen den Ländern und sind gleichzeitig mit den Suizidraten korreliert. Außerdem ist es möglich, dass bei der Diagnose eines potenziellen Suizidfalls in den einzelnen Ländern unterschiedlich vorgegangen wird. Um die Verzerrung durch vernachlässigte Variablen abzumildern, ist es deshalb erforderlich, diese unbeobachtete Heterogenität mittels geeigneter Panelschätzer zu modellieren.

Der Beitrag dieses Aufsatzes zur empirischen Forschung gestaltet sich wie folgt: Erstens benutzen wir ein Panel mit 25 Ländern, die wir teilweise bis zu 40 Jahre beobachten. Im Durchschnitt beobachten wir jedes Land ungefähr 30 Jahre. Damit dehnen wir auf diesem Gebiet den Beobachtungsumfang gegenüber anderen internationalen Panelstudien deutlich aus. Die meisten Studien (Andrés 2005, Neumayer 2004, Noh 2009) verwenden einen Beobachtungsumfang von durchschnittlich 10 bis 20 Jahren. Um die unbeobachtbare Heterogenität zu kontrollieren, verwenden die Studien Modelle mit festen Effekten (fixed effects model). Diese Verfahren setzen aber im Zusammenhang mit einem relativ kleinen zeitlichen Beobachtungsumfang pro Land die strikte Exogenität aller Einflussfaktoren voraus. Vergrößert man den zeitlichen Umfang, so geht selbst bei schwacher (kontemporärer) Exogenität der Einflussfaktoren die Inkonsistenz der Schätzer mit der Rate  $1/T$  gegen 0 (Wooldridge, 2002 and Vogelsang, 2012).

Da der moderne Wohlfahrtsstaat die individuelle Betroffenheit von Arbeitslosigkeit abmildert, haben wir die empirische Literatur auch um diese Punkte erweitert. Potenzielle Hypothesen zu den Wirkungen der Arbeitsmarktinstitutionen Kündigungsschutz und Arbeitslosenunterstützung in Bezug auf die Suizidraten werden ausführlich diskutiert (Rottmann 2014). Die empirischen Ergebnisse zeigen, dass ein stringenterer Kündigungsschutz sowohl für Männer als auch für Frauen die Suizidrate signifikant erhöht, dagegen senkt eine großzügigere Arbeitslosenunterstützung die Suizidrate der Männer signifikant. Diese Ergebnisse blieben auch bei vielfältigen Robustheitsüberprüfungen bestehen. So waren sie unabhängig von den verwendeten Variablen für die Arbeitsmarktinstitutionen, dem Stichprobenzeitraum und den ökonometrischen Schätzverfahren (Rottmann 2014).

## Datenbeschreibung und empirische Spezifikation

In der Studie wird für die Jahre von 1970 bis 2011 ein Panel von 25 OECD-Staaten verwendet. Als Datenbasis nutzen wir den Economic Outlook und die Gesundheitsstatistiken der OECD sowie weitere Daten der OECD. Tabelle 1 zeigt einige deskriptive Statistiken für die Suizidraten, gemessen als Anzahl der Suizide pro 100.000 Einwohner. Da wir ein unbalanciertes Panel benutzen, gibt die Spalte „Obs“ jeweils die Anzahl der Beobachtungen pro Land an. Für eine beachtliche Anzahl an Ländern können die verwendeten Variablen über den gesamten Zeitraum beobachtet werden, wohingegen für manche Länder nur kurze Perioden zur Verfügung stehen. Die durchschnittlichen, minimalen und maximalen Suizidraten werden sowohl für Männer als auch für Frauen für alle Länder wiedergegeben. Die Suizidraten der Männer

sind in allen Ländern deutlich höher als die Suizidraten der Frauen. Deshalb werden wir der Literatur folgend die Modelle für Frauen und Männer getrennt schätzen. Die Suizidraten variieren erheblich zwischen den Ländern. Die Standardabweichung zwischen den Ländern (between standard deviation) ist zwar größer als die Standardabweichung innerhalb der Länder (within standard deviation), trotzdem zeigen die Suizidraten innerhalb der einzelnen Länder eine beträchtliche Variation über die Zeit (vergleiche das Maximum und Minimum in Tabelle 1). So beträgt das durchschnittliche Verhältnis zwischen Maximum und Minimum über alle Länder für Männer (Frauen) 1,7 (2,1). Ohne Variation über die Zeit innerhalb der Länder wäre es nicht möglich, Modelle mit festen Effekten zu schätzen, da bei diesen eine länderspezifische Mittelwertbereinigung aller Daten durchgeführt wird.

Tabelle 1: Deskriptive Statistiken für die Suizidraten pro 100.000 Einwohner

Country	Obs.	Male			Female		
		Mean	Min	Max	Mean	Min	Max
Australia	6	19.40	17.20	21.90	4.98	4.40	5.30
Austria	41	35.72	23.10	46.40	11.38	6.00	15.20
Belgium	36	29.97	25.00	36.20	11.77	9.10	16.40
Canada	30	20.86	16.30	25.00	6.00	4.80	8.20
Czech Republic	11	25.04	22.20	29.20	4.94	4.00	6.40
Denmark	41	28.78	14.60	45.40	13.97	4.70	23.60
Finland	41	40.15	26.30	50.80	10.32	7.10	12.30
France	38	30.66	25.20	38.00	10.33	8.00	13.30
Germany	22	21.07	16.50	26.70	6.62	4.80	9.60
Greece	15	5.46	4.60	6.10	1.14	0.80	1.50
Hungary	11	43.50	38.80	50.60	10.32	9.20	12.20
Ireland	14	18.99	16.40	23.50	4.51	3.80	5.60
Italy	36	11.54	9.10	14.00	3.66	2.40	4.70
Japan	36	28.85	22.50	35.60	14.00	10.30	19.30
Korea	7	39.79	27.90	45.10	15.99	10.30	19.30
Netherlands	41	14.04	11.60	17.50	7.29	4.80	10.20
New Zealand	36	20.24	13.80	24.80	6.57	4.30	9.10
Norway	41	18.99	13.70	25.40	6.83	4.40	9.50
Poland	11	27.37	24.20	29.50	4.25	3.60	5.00
Portugal	38	16.10	9.00	21.30	4.28	1.90	6.40
Spain	31	12.16	8.70	13.90	3.51	2.60	4.20
Sweden	40	24.01	17.30	31.20	9.58	6.10	13.00
Switzerland	40	31.52	18.10	39.60	11.82	6.50	15.80
United Kingdom	31	11.78	10.10	13.50	4.04	2.80	6.80
United States	37	20.97	18.50	22.90	5.54	4.10	7.90
All Countries							
Mean			23.68			8.14	
Std. overall			9.88			4.21	
Std. between			9.76			3.92	
Std. within			4.22			2.20	

Tabelle 2 zeigt die deskriptiven Statistiken für die unabhängigen Variablen. Die Fertilitätsraten (Kinder pro Frau im Alter zwischen 15 und 49 Jahren) sind der Familien-datenbank (OECD family database) und die Scheidungs-raten (Scheidungen pro 1000 Einwohner) den sozialen Indikatoren der OECD entnommen. Diese beiden Variablen dienen dazu, die soziale Integration und die sozialen Kontakte bei den Schätzungen zu berücksichtigen. Familiäre Bindungen sind eine der wichtigsten Formen sozialer Kontakte. Außerdem ist zu vermuten, dass das Vorhandensein eigener Kinder die Hemmschwelle für suizidale Handlungen erhöht. Zusätzlich nehmen wir eine Variable für die Altersstruktur der Bevölkerung (Anteil der über 65 Jährigen in Prozent) in unsere Schätzungen auf. Außerdem berücksichtigen wir die durchschnittliche Lebenserwartung der Männer und Frauen, um den Gesundheitszustand der Bevölkerung zu erfassen. Eine schlechte medizinische Versorgung, mangelhafte Ernährung, verschmutzte Umwelt und ähnliche Faktoren beeinträchtigen die Gesundheit und reduzieren damit einhergehend die Zufriedenheit der Menschen. Das BIP pro Kopf, die Verbraucherpreisindices, die standardisierten Arbeitslosenquoten und das reale BIP-Wachstum stammen alle aus dem Economic Outlook der OECD. Die Auswirkungen der Arbeitslosigkeit auf das Suizidverhalten sind von besonderem Interesse. Außerdem berechnen wir international vergleichbare Werte für das reale BIP pro Kopf, indem wir das kaufkraftbereinigte BIP pro Kopf in US-Dollar durch den Preisindex der USA dividieren. Damit messen wir die Größe in 100 US-Dollar.

Tabelle 2: Deskriptive Statistiken für die Einflussfaktoren

Variable	Obs	Mean	Std. Dev.	Min	Max
Unemployment rate	731	6.32	3.64	0.00	21.64
Life expectancy, males	731	73.54	3.06	63.10	80.30
Life expectancy, females	731	79.83	2.54	69.70	85.80
Fertility	731	1.69	0.29	1.08	3.18
Divorce rate	731	2.07	0.93	0.00	5.30
Share of population in age group > 65	731	14.12	2.53	7.20	20.80
Real GDP per capita in 100 USD	731	253.96	74.43	85.85	564.85
Real GDP growth	731	2.03	2.59	-10.75	14.59

Bei der ökonometrischen Spezifikation folgen wir der Literatur und schätzen geschlechterspezifische Regressionen mit festen Effekten, um die Determinanten der Suizidraten über die Zeit zu analysieren:

$$S_{i,t} = \beta'X_{i,t} + \alpha_i + \varepsilon_{i,t}$$

Dabei stellen  $S_{i,t}$  die geschlechterspezifischen Suizid-raten im Land  $i$  und im Jahr  $t$  sowie  $X_{i,t}$  alle beobachteten Einflussfaktoren dar, wie beispielsweise die Arbeitslosen-quoten, die Fertilitätsraten oder die geschlechterspezifi-schen Lebenserwartungen. Verschiedene nicht beobach-tete, länderspezifische und zeitkonstante Einflussfaktoren (zusammengenfasst in der Variable  $\alpha_i$ ), wie das Klima, die Religiosität, die geografischen Lage, ethische oder gesell-schaftliche Normen, führen dazu, dass die Suizidraten zwischen den Ländern variieren.

In der Literatur werden hier gewöhnlich Regressions-modelle mit festen Effekten (FE-Modell) geschätzt. Es ist jedoch auch möglich, Modelle mit stochastischen Effekten (random effects model, RE-Modell) zu schätzen. Der Vorteil von Modellen mit stochastischen Effekten liegt darin begründet, dass wir bei der Schätzung der Parameter sowohl die Variation der Daten über die Zeit als auch zwischen den Ländern voll ausnutzen und deshalb unter bestimmten Bedingungen effiziente Schätzer erhalten. Dieses RE-Modell beruht allerdings auf der Annahme, dass die unbeachteten länderspezifi-schen Effekte unkorreliert mit den im Modell enthaltenen Regressoren sind. Ist das nicht der Fall, ist der Random Effekt-Schätzer verzerrt. Im Gegensatz dazu verwendet das FE-Modell zum Schätzen der Parameter nur die Variationen der Daten innerhalb der einzelnen Länder und benötigt deshalb eine solche Annahme nicht. FE-Modelle sind deshalb robuster als RE-Modelle gegenüber den Problemen vernachlässigter Variablen.

Allerdings erweisen sich Modelle mit festen Effekten als wenig robust, falls die Einflussfaktoren nur eine geringe Variation über die Zeit aufweisen und gleichzeitig mit Messfehlern behaftet sind (Griliches/Hausman 1986). Wir schätzen deshalb beide Modelle, um so auch die Robust-heit der Ergebnisse zu prüfen. Des Weiteren integrieren wir in einigen Spezifikationen zusätzlich noch feste Zeit-effekte, um makroökonomische Schocks zu berücksich-tigen, die alle Länder betreffen.

### Empirische Ergebnisse und ihre Interpretation

Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse sowohl für das RE-Modell als auch das FE-Modell, wobei wir die Schätzungen für Männer und Frauen getrennt vorgenommen haben. Im Einklang mit der empirischen Literatur verwenden wir als abhängige Variable den Logarithmus der Suizidraten, um der Schiefe der Verteilungen entgegenzuwirken. Wir multiplizieren dabei den Logarithmus mit 100, sodass ein geschätzter Koeffizient von 1 eine Zunahme der Suizidrate um ein Prozent darstellt, falls die dazugehörige Einfluss-variablen um eine Einheit zunimmt. Beispielsweise erhöht eine Zunahme der Scheidungsrate um einen Fall pro 1000 Einwohner die Suizidrate der Männer um 7 %. Falls die Arbeitslosenrate um 4 Prozentpunkte steigt, erhöhen sich die Suizidrate für Männer ungefähr um 5 % und für Frauen um 9 %. Ein Anstieg der Arbeitslosenrate um

4 Prozentpunkte entspricht in etwa einer Standardabweichung der Arbeitslosenquote (siehe bitte Tabelle 2). Die geschätzten Parameter und die dazugehörigen Standardfehler sind jeweils sehr ähnlich in beiden Spezifikationen (FE- und RE-Modell). Die Chi-Quadratstatistik des Hausman-Tests mit acht Freiheitsgraden beträgt 14,07 und weist einen P-Wert von 0,079 auf. Deshalb können wir gerade noch die Nullhypothese verwerfen, dass unsere beobachteten Einflussfaktoren nicht mit den länderspezifischen Effekten korreliert sind. Falls aber die idiosynkratischen Störterme nicht identisch und unabhängig verteilt sind, ist der Hausman-Test verzerrt, da das Modell mit stochastischen Effekten in diesem Fall nicht effizient wäre. Arellano (1993) hat einen alternativen regressionsbasierten Test entwickelt, der heteroskedastie- und autokorrelationsrobuste Standardfehler verwendet. Ein von Wooldridge (2002) vorgeschlagener Test verwirft klar

die Nullhypothese, dass die idiosynkratischen Störterme nicht autokorreliert sind. Die Chi-Quadratstatistik des Tests von Arellano mit acht Freiheitsgraden beträgt 36,4 und verwirft damit klar die Annahmen des Modells mit stochastischen Effekten. Zwar weist auch dieser Test auf signifikante Unterschiede bei den geschätzten Parametern beider Modelle hin, trotzdem sind die Parameter aber bei allen Variablen in beiden Spezifikationen jeweils sehr ähnlich, sodass die inhaltliche Interpretationen der Ergebnisse kaum beeinflusst werden. Auch bei den Frauen verwerfen die beiden Versionen des Tests jeweils die Annahmen des Modells mit stochastischen Effekten. Wiederum sind aber die Unterschiede bei den geschätzten Parametern sehr gering, sodass sie die inhaltlichen Interpretationen der Ergebnisse kaum beeinflussen. Unsere Ergebnisse sind also relativ robust gegenüber der verwendeten Schätzmethode.

Tabelle 3: Random-Effects- und Fixed-Effects-Modelle: log Suizidrate

	(1) male RE	(2) male FE	(3) female RE	(4) female FE
Unemployment rate	1.216*** (0.239)	1.281*** (0.239)	2.162*** (0.297)	2.253*** (0.298)
Life expectancy	-5.644*** (0.789)	-5.458*** (0.809)	-0.783 (1.093)	-0.734 (1.107)
Fertility	-20.896*** (2.921)	-20.814*** (2.922)	-20.773*** (3.865)	-20.533*** (3.871)
Divorce rate	7.039*** (1.471)	6.535*** (1.488)	7.025*** (1.869)	6.536*** (1.889)
GDP per capita (in 100 \$)	0.047* (0.024)	0.049** (0.025)	0.196*** (0.030)	0.201*** (0.031)
Real GDP growth	-0.448** (0.190)	-0.446** (0.189)	-0.516** (0.237)	-0.514** (0.237)
Share above 65 years	1.515*** (0.493)	1.659*** (0.497)	0.696 (0.646)	0.854 (0.651)
Trend	-0.270 (0.252)	-0.336 (0.263)	-2.936*** (0.272)	-2.986*** (0.279)
Constant	711.479*** (52.750)	698.166*** (54.083)	303.043*** (81.344)	298.523*** (82.196)
N	731	731	731	731
rho	0.907	0.926	0.915	0.931
r <sub>2_w</sub>	0.437	0.437	0.561	0.561

Standardfehler in Klammern

\*  $p < 0.10$ , \*\*  $p < 0.05$ , \*\*\*  $p < 0.01$

Im Folgenden werden wir deshalb nur noch Modelle mit festen Effekten darstellen.

Die Standardfehler in Tabelle 3 beruhen auf der Annahme, dass die Störterme unabhängig und identisch verteilt sind. Der bereits oben erwähnte Test auf Autokorrelation der Störterme weist allerdings darauf hin, dass diese Annahmen verletzt sind. Tabelle 4 zeigt deshalb Schätzungen mit robusten Standardfehlern für verschiedene Modelle mit festen Effekten. Die Literatur zu Paneldaten verwendet hier meistens die von Arellano (1987) vorgeschlagenen im Hinblick auf Cluster robusten Standardfehler. Ihre Validität beruht allerdings auf der Annahme, dass es keine Korrelation zwischen den Querschnitteinheiten (geographische Korrelation) gibt. Während diese Annahme im Fall von mikroökonomischen Paneldaten noch gerechtfertigt erscheinen mag, ist sie im Falle von makroökonomischen Daten aufgrund von gemeinsamen konjunkturellen und politischen Schocks äußerst umstritten (Urbain and Westerlund, 2006, Hsiao, 2007). Werden die Korrelationen der Störterme innerhalb und zwischen den Ländern ignoriert, so führt dies zu verzerrten statistischen Schlussfolgerungen, da der Informationsgehalt von korrelierten Beobachtungen geringer ist (Cameron and Trivedi 2005, Hsiao 2007).

Pesaran (2004) hat einen Querschnittstest vorgeschlagen, der die Nullhypothese testet, dass die Korrelationen der Störterme zwischen den Ländern null sind. Dazu verwendet der Test den Durchschnitt aller paarweisen Korrelationen, die mithilfe von länderspezifischen Regressionen berechnet werden. Der durchschnittliche absolute Korrelationskoeffizient beträgt 0,41 für Männer beziehungsweise 0,38 für Frauen und verwirft auf dem 1 %- beziehungsweise 5 %-Signifikanzniveau die Nullhypothese der Unabhängigkeit der Störterme zwischen den Ländern.

Deshalb verwenden wir in Tabelle 4 das von Driscoll und Kraay (1998) vorgeschlagene, nichtparametrische Verfahren, das heteroskedastiekonsistente Standardfehler schätzt, die robust gegenüber sehr generellen Formen von zeitlicher und geographischer Korrelation sind. Dabei benutzen wir für die Berücksichtigung der Autokorrelationsstruktur als maximale Laglänge den Wert drei (Hoechle 2007). Die empirische Literatur verwendet bei der Modellierung meistens den Logarithmus der Suizidraten als abhängige Variable, deutlich seltener werden die Suizidraten im Niveau als abhängige Variable verwendet (Ruhm 2000). Um die Robustheit unserer Ergebnisse in dieser Hinsicht zu überprüfen, enthält Tabelle 4 sowohl Schätzungen für das Niveau als auch den Logarithmus der Suizidraten als abhängige Variable.

Tabelle 4: Benchmark Fixed-Effects-Modelle: Suizidrate

	(1) Male level	(2) Male ln	(3) Female level	(4) Female ln
Unemployment rate	0.218** (0.094)	1.281*** (0.410)	0.131*** (0.044)	2.253*** (0.543)
Life expectancy	-1.300*** (0.262)	-5.458*** (1.056)	0.067 (0.129)	-0.734 (1.152)
Fertility	-5.314*** (1.380)	-20.814*** (5.362)	-1.882*** (0.695)	-20.533*** (6.306)
Divorce rate	1.735** (0.824)	6.535** (2.774)	0.542 (0.381)	6.536** (2.724)
GDP per capita (in 100\$)	0.017*** (0.005)	0.049** (0.024)	0.017*** (0.003)	0.201*** (0.032)
Real GDP growth	-0.136*** (0.050)	-0.446** (0.182)	-0.044*** (0.015)	-0.514*** (0.169)
Share above 65 years	0.518** (0.206)	1.659** (0.713)	0.102 (0.087)	0.854 (0.625)
Trend	-0.143* (0.082)	-0.336 (0.312)	-0.281*** (0.032)	-2.986*** (0.273)
Constant	116.598*** (18.613)	698.166*** (74.875)	7.826 (9.952)	298.523*** (91.013)
N	731	731	731	731
rho				
r2_w	0.419	0.437	0.465	0.561

Driscoll und Kraay robuste Standardfehler in Klammern.

\*  $p < 0.10$ , \*\*  $p < 0.05$ , \*\*\*  $p < 0.01$

Unsere Benchmark Regressionen bestätigen einen großen Teil früherer Ergebnisse der empirischen Literatur über Determinanten des Suizids: So erhöht in allen Spezifikationen Arbeitslosigkeit signifikant die Suizidrate, wogegen ein höheres Wachstum des BIP diese senkt. Der Einfluss des Einkommens pro Kopf erscheint etwas überraschend: Ein höheres BIP pro Kopf führt zu einer höheren Suizidrate, was den theoretischen Überlegungen von Hamermesh und Soss (1974) widerspricht. Allerdings gibt es Hinweise darauf, dass in Gesellschaften mit sehr hohen durchschnittlichen Einkommen oder vielen sehr zufriedenen Menschen gerade die ärmsten oder aus sonstigen Gründen benachteiligten Personen besonders unglücklich sind, da ihr Glücksempfinden wesentlich durch den relativen Vergleich mit anderen Gesellschaftsmitgliedern beeinflusst wird. So haben Daly u. a. (2011) in ihren empirischen Untersuchungen herausgefunden, dass die durchschnittliche Zufriedenheit der Bevölkerung die Suizidrate in den jeweiligen Ländern positiv beeinflusst. Die sozialen Determinanten des Suizids erweisen sich als statistisch signifikant: Die Lebenserwartung und die Fertilitätsraten senken die Suizidraten, wogegen die Scheidungsraten diese tendenziell erhöhen. Der Anteil der älteren Bevölkerung (65 Jahre und älter) erhöht die Suizidsterblichkeit. Während die meisten dieser Effekte für beide Geschlechter signifikant sind, sind die Lebenserwartung und die Altersvariable bei den Schätzungen für die Frauen nicht signifikant. In der Literatur gibt es häufig Hinweise auf signifikante Unterschiede bei den Determinanten des Suizidverhaltens von Männern und Frauen (Kuroki 2013).

Nachdem wir in unseren Benchmark Regressionen die sozialen und ökonomischen Determinanten der Suizidsterblichkeit geschätzt haben, integriert der Aufsatz (Rottmann 2014) die Arbeitsmarktinstitutionen. Dabei werden verschiedene Variablen der OECD und von G. Allard (2005) verwendet, um die Großzügigkeit der Arbeitslosenunterstützung und die Strenge des Kündigungsschutzes zu messen und die empirischen Ergebnisse hinsichtlich ihrer Robustheit zu überprüfen. Insgesamt zeigte sich, dass mit einem strikteren Kündigungsschutz sowohl bei Frauen als auch bei Männern eine höhere Suizidrate einhergeht. Eine großzügigere Arbeitslosenunterstützung senkt dagegen die Suizidraten der Männer, bei den Frauen hat eine großzügigere Ausgestaltung der Arbeitslosenversicherung dagegen keinen Einfluss. In unserem Aufsatz werden zudem viele theoretische Überlegungen präsentiert.

Auch hier haben wir verschiedenen Spezifikationen geschätzt, um die Robustheit der Aussagen überprüfen zu können. So haben wir als abhängige Variable sowohl den Logarithmus als auch das Niveau der Suizidrate verwendet. Die prinzipiellen Aussagen erweisen sich wiederum als äußerst robust. Des Weiteren haben wir das Modell mit festen Effekten noch zusätzlich um feste Zeiteffekte erweitert, indem wir neben den festen Effekten

für die Länder zusätzlich noch einen kompletten Satz von Jahres-Dummys eingefügt haben. Damit berücksichtigen wir allgemeine makroökonomische Schocks, die alle Länder betreffen. Deshalb können wir zur Schätzung der Parameter allerdings nur noch den Informationsgehalt der Variablen verwenden, der gleichzeitig über die Länder und über die Zeit variiert. Da die alleinige Berücksichtigung von festen Länder- und Zeiteffekten bereits 88 % der Suizidraten erklären würde, verbleibt für die Schätzung der Effekte von sozialen und ökonomischen Determinanten des Suizids relativ wenig Information. Trotzdem erwiesen sich die Ergebnisse auch dabei als sehr robust.

## Zusammenfassung

Der starke Anstieg der Arbeitslosigkeit in den südeuropäischen Ländern seit Beginn der Finanz- und Wirtschaftskrise führt zu Befürchtungen, dass sich in den von der Krise am stärksten betroffenen Ländern der Gesundheitszustand der Bevölkerung verschlechtern und die Neigung zur Selbsttötung zunehmen könnte. Die Soziologie, Psychologie und Ökonomie beschäftigen sich schon seit Langem mit den Determinanten des Suizids. Der Verlust von sozialen Bindungen oder die Zerstörung sozialer Netzwerke werden von Soziologen als mögliche Faktoren für höhere Suizidraten betont. Deshalb berücksichtigen sie bei ihren empirischen Untersuchungen beispielsweise die Religionszugehörigkeit, Fertilitäts- und Scheidungsraten als erklärende Variablen, um die sozialen Interaktionen in einer Gesellschaft abzubilden. Die neoklassische ökonomische Theorie modelliert Suizid als ein in die Zukunft gerichtetes nutzenmaximierendes Verhalten eines rationalen Agenten. Dabei hängt der persönliche Lebenszeitnutzen entscheidend von den zukünftigen Konsummöglichkeiten ab, die wiederum von der Arbeitslosenquote, dem BIP pro Kopf und dem Wachstum beeinflusst werden.

Der Beitrag unserer Studie zur empirischen Forschung auf diesem Gebiet beruht vor allem auf zwei Schwerpunkten: Sie erweitert den Beobachtungsumfang gegenüber ähnlichen Studien deutlich, indem ein Panel mit 25 Ländern genutzt wird, die teilweise bis zu 40 Jahre beobachtet werden. Dadurch ergeben sich hinsichtlich der Exogenität schwächere Anforderungen an die erklärenden Variablen. Da der moderne Wohlfahrtsstaat die individuelle Betroffenheit von Arbeitslosigkeit abmildert, wird in der Studie die empirische Literatur auch um diese Punkte erweitert.

Die empirischen Ergebnisse zeigen, dass höhere Arbeitslosigkeit und Scheidungsraten sowie niedrigere Lebenserwartung und Geburtenraten die Suizidraten sowohl bei Männern als auch bei Frauen erhöhen. Ein stringenter Kündigungsschutz erhöht sowohl für Männer als auch für Frauen die Suizidrate signifikant, dagegen senkt eine großzügigere Arbeitslosenunterstützung die Suizidrate der Männer signifikant. Diese Ergebnisse blieben auch bei vielfältigen Robustheitsüberprüfungen bestehen.

---

## Literaturverzeichnis

1. Allard, G. (2005), “*Measuring Job Security over Time: In Search of a Historical Indicator for EPL (Employment Protection Legislation)*”, IE Working Paper 05-17.
2. Andrés, A. R. (2005), *Income Inequality, Unemployment, and Suicide: A Panel Data Analysis of 15 European Countries*, Applied Economics, 37, 439–451.
3. Arellano, M. (1987), “*Computing Robust Standard Errors for Within-Groups Estimators*”, Oxford Bulletin of Economics and Statistics 49, 431–434.
4. Arellano, M. (1993), *On the testing of correlated effects with panel data*, Journal of Econometrics, 59, 87–97.
5. Becker, G. S., Posner, R. A. (2004), *Suicide: An economic approach*, Mimeo, University of Chicago.
6. Breuer, Christian (2014), “*Unemployment and Suicide Mortality: Evidence from Regional Panel Data in Europe*”, Health Economics, forthcoming.
7. Cameron, A. C. and P. K. Trivedi, 2005, *Microeconometrics: Methods and Applications*. Cambridge University Press.
8. Chuang, H.-L., Huang, W.-C. (1997), *Economic and social correlates of regional suicide rates: a pooled cross section and time series analysis*. Journal of Socio-Economics, 26, 277-89.
9. Daly, M. C., Oswald, A. J., Wilson, D. and W. Stephen (2011), *Dark contrasts: the paradox of high rates of suicide in happy places*. Journal of Economic Behavior & Organization, 80 (3), 435-442.
10. Driscoll, J. C., Kraay, A. C. (1998), *Consistent Covariance Matrix Estimation With Spatially Dependent Panel Data*, Review of Economics and Statistics 80, 549-560.
11. Durkheim, E. (1951), *Suicide: A study in sociology*, Free Press, New York.
12. Griliches, Z., Hausman, J. (1986), *Errors in Variables in Panel Data*. Journal of Econometrics, 31, 93-118.
13. Hamermesh, D. S., Soss, N. M. (1974), *Theory of Suicide*, Journal of Political Economy, 82, 83-98.
14. Hoechle, D. (2007), *Robust Standard Errors for Panel Datasets with Cross-Sectional Dependence*, Stata Journal 7, 281–312
15. Hsiao, C. (2007), *Panel Data Analysis – Advantages*
16. Helliwell, J.F. (2007), *Well-being and social capital: Does suicide pose a puzzle?*, Social Indicators Research 81, 455-496.
17. Kuroki, M. (2010), *Suicide and Local Unemployment in Japan: Evidence from Municipal Level Suicide Rates and Age-Specific Suicide Rates*, Journal of Socio-Economics, 39, 683–691.
18. Kuroki, M. (2013), *The Effect of Sex Ratios on Suicide*, Health Economics.
19. Milner, A., Hjelmeland, H., Arensman, E. and Diego De Leo (2013), “*Social-Environmental Factors and Suicide Mortality: A Narrative Review of over 200 Articles*”, Sociology Mind, 3 (2), 137–148.
20. Neumayer, E. (2003), *Are Socioeconomic Factors Valid Determinants of Suicide? Controlling for National Cultures of Suicide with Fixed-Effects Estimation*, Cross-Cultural Research, Vol. 37 (3), 307–329.
21. Neumayer, E. (2004), ‘*Recessions Lower (Some) Mortality Rates: Evidence from Germany*’, Social Science and Medicine, 58, 1037–1047.
22. Noh, J.-H. (2009), ‘*Does unemployment increase suicide rates? The OECD panel evidence*’ Journal of Economic Psychology, 30, 575–582.
23. Pesaran, M. (2004), *General Diagnostic Tests for Cross Section Dependence in Panels*. Cambridge Working Papers in Economics No. 0435, University of Cambridge.
24. Rottmann, H. (2014), *Do Unemployment Benefits and Employment Protection Influence Suicide Mortality? An International Panel Data Analysis*, Weidener Diskussionspapier 42.
25. Ruhm, C.J. (2000), *Are Recessions Good for Your Health?* Quarterly Journal of Economics 115(2), 617–650.
26. Stuckler, D., Basu, S., Suhrcke, M., Coutts, A., McKee, M. (2009), *The public health effect of economic crises and alternative policy responses in Europe: an empirical analysis*, The Lancet, 374, 315–323.
27. Urbain, J. and J. Westerlund (2006), *Spurious regression in nonstationary panels with crossunit cointegration*, METEOR Research Memorandum No. 057.
28. Vogelsang, T. J. (2012), *Heteroskedasticity, Autocorrelation, and Spatial Correlation Robust inference in linear panel models with fixed-effects*, Journal of Econometrics, 166, 303–319.

29. Wagner, A. (1864), *Die Gesetzmässigkeit in den scheinbar willkürlichen menschlichen Handlungen vom Standpunkte der Statistik*, Boyes und Geisler, Hamburg.
30. Wooldridge, J. M. (2002), *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data*. Cambridge, The MIT Press.
31. World Health Organization (2009), *Financial crisis and global health: report of a high-level consultation*, WHO, 2009.

### Kontakt:



#### **Prof. Dr. Horst Rottmann**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Betriebswirtschaft  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

[h.rottmann@oth-aw.de](mailto:h.rottmann@oth-aw.de)

Forschungsprofessor am  
ifo Institut für Wirtschaftsforschung  
an der Universität München

# Strömungstechnische Analyse eines High- Tech-Operationssaales mit Star-CCM+

Benjamin Rußwurm, B.Eng.  
Reinhold Hartwich, B.Eng.  
Prof. Dr. Franz Magerl  
Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

## Einleitung

An der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden wurde ein hochmoderner High-Tech-OP mit dem vollen Funktionsumfang eines realen Operationssaales inklusive Lüftungstechnik für Lehre und Forschung etabliert. Dadurch konnte die Hochschule ihre Kompetenz im Studiengang Medizintechnik und als innovatives Zentrum für die Gesundheitswirtschaft in der Region stärken und ausbauen. Im Rahmen von F&E-Aktivitäten werden unterschiedliche Fragestellungen bearbeitet, wie z. B.

- Einsatz und Nutzen intraoperativer Bildgebung
- Technologieintegration
- Medizintechnikplanung
- Ergonomie
- Workflow und Effizienz
- Hygiene und Lüftungstechnik

Da die Anzahl an nosokomialen Infektionen in Kliniken in den letzten Jahren rasant gestiegen ist, muss die Frage geklärt werden, wie man diesem Trend entgegenwirken und damit für mehr Patientensicherheit sorgen kann. [1]

Hierzu ergeben sich vielfältige Themenfelder in Bezug auf Hygiene in Verbindung mit medizintechnischen Einrichtungen bzw. Ausstattung im Operationssaal. Grundsätzlich ist es wichtig, dass Partikel oder Erreger nicht von außen in den OP-Saal gelangen, damit eine mögliche Kontamination mit Keimen für den Patienten, das OP-Personal oder dem medizinischen Inventar ausgeschlossen werden kann. Speziell bei Operationen, in denen eine großflächige Freilegung aseptischer Bereiche, beispielsweise bei Implantationen, Gelenköffnungen oder in der Knochenchirurgie notwendig ist, besteht ein erhöhtes Risiko einer nosokomialen Infektion.

Neben der Betrachtung von Risiken infolge von hygienisch nicht optimalen Bedingungen, kann als weiteres Risiko hinsichtlich hygienerelevanter Themen eine Störung des

## Abstract

The Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden (University of Applied Sciences) established a state-of-the-art, high-tech operating room for its research and teaching, which offers the full range of functions of a real operating room, including ventilation technology. Thus, the University was able to further broaden its competence in Medical Engineering and strengthen and expand its position as a center of innovation for the health industry of the region. Research and development activities involve various areas, such as...

- implementation and benefits of intra-operative imaging
- technology integration
- medical technology planning
- ergonomics
- work flow and efficiency
- hygiene and ventilation technology

The fact that the number of nosocomial infections has increased considerably over the past years raises the question of how to counteract this trend, thus providing for greater patient safety.

This in turn involves a number of issues regarding hygiene in connection with medical facilities and equipment. It is essential that no particles or pathogens enter the operation room from outside, so that the risk of contamination of patients, surgical staff and medical equipment and inventory by germs can be ruled out. This particularly applies to operations where the large-scale exposure of aseptic areas is necessary, e.g. in implantations, joint or bone surgery.

Besides the risks resulting from suboptimal hygienic conditions, there are additional hygiene-related risks caused by airflow disturbances in the operating room. By means of a special ventilation system a so-called

Luftstroms in einem OP identifiziert werden. Mit speziellen Lüftungssystemen wird eine sogenannte Turbulenzarme Verdrängungsströmung (TAV) generiert. Diese soll sicherstellen, dass im Bereich des OP-Tisches ein keimfreier Schutzbereich ausgebildet wird. Bildgebende Verfahren, OP-Monitore und „strömungsgünstig gestaltete OP-Leuchten (flächenhaft, kaum oder nicht luftströmungsdurchlässig) verschlechtern die Schutzwirkung der TAV-Lüftung.“ [2] Zum Grundverständnis und als Basis für Optimierungsmaßnahmen wurden Modelle generiert, um diese Einflüsse anhand von Strömungssimulationen zu untersuchen.

## Lüftungstechnik im Operationssaal

Der Standard-OP (gemäß Raumklasse 1a nach DIN 1946 Teil 4) verfügt über eine raumlufttechnische Anlage (RLT), welche die einströmende Um- und Frischluft vorreinigt, temperiert und im Regelfall befeuchtet. Danach wird sie über einen Schwebstoff-Filter der Filterklasse H 13 zurück in den OP geführt. Die Einleitung der gefilterten Zuluft erfolgt durch ein OP-Deckenfeld direkt über dem Operationsbereich (OP- und Instrumententisch). Dabei wird eine turbulenzarme Verdrängungsströmung erzeugt, welche dafür sorgt, dass ein gewisser Schutzbereich entsteht, in dem die Keimlast nahezu gegen null geht. Die Charakteristika an dieser Art der Strömung sind die Zuluftströme, die mit einer definierten Strömungsgeschwindigkeit nach unten verlaufen und durch seitlich auftreffende Turbulenzen oder Hindernisse, wie OP-Lampen, OP-Team etc., nach unten abgelenkt werden [2].

Mittlerweile existieren mehrere unterschiedliche Ansätze für RLT-Anlagen. Um eine Aussage über die Effektivität der RLT-Anlagen treffen zu können, ist eine konventionelle laminare Luftströmung (LAF) Decke, die die DIN-konforme Maße von 3200 mm x 3200 mm aufweist, mit einem Konzept (Produktname: Opragon) aus Schweden von der Firma Avidicare AB verglichen worden, welches einen temperaturkontrollierten laminaren Airflow (TLAF) erzeugt.

## Strömungssimulation im Operationssaal

Hierzu wurden umfangreiche numerische Strömungssimulationen für jedes Konzept durchgeführt und dessen Ergebnisse durch Luftgeschwindigkeit- und Temperaturmessungen verifiziert. Hauptziel dieser Untersuchungen war es, die entstehenden Luftströmungsphänomene im jeweiligen Operationssaal zu simulieren, um Rückschlüsse über dessen Einfluss auf die Wirksamkeit der Belüftungstechnik ziehen zu können. Mit der CFD-Software STAR-CCM+ (CD-adapco, Melville, NY, USA) [3] werden diese Wechselwirkungen für die Bildgebung im OP analysiert und die Einflüsse aufgezeigt.

low-turbulence air displacement flow (TAV) is generated to ensure a germ-free environment around the surgical table. Imaging methods, surgery monitors and surgery lamps with unfavorable flow characteristics (laminar, with no or hardly any permeability to airflow) have a negative influence on the protective effect of TAV-ventilation. For better understanding and as a basis for optimization measures, models were generated to examine these influences, using computational fluid dynamics simulation.

In einem ersten Schritt ist der gesamte Operationsraum mit technischer und personeller Ausstattung in Form eines CAD-Modells entworfen worden. Hierfür sind zunächst grundlegende Vereinfachungen angenommen worden: Unnötige Geometrien (u. a. Fasen, Rillen oder Kantenverrundungen) werden negiert, da diese für die Simulation keine große Rolle spielen. Die gesamte Belüftungstechnik ist auf den Ein- und Auslass der Luft reduziert und das OP-Personal ist idealisiert als Zylinder dargestellt worden. Die Abmessungen für Größe und Radius der Zylinder entsprechen den Angaben in der DIN 1946-4:2008-012. Der Einfluss von Fenstern, Türen und sonstigen Wandöffnungen wurde vernachlässigt.

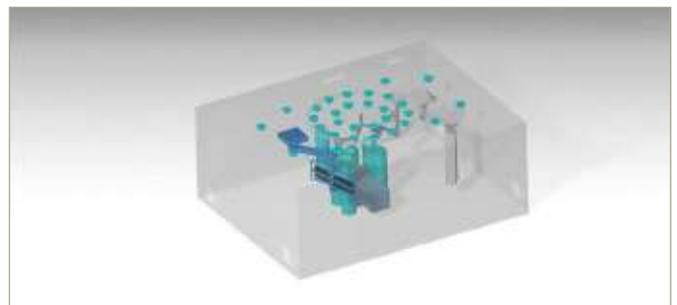


Abbildung 1: CAD-Modell des Forschungs-OP

Der Forschungs-OP an der Ostbayerischen Technischen Hochschule in Weiden wird mit einem innovativen Lüftungskonzept aus Schweden betrieben, welches einen temperaturkontrollierten directionalen Airflow generiert. Dabei strömt Luft durch halbkugelförmige Einlässe von oben in den OP. Die Temperatur der Einlässe in den beiden Mittelkreisen ist um 2 Kelvin kühler als außen. Erkennbar sind drei Bereiche, in denen unterschiedliche Luftvolumina mit unterschiedlicher Temperatur in den Operationssaal einfließen. Der Innenkreis (B1), der Außenkreis sowie der Randbereich (B3), wobei der Außenkreis nochmals unterteilt ist (B2.1 & B2.2).

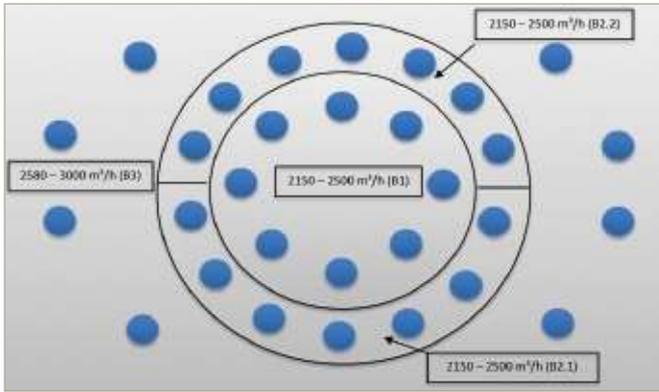


Abbildung 2: Vereinfachte Darstellung der einfallenden Luftvolumenströme des OP-Deckenfeldes

### Verifizierung der Simulation mit Star-CCM+ durch experimentelle Untersuchungen

Für die CFD-Simulation wurde das  $\kappa$ -Epsilon-Modell verwendet. Ausgewählte Simulationsergebnisse werden nachfolgend dargestellt. Zur Verifizierung der CFD-Simulation wurden sowohl Luftgeschwindigkeits- als auch Temperaturmessungen im Forschungs-OP der Hochschule durchgeführt. Nachfolgend sind die Messpunkte im OP-Saal aufgeführt.

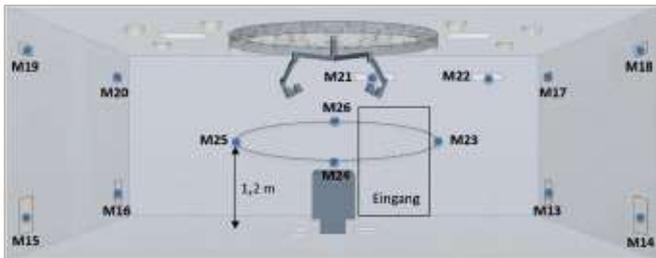


Abbildung 3: Position der Messpunkte im OP-Saal

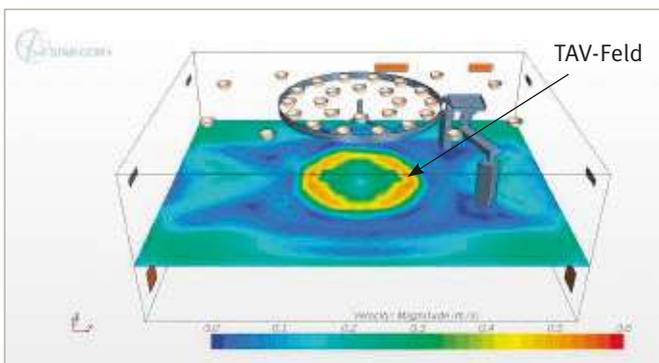


Abbildung 4: Simulationsergebnisse für die Strömungsgeschwindigkeit

Simulation:		Messung:	
Luftgeschwindigkeit in m/s	0,450	Luftgeschwindigkeit in m/s	0,420
TAV-Feld:	0,450	TAV-Feld:	0,420
Abweichung von ca. 7 %			

Abbildung 5: Vergleichstabelle zur Strömungsgeschwindigkeit

Dabei wurde ersichtlich, dass die in der Simulation berechnete Luftgeschwindigkeit von 0,450 m/s mit den Messwerten von 0,420 m/s nahezu identisch ist. Der

Vergleich der simulierten und der gemessenen Temperaturverteilung zeigt ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung. Basierend auf diesen Erkenntnissen konnten umfangreiche Grundsatzuntersuchungen und Parameterstudien durchgeführt werden.

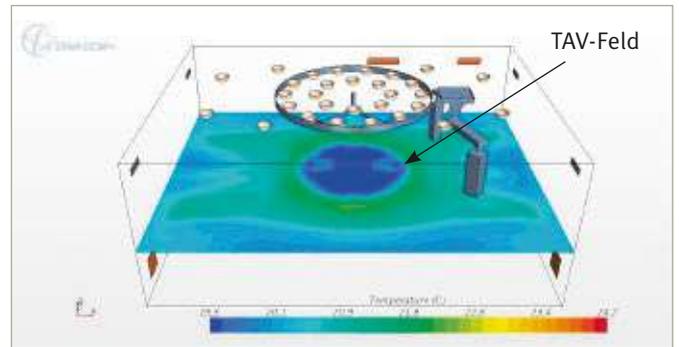


Abbildung 6: Temperaturverteilung

Simulation:		Messung:	
Temperatur in °C	21,8	Temperatur in °C	21,8
TAV-Feld:	21,8	TAV-Feld:	21,8
Abweichung von ca. 2 %			

Abbildung 7: Vergleichstabelle zur Temperaturverteilung

Neben einer Globalbewertung der Strömungs- und Temperaturverteilung wurden auch Detailuntersuchungen zum Einfluss der apparativen Ausstattung im OP-Saal durchgeführt. Exemplarisch wird hierzu das nachfolgende Strömungsfeld dargestellt, in dem Turbulenzen neben dem OP-Tisch erkennbar sind, welche von der TAV-Strömung überlagert wird. Diese Überlagerung verhindert das Aufsteigen von Keimen in den patientennahen Bereich. Konkrete Strömungsvisualisierungen unter Verwendung von Nebel untermauern dieses Ergebnis.

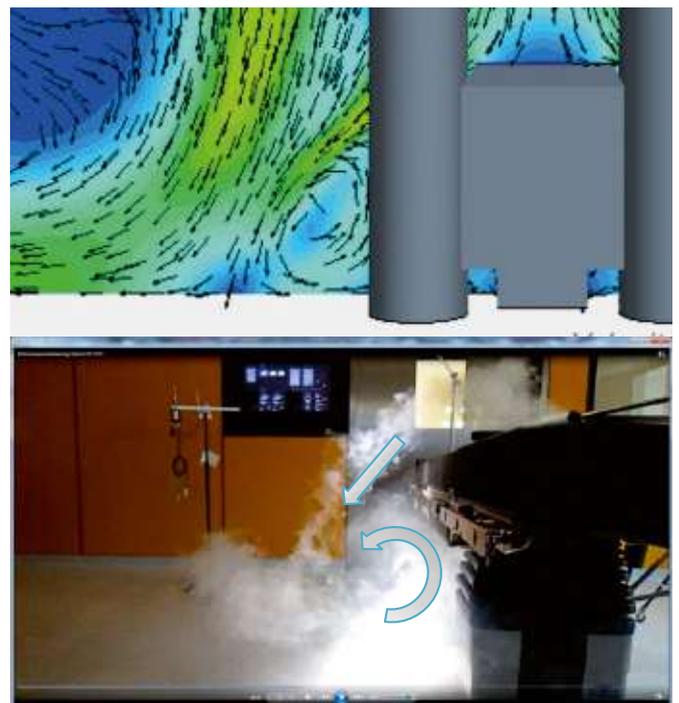


Abbildung 8: Vergleich von der Strömungsvisualisierung (unten) mit der Simulation im Forschungs-OP (oben)

## Schlussfolgerung

Die Ergebnisse der CFD-Simulation wurden durch umfangreiche Messungen der Strömungsgeschwindigkeit und Temperaturverteilung verifiziert. Basierend auf den Globaluntersuchungen wurde im Detail der Einfluss der apparativen Ausstattung mittels CFD analysiert. Es konnte herausgearbeitet werden, dass medizintechnische Geräte (Röntgen-C-Bogen, OP-Lampen, etc.), welche sich direkt unter dem TAV-Feld befinden, ein erhöhtes Risiko für die Verbreitung der Keime darstellen, sofern die Medizinprodukte bereits keimbelastet sind. Bei der Umströmung der Körper entstehen zusätzliche Turbulenzgebiete, die letztlich bewirken, dass kontaminierte Luft aus dem äußeren Raumbereich in den Schutzbereich gelangen kann. Die Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen zur Keimbelastung werden in einem nachfolgenden Bericht präsentiert.

Durch den Einsatz der CFD-Simulation können zuverlässige globale und lokale Aussagen über die Strömungs- und Temperaturverteilung im OP-Saal gemacht werden. Es können die optimalen Lüftungstechnischen Parameter herausgearbeitet und Optimierungspotenziale bei der medizingerätetechnischen Ausstattung identifiziert und Verbesserungsmaßnahmen empfohlen werden.

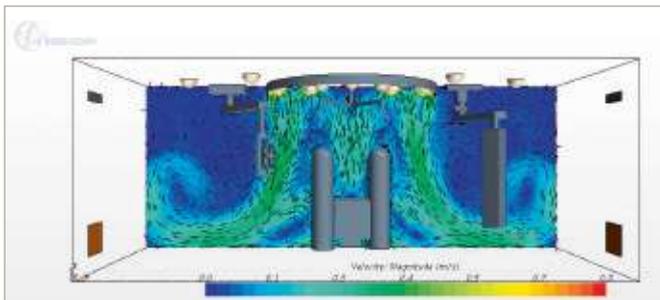


Abbildung 9: CFD-Simulation des Hybrid-OPs mit einer temperaturkontrollierten direktionalen Luftströmung

Die Ergebnisse aus den CFD-Simulationen verdeutlichen, dass die vorgestellten Lüftungssysteme ein Schritt in die richtige Richtung sind. Allerdings zeigen sie auch, dass die Lüftungstechnik nur im Zusammenspiel mit einer strömungsoptimierten Geräteausstattung und optimierten Arbeitsabläufen im OP-Saal effizient funktionieren kann.

---

## Referenzen

- [1] Robert Koch-Institut, *Krankenhaushygiene Basisdaten stationärer Krankenhausversorgung in Deutschland – nosokomiale Infektionen*, Epidemiologisches Bulletin Nr. 36, 13.09.2010
- [2] Rüdiger Külpmann, Kurt Hildebrand, *OP-Lüftungssysteme im Vergleich*, GI – Gebäude Technik | Innenraum-Klima, Vol. 134, No. 01, pp. 12 – 29, 2013
- [3] CD-adapco (2014), *STAR-CCM+ User Guide*

## Kontakt:



**Benjamin Rußwurm, B.Eng.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen  
Studiengang Medizintechnik  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

b.russwurm@oth-aw.de



**Reinhold Hartwich, B.Eng.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen  
Studiengang Medizintechnik  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

r.hartwich@oth-aw.de



**Prof. Dr. Franz Magerl**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen  
Dekan  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

f.magerl@oth-aw.de



**Prof. Dr. med. Clemens Bulitta**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen  
Studiengangsleiter und Studienfachberater  
im Studiengang Medizintechnik  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

c.bulitta@oth-aw.de

## Hintergrund

Die Anzahl an nosokomialen Infektionen in Kliniken steigt rasant. Allein in Deutschland sind im Jahr 2008 bei ca. 225.000 Patienten postoperative Wundinfektionen diagnostiziert worden [1], wobei ein Drittel aller Fälle vermeidbar wären. Bei schätzungsweise 10.000 bis 15.000 Patienten stellen nosokomiale Infektionen die Todesursache dar. Die dabei entstehenden Mehrkosten belaufen sich auf rund 4–5 Milliarden Euro jährlich. Die Zusatzkosten einer einzigen vermeidbaren Infektion liegen bei ca. 60.000 Euro. Ein Grund für diese beträchtliche Summe ist vor allem die zusätzliche Verweildauer der Patienten, welche im Schnitt auf 7–8 Tage angesetzt ist [2].

Mit dem Aufkommen immer neuer multiresistenter Erreger wird die Behandlung von Patienten bei Infektionen im klinischen Umfeld immer kritischer. Das Kernproblem dieser Infektionen stellt die zunehmende Antibiotikaresistenz der Krankheitserreger dar. Aufgrund dieser Tatsache verschiebt sich das Augenmerk immer mehr weg von der kalkulierten Antibiotikatherapie hin zu präventiven und prophylaktischen Hygienemaßnahmen, d. h. zur Verhinderung nosokomialer Infektionen.

Neben der Händehygiene ist der Einsatz von Medizinprodukten am Patienten als ein Gefährdungsbereich zu nennen. Aufgrund erster Ergebnisse sind weitere systematische Untersuchungen des Problemfeldes erforderlich. Effektive validierte Maßnahmen für standardisierte Reinigungs- und Desinfektionsmaßnahmen (Aufbereitung) von nicht steril oder keimarm zur Anwendung kommenden Medizinprodukten sind sinnvoll.

## Background

The number of nosocomial infections in hospitals is rapidly increasing. In Germany alone, more than 225,000 cases of post-surgical wound infections were diagnosed in 2008, of which one third could have been prevented. An estimated 10,000 to 15,000 patients die from nosocomial infections. This entails additional costs of € 4–5 bn per year. The additional costs of a single avoidable infection amount to approximately € 60,000. This considerable amount is mainly attributable to the prolongation of hospital stay, which is estimated at 7–8 days on average.

With the continuing emergence of new multi-resistant pathogens, the treatment of infections in the clinical environment becomes more and more critical. The main problem with these infections lies in the increasing antibiotic resistance of pathogens. Accordingly, there is a clear trend away from a calculated antibiotic treatment towards preventive and prophylactic hygiene measures, i.e. towards the prevention of nosocomial infections.

Both hand hygiene and the use of medical devices are particularly critical areas. Based on the first findings, further systematic investigations of this problem area will be necessary. Effective, validated and standardized cleaning and disinfection procedures (reprocessing) on applied non-sterile or low-germ medical devices will be useful.

## Unmittelbare Patientengefährdung durch Design- und/oder Entwicklungs-,fehler“ bei Medizinprodukten

Die steigende Zahl an Instrumenten und Geräten in einem modernen OP führt zu einem erhöhten Aufkommen potenzieller Keimträger. Aus diesem Grund rückt seit einigen Jahren der prophylaktische Infektionsschutz immer mehr in den Fokus der Forschung. Eine unmittelbare Patientengefährdung tritt meist durch Design- und/oder Entwicklungs-,fehler“ der technischen Ausstattung auf. Deutlich wird dies bei Produkten, die nur schwer zu reinigen, desinfizieren oder sterilisieren sind und zudem sehr leicht kontaminiert werden können.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes werden verschiedene Medizinprodukte bzgl. ihres technischen Designs und der daraus resultierenden hygienischen Risiken analysiert und bewertet. Hierbei finden vor allem umfassende Untersuchungen der Medizinprodukte im Hybrid-OP (Schwerpunkt Bildgebung und bildgestützte Chirurgie) statt. Einen von uns identifizierten Risikofaktor stellen Oberflächen dar, die häufig nicht glatt sind oder Vertiefungen, z. B. für Schrauben, aufweisen. Auch finden sich häufig Bedienmodule, welche eine adäquate Reinigung und Desinfektion nicht ermöglichen (Abb. 1–3).



Abbildung 1: Spalte zwischen Chassis führen zu einer schwierigen Reinigung



Abbildung 2: Rillenzwischenräume und Schraubenvertiefungen sind nur schwer zu reinigen



Abbildung 3: Userinterface mit schwer zu reinigenden vertieften Tasten und Joysticks

## Analyse und Bewertung von antimikrobiellen Oberflächen

Unter bestimmten Voraussetzungen bzw. Umgebungsbedingungen können Mikroorganismen wie Bakterien, Pilze oder Algen auf jeder Oberfläche auftreten und sich ausbreiten. Bei einigen dieser Erreger besteht zusätzlich die Gefahr der Ausbildung eines Biofilms. Dieser steigert dabei die Resistenz der Keime gegenüber Temperatur- und pH-Schwankungen, Bakteriziden sowie Röntgen- und UV-Strahlung. Ein vielversprechender Ansatz gegen diese Besiedlungen stellt der Einsatz von antimikrobiellen Oberflächen dar. Es handelt sich dabei um Oberflächen, die entweder eine biozide oder antiadhäsive Wirkung aufweisen. Das Anhaften (Adhäsion) von Erregern kann verhindert werden, indem die Oberflächen entweder ultrahydrophob (Lotus-Effekt) oder sehr hydrophil gestaltet werden. Im Gegensatz dazu haben aktiv antimikrobielle Materialien biozide Bestandteile, d. h. sie greifen die Mikroorganismen direkt an der Zellwand, im Stoffwechsel oder in der Erbsubstanz an.

Um eine aussagekräftige Bewertung der antimikrobiellen Oberflächen zu ermöglichen, muss zunächst ein Prozess etabliert werden, der es erlaubt Tests hinsichtlich der Messergebnisse auf Präzision und Wiederholgenauigkeit zu überprüfen. Als Grundlage für die Untersuchungen dient die international anerkannte Norm JIS Z 2801:2000. Hierbei wird eine definierte Bakterienkonzentration auf einen Probekörper aufgetragen und abgedeckt. Nach anschließender Inkubation wird das bebrütete Inokulum von der Probeplatte abgespült. Zur Überprüfung der antimikrobiellen Eigenschaften des Testkörpers werden konventionelle Nachweisverfahren eingesetzt, um die verbliebenen koloniebildenden Einheiten zu quantifizieren (Abb. 4).



Abbildung 4: Abspülen des bebrüteten Inokulums von der Probeplatte

### Luftkeimmessungen

Das Monitoring bei der Säuberung und Sterilisierung kritischer Oberflächen (OP-Liege, Instrumententisch, Griffflächen) gewinnt zunehmend an Bedeutung. Es kann die Wirksamkeit verschiedener Reinigungsmethoden (Desinfektionsmittel, UV-Licht) auf Oberflächen getestet und mögliche Schwachstellen in Hygiene- und Reinigungsplänen aufgedeckt werden.

Die Ermittlung der Keimbelastung der Raumluft erfolgt über eine aktive Luftkeimsammlung. Hierbei wird eine definierte Luftmenge (meist 1 m<sup>3</sup>) über Kulturplatten geführt und diese anschließend inkubiert. In Anlehnung an die geltenden Normen (DIN 1946/4 1998) kann anschließend ein unkritischer Grenzwert festgelegt werden. Diese Messungen können auch unter variierenden Umgebungsbedingungen wiederholt werden, um Störfaktoren zu identifizieren und gegebenenfalls entgegenwirken zu können.

Zur Generierung erster Daten sind bereits Messungen (EMTEK V-100 und Biomerieux air IDEAL) im Forschungs-OP der Hochschule durchgeführt worden (Abb. 5).

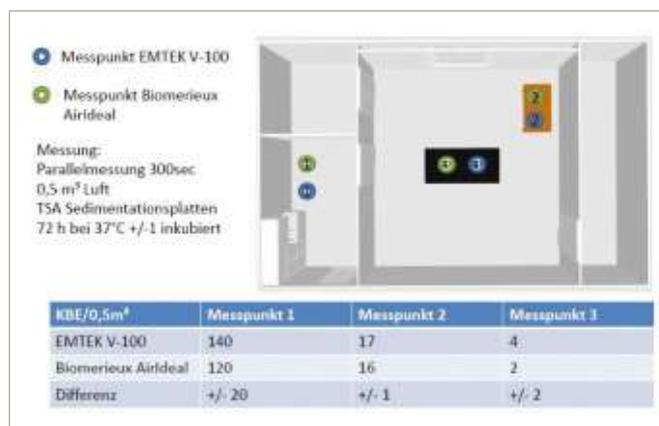


Abbildung 5: Luftkeimmessungen im Forschungs-OP der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden

### Schlussfolgerungen und Diskussion

Es ist wichtig, sich schon in der frühen Entwicklungsphase mit den Themen der Patientensicherheit, der Arbeitssicherheit/Arbeitsschutzes und der technischen Sicherheit auseinanderzusetzen, damit ein aus hygienischer Sicht optimales Design entsteht, welches die Reinigung und Desinfektion adäquat ermöglicht. Die Aufbereitung ist abhängig vom Infektionsrisiko des Medizinprodukts und setzt sich zusammen aus Reinigung, Desinfektion und ggf. Sterilisation, welche für keimarm und steril zur Anwendung kommende Medizinprodukte umfänglich geregelt ist (z. B. DIN 17644 [3]). Darüber hinaus dient die KRINKO/BfArM-Empfehlung als geeignetes Nachschlagewerk. Bei der Aufbereitung von nicht steril oder keimarm zur Anwendung kommenden Medizinprodukten hingegen besteht noch Forschungsbedarf, da diese bislang nicht systematisch bzgl. der Risiken und entsprechender Maßnahmen zur Risikominimierung untersucht worden sind. Es ist davon auszugehen, dass ein unmittelbares Infektionsrisiko durch hygienisch inadäquates Design von Medizinprodukten ausgeht. Grund hierfür ist vor allem, dass sie nicht oder nur schwer zu reinigen, zu desinfizieren oder zu sterilisieren sind.

### Literaturverzeichnis

- [1] Robert Koch-Institut, *Krankenhaushygiene, Basisdaten stationärer Krankenhausversorgung in Deutschland – nosokomiale Infektionen*, Epidemiologisches Bulletin Nr. 36, 13.09.2010
- [2] Gastmeier P., Brandt C., Sohr D., Babikir R., Mlageni D., Daschner F., Ruden H., *[Surgical site infections in hospitals and outpatient settings. Results of the German nosocomial infection surveillance system (KISS)]*, Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz, 2004, 47:339-44
- [3] DIN 17644:2004, *Sterilisation von Medizinprodukten*

## Kontakt:



**Benjamin Rußwurm, B.Eng.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen  
Studiengang Medizintechnik  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

b.russwurm@oth-aw.de



**Dr. rer. nat. Sebastian Buhl**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen  
Studiengang Medizintechnik  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

se.buhl@oth-aw.de



**Prof. Dr. Franz Magerl**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen  
Dekan  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

f.magerl@oth-aw.de



**Prof. Dr. med. Clemens Bulitta**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen  
Studiengangsleiter und Studienfachberater  
im Studiengang Medizintechnik  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

c.bulitta@oth-aw.de

# eDAS – Holistic Energy Management for 3<sup>rd</sup> and 4<sup>th</sup> Generation of Electric Vehicles

## Abstract

This article gives an overview of the eDAS research project and explains several approaches to improve the prediction of mileage in future electric vehicles of the 3<sup>rd</sup> and 4<sup>th</sup> generation. These approaches range from enhanced energy management strategies, as well as new hardware components to innovative thermal energy accumulating materials. The project's goal is to reduce the big delta between reachable mileage and the nominal range of electric vehicles. Improvements are gained by creating a network of energy sources and sinks that allows complex energy transfer scenarios governed by a powerful central computing platform.

Keywords: energy management, electric vehicles, eDAS, thermal energy recuperation, network, automotive

## Zusammenfassung

Dieser Artikel gibt eine Übersicht über das Forschungsprojekt eDAS und erklärt einige Ansätze, um die Restreichweite und deren Vorhersagbarkeit zukünftiger Elektrofahrzeuge der dritten und vierten Generation zu verbessern. Die Ansätze reichen von neuartigen Energiemanagement-Strategien und neuen Hardware-Komponenten bis hin zu innovativen Werkstoffen, die thermische Energie effektiv speichern können. Ziel des Projektes ist es, die große Differenz zwischen tatsächlich erreichbarer und nomineller Reichweite von Elektrofahrzeugen zu verkleinern. Verbesserungen zum aktuellen Entwicklungsstand werden erreicht, durch ein Energienetzwerk aus Quellen und Senken, das komplexe Energieaustausch-Szenarios, gesteuert durch einen Zentralrechner, ermöglicht.

Schlüsselworte: Energiemanagement, Elektrofahrzeuge, eDAS, Rückgewinnung thermischer Energie, Netzwerk, Automotive

## Introduction

Electric vehicles (EV)s represent only a small count of the new registered cars. Looking at the numbers from Germany, there were only 6051 of nearly 3 Million new registered cars driven by an electrical engine in 2013. [1] The main reason why consumers do not buy an EV is the reachable mileage, which underlies big fluctuations. Common electric cars have a range of about 120 km and the charging process of the battery takes much longer than refuelling a combustion based car, which seems to be a disadvantage. According to the psychologist Thomas Franke, who conducted a study on Sustainable mobility with limited resources, the nominal range is not the main problem. It is more important to increase the guaranteed usable range [2] and to reduce the delta between nominal

and reachable mileage. Therefore a holistic energy management is to be developed in eDAS.

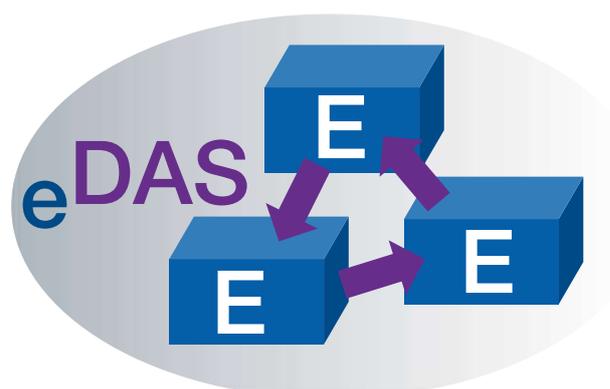


Figure 1. The official eDAS logo.

eDAS is an acronym for Efficiency powered by smart Design meaningful Architecture connected Systems. It is a specific targeted research project (STREP), funded by the European Union. eDAS is part of the ICT Green Cars 2013 theme for research and development, implementing the Seventh Framework Programme of the European Union for research, technological development and demonstration activities [3]. eDAS started in October 2013 and is planned to be finished in September 2016. It is part of a cooperative project cluster, sharing information and results with the partner projects INCOBAT and iCompose [4].

### State of the art

The range of today’s EVs is fluctuating considerably. This effect mainly depends on environmental variables like weather conditions, temperature, the driven route, the manner of driving, the activity of secondary energy consumers as well as the age and the covered charge-/discharge cycles of the high voltage battery [5]. The range of EVs today may vary between 40 % and 100 % of the nominal range [7].

Table 1: EV Range at different temperatures [8].

<b>Cars with pure electric heating</b>	<b>Range at 23 °C</b>	<b>Range at -7 °C</b>	<b>Difference</b>
Smart Fortwo ED	159 km	84 km	-48 %
Mitsubishi i-MIEV	113 km	64 km	-44 %
<b>Cars with additional combustion heating</b>	<b>Range at 23 °C</b>	<b>Range at -7 °C</b>	<b>Difference</b>
Fiat 500 Karabag	132 km	105 km	-20 %

In a use case of today, it is nearly impossible to make meaningful predictions of the remaining mileage [5]. This fact has a crucial negative impact on the usability of today’s EVs. The eDAS project tries to close this gap by a multitude of approaches to improve the mileage prediction of next generation EVs and to reduce the negative influence of environmental variables for a smaller delta between nominal and reachable mileage (cf. Figure 2).

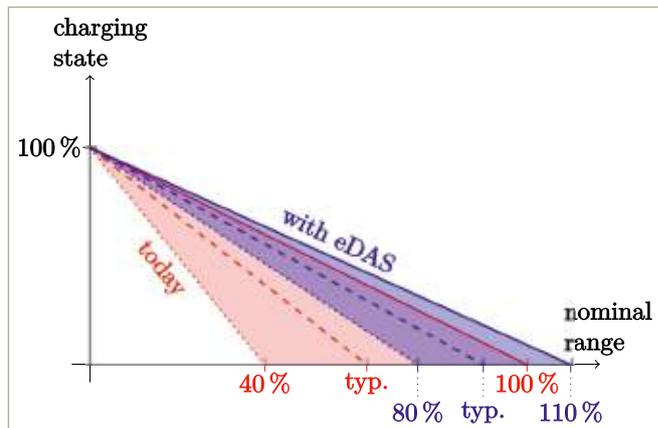


Figure 2. The impact of eDAS towards the usable mileage compared with the nominal range of a common EV today.

### Approaches to improve the predictable mileage

#### Recuperation and reuse of thermal energy

All electric components like the e-machine, the battery and the inverters and chargers have an efficiency  $\eta < 1$ . The lost power is transformed into thermal energy, which is in most cases irrecoverable in today’s EVs: The battery and e-machine have an active or passive cooling mechanism, which dissipates the produced heat to the environment [5].

The thermal energy cannot be used for cabin heating because the waste heat of the e-machine alone is not consistent and sufficient for heating, or is not even transported to the heating system at all. Defrosting the windshield, heating the battery or the cabin, etc. is done by using electrical heating, which needs several kilowatts of electric power.

The chance of recuperating and reusing thermal energy to relieve the electrical energy supply of the vehicle would have a big impact on the expected range of an EV, in particular in winter. Therefore, the possibility of interchanging and storing of thermal energy is needed. A network of sources and sinks for thermal energy needs to be established in the vehicles’ model.

#### Thermal and electrical energy networks

All system components that dissipate relevant amounts of heat, or need thermal energy to operate, are connected to a thermal energy interchange network called Thermal Connectivity Net (TCN). A proposed system architecture including an electrical and a thermal network is shown in Figure 3.

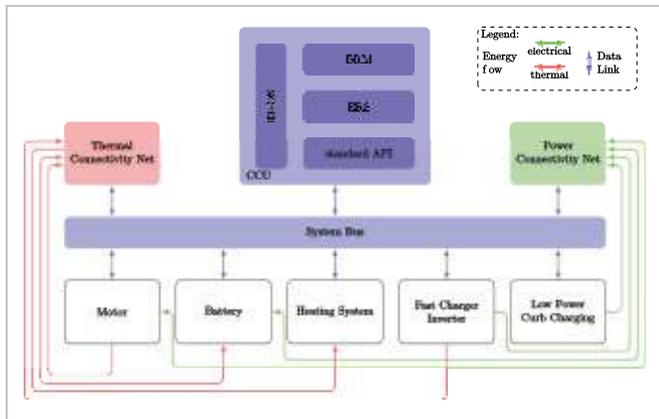


Figure 3. Proposed system overview [6].

In order to control all elements within the networks by a central computing unit (CCU), all components are connected over a common communications bus. The TCN and the power connectivity net (PCN) are also controlled by the CCU.

### CCU and energy management

The CCU is driven by an automotive Real-Time Operating System and consists of multiple layers and tasks. There are two tasks, which are responsible for controlling the energy-networks:

- Energy Resource Scheduler (ERS): The ERS controls the system components by sending and receiving messages over the system bus. This task is also responsible for safety issues and ensures that all relevant component parameters stay within their limits [7].
- Energy Resource Manager (ERM): The ERM calculates the system variables by using advanced energy management algorithms and controls the components through the ERS by setting parameters and requesting switching processes etc. If the system state allows the requested action in safety terms, the ERS task routes the message over the Hardware Abstraction Layer (HAL) to the corresponding system component [7].

The standard API is a hardware abstraction layer, which enables transparent communications with the network components. This layer will ease the future development of additional software because the complex configuration of automotive hardware drivers does not have to be done any more.

### Battery containing a PCM

To establish an effective thermal energy management, a holistic storage mechanism for thermal energy is needed. A phase change material (PCM, e.g. paraffin wax) is able to cover that requirement in an excellent way. Combining a PCM with the EV's battery has several advantages:

- Thermal peaks produced by big charging/discharging currents can be handled inside the battery without increasing the cooling capabilities.
- The temperature gradient within the battery can be reduced.
- The overall temperature of the battery system can be held around the softening point of the PCM.
- The battery can be used for accumulating and storing thermal energy.
- The safety of battery system is improved because a thermal "runaway" [5] of a battery could be prevented.

### Preconditioning of an EV

Preconditioning of an EV means that the vehicles' systems are prepared to work in a more efficient way while the car is parked.

If there is a high power link available for charging, charging of the HV battery can be done just before using the car. The heat dissipated by the charging process can be stored to maintain the temperature of battery and cabin. If there is no high power link available, the temperature of the system has to be provided in another way: A cold battery system will not deliver the same amount of energy as a preheated one, even if it is fully charged [5]. Therefore a wireless curb charging module will be integrated into the system. It can deliver the electrical power which a normal plug socket can deliver. This power source is not intended to be a replacement for the high power charging system, but it can be used for preconditioning the system without stressing the HV battery.

In combination with control algorithms running on the CCU, these efforts lead to optimized system efficiency and to an enhanced battery lifetime.

### GPS based 3D map data

Together with all measures described above, computing the required amount of energy based on 3D map data will help to ensure that most of the targets within the nominal range of an EV can be reached without the need for technical solutions like range extenders and combustion engine based plugin hybrid vehicles.

### Prospects: Battery Management System Demonstrator

As a following step, a Battery Management System (BMS) being the first EMS application is under development by Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden. This demonstrator is going to be applied in a Glider Plane from Lange Aviation. The software design takes a future expansion up to the full energy management systems' control into account.

The BMS hardware (cf. Figure 4) is divided into two parts:

- Battery monitoring modules (BMo)
- CCU running the EMS/BMS

Traditional BMSs are located within the battery system as a monolithic implementation [10]. This is applicable for designs where the battery is not a distributed arrangement like in today's automotive applications. If there is a need for a distributed battery system, like in avionic or future automotive applications, the presented dispersed approach brings additional flexibility.

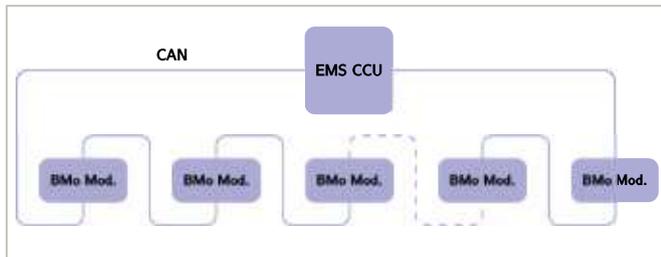


Figure 4. Dispersed BMS communicating over a CAN bus in a redundant ring topology.

The BMos collect all relevant cell data and transmit it via the CAN interface to the BMS, which processes the data streams. The BMS calculates the State of Health (SoH), the State of Charge (SoC) and the State of Function (SoF). Because of the redundant ring topology, the system is fail-safe and fail-operational compliant, meeting the automotive and avionic safety specifications.

## Conclusion

Today's nominal range of EVs is subjected to big fluctuations of 50 % and more. For cost and weight reasons, increasing the HV batteries' capacity is not an option. Today's approach towards gaining more mileage is to provide a so-called „Eco-Mode“, which reduces the vehicles performance to save energy [9]. There would be no need to further increase the nominal range of EVs if the car manufacturers could ensure that the range deviations are reduced to a minimum by an intelligent energy management. The eDAS project tries to raise the reliable range of future EVs of the 3<sup>rd</sup> or 4<sup>th</sup> generation to 80 % of the nominal range, without going into performance limitations.

All results will be checked by full vehicle drive cycle simulations in different use cases and compared to today's state-of-the-art vehicles.

The contribution of the Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden will be a software layer on the CCU, responsible for battery monitoring. Currently the requirements collection is running and will be finished in autumn 2014.

## Acknowledgement

This project has received funding from the European Union's Seventh Framework Programme for research, technological development and demonstration under grant agreement no 608770.

Call Part Identifier: FP7-2013-ICT-GC  
Grant Agreement Number: 608770  
Funding Scheme: Collaborative Project



---

## References

- [1] Kraftfahrt-Bundesamt, Neuzulassungen von Personenkraftwagen im Jahr 2013 nach Bundesländern und ausgewählten Kraftstoffarten absolut, [http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Umwelt/2013\\_n\\_umwelt\\_dusl\\_absolut.html](http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Umwelt/2013_n_umwelt_dusl_absolut.html), 04.06.2014
- [2] Thomas Franke, *Nachhaltige Mobilität mit begrenzten Ressourcen: Erleben und Verhalten im Umgang mit der Reichweite von Elektrofahrzeugen*, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-133509>, 31.01.2014
- [3] A. Waigel, „eDAS internet site“, <http://www.edas-ev.eu/>, 04-06-2014
- [4] W. Lu, „iCompose internet site“, <http://www.icompose-ev.eu/>, 08-08-2014
- [5] D. Klauke, Batterie-Elektrofahrzeuge: *Stand der Technik und zukünftiges Entwicklungspotenzial*. Verlag Dr. Müller, 2009.
- [6] A. Waigel, *Energy Resource Scheduler requirements for holistic energy management for 3rd and 4th generation of electric vehicles*, Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, 2014
- [7] R. John, A. Höß, *eDAS technical Annex I ICT Green Cars 2013* FP7-2013-ICT-GC, eDAS consortium 2013
- [8] Auto Motor Sport, *E-Smart leidet unter Kälte*, <http://www.auto-motor-und-sport.de/eco/e-autos-im-reichweitetest-e-smart-leidet-unter-kaelte-3258229.html>, 04.06.2014
- [9] Porsche Austria GmbH & Co, Reichweite, [http://www.volkswagen.at/modelle/e-golf/highlights/99672\\_reichweite](http://www.volkswagen.at/modelle/e-golf/highlights/99672_reichweite), 04.06.2014
- [10] R. Korthauer, *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Springer Vieweg 2013, Frankfurt

## Kontakt:



**Josef Schmid, B.Eng.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien  
und Informatik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

[j.schmid@oth-aw.de](mailto:j.schmid@oth-aw.de)



**Andreas Waigel, B.Eng.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien  
und Informatik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

[an.waigel@oth-aw.de](mailto:an.waigel@oth-aw.de)



**Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien  
und Informatik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

[a.hoess@oth-aw.de](mailto:a.hoess@oth-aw.de)

# Entwicklung und Aufbau einer Forschungsanlage für vernetzte dezentrale Energiesysteme

Roman Schönthier, B.Eng.  
Sebastian Schmidt, B.Eng.  
Raphael Lechner, M.Sc.  
Prof. Dr.-Ing. Markus Brautsch

## Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts „Energieautarke Gebäude der nächsten Generation“ an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden (OTH Amberg-Weiden) wird eine Forschungs- und Demonstrationsanlage für dezentrale Energiesysteme errichtet. Die Anlage erlaubt die flexible Vernetzung verschiedener Energiequellen, Speicher und Senken, die Einsatz in energieautarken Gebäuden finden können, und ermöglicht damit Analysen zu Systemverhalten, Effizienz und Synergieeffekten sowie die Entwicklung von Betriebsstrategien auf Basis dieser Analyseergebnisse. Die Arbeiten erfolgen in enger Kooperation mit dem Kompetenzzentrum für Kraft-Wärme-Kopplung und dem Institut für Energietechnik (IfE) an der OTH Amberg-Weiden.

## Abstract

As part of the project „Energieautarke Gebäude der nächsten Generation“ (energy self-sufficient buildings of the next generation) at the University of Applied Sciences Amberg-Weiden (OTH Amberg-Weiden) a research and demonstration facility for decentralized power systems is being designed and implemented. This facility allows a flexible integration of various energy sources, energy storage systems and loads which could potentially find use in self-sufficient buildings. Thus it is possible to analyze system behavior, efficiency and synergetic effects as well as developing operating strategies on the basis of the precedent analysis results. This work is conducted in close cooperation with the Centre of Excellence for Combined Heat and Power (CHP) and the Institute of Energy Technology.

## Einleitung

Die bisherige Energieversorgungsstruktur in Deutschland, aber auch weltweit, steht vor großen Herausforderungen. Der Umbau hin zu erneuerbaren Energien erfordert aufgrund der Fluktuationen von Energieproduktion und Energieverbrauch einen massiven Zubau an Energiespeicher- und Energietransportkapazität. Aufgrund des daraus resultierenden Investitionsbedarfs werden die Strompreise, ausgehend vom bereits hohen Niveau, voraussichtlich weiter steigen. Unter diesem Aspekt rückt die Vision von „Energieautarken Gebäuden der nächsten Generation“, die weit über den Ansatz eines Passivhauses hinausgehen, bereits mittelfristig in greifbare und wirtschaftlich bezahlbare Nähe.

Das Projekt wird im Rahmen der Programmsäule Forschungsschwerpunkte durch das Bayerische Staatsministerium für Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst gefördert und gliedert sich in mehrere Teilprojekte bzw.

Fachgebiete, welche in enger Zusammenarbeit die Gesamtaufgabe „Energieautarkes Gebäude der nächsten Generation“ lösen sollen.

Das Teilprojekt „Forschungsanlage“ unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Markus Brautsch bildet die Grundlage für praxisnahe Untersuchungen komplexer Energiesysteme unter Laborbedingungen. Die Forschungsanlage ermöglicht durch eine flexible Energieinfrastruktur und entsprechend anpassungsfähigere Leittechnik die Einbindung, Erprobung und Analyse verschiedener energietechnischer Komponenten im Verbund. In intensiver Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt von Prof. Dr. Peter Urban wird die Einbindung von elektrochemischen Speichertechnologien untersucht.

Im folgenden Abschnitt wird die Forschungsanlage mit ihren Bestandteilen vorgestellt. Darauf folgend werden erste Ergebnisse aus Versuchsdurchläufen gezeigt, bevor im letzten Teil ein kurzer Ausblick auf das weitere Vorgehen gegeben wird.

## Aufbau Forschungsanlage

Um Untersuchungen verschiedener Energiesysteme unter Laborbedingungen zu ermöglichen, ist es nötig, sich grundlegend auf bestimmte Gebäudetypen festzulegen, um Leistungsbereiche und Kapazitäten der energietechnischen Komponenten einzugrenzen und abzustimmen. Mit der entstandenen Installation ist es möglich, Energieanlagen von Ein- und Mehrfamilienhäusern sowie kleineren Handwerksbetrieben nachzustellen. In Abbildung 1 ist der Aufbau der Demonstrationsanlage schematisch dargestellt.

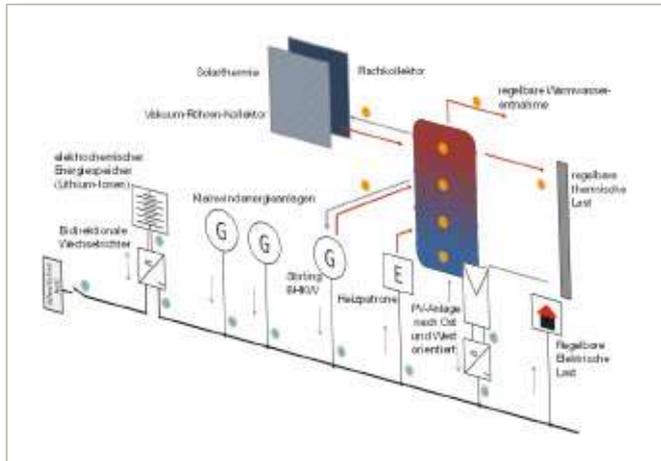


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der elektrischen und hydraulischen Installation der Forschungsanlage mit einigen Messpunkten

Im Vordergrund der Skizze ist das elektrische dreiphasige Wechselspannungsnetz vereinfacht durch eine schwarze Linie gezeichnet. Der sogenannte AC-Bus verbindet die elektrischen Komponenten miteinander. Durch Pfeile wird die jeweilige Energieflussrichtung dargestellt. In der Ebene dahinter ist die thermische Installation skizziert. Hier deuten die blau und rot gefärbten Pfeile die Flussrichtung des Wärmeträgermediums und dessen Temperaturniveau an. Durch die beiden regelbaren Lasten, thermisch und elektrisch, besteht die Möglichkeit, dem Energiesystem Energie zu entnehmen, die entweder durch Erneuerbare Energien, steuerbare Energieerzeuger oder das öffentliche Netz eines Energieversorgungsunternehmens (EVU) hinzugefügt wurde. So besteht also konkret die Möglichkeit, das Energiesystem mit real gemessenen oder synthetischen Lastgängen zu belasten. Regeleinrichtungen, wie beispielsweise eine drehzahlgeregelte Heizkreispumpe und Steuereinheiten, wie das Schütz, das den AC-Bus mit dem öffentlichen Stromnetz verbindet, werden zentral von einer speicherprogrammierbaren Steuerung angesprochen. Somit ist die Reaktion der Energieanlage auf bestimmte Gegebenheiten durch die Software der Steuerung beeinflussbar. Dazu werden zahlreiche Messwerte aufgenommen und verarbeitet. Einige Messpunkte werden in Abbildung 1 als farbige Kreise dargestellt.

## Energietechnische Komponenten

Die Forschungsanlage verfügt über eine Grundausstattung an Systemkomponenten, die im Folgenden näher beschrieben werden.

### Inselnetz

Einen wichtigen Bestandteil der Demonstrationsanlage aus elektrischer Sichtweise bilden sogenannte Inselnetzwechselrichter (siehe Abbildung 2). Diese Wechselrichter sind in der Lage, ein elektrisches Inselnetz (230 V/50 Hz) aufzubauen, um Verbraucher zu versorgen, Erzeuger einspeisen zu lassen und Energiespeicher zu laden und zu entladen, ohne dabei das öffentliche Stromnetz zu benötigen – kurzum elektrische Energieautarkie zu ermöglichen. Das öffentliche Stromnetz kann dennoch wahlweise in das individuelle Versorgungssystem, z. B. als Energiesenke oder -quelle, eingebunden werden. Ein gleichzeitiger Betrieb von Inselnetz und öffentlichem Stromnetz ist aber nicht möglich.

Der Hausanschluss (öffentliches Stromnetz) ist in Deutschland praktisch immer dreiphasig, daher ist auch das Inselnetz der Anlage standardmäßig dreiphasig konzipiert. In der Anlage können somit neben normalen einphasigen Verbrauchern auch Drehstromverbraucher versorgt werden. Ein einphasiges Inselnetz lässt sich aber mit den bestehenden Komponenten durch entsprechende Geräteeinstellung und Schütze-Stellung ebenso realisieren.



Abbildung 2: Inselnetzwechselrichter und elektrischer Energiespeicher

Die Nennleistung der Inselnetzwechselrichter beträgt jeweils 4,6 kW, die 30-minütige Überlastfähigkeit 6 kW und Lastspitzen von bis zu 11 kW können kurzzeitig abgefangen werden. Für den Betrieb dieser Inselnetzwechselrichter ist ein elektrisches Energiespeichersystem unumgänglich.

## Energiequellen

Um ein Gebäude versorgen zu können, wird sowohl elektrische als auch thermische Energie benötigt. Unter Beachtung des Projektstitels wurden adäquate Technologien zur Energiebereitstellung ausgewählt, um das Spektrum an möglichen Verbrauchern abzudecken. Von besonderem Interesse sind erneuerbare Energien, die zwar standortabhängig quantitativ variabel, aber faktisch überall vorhanden sind und damit die Vision einer energieautarken Versorgung realisierbar machen.

In der Haustechnik sind Erneuerbare Energiequellen heute bereits Standard, wobei die wichtigsten Vertreter Photovoltaik- (PV) und Solarthermie-Anlagen sind. Darüber hinaus gibt es aber noch weitere erneuerbare Energiequellen, insbesondere in Verbindung mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), welche sich potenziell für die Gebäudetechnik eignen.

Für die Forschungsanlage stehen diverse Energiequellen zur Verfügung, welche sich zu individuellen Versorgungssystemen verknüpfen lassen. Die mit 7,55 kWp größte elektrische Nennleistung weist die im Zuge dieses Teilprojektes aufgebaute Photovoltaikanlage auf.



Abbildung 3: Photovoltaikgenerator in Ost-West-Ausrichtung auf dem Flachdach der OTH Amberg

Die Besonderheit dieser PV-Anlage ist der in Abbildung 3 dargestellte polykristalline Generator, der nach Ost und West mit jeweils 15 Modulen ausgerichtet ist. Hintergrund zur Auswahl dieser bis heute eher ungewöhnlichen Art der Ausrichtung ist, dass die Einspeiseleistung der PV-Anlage über den Tag hinweg gleichmäßiger ausfällt und damit ein Energiespeichersystem schonender geladen werden kann. Ein weiterer Vorteil liegt in der zeitlich ausgedehnten Ertragskurve (vgl. Abbildung 4, „Vorteil Ost-West“), d. h., in den Morgen- und Abendstunden beginnt die PV-Einspeisung früher bzw. endet später als im direkten Vergleich mit einem nach Süden ausgerichteten Generator gleicher Leistung. Somit ist es möglich, den direkten Eigenverbrauch u. U. zu erhöhen.

Der größte Nachteil liegt im reduzierten Jahresertrag, welcher aber nicht signifikant geringer ausfällt.

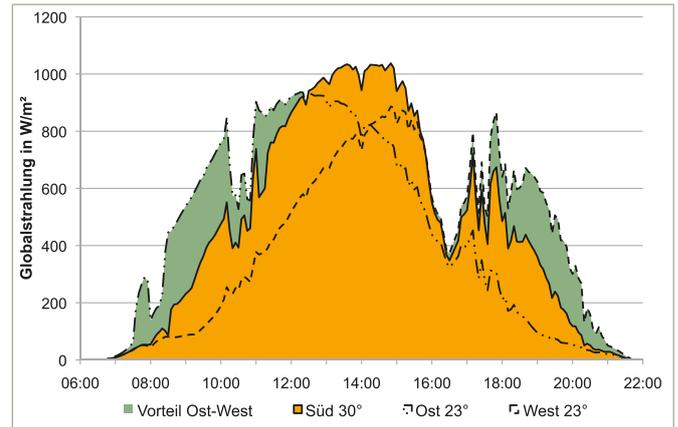


Abbildung 4: Globalstrahlung in Generatorebene in Süd-, Ost- und West-Ausrichtung

Die zwei in einem anderen Projektteil bereits aufgestellten Kleinst-Windenergieanlagen (KWEA) stellen wie auch die PV-Anlage rein elektrische Energiequellen dar. Die beiden KWEAs verfügen über eine Masthöhe von 10 m über Grund und unterscheiden sich in ihrer Generatorleistung von 1 kW und 4 kW, Anlaufwindgeschwindigkeiten und Rotorbauweise.

Blockheizkraftwerke (BHKW), wie sie am Kompetenzzentrum für Kraft-Wärme-Kopplung der OTH Amberg-Weiden untersucht werden, gehören zu den KWK-Anlagen und finden auch in dieser Anlage Anwendung. Im einem Projektteil von Prof. Dr.-Ing. Stefan Beer wird eine Mikro-KWK-Anlage auf der Basis Biomasse entwickelt und soll im späteren Projektverlauf auch in die Forschungsanlage eingebunden werden. Für die Einbindung des Aggregats bestehen in der Anlage bereits die notwendigen Anschlüsse.

Als Alternative sind zwei BHKWs als Quellen für thermische sowie elektrische Energie vorhanden. Zum einen ist ein Stirling-BHKW eingebunden, das gasförmige Brennstoffe mit bis zu 1 kW elektrischer Leistung und ca. 3 bis 5,8 kW thermischer Leistung wandeln kann. Darüber hinaus bietet dieses Stirling-BHKW einen zweiten Brenner in Form einer Gastherme, mit der zusätzlich maximal 18 kW Wärmeleistung bereitgestellt werden können. Als zweites Aggregat ist ein Pflanzenöl-BHKW vorhanden, das mit einem 3-Zylinder-Dieselmotor ausgestattet ist, der über einen Generator ca. 6 kW elektrische Leistung und über den Kühlkreislauf-Wärmetauscher maximal ca. 12 kW thermische Leistung auskoppelt. Dieses Aggregat ist besonders für kleinere Handwerksbetriebe oder Mehrfamilienhäuser interessant.

Reine erneuerbare Energie-Wärmequellen sind durch zwei Solarthermieanlagen gegeben. Beide Anlagen haben eine Kollektorfläche von jeweils ca. 6 m<sup>2</sup> und unterscheiden

sich durch die Kollektor-Bauarten Flachkollektor und Vakuumröhren-Kollektor, welche technologiebedingt das Wärmeträgermedium unterschiedlich hoch erhitzen können.

Eine Heizpatrone mit einer elektrischen Anschlussleistung von 4,5 kW zählt auch zu den Wärmeerzeugern, wobei sie gleichzeitig eine elektrische Energiesenke darstellt. Die Heizpatrone kann z. B. genutzt werden, um hohe elektrische Energieüberschüsse durch PV in Wärme zu wandeln und somit die Eigenverbrauchsquote zu steigern.

### Energiespeicher

In der Forschungsanlage existieren zwei Schnittstellen zur Einbindung von Energiespeichern – sowohl thermisch als auch elektrisch. Zur Pufferung elektrischer bzw. thermischer Energie sind an den entsprechenden Schnittstellen zwei Speicher installiert.

Der elektrische Energiespeicher (siehe Abbildung 2), angeschafft im Teilprojekt von Prof. Dr. Urban, ist ein Lithium-Ionen-Akkumulator mit Lithiumeisenphosphat ( $\text{LiFePO}_4$ ) als Kathodenmaterial. Dieser hat sich durch eine vorangegangene Evaluation von Energiespeichersystemen als sinnvollste Technologie für die elektrische Energiespeicherung in Gebäuden behaupten können. Der vorhandene Akku bietet große Flexibilität in Bezug auf Dimensionierung, da die Kapazität des Energiespeichers in 1,2-kWh-Inkrementen eingestellt werden kann. Damit ist ein Kapazitätsbereich von minimal 4,8 kWh bis maximal 16,8 kWh möglich. Über die Inselwechselrichter wird dieser Akku geladen und entladen.

Für die Wärmespeicherung steht ein 1000-l-Heizwasserwärmespeicher zur Verfügung (siehe Abbildung 5). In diesen Speicher sind zwei Heizspiralen für die beiden Solarthermieanlagen, drei Anschlüsse für direkte Heizwasserumwälzung, ein Brauchwarmwasser-Hygiene-Speicher und die Heizpatrone integriert. Ein Anschluss der Heizwasserumwälzung ist flexibel (z. B. für ein BHKW) nutzbar.

### Energiesenken

Um eine flexible Untersuchung diverser Verbraucher zu realisieren, ist die Demonstrationsanlage mit regelbaren Senken für Wärme und Strom ausgestattet.

Die Wärmesenke besteht im Wesentlichen aus zwei Lufterhitzern, deren Heizlast sowohl durch einstellbaren Heizwasserdurchfluss als auch Luftstrom regelbar ist (vgl. Abbildung 5). Weiter besteht in der hydraulischen Installation ein Drei-Wege-Ventil, das zur Anhebung der Rücklauftemperatur dient, um somit diverse reale Heizsysteme nachstellen zu können. Durch ein Zwei-Wege-Ventil kann die Brauchwarmwasserentnahme präzise auf den benötigten Volumenstrom eingestellt werden.



Abbildung 5: Hydraulische Installation mit thermischen Speicher, Wärmesenke und Solarthermiesteuerungen

Neben der Heizpatrone sind in der Forschungsanlage drei frei programmierbare elektronische Lasten (ELA) mit einer jeweiligen Maximallast von 3,6 kVA bzw.  $36 A_{\text{rms}}$  vorhanden. Das System kann je nach ELA-Konstellation und -Parametrierung mit Gleichstrom oder Wechselstrom einphasig oder dreiphasig belastet werden.

### Leittechnik

Der intelligente Einsatz aller Energieerzeuger, -speicher und -senken in einem modernen Energiesystem erfordert einen gewissen Aufwand an Regel- und Steuereinrichtungen. Als Beispiel sei hier die drehzahlgeregelte Heizkreispumpe genannt. In vielen Fällen wird diese von der Steuerung der Zentralheizung geregelt. Auch Messeinrichtungen sind in der Gebäudetechnik nötig, um Regelaufgaben zu ermöglichen, wie beispielsweise das Messen der Außentemperatur als Führungsgröße für Heizungsregelungen. Vor dem Hintergrund einer Versuchsanlage ist es nötig, einige Messwerte mehr zu erheben, als das in vielen Gebäuden nötig ist. Abbildung 1 zeigt einige Messpunkte der Anlage. Blaue Punkte zeigen Messstellen für elektrische Leistungen, Gleich- und Wechselspannungen wie auch Ströme und Frequenzen. Orange Punkte stehen für Messstellen, an denen Wärmeströme und Temperaturen aufgenommen werden. Neben den Regel- und Steuereinrichtungen der Gebäudeinstallation müssen auch die Energiesenken geregelt werden. Im Falle der ELA erfordert das einen relativ hohen programmatischen Aufwand.

Als weitere Anforderung an die Steuereinrichtung ist der autarke Betrieb anzusehen. So muss es möglich sein Versuche über mehrere Tage zu betreiben. Des Weiteren müssen außerhalb von Versuchszeiträumen sicherheitsrelevante Aufgaben bewältigt werden. Dazu zählen das Kühlen des thermischen Speichers, sollte eine Grenztemperatur erreicht werden, sowie das Zu- oder Abschalten von Verbrauchern bzw. Erzeugern elektrischer Energie in Abhängigkeit des State Of Charge (SOC) des elektrochemischen Speichers, um diesen vor Tiefentladung bzw. Überladung zu bewahren.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, kommt als **Hardware** eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) zum Einsatz, die zentral sämtliche Regel- und Steueraufgaben übernimmt. Programmiert wird die Hardware mit der Programmiersprache LabVIEW. Das Software-Programm erstreckt sich über drei Ebenen, auf denen programmiert wurde. Abbildung 6 verdeutlicht diese Ebenen schematisch. Während das Hauptprogramm auf dem Real Time Controller der SPS läuft, kann ein Programmteil auf einem Windows-PC ausgeführt werden. Mittels dieses Programms ist es möglich, sich via Ethernet auf das autark laufende Programm auf dem Controller zu verbinden. In diesem Fall kann in die Anlage eingegriffen werden und Daten der Anlage können visualisiert werden. Befehle an die Anlage und Daten von der Anlage werden gestreamt. Die dritte Ebene ist der FPGA-Chip (Field Programmable Gate Array). Während sämtliche Ein- und Ausgangssignale der SPS über diesen Chip geführt werden, ist es dem Nutzer auch möglich, diesen direkt zu programmieren, z. B. für die Verarbeitung zeitkritischer Signale. Dies ist für die Messung elektrischer Wechselspannungen und Wechselströme nötig, die im Gegensatz zu allen anderen Signalen direkt gemessen werden und eine hohe Abtastrate verlangen.

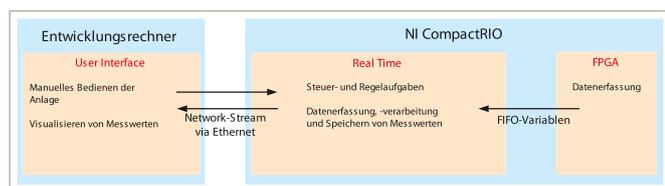


Abbildung 6: Datenverbindung zwischen Programmiererebenen

Die **Software** wurde so strukturiert, dass sich die Kommunikation von Daten, die Erfassung und Ausgabe, sowie die Datenspeicherung in einzelnen Unterprogrammen befinden. Dadurch wird ein hohes Maß an Flexibilität erreicht und dem Anwender wird das Anpassen von Regelstrategien erleichtert. In Abbildung 7 ist die Datenkommunikation zwischen parallel ausgeführten Schleifen und Unterprogrammen skizziert. Dabei stellen in Blau gehaltene Rechtecke und Quadrate Unterprogramme dar und jene mit abgerundeten Ecken stehen für Rechenschleifen. Um bei dieser Anzahl an parallel ausgeführten Prozessen Jitter zu vermeiden, wird das Unterprogramm, das die Regel- und Steueraufgaben übernimmt, in einer

deterministischen Schleife ausgeführt. Somit genießt dieser Prozess stets Vorrang. Die farbigen Linien verdeutlichen die Datenübertragungsstruktur der beiden Programmiererebenen. Auf beiden Ebenen wurden vorwiegend die Datenstruktur Queue eingesetzt. Jene Enden der Linien, die mit einem Pfeil versehen sind, zeigen an, bei welchen Prozessen Daten aus der Queue entnommen werden. An den verbleibenden Enden ohne Pfeil werden der Queue Daten hinzugefügt.

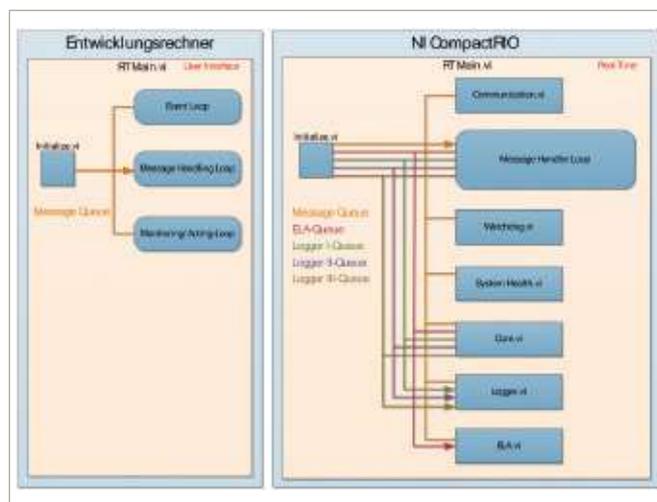


Abbildung 7: Interne Datenverbindungen zwischen parallel ausgeführten Unterprogrammen

## Beispielanlage

Im folgenden Abschnitt werden zwei Fälle beschrieben, die während eines Funktionstests einer beispielhaften Anlagenkonfiguration gezielt angefahren worden sind. Verbraucherseitig sind in dieser Systemkonstellation die ELA, Heizpatrone und zwei Solarthermiesteuerungen an den AC-Bus angeschlossen. Die PV-Anlage und die beiden Windkraftanlagen stellen die Erzeuger dar; das öffentliche Stromnetz ist als Reserve zuschaltbar, aber nicht als Primärversorger vorhanden. Der Lithium-Ionen-Akkumulator ist als elektrischer Energiespeicher im System mit eingebunden.

## Leistungsregelung der Erzeuger im Inselnetzbetrieb

Die Messergebnisse des Funktionstests zeigen, wie die Batteriewechselrichter in Abhängigkeit der Ladeleistung des Akkus die Leistungsabgabe der PV-Wechselrichter über die Variierung der Inselnetzfrequenz begrenzen. Abbildung 8 zeigt einen Frequenzanstieg infolge der Überschreitung der Ladeleistungsgrenze – hier 5000 W. Dieser Wert wurde im Vornherein bei den Inselnetzwechselrichtern als Maximum definiert und ist abhängig vom eingesetzten Energiespeichersystem.

Überschreitet die eingespeiste Leistung der Erzeugung (blau) die Ladeleistungsgrenze, beginnt der Inselnetzwechselrichter die Frequenz (schwarz) anzuheben (siehe Abschnitt 1 in Abbildung 8). Durch den Frequenzanstieg

wird der PV-Wechselrichter in seiner Leistungsabgabe gezielt reduziert und an die Ladeleistungsgrenze hin geregelt.

In Abschnitt 2 von Abbildung 8 kann der Erzeuger die Ladeleistungsgrenze des Energiespeichers nicht mehr überschreiten, da die Leistungsabgabe wetterbedingt reduziert ist. Hier reduziert der Inselnetzwechselrichter die Frequenzanhebung, um die Nennfrequenz von 50 Hz wiederherzustellen.

Zu Beginn von Abschnitt 3 wurde eine elektrische Last von etwa 2,2 kW pro Phase manuell zugeschaltet. Dieser stark erhöhte Energiebedarf kann nicht mehr von der PV-Anlage gedeckt werden. Die zusätzlich notwendige Energie wird durch das Energiespeichersystem bereitgestellt. Gleichzeitig regelt der Inselnetzwechselrichter die Frequenz auf 49 Hz und signalisiert dadurch dem PV-Wechselrichter, dass dieser mit maximal möglicher Leistungsabgabe in das Inselnetz einspeisen kann.

In Abschnitt 4 wird die Last pro Phase auf 1 kW reduziert, d. h., der Verbrauch hat sich wieder auf ein normales Niveau begeben. Nach kurzer Zeit hebt der Inselnetzwechselrichter die Frequenz wieder auf die Nennfrequenz an. Die PV-Anlage kann wie in Abschnitt 3 auch den Energiebedarf nicht decken und der Speicher kompensiert den Energiemangel.

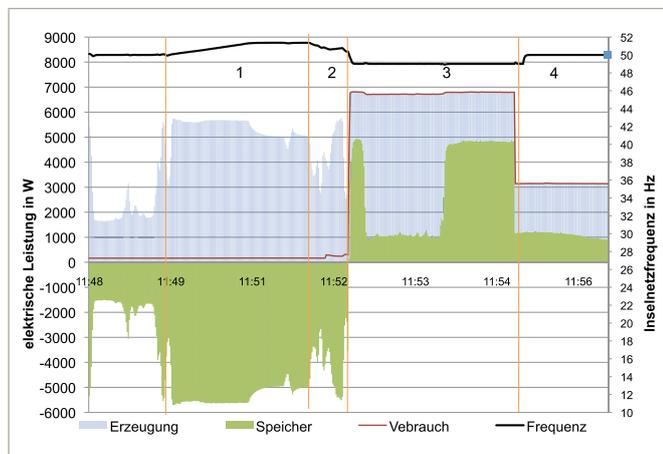


Abbildung 8: Ursache und Auswirkung der Frequenzregelung

### SOC-abhängige Regelung der Anlage

Die Regulierung der Leistungsabgabe des PV-Wechselrichters kann als Energieverlust im System gesehen werden, da die Photovoltaikanlage mehr Ertrag geliefert hätte als effektiv genutzt wurde. Es könnten beispielsweise durch Zuschalten der Heizpatrone Überschüsse aus dem PV-Ertrag als Wärmeenergie genutzt werden.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die erzeugte Leistung, die nicht mehr verwendet werden kann, ins öffentliche Stromnetz einzuspeisen. Abbildung 9 zeigt, wie die Anlage auf das Erreichen des maximal zulässigen

SOCs reagiert. Für Versuchszwecke wurde die untere SOC-Grenze auf 40 % und die obere Grenze auf 60 % eingestellt. Dadurch steht dem System ein Energiespeicher mit ca. 3 kWh elektrischer Speicherkapazität zur Verfügung.

Um ca. 12:03 Uhr erreicht der reale SOC 60 %, d. h., der Energiespeicher ist fiktiv zu 100 % geladen. Infolgedessen wird, um einem Reduzieren der PV-Leistung vorzubeugen, die Verbindung der Wechselrichter für Photovoltaik und die der beiden Wechselrichter für die Windkraftanlagen mit dem Inselnetz getrennt und diese werden stattdessen mit dem öffentlichen Stromnetz verbunden. Dadurch steht dem Inselnetz kein Erzeuger mehr zur Verfügung und die Verbraucher werden ausschließlich vom Energiespeicher versorgt. So wird trotz überschüssiger PV-Leistung im Bereich zwischen 12:03 Uhr und 12:33 Uhr die Last ausschließlich vom Speicher versorgt. Die erzeugte Leistung von PV- und Windenergieanlagen wird in das öffentliche Stromnetz eingespeist, da sonst eine Leistungsreduktion über die Frequenzanhebung die Folge wäre.

In diesem Beispiel verbleibt dieser Zustand für eine halbe Stunde und ist unabhängig vom SOC geregelt. Nachdem die Erzeuger eine halbe Stunde in das öffentliche Netz eingespeist haben und sofern der Energiespeicher über freie Speicherkapazität verfügt, werden die Erzeuger wieder auf das Inselnetz geschaltet. Ab etwa 12:33 Uhr wird der Speicher wieder geladen.

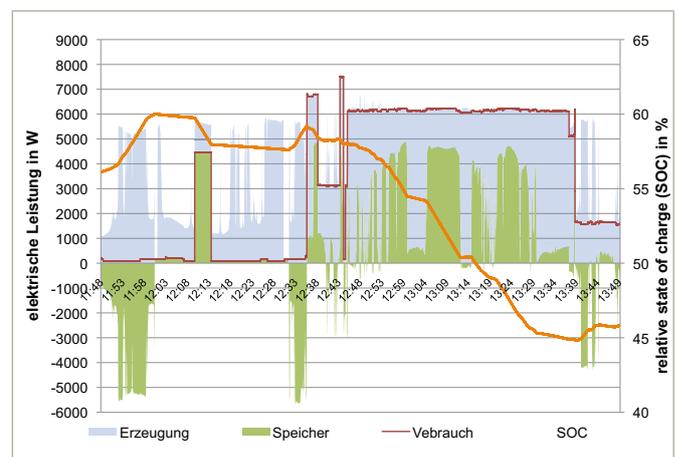


Abbildung 9: SOC-abhängige Regelung der Anlage

Im weiteren Verlauf ist die Last auf dem AC-Bus erhöht worden, um den Umschaltvorgang bei der unteren SOC-Grenze zu bewirken.

### Zusammenfassung

Die im Rahmen des Projekts „Energieautarke Gebäude der nächsten Generation“ aufgebaute Forschungsanlage bietet durch verschiedene Hard- und Softwareschnittstellen die nötige flexible Infrastruktur, um das Zusammenspiel verschiedener Aggregate und Einrichtungen der

Gebäudetechnik zu untersuchen und bei Bedarf Aggregate auszutauschen bzw. die Anzahl der Komponenten zu vergrößern oder zu verkleinern. Darüber hinaus wird ein Anpassen oder Verändern der Anlagenregelung erleichtert.

Aufbauend auf den Resultaten verschiedener Versuche können in Zukunft Regelstrategien und Konzepte entwickelt werden, die Steigerungen der Eigenverbrauchs- sowie der Autarkierate ermöglichen. Des Weiteren können Langzeiterfahrungen mit einzelnen Komponenten, wie z. B. dem elektrochemischen Energiespeicher, gesammelt werden.

Ausgehend von der derzeitigen Konstellation der Installationen sollen Langzeittests mit angepassten Regelstrategien erfolgen. Dazu werden in erster Linie Einfamilienhäuser und kleinere Haushalte untersucht.

Im Rahmen dieses Projekts entstehen außerdem zwei Masterarbeiten, die das Entwickeln von Simulationstools zum Ziel haben, mit deren Hilfe es möglich sein wird, repräsentative synthetische Lastprofile für den Strombezug sowie den Wärmebedarf eines Haushaltes zu generieren. Aus den Ergebnissen soll in einem weiteren Schritt ein Tool zur Auslegung von Energieanlagen entstehen. Ferner sollen beide Tools in das Hauptprogramm der Forschungsanlage implementiert werden, um die Lastprofile in Echtzeit zu generieren. Dadurch eröffnet sich die Möglichkeit Einfluss auf die Lastprofile zu nehmen. So können Maßnahmen, wie zum Beispiel das Verschieben des Betriebs einzelner elektrischer Verbraucher auf einen anderen Zeitpunkt, erfolgen. Ebenso kann der Einfluss von Rundsteuersignalen, welche die Änderung von Energiepreisen signalisieren, auf eine entsprechende Anlagenregelung untersucht werden.

## Kontakt:



**Roman Schönthier, B.Eng.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

ro.schoenthier@oth-aw.de



**Sebastian Schmidt, B.Eng.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

seb.schmidt@oth-aw.de



**Raphael Lechner, M.Sc.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

r.lechner@oth-aw.de



**Prof. Dr.-Ing. Markus Brautsch**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

m.brautsch@oth-aw.de

# MONEY IN MODERN MACRO MODELS: *A review of the arguments\**

Prof. Dr. Franz Seitz  
Markus A. Schmidt

## Zusammenfassung

Das Papier gibt einen Überblick über die Rolle des Geldes in modernen Makromodellen. Konkret erfolgt eine Konzentration auf die Ergebnisse und Unzulänglichkeiten neu-keynesianischer und neu-monetaristischer Modelle in dieser Hinsicht. In einem weiteren Schritt gehen wir dabei der Frage der Bedeutung der Finanzintermediation nach. Insgesamt wird unterschieden zwischen engen und breiten Geldmengenaggregaten. Wir schlussfolgern, dass es aus theoretischen und praktischen Überlegungen ratsam ist, die Definition der Geldmengenkonzepte immer wieder einer Überprüfung zu unterziehen. Trotz der vor allem von Vertretern neu-keynesiansicher Modelle vorgetragenen Kritik einer hervorgehobenen Stellung der Geldmenge argumentieren wir, dass es für die Geldpolitik zur Erreichung von Preisstabilität, aber auch von Finanzstabilität, ratsam ist, monetäre Entwicklungen nicht aus dem Blickfeld zu verlieren. Um es auf den Punkt zu bringen: „Money still matters!“

## Abstract

This paper provides an overview of the role of money in modern macro models. In particular, we are focussing on New Keynesian and New Monetarist models to investigate their main findings and most significant shortcomings in considering money properly. As a further step, we ask about the role of financial intermediaries in this respect. In dealing with these issues, we distinguish between narrow and broad monetary aggregates. We conclude that for theoretical as well as practical reasons a periodic review of the definition of monetary aggregates is advisable. Despite the criticism brought forward by the recent New Keynesian literature, we argue that keeping an eye on money is important to monetary policy decision-makers in order to safeguard price stability as well as, as a side-benefit, ensure financial market stability. In a nutshell: money still matters.

Keywords: money, New Keynesian model, New Monetarist model, financial intermediaries

JEL Classification Numbers: E51, E52, E58

*“Money so they say,  
Is the root of all evil today.”*

*(Pink Floyd)*

\* We thank 2 anonymous referees for their helpful comments. Moreover, the paper benefited from comments and suggestions by B. Fischer, D. Gerdesmeier, C. Johansen, A. Lojschova, M. Morelli, B. Roffia, P. Spahn, P. Welz and the participants of seminars at the European Central Bank and the University of Düsseldorf and of the Fall 2013 ROME Workshop. At the time of writing this paper, Markus Schmidt had worked with the European Central Bank, Directorate General Economics. The views presented herein are those of the authors and do not necessarily reflect the position of the European Central Bank or the Deutsche Bundesbank.

## 1 Introduction

Since the formation of Stockholms Banco<sup>1</sup> in 1656, safeguarding the value of money has remained one of the main tasks of monetary authorities. Although this objective is widely accepted, disagreement persists on how to achieve a situation that is commonly referred to as “price stability”. One of the most influential views on this issue is provided by the “quantity theory of money” whose modern version has been established in economic theory since Friedman (1956).<sup>2</sup> According to the quantity theory, there is a close link between the growth rate of money and the inflation rate – at least in the long run.

The implications of the quantity theory are known among researchers as well as policy-makers and empirical evidence in its favour is well-documented (e.g. Teles & Uhlig, 2010). However, in parallel to monetary policy becoming increasingly based on theoretical models and empirical evidence (Mishkin, 2010, 81) money’s information content for monetary policy has been increasingly questioned. In particular, owing to the seminal works by Kydland & Prescott (1982) and Long & Plosser (1983), Real Business Cycle (RBC) and recently Dynamic Stochastic General Equilibrium (DSGE) models gained importance for monetary policy purposes. Despite these models’ theoretical appeals, they have still not been able to adequately explain money, and money only plays a passive role in them, if at all (see section 3).

The neglect of money in monetary policy decisions seems to have come to an end since the dawn of the financial crisis in 2007. After the outbreak of the crisis, it was realised that looking at monetary developments would have signalled the built-up of financial imbalances at an early stage (Borio & Lowe, 2002). Moreover, since central banks around the world conduct quantitative easing<sup>3</sup> in order to counteract the negative consequences of the financial market tensions for the real economy, money re-gained prominence on the monetary policy agenda. At the same time, with central banks flooding the banking system with liquidity, concerns increased that this huge liquidity provision will cause inflation to accelerate in the future.

Thus, there seems to have been an obvious contradiction between state-of-the-art economic theory and the conduct of monetary policy in practice in recent times. Indeed, this has left observers and policy makers somewhat confused about the actual relevance of money for economic developments in general and monetary policy in particular. This paper aims at resolving this confusion. The remainder is structured as follows: First, in the second section, we provide some general reflections on the role of money, shedding light on money itself and its use in theoretical and practical applications. By doing so, we identify some misunderstandings and inadequateness of many macro models, which, to our

opinion, provide a reason for these models’ inability to justify a non-trivial role for money as yet. The third section concentrates on the canonical workhorse model now in use, the New Keynesian (NK) model, putting particular emphasis on the different theoretical approaches that have been employed to introduce money into these models. In section four we switch to a more recent research agenda, the so-called New Monetarist (NM) approach. While NK models usually conclude that there is only a trivial role for money in the economy, the NM literature claims that money facilitates transactions that otherwise would not have taken place. Despite that, NM models seem far from providing a generally accepted toolbox for the investigation of money. We provide some rationale for why this is actually the case. The fifth part deals with an aspect of money that is often neglected in modern macro models, namely financial intermediation. In our opinion, considering financial intermediation is essential when dealing with money and trying to understand the interaction between price stability and financial stability. Taking financial intermediaries explicitly into account allows addressing monetary policy and macro-prudential issues simultaneously. Finally, section six concludes and provides some implications for monetary analysis.

## 2 Some general reflections

One buck is like any other, isn’t it? Actually, it’s not! Talking about money necessitates a clear distinction between different types of money. The most fundamental one is that between inside and outside money (see, e.g., Lagos, 2006).<sup>4</sup> Of course, the liquidity provision of a central bank to its counterparties – conducted via so-called outside money – does not necessarily affect consumer prices. It might only have inflationary consequences in case it was transformed into potentially inflation-relevant inside money via commercial banks’ granting of credit to the money-holding sector. Unfortunately, many theoretical models do not explicitly distinguish between outside (or base) money and inside money. Indeed, money and credit are linked via the money-issuing sector’s<sup>5</sup> (consolidated) balance sheet (see Figure 1). Thus, an expansion of base money might fuel an increase in bank lending to the money-holding sector, which in turn could result in an expansion of the stock of (inside) money. This transmission channel, however, is rather indirect. There might even be reverse causality. This leads us to the conviction that theoretical approaches should either model the transmission of outside into inside money explicitly or should – as a minimum requirement – be explicit on the definition of money that is actually used.

Even though (inside) money might technically be linked to credit via the balance sheet identity and despite the fact that many modern macro models explicitly deal with credit (see section 3) or investigate money’s role in

facilitating trade (see section 4), there is no formal and *generally accepted* micro-founded (general equilibrium) theory of money as yet. Such a theory should be able to explain how money arises endogenously, why money is preferred to other means of transaction and how welfare is enhanced by the existence of money (Thornton, 2000, 35).

Assets	Liabilities
Credit to general government	Currency in circulation
Loans	Overnight deposits
Securities	Other short-term deposits
	Marketable instruments
Credit to private sector	
Loans	Holdings of general government
Securities	Longer-term liabilities
Net claims on non-euro area	Remaining liabilities
Shares & other equity	
Reamaining assets	

Figure 1: A stylised MFI balance sheet

Most monetary macro models highlight money's unique role for transactions purposes. They thus interpret the facilitation of trade, the lowering of trading frictions (e.g. by lowering problems associated with asymmetric information) as well as the reduction of transaction costs as money's essential functions.<sup>6</sup> Concentrating on trade, however, implies that models dealing with representative agents' models are not well-suited to capture money's importance, since there is no rationale for trade between identical individuals. Instead, *heterogeneous* agents' models should be in the focus and all approaches based on homogeneous agents thus seem to be subject to a fundamental shortcoming.<sup>7</sup>

In theoretical frameworks, the importance of money for transactions in goods and services might partly relate to the fact that the ultimate goal of monetary policy in these frameworks is price stability and/or stabilising the output gap. Even though this is thus in line with reality, the interpretation of the transmission channel from monetary developments to inflation inherent in this view might be too narrow. In fact, monetary policy practice since the end of the 1980s has relied more and more on broader monetary aggregates, so its scope was actually beyond pure transaction-oriented definitions.

Theoretical models' emphasis on money's role as a means of transaction does also result in an inaccuracy frequently perpetrated in empirical applications: Therein, researchers usually employ a narrow money concept, commonly M1, in analysing money's role in economic developments. Doing so, however, should not be interpreted as the central bank having perfect control over

M1, which is actually not the case. If at all, the central bank is able to indirectly steer the quantity of money by adjusting the monetary base or short-term interest rates. Since the transmission and intermediation process from the monetary base to inside money is complex and time-varying (see already, e.g., Brunner and Meltzer, 1966), perfect controllability of whatever monetary aggregate might be too much of a simplification and could thus result in misguided conclusions.

An additional aspect of money that is often left out of consideration in both theoretical macro models and empirical investigations is its use in financial market transactions. In fact, money's disposition is not limited to transactions in goods and services. Money also enables agents to purchase financial assets, many of which, though interest-bearing, are not held for investment purposes in the first place, but for liquidity reasons. These short-term interest-bearing assets are available for financing transactions in the not-too-distant future and are thus a possible source of price pressure in case this potential demand for goods and services materialises.

Against this background, it seems obvious to broaden the interpretation of money, since it might be a too restrictive view to solely emphasise money's role as a means of transaction. Rather, the above-mentioned considerations call for a broad monetary aggregate as the appropriate measure of money like M2 or M3 in the Eurosystem.<sup>8</sup>

Nevertheless, many empirical investigations of *standard* money-demand functions using broad monetary aggregates in the euro area have documented a large and persistent residual, at least since 2004 (see figure 2). This finding has been frequently interpreted as an indication that the money-demand specification collapsed which led both academic mainstream as well as policy makers to conclude that money cannot be assigned a central role for monetary policy purposes (Woodford, 1998; Reichlin, 2006).<sup>9</sup> Subsequently, much effort was spent in trying to counter this critique and re-specify the money demand function by augmenting it with various additional variables, e.g. stock market, housing market or uncertainty variables (see, among others, Greiber & Lemke, 2005, and Greiber & Setzer, 2007) or to introduce non-linearities (see, e.g., Dreger & Wolters, 2010) into the basic specification. However, against the background of the experiences the euro area has made since the dawn of the financial crises, one might conclude that the observed persistent error term in the standard money demand specification could have indicated the build-up of an imbalance with potentially severe consequences. Thus, investigating its causes could probably be helpful in identifying, understanding and explaining financial crises.<sup>10</sup>

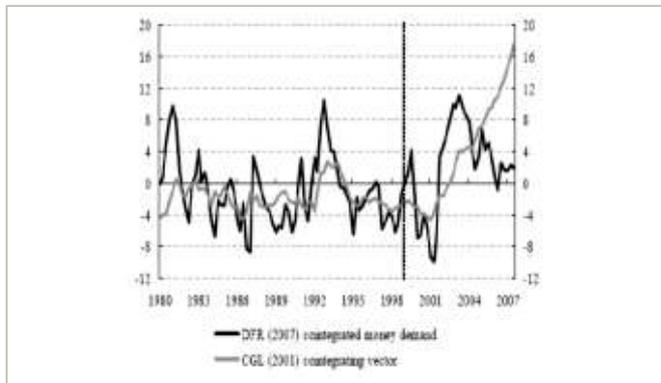


Figure 2: Residual of a standard money demand specification based on Calza et al. (2001) and de Santis et al. (2013)

In fact, this view leads us to a commonly encountered misconception regarding the money inflation link in today's general equilibrium (GE) macro models: Actually, this link is neither direct (Nelson, 2003) nor is it an equilibrium concept. In contrast, risks to price stability emerge in disequilibria only. But even if this disequilibrium is identified, the inflationary risk does not necessarily materialise.<sup>11</sup> Of course, there are factors that temporarily have the potential to induce agents holding more (or less) money than they would usually need in order to finance their demand for goods and services. Among these are variations in the velocity of money, uncertainty or developments in asset prices. In addition, it is *not* necessarily the case that any disequilibrium adjusts via price movements in goods markets, which are in the focus of the usual definition of inflation. In fact, the adjustment can also take place via asset prices, i.e. financial market imbalances. Consequently, Nelson (2003) highlights that the quantity theory neither claims a direct link between money and inflation nor does it rest on that interpretation. In fact, money is seen to be one factor determining real aggregate demand relative to potential output. Thus, Nelson argues that in empirical investigations of the Phillips curve, a significant coefficient on money rather indicates measurement errors or a misspecification of the IS-curve once the output gap is taken into account.<sup>12</sup>

A growing literature supports the view that monetary analysis can help ex-ante to identify the build-up of financial imbalances.<sup>13</sup> For example, Alessi & Detken (2011) find that analysing monetary developments provides useful information for detecting financial market misalignments and financial market crises arising from these. In a similar vein, Adrian & Shin (2011) show theoretically the importance of financial intermediaries' balance sheet quantities as an indicator for financial market participants' risk appetite.<sup>14</sup> Importantly, as Adalid and Detken (2007) conclude, the empirically convincing indicator properties of money for the build-up of financial imbalances are usually not only found for narrow, but for broad monetary aggregates as well. Moreover, this conclusion holds true for both the global and the

country-level. As regards this financial stability dimension of money, its role goes beyond the pure transactions motive and emphasises store-of-value and precautionary considerations.<sup>15</sup>

Having in mind all the above-mentioned arguments regarding the link between money and credit, the merits of broad monetary aggregates and the benefits money (and credit) provides for detecting financial market imbalances, another shortcoming of state-of-the-art macro models becomes obvious: The modelling of a banking sector. Whenever a banking sector is explicitly taken into account in modern theoretical approaches, this is usually done in order to model credit rather than money (see, e.g., Adrian & Shin, 2011; Gertler & Kiyotaki, 2011).<sup>16</sup> On the one hand, concentrating on credit omits money's role for funding banks' granting of credit. On the other hand, it neglects the fact that a credit economy would in any case give rise to money as a medium of exchange (Thornton, 2000, 51ff.). Credit promises are most efficient if they are denominated in the form of outside money, i.e. currency. But as long as the commitment of financial institutions to exchange deposits for cash immediately and at a fixed one-to-one nominal value is credible, these two forms of transactions money are perfect substitutes and should be included in the stock of money. Ultimately, this also means that models are not complete as long as money is missing.

Due to the balance sheet identity, modelling credit is often seen as being sufficient for capturing the effects of money for the macroeconomy. However, treating money and credit as perfect substitutes disregards many other important balance sheet items of monetary financial institutions, e.g. net-external assets or longer-term financial liabilities, as highlighted by Nelson (2008). In addition, shadow-banking activity and banks' off-balance sheet transactions can contribute to an increase in bank deposits but are not necessarily considered as a respective granting of credit (see Bernanke, 2008). Thus, Woodford (2008, section 2) rightly concludes that an emphasis on credit (frictions) should not be seen as a sufficient condition for rationalising a useful role of money.

### 3 New Keynesian models

Before discussing New Keynesian theory in more detail, it seems worth clarifying a fairly common misunderstanding: NK literature and the Monetarist view of a long-run relationship between money and inflation are *not* mutually exclusive. Many researchers working on NK theory do not support the view that money is unimportant to inflation. Actually, Woodford (at the ECB's 2006 central banking conference, see Reichlin, 2006) as well as Uhlig (2006) state that "we are all Monetarists now". NK literature, however, frequently doubts that there

is a rationale for a prominent role for money in a central bank's monetary policy strategy.

### 3.1 The standard NK model and its implications for monetary policy

The conclusion on money's irrelevance for monetary policy purposes can be derived from the typical setup of a New Keynesian (NK) model. NK-type models of this kind are nowadays frequently used to address monetary policy-related issues. It is based on a combination of an IS relationship, a Phillips curve as well as a policy rule determining jointly the real interest rate ( $r$ ), the output gap and the inflation rate (e.g. Clarida et al., 1999). The key friction that gives rise to short-run non-neutralities of monetary policy is – by assumption – price stickiness, i.e. a nominal rigidity.<sup>17</sup> The central bank is viewed as being able to set a short-term nominal interest rate, and the policy problem is presented as a choice over alternative rules for how this should be done in response to economic conditions. The standard NK model in its basic form can be summarized by equations (1) - (3):

$$x_t = -\phi_i(i_t - E_t\pi_{t+1}) + E_t x_{t+1} + \varepsilon_t^x \quad (1)$$

$$\pi_t = \lambda_x x_t + \lambda_\pi E_t \pi_{t+1} + \varepsilon_t^\pi \quad (2)$$

$$i_t = \omega_0 + \omega_x x_t + \omega_\pi E_t \pi_{t+1} + \varepsilon_t^i \quad (3)$$

$$(m_t - p_t) = \alpha_0 + \alpha_1 y_t - \alpha_2 i_t + \varepsilon_t^m \quad (4)$$

Equation (1) is the IS relation with  $x$  the output gap,  $i$  the nominal interest rate,  $\pi$  the inflation rate and  $E$  the (rational) expectation operator. (2) shows the AS relation (or alternatively the Phillips curve) according to which inflation depends positively on the output gap and expected inflation. (3) provides the Taylor-type monetary policy reaction function which closes the model.<sup>18</sup> The  $\varepsilon$  terms are AD, AS and interest rate shocks, respectively. These three equations determine the three endogenous variables  $x$ ,  $\pi$  and  $r$ . Adding a money demand equation (4) to the above system does not affect the three variables of interest. The money demand function is redundant as it adds one unknown variable, i.e. money, and one equation identifying it in the system. As a consequence, steady-state inflation can be derived without considering money as it is represented by the credible inflation target of the central bank (Woodford, 2008).<sup>19</sup> In fact, (4) just describes how money supply has to adjust in order to balance money demand.<sup>20</sup> Causality runs, if at all, from prices to money and not the other way round. In particular, there is no role for money (shocks) in explaining short-run inflation dynamics, which are according to (2) solely determined by inflation expectations and the output gap. The output gap, in turn, is a function of real marginal costs' deviation from their steady state level and thus depends on expected output and the real interest rate (e.g. Clarida et al., 1999; Woodford, 2003). Given that

there is no role for money in NK models to affect short-run inflation dynamics and that the long-run is simply the sum of all “short runs”, Thornton (2014) concludes that there is no role for money in this model even in the long-run. Thus, an essential question arises: How can NK models be modified to yield a non-trivial role for money?

### 3.2 Money's role for monetary policy transmission and its consequences for the long-term link to inflation

One central assumption in NK theory is that steady-state inflation always equals the monetary authority's credible inflation target. The consequence of this assumption is simple: Any change in the long-term average of inflation is interpreted as a result of a change in the central bank's desired inflation rate (e.g. Galí, 2002). In addition, the standard NK view implies that the central bank can steer interest rates without considering money demand and supply. Movements in real money balances are driven either by current output – which is (indirectly) determined by the IS relation – or the current short-term interest rate – set by the central bank – if they are not anyway considered as pure noise, i.e. as a money demand shock  $\varepsilon^m$ . Many researchers in NK modelling spent effort on challenging the view that money does not affect inflation, even in the long-run (see, e.g., Nelson, 2008; Ireland, 2004b).<sup>21</sup> Nelson (2008) is most explicit about this point. He argues that in monetary economics, the term *long-run* is generally defined as the conditions prevailing after all prices have fully adjusted to monetary policy actions. This illustrates that price stickiness is a temporary phenomenon only.<sup>22</sup> Moreover, monetary policy is not able to control the real interest rate permanently. This indeed raises the question how the central bank can determine inflation in the long run, i.e. how it can steer actual inflation to its target rate. As monetary neutrality is assumed to prevail, the relative change of the price level has to be equal to the relative change in the nominal money stock. The latter, in turn, is influenced by the central bank via its monetary policy instruments (e.g. open market operations), even in the long run. Consequently, “reaching the inflation target means a specified quantity of open market operations in the steady state; specifically, open market operations that deliver a steady-state money growth” (Nelson, 2008, 1805).

A prominent role in monetary policy transmission can be assigned to the banking system, which is often disregarded in NK models. However, as soon as one explicitly accounts for financial intermediation in a banking system, a role for money emerges. For instance, Zanetti (2012) shows that augmenting a standard NK model with even a simple banking sector that “produces” deposits households can use to finance consumption results in a significant role of money in the business cycle. This is because money is crucial for households' intertemporal allocation of consumption. Moreover,

introducing banks leaves the deep coefficients of the theoretical framework unchanged and thus avoids that the model becomes subject to the Lucas (1976) critique. Despite these theoretical advances, Zanetti (2012) admits that the omission of money in his model hardly changes the variables' reaction to shocks, raising doubts about money's significance for the modelled transmission mechanism.

Matsuoka (2011) investigates optimal monetary policy in an overlapping generations setting that comprises a banking sector to provide liquidity. In his model, a transactions role of money emerges due to spatial separation and limited communication among economic agents. His optimality conditions depend essentially on the competitive structure of the banking system. For instance, in a monopolistic banking system the Friedman rule<sup>23</sup> can eliminate banks' monopoly power – and thus the inefficiencies related to it – that emerges under positive nominal interest rates. As a result, monetary policy should not only pay attention to the development of money, but must also take the institutional environment into consideration. Matsuoka's (2011) results thus ultimately suggest that the importance of money in the conduct of monetary policy might vary among countries, governed by, *inter alia*, the structure of the banking system.

Goodfriend (2005) also investigates the transmission of monetary policy decisions. His model puts particular emphasis on the role of a broad monetary aggregate (including bank deposits) amid the interaction of supply and demand for (broad) money, loan production, asset markets and possible arbitrage between banking services and asset markets.<sup>24</sup> Therein, households demand deposits to hedge against liquidity risk (which is caused by the timing structure of income flows and households' consumption decisions). Deposits, in turn, originate from collateralised loans, which are produced by banks due to their (risk) management competency. This gives rise to an external finance premium as part of the interest rate for loans to households. The external finance premium, for its part, is governed by households' volume of borrowing relative to collateral. Via a no-arbitrage condition, the interest rate on bank loans (and hence the external finance premium) is linked to the interbank interest rate in particular and the cost of loanable funds in general. The distinguishing feature of Goodfriend's approach is the simultaneous determination of the price of consumption goods and the management effort in banks' loan production. Goodfriend (2005) concludes that the central bank, targeting an interbank interest rate in order to maintain price stability, has to take into account broad liquidity conditions, which are, *inter alia*, reflected in money.

One obvious question arising from the Goodfriend (2005) Model that also touches the implications of the standard

NK model is the issue of the central bank's ability to steer interest rates. As mentioned earlier, there can be doubts about the view that a central bank can steer the whole term structure of interest rates at its own and direct discretion. In fact, central banks can expand or limit the volume of liquidity they provide to their counterparts and can – more or less explicitly – determine commercial banks' costs of refinancing at the central bank. By doing so, they initiate a complex process of changes in relative (asset) prices and yields. The ultimate effects of the central bank's decision for banks' market-based refinancing costs are, therefore, rather indirect and depend on numerous factors beyond the direct control of the central bank, as experienced in particular during the financial market tensions since 2007.<sup>25</sup>

Another aspect that should be taken into account is central banks' ability to anchor inflation expectations, which are, as highlighted in the policy rule (3), essential in NK models. Christiano et al. (2008) explicitly address this issue. In their view, even if a monetary policy reaction function like (3) might be able to stabilise inflation expectations, it might not do so in any circumstances due to the uncertainty regarding the true data-generating process. If this type of uncertainty occurs, they show that the central bank's credible commitment to monitor and steer non-borrowed reserves (*i.e.* money supply) is helpful in stabilising inflation expectations in case money evolves not in line with fundamentals (Christiano et al., 2008, 33). Money, in this sense, is used as an escape clause strategy for special circumstances. Such a strategy works if the central bank is able to credibly commit to control money in the case the escape clause is activated. Besides this, the authors look at situations with possible financial market imbalances. They derive that cautious and forward-looking monetary policy which gets restrictive in case of strong credit (money) growth will attenuate boom-bust-cycles in financial markets.

Lastly, Christiano & Rostagno (2001) review different ways how monetary policy characterized by (3) might increase macroeconomic volatility. They show that a modification to (3) according to which the central bank monitors money growth as well as its commitment to abandon (3) in favour of a money-rule in case money growth left a pre-defined corridor is optimal. A similar reasoning is presented by Minford & Srinivasan (2010) who argue that NK models should explicitly take money demand and money supply issues into account and formulate a terminal condition for its money supply behaviour. This is necessary to avoid indeterminacy of inflationary processes because the NK argument that agents would not choose a path of hyperinflation due to its disastrous consequences is not credible and does not rule out such an equilibrium.<sup>26</sup> Only money provides the central bank with a tool to formulate such a terminal condition and thus an instrument to credibly anchor inflation expectations and rule out bubbles (see

also Balfoussia et al, 2011, Brückner & Schabert, 2006; Cochrane, 2007a, b; Feldkord, 2005).<sup>27</sup> Atkeson et al. (2009) show that determinacy can be re-established by employing sophisticated monetary policy rules where the monetary authority switches from an interest rate rule to a money growth rule.<sup>28</sup>

### 3.3 Incorporating money into NK theory

As argued above, there are convincing arguments against the view that there is no role for money for economic developments in general and monetary policy in particular. Consequently, researchers tried to incorporate money into theoretical Dynamic Stochastic General Equilibrium (DSGE) models (which are built on the basis of NK theory)<sup>29</sup> by including money directly into the utility or production function of agents or firms. Therefore, the resulting models are called *money-in-the-utility-function* (MIU) (see e.g. Woodford, 2003, ch. 2) or *money-in-the-production-function models* (see e.g. Canova & Menz, 2011; Benchimol, 2014a).<sup>30</sup>

The ultimate conviction of MIU models is that holding money itself yields direct or indirect utility. Consequently, money appears in the household's utility function  $u(\cdot)$ . In the basic theoretical set-up, households are assumed to be infinitely-lived and aim at maximising their expected lifetime-utility of the form

$$E_0 \left[ \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t u(c_t, m_t) \right], \quad (5)$$

where  $0 < \beta < 1$  is the discount factor,  $E$  is the expectation operator and the per-period utility depends positively on consumption  $c$  and real balances  $m = M/P$ . The way money affects the consumption path crucially depends on the assumption made about  $u_{cm}$ , i.e. what happens to the marginal utility of consumption if real money balances change.

If  $u(\cdot)$  is additively separable between  $c$  and  $m$ , the marginal utility of consumption would be independent of real balances. There would be no real balance effect beyond the fact that money enters the utility function. In contrast, if  $u(\cdot)$  is assumed to be non-separable across its arguments, there indeed arises a role for money since real balances enter the model's IS and Phillips curve, as shown in Woodford (2003), Ireland (2004) and Andrés et al. (2006), among others. Andrés et al. (2009), Canova & Menz (2011) and Castelnuovo (2012) bring these models to the data. Andrés et al. (2009) find evidence for the forward-looking character of money demand and for its value in identifying variations in the natural rate of interest and the real-interest rate gap. In addition, Castelnuovo (2012) estimates a structural DSGE monetary model of the business cycle for the US economy in which money is allowed, but not necessarily required, to play a role. In his model, money may exert

an influence via non-separability, direct (via portfolio adjustment costs) effects and/or the impact of policy-maker's systematic reaction to monetary developments. Castelnuovo finds that money, as measured via M2, plays a significant role in shaping the US business cycle, even though its significance is time-varying.<sup>31</sup> The effects are first and foremost stemming from non-separability and from policy-makers' systematic reaction to monetary developments. At the same time, these results are not true for the monetary base.

Benchimol & Fourçans (2012) also provide a model based on non-separable utility to particularly investigate the link between risk-aversion and money demand highlighted already in Friedman (1956). Accordingly, agents' money demand should pick-up with risk-aversion in order to cope with uncertainty and to optimise the intertemporal allocation of consumption. Indeed, Benchimol & Fourçans (2012) find evidence for money's role in determining output (fluctuations) for high-levels of risk-aversion (for an application to the euro area see Benchimol, 2014b). Consequently, risk-aversion potentially affects money's impact on relative prices in goods as well as financial markets with repercussions on aggregate demand and output.<sup>32</sup> In addition, Benchimol & Fourçans (2012) argue that the role of money for macroeconomic dynamics is usually masked in standard NK models' endogenous inertia regarding output (via consumption habits) and inflation (via price indexation). In fact, output and inflation seem to be more forward looking than implied by these inertial components, providing another conduit for money to affect economic outcomes.

Apart from the discussion about (non-)separability of utility, Woodford's (1998, 2003 ch. 2.3.4) case of a "cashless limiting economy" does also controvert the impact of money on economic developments. In his model, agents need money to finance transactions, but the volume of money that is actually used for transactions tends to zero due to innovations in financial markets and payment systems. Consequently, the velocity of money approaches infinity, resulting in households' holdings of real balances falling to zero. The marginal utility of additional real balances becomes large in such an environment. Thus, it is possible to arrive at an equilibrium exhibiting a non-trivial interest-rate differential between monetary and non-monetary assets and significant opportunity costs of holding money. At the same time, variations in the stock of money hardly have any effects on the marginal utility of consumption as money becomes increasingly unimportant for transactions, resulting in an equilibrium with real balances being very small relative to national income. The underlying idea of this view is that in such an economy money is used for transactions of only a very few kinds, though it is essential for those.

The assessment whether or not the assumptions of separability of the utility-function or that of a cashless-limit environment are relevant and quantitatively important is ultimately an empirical question. However, even on theoretical grounds, both of these assumptions seem questionable. For instance, cash certainly provides valuable services to consumers which may stem from its anonymity or from the fact that transactions can be conducted via money without knowledge of individual histories (imperfect monitoring), imperfect recognisability or costly connections among people (Wallace, 2011).<sup>33</sup> Against this background, McCallum (2000, 2001, 2002) strongly argues that there is no compelling theoretical basis for the assumption of separability of the utility function. Moreover, as Ireland (2004b) states, introducing real balances into a forward-looking IS curve necessarily requires introducing real balances into a forward-looking Phillips curve. By doing so, Barthélemy et al. (2008) achieve a direct effect of money on output and inflation and find a non-trivial role for money in the business cycle.

### 3.4 The information channel of money

A number of NK models, summarised by the term *information channel literature*, (see Beck & Wieland, 2007, 2008; Coenen et al., 2005) assign money a prominent role for monetary policy due to its leading indicator property for the underlying *state of the economy*. Within this strand of literature, one can further distinguish between models arguing via money's informational content regarding (potential) output or the natural rate of interest, while other models focus on the information money provides for asset price developments.

#### 3.4.1 Money as an indicator to improve perceptions of output and interest rates

As regards money's informational content with respect to the mitigation of problems arising from misperceptions of either the level of output or the real interest rate, Coenen et al. (2005) refer to money's leading indicator property amid data revisions. According to their results, money can improve the precision of output estimates since aggregate money demand is governed by the true level of aggregate demand, whereas the central bank can observe only a noisy measure of aggregate output. However, a useful indicator property of money necessitates (i) a lower variance of money demand shocks compared to that of output mismeasurements and (ii) a relatively close contemporaneous link between money and aggregate demand. Coenen et al. (2005) have to admit that the latter of these two pre-requisites seems to be hardly fulfilled in the euro area.

The role of money in dealing with data uncertainty is also highlighted in Scharnagl et al. (2010) in an extension of the analysis of simple monetary policy rules to the case where policy-makers face measurement problems with

respect to both actual and potential output. They change the standard NK model (1) - (3) by including a money demand function (which depends on actual output) and degrees of output gap uncertainty found in practice. With these simple modifications they find that a speed-limit rule which includes an additional response to money growth outperforms both the standard speed-limit rule and more conventional Taylor rules (with and without money).<sup>34</sup> The main reasons for the welfare gain are that money growth contains information on current output growth and that data on the euro area money stock are subject to only negligible measurement errors.<sup>35</sup> Beck & Wieland (2007, 2008), too, allow for persistent central bank misperceptions regarding potential output. They show that under this assumption, cross-checking the optimal (discretionary) policy response derived from NK models with money-based estimates of trend inflation generates substantial stabilisation benefits (see also Arestis et al., 2010). These results might be subject to criticism regarding the assumption of the persistence of the central bank's misperception of potential output, in particular against the backdrop of academic advances in nowcasting macro-economic variables (see Evans, 2005, among others). However, Beck & Wieland actually base their assumption on a couple of studies supporting their view of relatively long-lasting misperceptions (see, e.g., Orphanides, 2003; Gerberding et al., 2005).

#### 3.4.2 Money as an instrument to improve the understanding of asset price fluctuations

A second strand within the information channel literature refers to money being a good proxy for a whole set of asset price developments which are not well captured by short-term interest rates alone. Therefore, NK models tend to understate the value of money as an indicator for monetary policy due to recognising an insufficient number of distinct assets by presuming perfect substitutability between non-monetary assets. Nelson (2002, 2003) presents an alternative theoretical framework. Therein, money is important to aggregate demand because of its leading indicator property for various substitution effects among assets – which, in turn, matter for aggregate demand – triggered by monetary policy decisions which changes asset prices and yields.

Kajanoja's (2003) model supports the benefits of this leading indicator property of money, in particular when money-demand is forward-looking, because it enables policy-makers to learn faster about the various shocks the economy is exposed to.<sup>36</sup> This is because the growth rate of real balances, being affected by the nominal interest rate steered by the monetary authority, contains information about the real interest rate and the economy's potential output. The distinguishing feature of this approach is the *forward-looking* money demand function, since in a static money demand framework all information

about the natural rate of output is already contained in current output and the nominal interest rate.

The forward-looking character of money demand is empirically confirmed by Andrés et al. (2009) for MIU models with non-separable utility and for CIA models. Thus, there is evidence that real money balances are valuable for anticipating future variations in the natural real interest rate, which are otherwise difficult to gauge. The reasoning is that real balances reflect agents' portfolio adjustments in response to aggregate demand and/or technology shocks to which they are exposed.<sup>37</sup> Ullersma et al. (2006) also augment a standard NK model with the idea of money being a proxy for the yields of different assets which matter for aggregate demand, but cannot be incorporated into the model. Welfare gains are achieved if the monetary authority takes money growth explicitly into account when setting interest rates, because doing so allows an assessment of the resulting developments in asset prices that are relevant for aggregate demand and thus for inflation. Furthermore, since money reveals information on determinants of aggregate demand beyond the short-term interest rate, it leads to a better estimation of the natural real interest rate. Hence, considering money enables the central bank to improve its understanding of the transmission process of monetary policy.

In a similar vein, McCallum & Nelson (2011, 144) present historical evidence for the general idea that money reveals fluctuations in variables, which are hard to be observed directly, but nevertheless matter for future aggregate demand – in particular the natural rate of interest. Moreover, an assessment of the monetary policy stance is more reliable when it takes monetary aggregates into account instead of focusing solely on interest rates. For instance, Tödter (2002) shows that money can be interpreted as being a “summary statistic” of different shocks hitting the economy (the  $\varepsilon^i$  terms in (1) - (4)), even though money does not allow to identify the respective individual shocks  $\varepsilon^i$ .

#### 4 New Monetarist Economics

In recent years, a new school of thought has established, *New Monetary Economics*.<sup>38</sup> What is their thinking about the role and concept of money? And what's so new with the New Monetarists (NM)? In fact, both “Old” and “New” Monetarist models stress the importance of money and concentrate on welfare aspects that makes them being focused on rather long-run issues. Apart from that, the two approaches have hardly anything in common.<sup>39</sup> For example, the conclusions of the NM literature are grounded in formal and microeconomic theory, while the traditional approach was based on rather ad-hoc assumptions. From an institutional design perspective, one of the most important distinguishing features of NM models is that they explicitly take the role of financial

intermediaries and their interactions with the central bank into account.<sup>40</sup>

Like NK models, the NM literature also highlights the importance of economic frictions. However, the differences are in the details. For example, frictions in NM theory are modelled explicitly and are not based on assumptions as is common in NK models. Additionally, the kinds of restrictions for the optimisation process are different. Imperfect monitoring together with limited commitment and asymmetric information about both a counterpart's credit standing and the traded good's features and quality are in the NM approach's centre of interest. This has far-reaching consequences as money now actually is the key to ameliorate frictions. Consequently, the NM approach is able to show that spatial separation per se is *not* the critical friction making money essential.<sup>41</sup>

The fundamental idea behind that view is that money helps to resolve the double-coincidence-of-wants problem in an environment subject to the above-mentioned restrictions to the optimisation process.<sup>42</sup> As regards imperfect monitoring amid limited commitment this is because money can serve as a kind of memory (Kocherlakota, 1998).<sup>43</sup> In other words, money can be used as evidence of an agent's actions in the past, weakening his incentives to cheat (Wallace, 2011). Thus, imperfect monitoring implies incomplete record-keeping that ultimately gives rise to asymmetric information about the history of transactions.<sup>44</sup> To put it differently, imperfect monitoring results in uncertainty regarding an agent's credit standing. In the extreme case of no monitoring at all, all transactions should thus be conducted via money. Thus, money comes into play via incomplete memory, which is traditionally formalised by assuming anonymous agents in NM models. At the same time, conditions for credit are best in an environment in which there is full monitoring. Consequently, if one aims at modelling money and credit simultaneously, it is necessary to limit monitoring sufficiently to make a case for money, while leaving its level adequately high to enable credit.

From a methodological point of view, NM models have in common a search-based structure (see for one of the first papers Kiyotaki & Wright, 1993). Though varying in their theoretical details, a general conclusion is that a shortage of a medium of exchange is costly because trades do not occur that actually would be welfare-improving (Williamson & Wright, 2011). For illustrative purposes, imagine a very simple economy with a worthless object, which may be stored in units  $m \in \{0, 1\}$ .<sup>45</sup> For the sake of simplicity, let us call this object “money”, even though doing so is not fully in line with the usual definition of money employed in central banks. Next, assume that whenever two agents meet, each of them is endowed with “money” (i.e.  $m=1$ ) with probability  $p$ . Consequently, the probability of someone not having money at his disposal

(i.e.  $m=0$ ) is  $1-p$ . If we define  $V_m$  to be the payoff of an agent with “money”, the payoff  $V_0$  ( $m=0$ , i.e. not having money) is given by

$$V_0 = \beta V_0 + \alpha \delta (U - C) + \alpha \sigma p \max_{\phi} [-C + \beta (V_1 - V_0)], \quad (6)$$

where  $\beta$  is a discount factor,  $U$  is utility obtained from consuming a good produced by someone else and  $C$  represents the cost of producing goods.<sup>46</sup> The parameter  $\alpha$  describes the probability that two agents meet while  $\delta$  is the probability that both of them like what their counterpart produces (so-called “double-coincidence meeting”). Double-coincidence meetings increase the payoff in the case without money (depending on the two probabilities) as utility  $U$  exceeds the costs of the good  $C$ . By contrast,  $\sigma$  is the probability that only one of the two agents is willing to transact, whereas the other is not (so-called “single-coincidence meeting”). In this case,  $\phi$  is the probability that the one not endowed with “money” actually agrees to sell his good for “money”. Single coincidence additionally improves the situation (depending on the probabilities) if the producer costs  $C$  are lower than the payoff increase meeting someone having money (see the third term in (6)). In double coincidence meetings (the second term in (6)), the agent can still barter, but with money he has one further option. If he meets a person with money who likes his good, he can trade for cash and  $\phi$  is the probability he agrees to do so.

In case the agent is endowed with money, the payoff  $V_1$  ( $m=1$ ) is given by

$$V_1 = \beta V_1 + \alpha \delta (U - C) + \alpha \sigma (1 - p) \phi [U + \beta (V_0 - V_1)], \quad (7)$$

where  $\phi$  is the probability that the agent’s money offered in a single-coincidence meetings is accepted. Again, he can still barter in double-coincidence meetings. However, in the single-coincidence case (the last term in (7)) having money is useful for him as he can make a cash offer to get the good, which is accepted with probability  $\phi$ .

Equations (6) and (7) show that as long as a double-coincidence meeting takes place, agents have always the option to barter. In this case, there is no role for money left. However, as soon as one of the two agents is not interested in the good his counterpart owns, money provides the opportunity to trade for money (as captured by the third term in the respective equations). As a result, money enables transactions in single-coincidence meetings, which would not have occurred without money.

More formally, in a system like the one described, an equilibrium is defined as a set  $\{\phi, V_0, V_1\}$  which satisfies (6) and (7) combined with a so-called best response condition (i.e. maximised value of  $\phi$  given  $\phi$ ). There is a monetary equilibrium  $\phi = 1$  if and only if  $C$  is not too high.<sup>47</sup> This equilibrium is superior to barter and is

robust. However, it can be shown that it does not as well as perfect credit (Williamson & Wright, 2011, 34). Thus, money is not a perfect substitute for credit.<sup>48</sup> Nevertheless, the intrinsically worthless asset  $m$  has a positive value in monetary equilibria as a medium of exchange or due to its liquidity. The money demand function inherent in these models is well-defined and fairly standard. It specifies real balances proportional to income and the proportionality factor to depend negatively on the interest rate (Williamson & Wright, 2011, 46).

As an interim result, we notice that NM theory provides a rationale for both the existence of money and credit – a fundamental advance in rationalising the potential usefulness of money for monetary policy purposes. However, from a monetary policy perspective, some questions yet remain: What are the costs of inflation implied in NM models? What assets do actually exhibit the features of “money”? And should monetary policy makers care about money when they aim at maintaining price stability?

Some intuitive answers to these questions can be directly obtained from (6) and (7). For example, whenever high (anticipated) inflation rates result in a loss of money’s medium-of-exchange feature, welfare (measured via the value function  $V_m$ ) in the NM model will decline as the parameter  $\phi$  shrinks. In addition, inflation is likely to increase the cost of producing goods ( $C$ ), which also decreases  $V_m$ .

In order to address these questions in more detail, it seems reasonable to extend this NM model to directly account for inflation. The simple environment used above is not capable of doing so since prices are fixed. This assumption is relaxed, for example, in Williamson & Wright (2010) who refer to models introduced by Shi (1995) and Trejos & Wright (1995). Williamson & Wright (2010) show that in this environment the price level increases with the number of consumers. Leaving distributional considerations aside, this implies that the price level co-varies positively with money. Policy makers can either target money growth, the inflation rate or the nominal interest rate which all are equivalent in this model. At the same time, in the stochastic version of the model, many paths of monetary developments can be consistent with a specific level of interest rates. Lastly, NM models find that the costs of (both anticipated and unanticipated) inflation, which in NM models are due to intertemporal distortions, are much higher than in NK models.

New Monetarists find substantial flaws in New Keynesian ideas (Williamson & Wright, 2010, 269ff.). Their main point of critique is the weak foundation of the assumption of nominal rigidities, in particular price stickiness, in the sense that prices cannot be changed except at

times specified rather arbitrarily (e.g. Calvo pricing) or at some menu cost. In these kinds of settings, money does not help resolving the problems, but is often, e.g. in CIA models, the cause of them. In contrast, New Monetarists are convinced that price stickiness should be the endogenous result of a model, not exogenously postulated. In their view, price stickiness is, if at all, a friction of the mechanism (design) and not in the environment (like private information, lack of commitment, imperfect recognisability or incomplete record keeping). They concentrate on the frictions in the environment as price stickiness (or sticky information) by assumption excludes some gains from trade. New Monetarists hence explicitly describe the frictions in the exchange process.

To substantiate the NM convictions, Williamson & Wright (2011, ch. 4) impose price stickiness like in NK models to show that confining monetary policy to the cashless limit case as done in Woodford (2003) is dangerous. The key difference between a model with money and credit and the cashless economy is that in the former the behaviour of prices is tied to the behaviour of the aggregate money stock, in line with the quantity theory of money. Only the model with money provides control over a monetary quantity to the monetary authority. The most important theoretical message of this kind of exercise is that if one thinks it is critical to have nominal rigidities in a model, this is not inconsistent with theories that try to be explicit about the exchange process and the role of money or related institutions in that process. Alternatively, Williamson & Wright (2011) use a search model to get nominal rigidities to emerge endogenously. It's main contribution to the theoretical discussion is that this model delivers monetary neutrality – a characteristic not existent in NK models – and reveals that sticky prices per se do not logically constitute evidence of the non-neutrality of money.<sup>49</sup>

Turning to the empirical evidence on NM models, there are only few empirical studies available as yet. Those existing usually focus on money's unique medium-of-exchange function, the natural empirical counterpart of which is a narrow or transactions-related definition of money, like M0 (in particular currency in circulation) or M1. Therefore, M1's good leading indicator properties for GDP growth may find some intuition in NM models (see for the euro area Brand et al., 2004). Alternatively, monetary services index numbers could be in the spirit of NM models, since they are derived from first principles. However, not all of the components included in these liquidity-weighted aggregates may be directly used in transactions. Consequently, NM models usually distinguish between currency in circulation and bank liabilities, respectively. However, referring to Lucas (2000), Williamson & Wright (2010, p. 281) note that a too narrow measure of money would take the theory probably too literally. Since in principle almost any asset can exhibit transaction-related

features in NM models,<sup>50</sup> more empirical research is needed to find the best measure for money. The models itself do not favour one aggregation scheme above another, e.g. simple-sum vs. weighted monetary aggregates.

## 5 Financial Intermediation

As stated earlier, New Monetarist models explicitly take financial intermediation into account. However, this is usually not done by explicitly modelling a banking sector. In the NK literature, there are models with an accentuated banking industry, though these approaches do so in order to investigate the granting of credit rather than analysing the emergence of a special role of money. In a world where risk is important (i.e. certainty equivalence does not hold), where money is broadly defined and where money supply is not perfectly elastic, the banking sector actually plays an active role in the transmission process. The frictions money helps to overcome in financial markets are related to its role in providing liquidity services which, in turn, improve the understanding of the evolution of asset prices (King, 2002). This is where financial intermediaries as suppliers of (inside) money come into play. As a consequence, as long as theoretical models do not account for a banking system to explicitly consider both credit *and* money, they will hardly be able to assign a non-trivial role to money.

Indeed, Zanetti (2012) shows that augmenting a standard NK model even with a simple banking sector in order to introduce deposits that households can use to finance consumption results in a significant role of money in the business cycle (see section 3 above). Moreover, financial intermediation becomes relevant for monetary policy purposes via the link between price stability and financial stability. This is because financial intermediaries are key players in the monetary transmission process: they create inside money (issue demand deposits) and may stabilise or destabilise financial markets via their daily business. This link is well-elaborated in Brunnermeier & Sannikov (2011), introducing a modern approach called the "*I Theory of Money*" which combines *intermediation* and *inside* money. It highlights the role of money as a store of value, liquidity buffer or insurance device instead of its transactions feature. In contrast to NK models, prices are fully flexible in their setup and households are assumed to be *heterogenous*. In such an environment, financial intermediaries can mitigate or even overcome financial frictions like asymmetric information. However, the intermediation process involves risks which give rise to two possible equilibrium outcomes (see also Brunnermeier et al., 2011). In the first equilibrium, the financial sector is well capitalised and banks create a large quantity of *inside money* by lending freely. *Outside money* is not really needed and hence has low value as agents have alternative ways to undertake transactions and hold money for precautionary reasons. They can hold

deposits with intermediaries or purchase securities from non-financial corporations. Banks are mainly funded by deposits that emerge from intermediaries' lending activity. However, a negative aggregate shock can shrink financial institutions' net assets and is hence capable of impairing their intermediation activity and the creation of inside money. This leads to the second equilibrium. Due to growing risk and uncertainty, precautionary money demand increases, leading to an increasing value of outside money. This, in turn, leads to a collapse of the (endogenous) money multiplier and thus ultimately to deflation (as in the early monetarist literature). Monetary policy can mitigate these adverse effects by redistributing money towards the financial sector (ex-post).<sup>51</sup>

In this sense, money, liquidity and financial frictions are inter-related. With financial frictions, a temporary adverse shock may be highly persistent, possibly generates amplification effects through intermediaries' balance sheets (e.g. negative liquidity spirals) and may lead to instability of financial markets. In anticipation of potential adverse shocks, the demand for liquid assets (i.e. money) of market participants for precautionary reasons will rise. This holds particularly true for monetary and non-monetary financial intermediaries, but also for non-banks. The higher the degree of liquidity or "moneyness" of assets, the better this liquidity buffer is. The essential distinction within the I-Theory is between inside and outside money which are only imperfect substitutes for each other.<sup>52</sup>

Besides the direct link between money and price stability highlighted in the (old and new) monetarist literature, the I-Theory of Money illustrates the significance of monetary developments for price stability also via a financial stability channel. Alternative approaches frequently highlight the importance of money and financial intermediation for macro-prudential issues, but do not take another step forward to relate it to price stability.

For example, Adrian & Shin (2011) present a New Keynesian DSGE model in which they highlight financial intermediaries' role in determining the price of risk. As these expand their balance sheets, their risk-bearing capacity increases and risk premiums fall. Thus, balance sheet quantities (e.g. money on the liability side) are indicators of the risk taking capacity of the *whole* financial intermediaries sector, the profitability of their projects (e.g. credit) as well as real activity. The broader the concept of money, the better this indicator property is. However, there are important differences between the various financial intermediaries and their respective balance sheet quantities. First, the information provided by institutions that are marking-to-market their balance sheet items is of superior quality. Second, the more market-based a financial system is, the more marketable instruments are useful with regard to this risk taking channel.

In a similar vein, Shin & Shin (2011) and Hahm et al. (2013) examine to what extent monetary aggregates can serve as an indicator of the stage of the financial cycle (for macroprudential reasons), which is reflected in the *composition* of the liabilities of the banking sector. However, the traditional classification of money according to the "moneyness" (or ease of settlement) of its components is not very helpful in this respect. The more relevant distinction, according to this theory, is that between *core and non-core liabilities* of the banking system. The core liabilities of a financial institution are its liabilities to non-MFI domestic creditors (mostly in the form of deposits to households). Consequently, the non-core liabilities consist either of liabilities to another financial institution or of liabilities against a foreign creditor.<sup>53</sup> In a boom with high credit growth, retail deposits (core liabilities) are usually not sufficient to fund the increase in bank credit. Therefore, other sources of funding must be attracted to fund the expansion in lending. Consequently, either transaction volumes in interbank lending markets increase or financial intermediaries' foreign liabilities extend. In this way, there are close links between procyclicality, systemic risk and the amount of non-core liabilities of financial intermediaries. Usually, non-core liabilities have shorter maturity than other liabilities and lengthen the intermediation chains.<sup>54</sup>

In this context, it seems appropriate to raise the question on banks' input factors and their respective actual output. Usually, theory regards deposits as input factors and credit as their output (see for recent examples Shin & Shin, 2011; Adrian & Shin, 2011). In fact, this view highlights banks' term transformation, but it neglects its risk management function. However, the view that banks are using (more or less) risky credit as an input factor to produce – by adding their risk management techniques – riskless deposit opportunities seems to be more appropriate today. At the bottom-line, this view explains the co-existence of banks and exchanges, as exchanges do also provide term transformation when assets are fungible, while they cannot provide these risk management services. This is important because banks, compared to financial markets, have an informational advantage when it comes to granting credit to a debtor due to their close monitoring and experiences they made during long-lasting business-relationships. This holds particularly true for the many small savings and cooperative banks with area-wide presence, regional identity and local rootedness. Banks are hence able to reduce information asymmetries between debtors and creditors. The view that credit and (broad) money are the same as "money is the balance sheet counterpart to bank lending" (Kim et al., 2012, 1) thus cannot hold under any circumstances. Modelling money in our understanding thus necessitates introducing information asymmetries in order to account for a realistic role of the banking sector and thus to find a role for money.

A shortcoming of models dealing with macro-prudential issues is that they are by construction concerned with downside-risks to price stability rather than with a balanced assessment of the risk of deviating from the preferred inflation rate in any direction. For instance, financial stability concerns regarding too little provision of liquidity are that it can cause a credit crunch to the real economy, triggering a recession that might ultimately result in deflation. Alternatively, too much provision of liquidity, from a financial stability perspective, might bear the risk of an asset price bubble, the burst of which can have analogous consequences via the necessary balance sheet adjustments of financial intermediaries in general and the banking industry in particular. Thus, in these theories, the analysis of monetary developments provides useful information from a financial stability point of view, but its applicability for monetary policy purposes is by far broader.

## 6 Conclusion

Regarding the question of what standard modern macro models regard as “money” it seems that the distinct feature of money is that it is used as a medium of exchange and is (usually) non-interest bearing. This view differs quite significantly from the definition of money that is commonly used in monetary policy practice at central banks. There, money is often defined as containing also interest-bearing short-term assets. This discrepancy in the definition of money in theory and practice poses the empirical question which monetary components actually represent money and contain valuable information for monetary policy to safeguard price stability and financial stability. Of course, the most valuable definition of money have to coincide with that of M1, M2 or M3 – even more so as these definitions vary among different currency areas. Thus, there is a need for a periodical review of the definition of money against the

backdrop of both latest theoretical advances and practical necessities. As regards the former, theory has been by now increasingly successful in finding a non-trivial role for money despite the criticism of the standard New Keynesian framework, although many theories still mainly emphasise money’s role as a medium-of-exchange. Regarding the latter, the definition of money must be kept up-to-date in order to account for latest financial innovations which are usually not considered in theoretical models. For example, securitisation activity of MFIs potentially results in monetary statistics on MFIs’ granting of loans deviating from their actually relevant origination of loans. A review of the definition of money always has to take care of theoretical as well as practical advances.

Anyway, at the bottom line both theory and practical experience guide monetary policy-makers towards one ultimate conclusion: If one accepts price stability as being the primary goal of monetary policy, a discussion of monetary policy without a reference to monetary aggregates seems quite misleading and inconsistent. Inflation is a synonym for a declining value of money, which is determined by supply as well as demand factors. This reasoning can be applied both to the analysis of inflation dynamics and to the determination of steady-state inflation. Against the background of uncertainty, misperceptions and theoretical ambiguities, it is advisable to consider money and interest rates in monetary policy analysis and decision-making. In a monetary economy with money as a means of payment, there must be consistency between the target rate of inflation no matter how it is controlled and which instrument the central bank uses and the growth rate of money. With an additional financial market stability perspective in mind, this logic can be easily adapted if asset price inflation is included in the measurement of inflation. In a nutshell, money (still) matters!

---

## Endnotes

1. Stockholms Banco is the predecessor of Sveriges Riksbank which is considered the world’s oldest central bank today
2. The quantity theory of money is one of the oldest and best-known principles in economics. Irving Fisher (1911) gave a definitive statement of the classical approach to monetary economics. However, considerations on the link between money and prices date back to the British philosopher John Locke (\* 1632, † 1704).
3. Quantitative easing is the central bank policy to increase liquidity in the economy when interest rates are near zero by buying assets (e.g. Government bonds). This, first of all, increases bank reserves (the monetary base). In a second step, this policy is expected to also increase the money stock in the hands of the public.
4. Inside money is a debt as well as an asset held by the private sector (e.g. demand deposits at banks). Outside money, in contrast, is a debt of the government (including the central bank), while it is an asset of the private sector (e.g. cash or the monetary base). The distinction between inside and outside money goes back to Gurley & Shaw (1960). The idea that financial intermediation is essential for understanding monetary developments is already referred to in Brunner & Meltzer (1966).
5. In the euro area, Monetary Financial Institutions (MFIs) constitute the money-issuing sector. They consist of central banks, commercial banks, money market funds and building societies.
6. For King (2002), the proof of a significant role for money for real developments has to be based on the two observations that money reduces transactions costs and that transactions costs are important in determining (asset) prices.
7. Some authors even suggest that monetary exchange should be analysed in an environment characterized by specialized traders, see Alchian (1977), Howitt (2005) and Krueger (2012).

8. In the Eurosystem's definition of monetary aggregates, M3 comprises M1 (currency in circulation and overnight deposits), other short-term deposits (short-term saving deposits and short-term time deposits which together with M1 sum-up to M2) and marketable instruments (repurchase agreements, money market fund shares, short-term debt securities).
9. However, Canova and Ferroni (2011) show that the role of money may be underestimated in empirical analyses due to choosing an inappropriate statistical filter.
10. One might even argue that money demand is by definition stable as instability is only due to omitted variables.
11. As Milton Friedman put it: "What would it mean for money of itself to drive up prices? What drives up prices is spending by the holders of money, driven by many factors, of which the quantity of money that they happen to have at the moment is one." (Nelson, 2003, 1040). Similarly, Brunner (1969, 26) states: "Of course, it is not money as such which drives up prices."
12. This statement must not be confounded with the well-known Goodhart's law (Goodhart, 1975a, b), which states that once monetary policy reacts to a specific economic variable, this particular variable will become insignificant in empirical investigations.
13. See for a broad range of countries and a sample of more than one century Schularick & Taylor (2012).
14. In this direction, intertemporal risk smoothing (related to financial intermediaries' creation of informationally insensitive deposits) implies to only include deposits of commercial banks (besides currency) in monetary aggregates, but no marketable securities. Moreover, as financial market crises often are liquidity crises and as the concept of money by definition has the highest degree of liquidity, money comes into play from this direction, too.
15. In fact, empirical studies usually conclude that credit aggregates (the counterpart to money) also perform well or even better than monetary aggregates (see Gerdesmeier et al, 2010; Borio & Lowe, 2002) in detecting asset price misalignments.
16. However, if there arises a role for money in models which, in the first place, try to introduce credit, this would be even a stronger argument for looking at money.
17. An alternative strand of the NK literature, investigating the consequences of sticky information for economic developments, was introduced by Mankiw & Reis (2002).
18. It is worth noting that due to observational equivalence, interest rate behaviour following (3) is compatible with very different monetary policy rules including money supply rules, see Minford et al. (2002). Moreover, it is generally accepted that the central bank can (credibly) control (at least narrow) money, whereas (3) suggests that it can control (the whole term structure of) interest rates which is more at odds with common wisdom (see, e.g. Thornton, 2014).
19. This procedure defines away the problem of establishing and maintaining central bank credibility.
20. This conclusion would change if money enters one of the equations (1) - (3), see Canova & Menz (2011). The standard NK model is also capable of describing the behaviour of a central bank steering money supply according to (4). In this case, the "Taylor rule" interest rate equation (3) becomes obsolete.
21. The simulations within a standard NK model in McCallum & Nelson (2011, ch. 6.2) suggest that the leading indicator property of money growth for inflation is even present at the business cycle frequency.
22. This fact is not denied in NK literature. For example, the well-known concept of Calvo pricing (Calvo, 1983) allows some fraction of the population of firms to adjust prices each period. Since in every single period the firms that are allowed to adjust are selected randomly, all firms have adjusted their prices after an (theoretically) infinite period of time.
23. "Our final rule for the optimum quantity of money is that it will be attained by a rate of price deflation that makes the nominal rate of interest equal to zero." (Friedman, 2006, 34).
24. A role for a broad monetary aggregate in inflationary processes is also found in Canzoneri et al. (2008) by introducing financial frictions and financial intermediaries in a NK framework. Interestingly, there is no role for a narrow monetary aggregate in this respect. The reason is that the money demand relationship in their model plays an active part in determining households' and banks' demand for various assets and that innovations in broad aggregates contain information about the most important underlying shocks to productivity and government spending.
25. For example, despite the ECB's Governing Council leaving the interest rate on its main refinancing operations unchanged between May 2009 and April 2011 at 1.00%, volatility of the overnight interbank benchmark interest rate EONIA (European Overnight Interest Average) hiked significantly between July 2010 and September 2011. This documents retrenched control of the interbank interest rate that is considered the starting point of the monetary policy transmission process in the euro area.
26. Determinacy is less of a problem if the equilibrium is learnable. However, it is well known that non-activist interest rate rules ( $\omega\pi < 1$ ) like (3) do not give rise to any learnable rational expectations equilibrium as the Taylor principle is violated (e.g. Woodford, 2003, 261ff.). In this sense, a non-activist money growth rule (i.e. constant money growth rate) is preferable as it guarantees a single non-explosive solution that is learnable (McCallum & Nelson, 2011, ch. 8.2). In this rational expectation equilibrium inflation equals money growth after taking advances in payments technology and financial innovation into account.
27. The latter paper also considers a broad monetary aggregate.
28. Atkeson et al. (2009) define "sophisticated policy rules" to be dependent on past private actions.
29. Strictly speaking, also Real Business Cycle (RBC) models can be interpreted as DSGE models since they are dynamic, stochastic and are dealing with general equilibriums. The only distinguishing feature between RBC and NK (i.e. DSGE) models is that the latter allow for nominal rigidities, while RBC models usually deal with flexible prices (see, e.g., Goodfriend & King, 1997).
30. Holman (1998) postulates that money-in-the utility-function models allow for transactions as well as precautionary and store-of-value motives for holding money. Another common strand of the literature is the so-called cash-in-advance (CIA) approach. Its fundamental idea is that financing certain types of transactions necessitates holding money balances. Bhattacharjee & Thoenissen (2007) compare the CIA and the MIU methods of motivating money in New Keynesian DSGE models together with alternative monetary policy feedback rules. They find that the CIA model closed by a money growth rule comes closest to the data. However, Feenstra (1986) has shown that the CIA model is a special case of the MIU approach. In addition, Wallace (2011) criticizes that the CIA approach, or generally models with asset-specific transaction-costs, do not allow to analyse alternative ways of achieving specific distributions of assets among agents in the economy. Therefore, in what follows, we concentrate on MIU models. The MIU approach found further motivations in the context of shopping time models (see e.g. Bakhshi et al., 2002), which stated that money holdings allow economic agents to reduce shopping and transactions time. Croushore (1993) shows that MIU and shopping time models are functionally equivalent. McCallum (2000) presents a reduced form of all these analyses by introducing a transactions cost function which reflects the transaction-facilitating properties of money, in the per-period budget constraint. Another approach to rationalize money's role as a medium of exchange (and store of value) in a world with trading frictions would be overlapping generations models (Champ et al., 2011).
31. Canova & Menz (2011) also provide evidence on the time-varying character of the impact of money on economic developments.

32. Another way to introduce money in DSGE models would be to substitute the monetary policy reaction function (3) with a money rule. Christiano et al. (2003) show that if such a rule had been in place, the Great Depression would have been relatively mild.
33. See part 4 below for a detailed discussion of the related New Monetarist view to money's role in the economy.
34. In their approach, performance of different interest rate rules is measured by a commonly used central bank loss function which aims at minimising the variances of inflation around its target, of the output gap and interest rate changes, respectively (e.g. Rudebusch & Svensson, 1999; Ehrmann & Smets, 2003; Coenen et al., 2005).
35. As a side benefit, monetary policy responding to monetary developments automatically introduces inertia and history-dependence into the policy rule (Gerberding et al., 2009; Söderström, 2005), both of which are robustness characteristics of forward-looking models to stabilise inflation expectations, as demonstrated in Woodford (2003, ch. 8).
36. Output shocks, inflation shocks and interest rate shocks are considered. He derives the forward-looking money demand function within a model based on portfolio adjustment costs for real balances.
37. Further empirical support for this outcome is provided in Nelson (2002).
38. The term "New Monetarist Economics" is introduced in Williamson & Wright (2011). It has close connections to the "mechanism-design approach to monetary theory", as used in Wallace (2011). A textbook treatment of different aspects of NM ideas can be found in Nosal & Rocheteau (2011).
39. An introduction to New Monetarist models, including a comparison between the "Old" and "New" Monetarist literature is provided in Williamson & Wright (2011, p. 271 ff.). For recent overviews of NM models Williamson & Wright (2010, 2011).
40. As a consequence, NM models realise that banks perform a socially beneficial function in transforming illiquid assets into liquid liabilities and helping to reduce asymmetric information problems and transaction costs. Thus, they frequently conclude that reserve requirements of 100%, as previously urged by Old Monetarists, inefficiently preclude this activity. Furthermore, as New Monetarist models explicitly account for the exchange process, they are especially suited to study payments and settlement systems like TARGET2 or Fedwire.
41. Matsuoka (2011) concludes that a transactions role for money emerges due to spatial separation and limited communication in an overlapping generations model.
42. Double coincidence is the situation where the supplier of good x wants good z and the supplier of good z wants good x. Accordingly, single coincidence means that either of the two conditions is not met. The double-coincidence-of-wants problem arises whenever two agents meet for a transaction and only one of them can offer an asset or good his counterparty is interested in. In this circumstance (so-called "single-coincidence meeting", Williamson & Wright, 2011), direct barter is not possible, so trading against a medium-of-exchange, which is usually interpreted to be "money", can facilitate trade.
43. In this context, limited or no commitment means agents' lack of agreement on a particular allocation of resources (Kocherlakota, 1998). If there are several potential suppliers of money, an efficient solution can once again only be guaranteed by the existence of trust, not by competition alone. Therefore, Marimon et al. (2012) call money an experience good.
44. Asymmetric information is also an issue when it comes to the features and quality of the goods to be traded. This issue is frequently discussed under the term "imperfect recognisability" (Wallace, 2011).
45. If m is used as a medium of exchange, it is by definition fiat money (Wallace, 1980).
46. C may alternatively be interpreted as the opportunity cost of forgoing one good with utility C in exchange for another good with utility U.
47. In contrast,  $\phi = 0$  is also a possible equilibrium outcome which directs attention to possible instabilities of fiat money systems.
48. Gomis-Porqueras & Sanches (2013) even show that fiat money complements the use of credit in transactions if access to credit is restricted.
49. Aruoba & Schorfheide (2011) develop a DSGE model (see section 2) with a centralised and decentralised market. Activities in the centralised market resemble those in a standard NK economy with price rigidities. The presence of a decentralised market creates an incentive for households to hold money and money's role as a medium of exchange emerges endogenously. They show that the long-run distortions from monetary frictions may be of similar magnitude as the distortions created by the New Keynesian frictions.
50. "Note as well that theory provides no particular rationale for adding up certain public and private liabilities (in this case currency and bank deposits), calling the sum money, and attaching some special significance to it. Indeed, there are equilibria in the model where currency and bank deposits are both used in some of the same transactions, both bear the same rate of return, and the stocks of both turn over once each period. (...) But what the model tells us is that public and private liquidity play quite different roles. (...) We see no real purpose in drawing some boundary between one set of assets and another, and calling members of one set money." (Williamson & Wright, 2010, 294). Consequently, the NM view is not necessarily in contrast to the NK conviction that a central bank does not need to monitor monetary developments as agents' habits to transact can change that quickly that whatever definition of a monetary aggregate will not be able to explain inflationary processes (Woodford, 1998).
51. However, by reducing losses that financial intermediaries are exposed to, such a policy creates moral hazard problems ex-ante.
52. Indeed, the proponents of this theory hold the view that it is difficult to measure money in the form of M1, M2 or M3 in a meaningful way.
53. In this respect, the approach is somewhat grounded in deliberations similar to those of the Basel III regulatory framework that considers a stable funding ratio.
54. The concrete definition of non-core liabilities used for practical purposes depends on the financial structure of the economy.

---

## References

1. Adalid, Ramón. & Carsten Detken (2007), Liquidity Shocks and Asset Price Boom/Bust Cycles, ECB Working Paper No. 732, February.
2. Adrian, Tobias & Hyun Song Shin (2011), Financial Intermediaries and Monetary Economics, in: B. Friedman and M. Woodford (eds.), *Handbook of Monetary Economics*, Vol. 3A, North-Holland, pp. 601-6-650.
3. Alchian, Armen A. (1977), Why Money?, *Journal of Money, Credit, and Banking* 9, pp. 133–140.
4. Alessi, Lucia & Carsten Detken (2011), Quasi Real time Early Warning Indicators for Costly Asset Price Boom/Bust Cycles: a role for global liquidity, *European Journal of Political Economy* 27, pp. 520–533.
5. Andrés, Javier, J. David López-Salido & Javier Vallés (2006), Money in an Estimated Business Cycle Model of the Euro Area, *Economic Journal* 116, pp. 457–77.
6. Andrés, Javier, J. David López-Salido & Edward Nelson (2009), Money and the Natural Rate of Interest: Structural estimates for the United States and the euro area, *Journal of Economic Dynamics & Control* 33, pp. 758–776.
7. Arestis, Philip, Georgios Chortareas & John D. Tsoukalas (2010), Money and Information in a New Neoclassical Synthesis Framework, *The Economic Journal* 120, pp. F101-F128.
8. Aruoba, S. Boragan & Frank Schorfheide (2011), Sticky Prices Versus Monetary Frictions: An Estimation of Policy Trade-offs, *American Economic Journal: Macroeconomics* 3, pp. 60–90.
9. Atkeson, Andrew, Varadarajan V. Chari & Patrick J. Kehoe (2009), Sophisticated Monetary Policies, Federal Reserve Bank of Minneapolis Research Department Staff Report 419, May.
10. Bakhshi, Hasan, Ben Martin & Tony Yates (2002), How Uncertain are the Welfare Costs of Inflation?, Bank of England Working Paper No. 152, February.
11. Balfoussia, Hiona, Sophocles N. Brissimis & Manthos D. Delis (2011), The Theoretical Framework of Monetary Policy Revisited, Bank of Greece Working Paper 138, September.
12. Barthélemy, Jean, Laurent Clerc & Magali Marx (2011), A Two-Pillar DSGE Monetary Policy Model for the Euro Area, *Economic Modelling* 28, pp. 1303–1316.
13. Beck, Günter & Volker Wieland (2007), Money in Monetary Policy Design: A formal characterization of ECB-Style cross-checking, *Journal of the European Economic Association* 5, pp. 524–533.
14. Beck, Günter & Volker Wieland (2008), Central Bank Misperceptions and the Role of Money in Interest-rate Rules, *Journal of Monetary Economics* 55, pp. 1–17.
15. Benchimol, Jonathan (2014a) Money in the Production Function: A New Keynesian DSGE perspective, *Southern Economic Journal*, In-Press.
16. Benchimol, Jonathan (2014b), Risk Aversion in the Eurozone, *Research in Economics* 68, pp. 39–56.
17. Benchimol, Jonathan & André Fourçans (2012), Money and Risk Aversion in a DSGE Framework: A Bayesian Application to the Euro Zone, *Journal of Macroeconomics* 34, pp. 95–111.
18. Bernanke, Ben S. (2008), Financial Markets, the Economic Outlook, and Monetary Policy, Speech, January 2010.
19. Bhattacharjee, Arnab & Christoph Thoenissen (2007), Money and Monetary Policy in Dynamic Stochastic General Equilibrium Models, *The Manchester School* 75, pp. 88–122.
20. Borio, Claudio & Philip Lowe (2002), Asset Prices, Financial and Monetary Stability: Exploring the Nexus, BIS Working Paper No. 114, July.
21. Brand, Claus, Hans-Eggert Reimers & Franz Seitz (2004), Narrow Money and the Business Cycle: Theoretical Aspects and Euro Area Evidence, *Review of Economics* 55, pp. 246–262.
22. Brückner, Matthias & Andreas Schabert (2006), Can Money Matter for Interest Rate Policy?, *Journal of Economic Dynamics & Control* 30, pp. 2823–2857.
23. Brunner, Karl (1969), The Drift into Persistent Inflation, *Wharton Quarterly* (Fall), pp. 23–34.
24. Brunner, Karl. & Allan H. Meltzer (1966), A Credit Market Theory of the Money Supply and an Explanation of Two Puzzles in US Monetary Policy, in: T. Bagliotti, (ed.), *Investigations in Economic Theory and Methodology*, Padova, Cedam.
25. Brunnermeier, Markus K., Thomas M. Eisenbach & Yuliy Sannikov (2011), Macroeconomics with Financial Frictions: A Survey, July.
26. Brunnermeier, Markus K. & Yuliy Sannikov (2011), The I Theory of Money, June.
27. Calvo, Guillermo (1983), Staggered Prices in a Utility-Maximizing Framework, *Journal of Monetary Economics* 12, pp. 383–98.

28. Calza, Alessandro, Dieter Gerdesmeier, & Joaquim Levy (2001), Euro Area Money Demand: Measuring the Opportunity Costs Appropriately, IMF Working Paper No. 01/179.
29. Canova, Fabio & Tobias Menz (2011), Does Money Matter in Shaping Domestic Business Cycles? An International Investigation, *Journal of Money, Credit and Banking* 43, pp. 577–607.
30. Canova, Fabio & Filippo Ferroni (2011), Multiple Filtering Devices for the Estimation of Cyclical DSGE Models, *Quantitative Economics* 2, pp. 73–98.
31. Canzoneri, Matthew B., Robert Cumby, Behzad Diba & David López-Salido (2008), Monetary Aggregates and Liquidity in a Neo-Wicksellian Framework, National Bank of Belgium Working Paper No. 141, October.
32. Castelnuovo Efram (2012), Estimating the Evolution of Money's Role in the U.S. Monetary Business Cycle, *Journal of Money, Credit and Banking* 44, pp. 23–52.
33. Champ, Bruce, Scott Freeman & Joseph Haslag (2011), Modeling Monetary Economies, 3<sup>rd</sup> ed., Cambridge University Press.
34. Christiano, Lawrence J., Roberto Motto & Massimo Rostagno (2003), The Great Depression and the Friedman-Schwartz Hypothesis, *Journal of Money, Credit and Banking* 35, pp. 1119–1197.
35. Christiano, Lawrence J., Roberto Motto & Massimo Rostagno (2008), Two Reasons why Money and Credit May be useful in Monetary Policy, in: A. Beyer, and L. Reichlin (eds.), The Role of Money - Money and Monetary Policy in the 21<sup>st</sup> Century, 4<sup>th</sup> ECB Central Banking Conference, Frankfurt, pp. 28–55.
36. Christiano, Lawrence J., Roberto Motto & Massimo Rostagno (2010), Financial Factors in Business Cycle Fluctuations, ECB Working Paper no. 1192.
37. Christiano, Lawrence J. & Massimo Rostagno (2001), Money Growth Monitoring and the Taylor Rule, NBER Working Paper no. 8539.
38. Christiano, Lawrence J., Mathias Trabandt & Karl Walentin (2011), DSGE Models for Monetary Policy Analysis, in: B. Friedman and M. Woodford (eds.), Handbook of Monetary Economics, Vol. 3A, North-Holland, pp. 285–367.
39. Clarida, Richard, Jordi Gali & Mark Gertler (1999), The Science of Monetary Policy: A New Keynesian Perspective, *Journal of Economic Literature* 37, pp. 1661–1707.
40. Cochrane, John H. (2007a), Inflation Determination with Taylor Rules: A Critical Review, NBER Working Paper No. 13409.
41. Cochrane, John H. (2007b), Identification with Taylor Rules: A Critical Review, NBER Working Paper No. 13410.
42. Cochrane, John H. (2009), Can Learnability Save New-Keynesian Models?, *Journal of Monetary Economics* 56, pp. 1109–1113.
43. Coenen, Günter, Andrew Levin & Volker Wieland (2005), Data Uncertainty and the Role of Money as an Information Variable for Monetary Policy, *European Economic Review* 49, pp. 975–1006.
44. Croushore, Dean (1993), Money in the Utility Function: A Functional Equivalence to a Shopping-time Model, *Journal of Macroeconomics* 15, pp. 175–182.
45. De Grauwe, Paul & Magdalena Polan (2005), Is Inflation Always and Everywhere a Monetary Phenomenon?, *Scandinavian Journal of Economics* 107, pp. 239–59.
46. De Santis, Roberto A., Carlo A. Favero and Barbara Roffia (2013), Euro Area Money Demand and International Portfolio Allocation: A contribution to assessing risks to price stability, *Journal of International Money and Finance* 32, pp. 377–404.
47. Dreger, Christian & Jürgen. Wolters (2010), Investigating M3 Money Demand in the Euro Area, *Journal of International Money and Finance* 29, pp. 111–122.
48. Evans, Martin D. D. (2005), Where Are We Now? Real-Time Estimates of the Macroeconomy, *International Journal of Central Banking* 1, pp. 127–175.
49. Feenstra, Robert C. (1986), Functional Equivalence between Utility Costs and the Utility of Money, *Journal of Monetary Economics* 17, pp. 271–291.
50. Feldkord, Eva-Ulrike (2005), On the Relevance of Monetary Aggregates in Monetary Policy Models, HWWA Discussion Paper 317, May.
51. Fisher, Irving (1911), The Purchasing Power of Money, Macmillan.
52. Friedman, Milton (1956), The Quantity Theory of Money – A Restatement, in: M. Friedman, Studies in the Quantity Theory of Money, Chicago.
53. Friedman, Milton (2006), The Optimum Quantity of Money, in: M. Friedman, The Optimum Quantity of Money, AldineTransaction, New Brunswick/London.

54. Galí, Jordi (2002), Monetary Policy in the Early Years of EMU, Mimeo, Universitat Pompeu Fabra.
55. Gerberding, Christina, Franz Seitz & Andreas Worms (2005). How the Bundesbank really conducted monetary policy, *North American Journal of Economics and Finance* 16, pp. 277–292.
56. Gerberding, Christina, Franz Seitz & Andreas Worms (2009), Interest Rate Rules and Monetary Targeting: What are the links?, ROME Working Paper 2009–01, June.
57. Gerdesmeier, Dieter, Hans-Eggert Reimers & Barbara Roffia (2010), Asset Price Misalignments and the Role of Money and Credit, *International Finance* 13, pp. 377–407.
58. Gertler, Mark & Nobuhiro Kiyotaki (2011), Financial Intermediation and Credit Policy in Business Cycle Analysis, in: B. Friedman and M. Woodford (eds.), *Handbook of Monetary Economics*, Vol. 3A, North-Holland, pp. 547–599.
59. Gomis-Porqueras, Pedro & Daniel Sanches (2013), Optimal Monetary Policy in a Model of Money and Credit, *Journal of Money, Credit and Banking* 45, pp. 701–729.
60. Goodfriend, Marvin (2005), Narrow Money, Broad Money, and the Transmission of Monetary Policy, in: J. Faust, A. Orphanides and D. Reifschneider (eds.), *Models and Monetary Policy: Research in the Tradition of Dale Henderson, Richard Porter, and Peter Tinsley*. Board of Governors of the Federal Reserve System.
61. Goodfriend, Marvin & Robert G. King (1997), The New Neoclassical Synthesis and the Role of Monetary Policy, NBER Macroeconomics Annual 1997, Volume 12.
62. Goodhart, Charles A. E. (1975a), Monetary Relationships: A View from Threadneedle Street, in: *Papers in Monetary Economics*, Volume I, Reserve Bank of Australia.
63. Goodhart, Charles A. E. (1975b), Problems of Monetary Management: The UK Experience, in: *Papers in Monetary Economics*, Volume I, Reserve Bank of Australia.
64. Greiber, Claus & Wolfgang Lemke (2005), Money Demand and Macroeconomic Uncertainty, Deutsche Bundesbank Discussion Paper 26-2005.
65. Greiber, Claus & Ralph Setzer (2007), Money and Housing – Evidence for the Euro Area and the US, Deutsche Bundesbank Discussion Paper 12-2007.
66. Gurley, John G. & Edward S. Shaw (1960), *Money in a Theory of Finance*, The Brookings Institution.
67. Hahm, Joon-Ho, Hyun Song Shin & Kwanho Shin (2013), Noncore Bank Liabilities and Financial Vulnerability, *Journal of Money, Credit and Banking* 45(S), pp. 3–36.
68. Holman, Jill A. (1998), GMM Estimation of a Money-in-the-Utility-Function Model: The Implications of Functional Forms, *Journal of Money, Credit and Banking* 30, pp. 679–698.
69. Howitt, Peter (2005), Beyond Search: Fiat Money in Organized Exchange, *International Economic Review* 46, pp. 405–429.
70. Ireland, Peter N. (2004a), The Liquidity Trap, the Real Balance Effect and the Friedman Rule, *International Economic Review* 46, pp. 1271–1301.
71. Ireland, Peter N. (2004b), Money’s Role in the Monetary Business Cycle, *Journal of Money, Credit and Banking* 36, pp. 969–983.
72. Kajanoja, Lauri (2003), Money as an Indicator Variable for Monetary Policy when Money Demand is Forward Looking, Bank of Finland Discussion Paper 9/2003.
73. Kim, Hyun Jeong, Hyun Song Shin & Jaeho Yun (2012), Monetary Aggregates and the Central Bank’s Financial Stability Mandate, Paper presented at the Federal Reserve conference “Central Banking: Before, During, and After the Crisis”, March 23–24, 2012.
74. King, Mervyn (2002), No Money, no Inflation – The Role of Money in the Economy, Bank of England Quarterly Bulletin, Summer 2002, pp. 162–177.
75. Kiyotaki, Nobuhiro & Randall Wright (1993), A Search-theoretic Approach to Monetary Economics, *American Economic Review* 83, pp. 63–77.
76. Kocherlakota, Narayana R. (1998), Money is Memory, *Journal of Economic Theory* 81, pp. 232–51.
77. Krueger, Malte (2012), Money: A market microstructure approach, *Journal of Money, Credit and Banking* 44, pp. 1245–1258.
78. Kydland, Finn E. & Edward C. Prescott (1982), Time to Build and Aggregate Fluctuations, *Econometrica* 50, pp. 1345–1370.
79. Lagos, Ricardo (2006), Inside and Outside Money, Federal Reserve Bank of Minneapolis Research Department Staff Report No. 374, May.
80. Long, John B. & Charles I. Plosser (1983), Real Business Cycles, *Journal of Political Economy* 91, pp. 36–69.

81. Lucas, Robert E. (1976), *Econometric Policy Evaluation: A Critique*, *Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy* 1, pp. 19–46.
82. Lucas, Robert E. (2000), *Inflation and Welfare*, *Econometrica* 68, pp. 247–74.
83. Mankiw, N. Gregory & Ricardo A. M. R. Reis (2002), *Sticky Information Versus Sticky Prices: A Proposal to Replace the New Keynesian Phillips Curve*, *Quarterly Journal of Economics* 117, pp. 1295–1328.
84. Marimon, Ramon, Juan Pablo Nicolini & Pedro Teles (2012), *Money Is an Experience Good: Competition and Trust in the Private Provision of Money*, Federal Reserve Bank of Minneapolis Research Department Staff Report 467, July.
85. Matsuoka, Tarishi (2011), *Monetary Policy and Banking Structure*, *Journal of Money, Credit and Banking* 43, pp. 1109–1129.
86. McCallum, Bennett T. (2000), *Theoretical Analysis Regarding a Zero Lower Bound on Nominal Interest Rates*, *Journal of Money, Credit and Banking* 32, pp. 870–904.
87. McCallum, Bennett T. (2001), *Monetary Policy Analysis in Models Without Money*, Federal Reserve Bank of St. Louis Review 83(4), pp. 145–160.
88. McCallum, Bennett T. (2002), *Recent Developments in Monetary Policy Analysis: The Roles of Theory and Evidence*, Federal Reserve Bank of Richmond Economic Quarterly, 88(1), pp. 67–96.
89. McCallum, Bennett T. & Edward Nelson (2011), *Money and Inflation: Some Critical Issues*, in: B. Friedman and M. Woodford (eds.), *Handbook of Monetary Economics*, Vol. 3A, North-Holland, pp. 97–153.
90. Minford, Patrick & Naveen Srinivasan (2010), *Determinacy in New Keynesian models: A role for money after all?*, Cardiff Business School Working Paper E2009/21, September.
91. Minford, Patrick, Francesco Perugini & Naveen Srinivasan (2002), *Are Interest Rate Regressions Evidence of a Taylor Rule*, *Economics Letters* 76, pp. 145–150.
92. Mishkin, Frederic S. (2010), *Will Monetary Policy Become More of a Science?*, in: V. Wieland (ed.), *The Science and Practice of Monetary Policy Today*, Springer, pp. 81–103.
93. Nelson, Edward N. (2002), *Direct Effects of Base Money on Aggregate Demand: theory and evidence*, *Journal of Monetary Economics* 49, pp. 687–708.
94. Nelson, Edward N. (2003), *The Future of Monetary Aggregates in Monetary Policy Analysis*, *Journal of Monetary Economics* 50, pp. 1029–59.
95. Nelson, Edward N. (2008), *Why Money Growth Determines Inflation in the Long Run: Answering the Woodford Critique*, *Journal of Money, Credit and Banking* 40, pp. 1791–1814.
96. Nosal, Ed & Guillaume Rocheteau (2011), *Money, Payments, and Liquidity*, The MIT Press.
97. Orphanides, Athanasios (2003). *The Quest for Prosperity Without Inflation*, *Journal of Monetary Economics* 50, pp. 633–663.
98. Reichlin, Lucrezia (2006), *Introduction*, in: A. Beyer, and L. Reichlin (eds.), *The Role of Money – Money and Monetary Policy in the 21<sup>st</sup> Century*, 4<sup>th</sup> ECB Central Banking Conference, pp. 5–12.
99. Scharnagl, Michael, Christina Gerberding & Franz Seitz (2010), *Should Monetary Policy Respond to Money Growth? New Results for the Euro Area*, *International Finance* 13, pp. 409–441.
100. Schularick, Moritz & Alan T. Taylor (2012), *Credit Booms Gone Bust: Monetary Policy, Leverage Cycles, and Financial Crises, 1870–2008*, *American Economic Review* 102, pp. 1029–1061.
101. Shi, Shouyong (1995), *Money and Prices: A Model of Search and Bargaining*, *Journal of Economic Theory* 67, pp. 467–496.
102. Shin, Hyun Song & Kwanho Shin (2011), *Procyclicality and Monetary Aggregates*, NBER Working Paper 16836, February.
103. Söderström, Ulf (2005), *Targeting Inflation with a Role for Money*, *Economica*, 72, pp. 577–96.
104. Teles, Pedro & Harald Uhlig (2010), *Is Quantity Theory still Alive?*, NBER Working Paper no. 16393, September.
105. Thornton, Daniel L. (2000), *Money in a Theory of Exchange*, Federal Reserve Bank of St. Louis Review, 82(1), January/February, pp. 35–60.
106. Thornton, Daniel L. (2014), *Monetary Policy: Why Money Matters and Interest Rates Don't*, *Journal of Macroeconomics* 40, pp. 202–213.
107. Tödter, Karl-Heinz (2002), *Monetäre Indikatoren und geldpolitische Regeln im P-Stern-Modell*, *Review of Economics* 53, pp. 210–243.
108. Trejos, Alberto & Randall Wright (1995), *Search, Bargaining, Money, and Prices*, *Journal of Political Economy* 103, 118–141.

109. Uhlig, Harald (2006), Comment on: Woodford, M., Does a “Two-Pillar Phillips Curve” justify a Two-Pillar Monetary Policy Strategy?, in: A. Beyer & L. Reichlin (eds.), *The Role of Money – Money and Monetary Policy in the 21<sup>st</sup> Century*, 4<sup>th</sup> ECB Central Banking Conference, pp. 87–96.
110. Ullersma, Cees, Jan Marc Berk & Bryan Chapple (2006), *Money Rules*, De Nederlandsche Bank Working Paper No. 096/2006, March.
111. Wallace, Neil (2011), The Mechanism Design Approach to Monetary Theory, in: B. Friedman and M. Woodford (eds.), *Handbook of Monetary Economics*, Vol. 3A, North-Holland, pp. 3–23.
112. Williamson, Stephen & Randall Wright (2010), *New Monetarist Economics: Methods*, Federal Reserve Bank of St. Louis Review, 92(4), July/August, pp. 265–302.
113. Williamson, Stephen & Randall Wright (2011), *New Monetarist Economics: Models*, in: B. Friedman and M. Woodford (eds.), *Handbook of Monetary Economics*, Vol. 3A, North-Holland, pp. 25–96.
114. Woodford, Michael (1998), *Doing Without Money: Controlling Inflation in a Post-Monetary World*, *Review of Economic Dynamics* 1, pp. 173–219.
115. Woodford, Michael (2003), *Interest and Prices: Foundations of a Theory of Monetary Policy*, Princeton University Press.
116. Woodford, Michael (2008), *How Important is Money in the Conduct of Monetary Policy?*, *Journal of Money, Credit and Banking* 40, pp. 1561–1598.
117. Zanetti, Francesco (2012), *Banking and the Role of Money in the Business Cycle*, *Journal of Macroeconomics* 34, pp. 87–94.

## Kontakt:



### **Prof. Dr. Franz Seitz**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Betriebswirtschaft  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

f.seitz@oth-aw.de

### **Markus A. Schmidt**

Deutsche Bundesbank  
Wilhelm-Epstein-Straße 14  
60431 Frankfurt am Main

markus.schmidt@bundesbank.de

# Reinraumtechnik für die industrielle Medizintechnik

Prof. Dipl.-Ing. Burkhard Stolz  
Dr. rer. nat. Sebastian Buhl  
Dipl.-Wirtschaftsing. (FH) Kornelia Graf

## Zusammenfassung

Die Anforderungen der pharmazeutischen Industrie in Bezug auf Reinheit und Qualität ihrer Produkte sind besonders hoch. Ein wesentlicher Garant für die Einhaltung dieser Anforderungen stellt die Reinraumtechnik dar, welche an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden aus Mitteln des „Technisch-Wissenschaftlichen Netzwerks Oberpfalz – TWO“ etabliert werden konnte. In Zusammenarbeit mit zwei Unternehmen aus der Oberpfalz konnten erste grundlegende Untersuchungen zu diesem Themenkreis bearbeitet werden.

## Abstract

The demands of the pharmaceutical industry with regard to the quality and purity of its products are particularly high. Clean room technology is essential to meet these demands. To meet the need for further research in this field, the Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden successfully established its own clean room facilities with financial support from the “Technisch-Wissenschaftliches Netzwerk Oberpfalz – TWO”, a technical and scientific network located in the Upper Palatinate. In close cooperation with two companies from the Upper Palatinate, investigation into this subject area was conducted.

## Anforderungen der Industrie

Pharmazeutische Packmittel aus Kunststoff sind schon seit vielen Jahren ein etablierter Standard in der Industrie und werden in den meisten Fällen nicht vom Pharmazeuten selbst, sondern durch die Zulieferindustrie gefertigt. Erst die Abfüllung der Wirkstoffe in ihren unterschiedlichen Darreichungsformen wird dann vom Pharmazeuten oder einem Lohnabfüller durchgeführt. Die hohen Anforderungen an die Reinheit und Qualitätsziele der Arzneimittel sind in den GMP-Richtlinien und ergänzenden Leitfäden festgelegt und werden von der pharmazeutischen Industrie umgesetzt. Alle Prozesse und Anlagen sind beschrieben und qualifiziert bzw. validiert.

Die pharmazeutische Industrie fordert naturgemäß die Einhaltung dieser Regularien und Richtlinien auch von allen Zulieferern innerhalb der Prozesskette. Dies umfasst dann nicht nur den Hersteller der Verpackungen, sondern auch die Hersteller aller Maschinen, Instrumente und Werkstoffe, die an der Herstellung des Wirkstoffs und

der Verpackung beteiligt sind. Vor dem Hintergrund einer langjährigen Arzneimittelentwicklung, die von der Identifikation neuer Moleküle bis hin zu umfangreichen multinationalen Studien mit tausenden von Patienten geht, und der damit verbundenen Kosten in dreistelliger Millionenhöhe ist nachzuvollziehen, dass auch die Packmittelentwicklung und deren Herstellung diesen hohen Anforderungen genügen muss. Es stellt sich indes die Frage, ob die Forderungen an diese Prozesse tatsächlich gerechtfertigt sind oder die Angst vor einer Fehlentscheidung die Anforderungen treibt. Tatsächlich entwickeln sich Packmittel heute zu intelligenten Systemen aus einer Vielzahl von Einzelteilen, die ein eigenes komplexes Projekt darstellen. Die Zulieferindustrie hat heute nur bedingt Antworten auf die vielen Fragen der pharmazeutischen Auftraggeber und ist hier aufgefordert mithilfe eigener Untersuchungen Antworten zu liefern. Dies ist die Motivation für eine Vielzahl von Fragestellungen, die im Umfeld des an der OTH Amberg-Weiden geschaffenen Reinraums der Klasse 7 gem. EN ISO 14644 in Zusammenarbeit mit industriellen Partnern untersucht werden.

## Ausstattung an der OTH Amberg-Weiden

Der Reinraum, der im Gebäude des WTC eine effektive Produktionsfläche von 60 m<sup>2</sup> aufweist, bietet die Möglichkeit der Herstellung von Bauteilen aus Kunststoff auf einer vollelektrischen 50-Tonnen-Spritzgussmaschine des Herstellers Krauss-Maffei. Diverse Folgeprozesse, wie Handhaben, Fügen oder Verpacken können in die Prozesskette eingefügt werden. Für die Analyse der Bauteile stehen aktuell zwei Analysegeräte zur Verfügung, mit denen jeweils auf unterschiedliche Art die Belastung mit Partikeln in der Größenordnung bis hinunter zu 0,5 µm gemessen werden kann. Hierzu wird einerseits ein Flüssigkeitspartikelzählgerät der Firma RION eingesetzt, welches auch im Bereich der Qualitätskontrolle der Pharmazeuten bei der Parenteralia-Herstellung zur Anwendung kommt. Das Messsystem besitzt einen Lichtblockade-Partikeldetektor und erfüllt die Anforderungen an die USP 788. Diese gibt Grenzwerte für Partikel in Parenteralia und deren Bestimmung vor. Darüber hinaus wird auch ein Messmikroskop der Firma Leica eingesetzt, welches in Verbindung mit einer Software ebenfalls für die Messung von Partikeln aus Flüssigkeiten verwendet werden kann. Für die Analyse müssen jeweils die Partikel in Reinstwasser eluiert und im Falle des Messmikroskops auf Filtern aufgefangen werden. Somit gestaltet sich die Partikelanalyse als sehr zeitaufwendig. Partikelmessungen in Luft und mikrobiologische Methoden zur Bestimmung einer Keimlast runden die Messtechnik in diesem Labor ab.

## Industrielle Zusammenarbeit

Im Rahmen von zwei Industrieprojekten im Zeitfenster 2013/2014 konnte in Zusammenarbeit mit den Firmen Gerresheimer Regensburg GmbH und Afag GmbH die Bearbeitung von unterschiedlichen Fragestellungen begonnen werden. Für Gerresheimer stand die Partikelanzahl an einem Kunststoffbauteil im Vordergrund, welches werkstoff- und werkzeugseitig neue Anforderungen an die Fertigungsprozesse stellt. Neben der Optimierung der Prozessparameter wurde hier im Wesentlichen die Untersuchung unterschiedlicher Werkzeugkomponenten und deren Einfluss auf Partikel betrieben. Als führender Partner der Pharmaindustrie ist Gerresheimer stark an der Weiterentwicklung von Verfahren interessiert, die neue Optionen bei der Herstellung von pharmazeutischen Packmitteln ermöglichen. Da Gerresheimer aktuell selbst keinen Reinraum der Klasse 7 gem. EN ISO 14644 betreibt, ist die OTH Amberg-Weiden ein hervorragend ausgestatteter Partner für diese und weitere Untersuchungen rund um die ständig steigenden Anforderungen von Arzneimitteln.

Afag wiederum ist führender Hersteller von Fördertechnik in allen Industrien, mit dem starken Interesse einer Ausweitung des Geschäftes in die Medizin- und Pharmaindustrie. In enger Zusammenarbeit mit dem Unternehmen konnte in einer ersten Grundlagenuntersuchung gezeigt werden, dass die Schwingfördersysteme des Amberger Herstellers die hohen Anforderungen der Pharmaindustrie erfüllen und somit auch in diesem anspruchsvollen Umfeld eingesetzt werden können. Auch hier sollen weitere Untersuchungen folgen.

Die Zusammenarbeit mit beiden Unternehmen trägt dem Gedanken des „Technisch-Wissenschaftlichen Netzwerks Oberpfalz – TWO“ Rechnung, welcher den Innovations-transfer zwischen Hochschule und Industrie beschleunigen soll und lokalen Unternehmen Unterstützung zur Festigung ihrer Wettbewerbssituation ermöglicht.



Panoramablick Reinraum



Spritzgussmaschine im Reinraum



Partikelanalyse am Messmikroskop



Partikelfilter

**Kontakt:**



**Prof. Dipl.-Ing. Burkhard Stolz**

Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
 Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen  
 Lehrgebiet Diagnostische Systeme und Mikrosysteme  
 Studiengang Medizintechnik  
 Hetzenrichter Weg 15  
 92637 Weiden

b.stolz@oth-aw.de



**Dr. rer. nat. Sebastian Buhl**

Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
 Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen  
 Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
 Hetzenrichter Weg 15  
 92637 Weiden

se.buhl@oth-aw.de



**Dipl.-Wirtschaftsing. (FH) Kornelia Graf**

Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
 Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen  
 Projektingenieurin  
 Hetzenrichter Weg 15  
 92637 Weiden

k.graf@oth-aw.de

# (Überlegungen zu) Gestaltungsprinzipien des Dienstleistungsent- wicklungsprozesses für produzierende Unternehmen

## Hintergrund

Mit diesem Papier regen die Autoren (grundlegende) Gestaltungsprinzipien des Dienstleistungsentwicklungsprozesses im Kontext produzierender Unternehmen an. Diese Gestaltungsprinzipien sind auf Basis von Studien und Projekten entwickelt. Die Berücksichtigung oder Nichtberücksichtigung dieser Gestaltungsprinzipien für die Dienstleistungsentwicklung haben (nach Meinung der Autoren) merklichen Einfluss auf den Erfolg/Misserfolg des Dienstleistungsgeschäfts in der Industrie.

Keywords: Produzierende Unternehmen, Service, Serviceprozesse, Innovation, Serviceentwicklung, Gestaltungsprinzipien.

## Background

This paper proposes fundamental principles of shaping the service development process of manufacturing companies. The principles have been developed on the basis of studies and research projects. Compliance or non-compliance with these principles for the development of services has (according to the authors' opinion) considerable influence on the success or failure of the service business in the industry.

Key words: manufacturing companies, service, service processes, innovation, service development, design principles

---

## Die Unternehmenslandschaft der Dienstleistungen

Wie professionell ist das Dienstleistungsgeschäft in der Industrie? Das war die Kernfrage der Untersuchungen der vergangenen fünf Jahre. Die Studie mit Führungskräften aus Deutschland, Österreich und der Schweiz aus den Branchen der elektronischen Fertigung, Automobilproduktion, Verarbeitungs- und Abfülltechnik, Energietechnik und medizinischen Gerätetechnik zeigte eine augenfällige Lücke: die (mangelnde) systematische Entwicklung von Dienstleistungen in Industrieunternehmen (Strassl und Schicker, 2014; Schicker und Strassl, 2014).

Die Dienstleistungslandschaft in Unternehmen unterscheidet sich durch dreierlei Dimensionen (bei der Analyse folgen wir hier dem Vorschlag Niklas Luhmanns, drei *Sinndimensionen* zu unterscheiden (Luhmann, 1987): die Sach-, Sozial- und Zeitdimension.

Unternehmen verfügen über ein heterogenes Bündel an Dienstleistungen, wie sie durchgeführt werden. Einige

Dienstleistungen werden (ausschließlich) von Menschen umgesetzt, wie beispielsweise eine reine Beratungsleistung zu einem bestimmten Thema. Andere Dienstleistungen sind hybride Dienstleistungen, denn diese setzen eine technische Infrastruktur für die Durchführung der Dienstleistung voraus, wie zum Beispiel die Fernüberwachung einer Anlage beim Kunden, auch wenn die Interpretation von Daten und mögliche Eingriffe von Technikern vorgenommen werden. Andere Dienstleistungen können als rein technisch angesehen werden, wie der *Upgrade* einer Maschine, in dem Module an einen Kunden verkauft werden, um dessen Maschine auf den aktuellen technischen Stand zu bekommen. Jede dieser Sachbeschreibungen ist eine Inhaltsbeschreibung: welche Dienstleistung ist die richtige für den Markt. Es wird ein Sachverhalt *markiert* und damit gegen alle anderen Sachverhalte abgegrenzt (der *Unique Selling Point*). Unternehmen haben die Qual der Wahl. Und so manche Entscheidung, welches Dienstleistungsangebot offeriert wird, ist oft mit individuellen oder ideologischen Interessen der Organisationsmitglieder verbunden.

In Unternehmen haben nicht nur Mitarbeiter miteinander zu tun, sondern auch Abteilungen, juristische Personen oder andere Unternehmen. Sie treten während der Entwicklung oder der Umsetzung einer Dienstleistung miteinander (*sozial*) in Kommunikation und einigen sich (häufig), was geschehen muss. Dabei fungieren Strukturen (wie Rollen und Stellen) und Personen als Entscheidungsprämissen. Bei der Entwicklung oder der Umsetzung von Dienstleistungen sind meist eine Vielzahl an Personen aus ein oder (die Komplexität meist erhöhend) mehreren (nationalen wie internationalen) Standorten beteiligt (in losen oder festgekoppelten Teams oder als (Entscheidungs-)Gremien).

Die *Zeit*dimension orientiert sich an der Reversibilität und Irreversibilität, also an Veränderungen, die zur Unterscheidung von Vorher und Nachher führen. In der Entwicklung einer Dienstleistung wird diese Veränderung ausgedrückt. Alle Unternehmen haben Dienstleistungen, die sich in unterschiedlichen Phasen des Lebenszyklus befinden. Dienstleistungen, wie Ersatzteile für ein Gerät oder ein Fahrzeug, mögen für einen langen Zeitraum existieren (müssen). Andere Dienstleistungen, wie die Fernüberwachung eines kürzlich entwickelten Geräts, befinden sich in der weltweiten Einführung in den Markt. Wiederum eine weitere Dienstleistungsidee wird im Unternehmen gerade diskutiert (vielleicht sogar schon über längere Zeit), aber sie wurde nicht weiterverfolgt.

Tabelle 1: Dimensionen der Dienstleistungslandschaft (Beispiel)

Dienstleistung	Sache – Form	Sozial – Beteiligte	Zeit – Lebenszyklus
Upgrade	Produkt	Service, R&D, Business Unit	Entwicklung
Remote Monitoring	Hybrid	Service, Business Unit, R&D	Einführung
Produktivitätsberatung	Dienstleistung	Service	Idee
...			

Wenn es darum geht, Dienstleistungen im Unternehmen zu erfassen, dann kann diese Matrix eine (grobe) Orientierung liefern, wie unterschiedliche Beteiligte die Dienstleistungen zuordnen.

### Anforderungen an die Dienstleistungsentwicklung

Werden die Dienstleistungen in einem Unternehmen in dieser Art erfasst, lassen sich Anforderungen an die Dienstleistungsentwicklung skizzieren, für die derzeit keine (zufriedenstellenden) Lösungen vorliegen. Die Liste ist sicherlich nicht vollständig, sondern spiegelt die Erfahrungswelt der Autoren und Studienergebnisse von Kollegen.

### Dienstleistungsideen sind nicht transparent und dokumentiert

Dienstleistungsideen werden in allen Teilen einer Organisation geboren – am häufigsten vielleicht bei Mitarbeitern, die täglich (direkt) mit Kunden zu tun haben. Viele Unternehmen haben bereits eine Form von Innovationsmanagement oder einen Innovationsprozess etabliert. Dennoch gibt es selten die Möglichkeit, Dienstleistungsideen systematisch zu sammeln und zu dokumentieren – egal aus welchem Teil der Organisation heraus.

Wenn Führungskräfte entscheiden müssen, welche Dienstleistungsideen in ein (konkretes) Dienstleistungsangebot übergeführt werden soll, dann kann dies als (immerwährender) Prozess des Austausches von Feststellungen und Präsentationen angenommen werden. Dieser Prozess kann als organisatorischer Lernprozess gesehen werden (Stevens, 2005). Besonders wenn Informationen von Kunden gesammelt werden (z. B. bei Feedback-Aktionen), so werden diese häufig nicht (systematisch) dokumentiert und untersucht, was dann zu schlechteren Entscheidungen führt (Carbonell, 2009).

Kunden, Mitarbeiter und Führungskräfte haben, häufig, (verblüffende) Ideen, vielleicht nicht immer zur richtigen Zeit oder am richtigen Ort. Systematisch koordinierte und transparente Prozeduren unterstützen die erfolgreiche Entwicklung neuer Dienstleistungen. Der Entwicklungsprozess muss präzise definieren, auf Basis welcher Kriterien Entscheidungen für (oder gegen) Dienstleistungen getroffen werden sollen.

### Die organisatorische Verantwortung ist nicht eindeutig

Überspitzt formuliert: Ist Marketing oder R&D dafür verantwortlich? R&D sieht sich selbst (häufig) als Treiber für technische Innovationen in produzierenden Unternehmen und nicht als Anknüpfungspunkt für Dienstleistungen. Vertrieb und Marketing sehen sich als (den) Kern des Servicegedankens. Dienstleistung wird als ein Instrument für Kundenloyalität und Marketinginitiativen gesehen, selten als etwas, das systematisch zu entwickeln ist. Vielen Unternehmen fehlen Innovationsstellen, die auch das Dienstleistungsgeschäft mit aufnehmen.

### Industrieunternehmen sind immer noch *kundenphob*, was die Dienstleistungen angeht

Kunden sind (meist) nicht die Hauptquelle für neue Dienstleistungsideen, sondern die Wettbewerber. Alle scheinen zu wissen, was Kunden erwarten, jedoch existiert eine (gewisse) Scheu, Kunden (tatsächlich) systematisch und regelmäßig zu befragen (Schicker und Strassl, 2014). Zukünftige Umsatzerlöse durch Dienstleistungen brauchen eine marktorientierte Dienstleistungsentwicklung auf Basis von Kundenanforderungen. Workshops mit

(ausgewählten) Kunden seien hier als eine wichtige Quelle für die Entwicklung neuer Ideen genannt.

Carbonells Untersuchungen bestätigen, dass die Verwendung von Kundeninformationen zu neuen oder besseren Dienstleistungen führen und somit die Marktperformanz erhöhen kann (Carbonell, 2009), vorwiegend dadurch, dass Erwartungen zum Ausdruck gebracht werden können oder systematisch moderiert werden. Die enge Zusammenarbeit mit Kunden während der Entwicklung von Dienstleistungen schafft ein besseres Verständnis der Herausforderungen und Bedarfe der Kunden und mag letztendlich zu neuen Geschäftsmöglichkeiten führen.

### Unternehmen haben keine Werkzeuge im Einsatz für das Lebenszyklusmanagement von Dienstleistungen

Es lässt sich ein Mangel an (digitalen) Werkzeugen und Vorlagen feststellen, die die Dienstleistungsentwicklung und das Management über den Lebenszyklus durch das Unternehmen unterstützen. Traditionelle Modelle, Methoden und Werkzeuge (wie sie vielleicht aus dem Produktmanagement bekannt sind und ggf. eingesetzt werden), sind unzureichend für systematische und kooperative Dienstleistungsentwicklung.

### Es fehlt eine (klare) Serviceentwicklungsstrategie

Die Definition einer Dienstleistungsstrategie ist der Schlüssel zum Erfolg und die fehlende Verbindung, die den Kundenkontext, die Ressourcen und Fähigkeiten der Unternehmen verknüpft. Fragen, wie sich die Unternehmen durch das Dienstleistungsgeschäft von anderen Mitbewerbern unterscheiden (wollen), bleiben (oft) unbeantwortet (Strassl und Schicker, 2012).

### Gestaltungsprinzipien eines Dienstleistungsentwicklungsprozesses

Nachfolgend werden Gestaltungsprinzipien definiert, die grundlegende Ideen über die Praxis der Dienstleistungsentwicklung für produzierende Unternehmen ausdrücken. Hier ist die Annahme, dass die Art, wie Unternehmen diese Prinzipien anwenden, den Erfolg des Dienstleistungsgeschäftes bestimmt. Die Anzahl der Gestaltungsprinzipien ist dabei nicht enumerativ zu sehen. Hier wollen wir *Autonomie*, *Kundenintegration* und *Agilität* als wesentliche Gestaltungsprinzipien charakterisieren.

#### Autonomie

Angebote produktbezogener Dienstleistungen, die Kunden unterstützen, fokussieren das Leistungsversprechen auf den Kunden und erlauben interaktive *Value Co-Creation* (Oliva/Kallenberg, 2003; Gebauer, 2006; Böhmman et al., 2014). Ein Dienstleistungsangebot (aus dem Portfolio aller möglichen Dienstleistungsangebote) kann somit als autonomes Geschäftsmodell betrachtet

werden, das (bestenfalls) einen einzigartigen Wert beschreibt, den ein Unternehmen ihren Kunden bereitstellt, wie sie ihn bereitstellt und wie dieser Umsatzerlöse generiert. Alexander Osterwalder definiert ein Geschäftsmodell als „[...] a conceptual tool that contains a set of elements and their relationships and allows expressing the business logic of a specific firm. It is a description of the value a company offers to one or several segments of customers and of the architecture of the firm and its network of partners for creating, marketing, and delivering this value and relationship capital, to generate profitable and sustainable revenue streams.“ (Osterwalder et al., 2004, p. 10)

Ein autonomes (Dienstleistungs-)Geschäftsmodell kann als singuläre Erreichungsunabhängigkeit betrachtet werden und, am Ende, für die (individuelle) Leistung verantwortlich gemacht werden. Weil viele Unternehmen gleichzeitig mehr als nur eine Dienstleistung entwickeln und anbieten, hilft die *autonome* Geschäftsmodellbetrachtung beim Balancieren von internen Fähigkeiten und Ressourcen, das häufig von Führungskräften unterschätzt wird (Edvardsson et al., 2010).

#### Kundenintegration

Der Wert der Dienstleistung wird gemeinsam mit dem Kunden geschaffen. Die Idee der *Service-dominant Logic* wurde von Stephen Vargo und Robert Lusch als konzeptuelles Gegenteil zur *Goods-dominant Logic* geschaffen. Die *Co-Creation* des Wertes braucht verkettete Aktivitäten, die Kunden und Unternehmen miteinander zu einem positiven Ergebnis führt (Vargo und Lusch, 2004; Edvardsson et al., 2013). Die Dienstleistungsaktivitäten können nach deren Sicht nicht vom Kunden getrennt durchgeführt werden.

Die Idee, dass der Wert gemeinsam mit dem Kunden geschaffen wird, unterliegt der (heimlichen) Annahme, dass Kunden bereits während des Entwicklungsprozesses integriert sind und die Dienstleistung gemeinsam schaffen. Die grundlegende Frage während des Dienstleistungsentwicklungsprozesses ist, welcher Wert wie während des Betriebs für Kunden und Dienstleister geschaffen wird. Somit hängt der Erfolg des Leistungsversprechens von der Fähigkeit ab, den (zukünftigen) Akt der gemeinsamen Wertschaffung während des Betriebs zu verstehen. Wir verstehen Kunden als Ressource in einem Werternetzwerk und somit erscheint die Integration der Kunden während der Dienstleistungsentwicklung attraktiv.

Unternehmen, die Kunden während der Dienstleistungsentwicklung integrieren, sammeln Wissen von und über Kunden(-prozesse). Bo Edvardsson (Edvardsson et al., 2010) unterscheidet (wenigstens) zwei Arten von Wissen: *Anwendungswissen* bezieht sich auf tatsächliche Situationen des Wissens, Schwierigkeiten, Ideen, Gelegenheiten,

Verhalten und Emotionen. *Technikwissen* bezieht sich auf die Ressourcen, mit denen aktuelle oder zukünftige Dienstleistungen umgesetzt werden.

Das Wissen von Kunden zu erfassen kann von allen möglichen Rollen durchgeführt werden (ob Servicetechniker, Geschäftsführung), solange diese im Entwicklungsprozess beteiligt sind. Das gilt für bereits bestehende Dienstleistungen (seien es erfolgreiche oder nicht erfolgreiche, was auch immer das für eine Dienstleistung bedeutet) und für gänzlich neue Dienstleistungen (Edvardsson et al., 2010; Carbonell et al., 2009).

## Agilität

Dienstleistungsentwicklung erfordert einen Handlungsrahmen, der systematische Entwicklung erlaubt, wie es bei der Entwicklung von (dinglichen) Produkten ebenfalls der Fall ist. Der Entwicklungsprozess für neue Dienstleistungen verläuft jedoch selten systematisch (Dörner et al., 2011). Um wettbewerbsfähig zu bleiben, müssen Unternehmen flexibel und zeitgerecht auf Veränderungen antworten. Und so endet die alleinige Anpassung des Entwicklungsprozesses für Produkte an das Dienstleistungsgeschäft oft in einen nicht verwendeten Dienstleistungsentwicklungsprozess. Handlungsrahmen für die Dienstleistungsentwicklung brauchen einen anderen Ansatz. Kindström meint, dass strukturierte und

formalisierte Entwicklungsprozesse (mutige und zahlreiche) Explorationsversuche einschränken. Vielmehr muss ein Entwicklungsprozess den Bedarf nach Struktur mit explorativer Ermutigung ins Gleichgewicht bringen (Kindström, 2009). Gremyr beobachtete in seinen Untersuchungen, dass Dienstleistungen überhaupt nicht systematisch entwickelt werden, sogar wenn Prozessschritte definiert waren (Gremyr et al., 2010).

Die Software-Entwicklung hatte mit einem ähnlichen Problem über viele Jahre hinweg zu kämpfen: Wasserfallähnliche Prozesse schränkten die flexiblen Anforderungen und Möglichkeiten ein. Die Idee der iterativen und inkrementellen Entwicklung tauchte auf und unterstützte die adaptive und evolutionäre Entwicklung – die Idee der *agilen* Software-Entwicklung war geboren. Überträgt man die Idee auf Dienstleistungen, so unterstützt agile Dienstleistungsentwicklung Unternehmen, rasch (un-)erwartete Änderungen während des Prozesses umzusetzen.

In diesem Sinne bedeutet der Begriff *agil* in der Dienstleistungsentwicklung, die Fähigkeit eines (wachen) Unternehmens, flexibel auf Veränderungen in einem dynamischen Umfeld innerhalb kürzester Zeit einzugehen, und zwar mit den wirtschaftlichsten und einfachsten Mitteln und unter Anwendung von Wissen und Erfahrung, um aus der eigenen Organisation und dem Umfeld zu lernen (Qumer et al. 2008).

---

## Quellenangaben

1. Böhmann, T., Leimeister, J. & Möslin, K., 2014, Service-Systems-Engineering, *WIRTSCHAFTSINFORMATIK*, 56(2), pp. 83–90.
2. Carbonell, P., Rodríguez-Escudero, A.I. & Pujari, D., 2009, Customer Involvement in New Service Development: An Examination of Antecedents and Outcomes, *Journal of Product Innovation Management*, 26(5), pp. 536–50.
3. Dörner, N., Gassmann, O. & Gebauer, H., 2011, Service innovation: why is it so difficult to accomplish? *Journal of Business Strategy*, 32(3), pp. 37–46.
4. Edvardsson, B., Edvardsson, P., Kristensson, P., Magnusson, P., & Sundström, E., 2010, *Customer integration in service development and innovation - methods and a new framework*. Karlstad University, Faculty of Economic Sciences, Communication and IT.
5. Edvardsson, B., Meiren, T., Schäfer, A. & Witell, L., 2013, Having a strategy for new service development – does it really matter? *Journal of Service Management*, 24(1), pp. 25–44.
6. Gebauer, H., Friedli, T. & Fleisch, E., 2006, Success factors for achieving high service revenues in manufacturing companies, *Benchmarking: An International Journal*, 13(3), pp. 374–86.
7. Gremyr, I., Löfberg, N. & Witell, L., 2010, Service innovations in manufacturing firms, *Managing Service Quality*, 20(2), pp. 161–75.
8. Kindström, D. & Kowalkowski, C., 2009, Development of industrial service offerings: a process framework, *Journal of Service Management*, 20(2), pp. 156–72.
9. Luhmann, N., 1987, *Soziale Systeme: Grundriss einer allgemeinen Theorie*, Suhrkamp, Frankfurt am Main.
10. Oliva, R. & Kallenberg, R., 2003, Managing the transition from products to services, *International journal of service industry management*, 14(2), pp. 160–72.
11. Osterwalder A., The business model ontology: A proposition in a design science approach, in *Institut d'Informatique et Organisation*. Lausanne, Switzerland, University of Lausanne, Ecole des Hautes Etudes Commerciales HEC (2004).

12. Qumer, A. & Henderson-Sellers, B., 2008, An evaluation of the degree of agility in six agile methods and its applicability for method engineering, *Information and Software Technology*, 50(4), pp. 280–95.
13. Schicker, G. & Strassl, J., 2014, Forschungsbericht 2014, *Wie professionell ist das Servicegeschäft in der Industrie?* Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, Amberg-Weiden, pp. 19–24.
14. Stevens, E. & Dimitriadis, S., 2005, Managing the new service development process: towards a systemic model, *European Journal of Marketing*, 39(1/2), pp. 175–98.
15. Strassl, J. & Schicker, G., 2012, *Der richtige Weg zu mehr Professionalität: Wie professionell ist das Servicegeschäft in der Industrie?* Institut für industrielles Service Management, Service For Industry, Weiden i.d. OPf., Germany.
16. Strassl, J. & Schicker, G., 2014, *Wie erzielen Unternehmen herausragende Serviceleistungen mit höheren Gewinnen?*, OTH im Dialog: Weidener Diskussionspapiere (No. 38).
17. Vargo, S. L. & Lusch, R. F., 2004, Evolving to a new dominant logic for marketing, *Journal of marketing*, 68(1), pp. 1–17.

**Kontakt:**



**Prof. Dr. Johann Strassl**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Betriebswirtschaft  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

[j.strassl@oth-aw.de](mailto:j.strassl@oth-aw.de)



**Prof. Dr. Günter Schicker**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Betriebswirtschaft  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

[g.schicker@oth-aw.de](mailto:g.schicker@oth-aw.de)



**Christian Grasser, B.A.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Betriebswirtschaft  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

[c.grasser@oth-aw.de](mailto:c.grasser@oth-aw.de)

# Biopolymere – eine Zukunft ohne Erdöl!

Manuela Weiß, M.Sc.  
Prof. Joachim Hummich

Finanziert durch das Technologie- und  
Wissenschaftsnetzwerk Oberpfalz

Unterstützt von: BASF, BYK-Chemie, DuPont,  
ProPlast, Sabic und Sachsenleinen

## Zusammenfassung

Aufgrund der Endlichkeit fossiler Ressourcen müssen über kurz oder lang alternative Rohstoffquellen für die Kunststoffproduktion erschlossen werden. Dazu sind zum einen Rohstoffe pflanzlichen Ursprungs wie Stärke, Zucker, Cellulose, Pflanzenöle oder Lignin geeignet. Zum anderen können auch Rohstoffe tierischen Ursprungs wie Chitin oder Casein zu Ausgangsstoffen der Kunststoffproduktion verarbeitet werden.

Die einfachste Möglichkeit, konventionelle durch biobasierte Kunststoffe zu substituieren, ist der bloße Austausch der Rohstoffquelle. Bei diesen sogenannten Drop-in-Lösungen können die etablierten Synthesewege sowie die bestehenden Verarbeitungsprozesse und -einstellungen beibehalten werden. Chemisch gesehen entsprechen diese Kunststoffe ihren erdölbasierten Pendanten und bringen demnach auch die gleichen Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften mit. Neben der Möglichkeit, Drop-in-Lösungen zu nutzen, existieren verschiedene neuartige Biopolymere wie PLA, welche auf petrochemischer Basis nicht hergestellt wurden. Die Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften dieser neuartigen Biopolymere sind häufig nur unzureichend erforscht, was dem breiten Einsatz dieser Materialien meist noch im Wege steht. Zudem bringen die neuartigen Biopolymere immer wieder nachteilige Eigenschaften wie beispielsweise die geringe Wärmeformbeständigkeit bei PLA mit, welche eine Substitution konventioneller Kunststoffe in bestimmten Anwendungen unmöglich machen. Um die Substitution etablierter Kunststoffe in langlebigen und auch technischen Anwendungen durch neuartigen, Biopolymere zu ermöglichen, wird im TWO-Projekt „Biopolymere“ an der Veränderung der Eigenschaften von PLA durch Blenden mit anderen Biokunststoffen wie Bio-PE oder Bio-PA gearbeitet. Im Rahmen dieses Projekts werden zudem die Modifikation der Eigenschaften von Bio-PE mithilfe von Hanffasern und verschiedene Verträglichkeitsmacher auf ihre Eignung hin untersucht.

## Abstract

Due to the shortage of fossil resources, alternative sources of raw materials for the production of plastics have to be exploited. On the one hand, raw materials of vegetable origin, such as starch, sugar, cellulose, vegetable oils or lignin are suitable for this purpose. On the other hand, raw materials of animal origin, such as chitin or casein can also be transformed to raw materials for the production of plastics.

The easiest way to replace conventional plastics by bio-based plastics is the simple replacement of the sources of raw materials. For these so-called drop-in-solutions the established routes of synthesis as well as the existing manufacturing processes and parameters can be maintained. From a chemical point of view, these polymers are equivalent to their petrochemical counterparts and thus bring along the same processing and use properties. Besides the possibility to use drop-in-solutions, several novel biopolymers, such as PLA, which has not been produced on a petrochemical base yet, are available. Their processing and use properties have often been investigated insufficiently, which has restricted their broad use up to now. In addition, the novel biopolymers may be accompanied by unfavourable properties, as the low heat resistance of PLA, which make the substitution of conventional plastics impossible for certain applications.

The TWO Project “Biopolymere” deals with the properties of PLA blended with other biopolymers, such as Bio-PE or Bio-PA, in order to enable the replacement of established plastics by novel biopolymers in durable and even technical applications. In addition, this project aims to investigate the modification of Bio-PE with hemp fibres and to test the suitability of compatibilisers.

## Entwicklung der Biopolymere

Nachdem die ersten Kunststoffe zu Beginn der Industrialisierung noch auf nachwachsenden Rohstoffen basierten (I), wurden diese durch den Fortschritt in der Petrochemie zunehmend durch Kunststoffe auf petrochemischer Basis ersetzt (II). Beide Kunststoffarten waren jedoch nicht biologisch abbaubar. Erst in den letzten Jahrzehnten wurden auf Basis der konventionellen petrochemischen Rohstoffe Kunststoffe entwickelt, die biologisch abbaubar sind (III). Im nächsten Schritt wurden Biopolymere entwickelt, die sowohl eine nachwachsende Rohstoffbasis besitzen als auch biologisch abgebaut werden können (IV). Deren Entwicklung war durch die Erkenntnis der Endlichkeit der Erdölressourcen sowie den Wunsch nach einer Verbesserung der Entsorgungssituation motiviert. Seit einigen Jahren verlagert sich der Schwerpunkt in der Entwicklung jedoch von der Kompostierbarkeit auf den Einsatz nachwachsender Rohstoffe. Im Zuge dessen werden zunehmend Kunststoffe mit biologischer Rohstoffbasis entwickelt, die für den Ersatz von konventionellen, petrochemisch basierten Kunststoffen geeignet sind (V). Mit der Entwicklung neuer, auf biologischen Rohstoffen basierender Herstellverfahren für konventionelle Kunststoffe wie PE, PET oder PA können zunehmend langlebige und auch technisch anspruchsvolle Anwendungen mit Bio-Polymeren realisiert werden.[2]

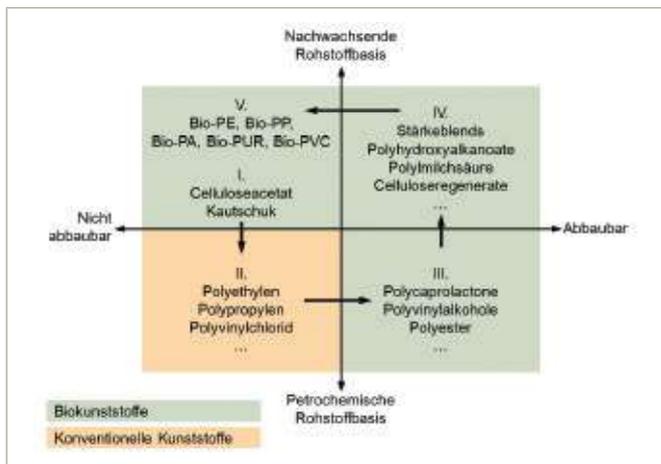


Abbildung 1: Einteilung der Kunststoffe nach Rohstoffbasis und Abbaubarkeit nach [2]

## Gründe für den Einsatz von Biopolymeren

Derzeit wird durch den Menschen jedes Jahr die Menge an Erdöl verbraucht, die in einer Million Jahre der Erdgeschichte entstanden ist.[6] Aufgrund der Endlichkeit der Ressource Erdöl wird auch die Kunststoffindustrie früher oder später gezwungen sein, über alternative Rohstoffquellen und Herstellungsverfahren nachzudenken. Biokunststoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe herzustellen, stellt derzeit eine vielversprechende und nachhaltige Alternative zur petrochemischen Variante dar. [2]

Des Weiteren existieren in Zusammenhang mit Erdöl als Rohstoffquelle für die Kunststoffherstellung zwei weitere Probleme. Zum einen sind die Rohölvorkommen äußerst inhomogen über die Erde verteilt, sodass die meisten Länder der Erde auf die Erdölimporte einiger weniger Länder mit hohen Ölvorkommen angewiesen sind. Außerdem steigt der Ölpreis nahezu permanent, was durch immer schwieriger zu erschließende Ölquellen noch verstärkt wird. Gerade im Hinblick auf die zur Neige gehenden Erdölvorräte werden beide Problematiken noch verschärft. Durch den Einsatz alternativer Rohstoffquellen für die Kunststoffproduktion könnte die Kunststoffindustrie unabhängiger von Erdölimporten zum einen und der Entwicklung des Rohölpreises zum anderen werden.[2]

Ein weiterer Grund, der für den Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen als Basis für die Kunststoffproduktion spricht, ist die verbesserte CO<sub>2</sub>-Bilanz. Wie in Abbildung 2 dargestellt, entsteht zwar unabhängig von der Rohstoffbasis bei der Produktion, der Verarbeitung und der Entsorgung von Kunststoffen CO<sub>2</sub>, jedoch wird bei einer pflanzlichen Rohstoffbasis während des Pflanzenwachstums CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre absorbiert. Kunststoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe können demnach über ihre Lebensdauer als CO<sub>2</sub>-Speicher fungieren. Bei einer Verbrennung des Kunststoffs am Ende der Nutzungsphase wird lediglich das CO<sub>2</sub> freigesetzt, welches zuvor von der Pflanze gespeichert wurde. Durch Recycling und mehrfache Verwendung dieser Kunststoffe kann CO<sub>2</sub> langfristig gebunden werden. Im Gegensatz dazu wird bei der Verbrennung petrochemisch basierter Kunststoffe CO<sub>2</sub> frei, welches seit Milliarden von Jahren im Öl gebunden war und demnach zum Treibhauseffekt beiträgt.[2]

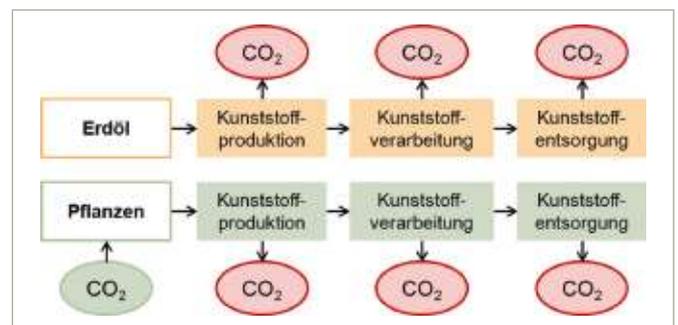


Abbildung 2: CO<sub>2</sub>-Aufnahme und -Abgabe über den Lebenszyklus von Kunststoffen nach [4]

Untersuchungen haben gezeigt, dass Kunststoffe mit biogener Rohstoffbasis ein signifikantes CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial im Vergleich zu petrochemisch basierten Kunststoffen mitbringen können, bis hin zur CO<sub>2</sub>-Neutralität. Das genaue Einsparpotenzial hängt vom jeweiligen Rohstoff, dem Produkt und der Anwendung ab.[3]

Des Weiteren ergibt sich durch die zum Teil biologische Abbaubarkeit von Biopolymeren häufig ein zusätzlicher Nutzen. So können Mulchfolien aus abbaubaren Biokunststoffen nach der Ernte mit untergepflügt werden und

bauen sich im Boden ab. Das Einsammeln, Säubern und Entsorgen der Folien entfällt für den Landwirt. Eine weitere Anwendung, bei der die biologische Abbaubarkeit einen zusätzlichen Nutzen generiert, stellen bioresorbierbare Implantate oder Knochenschrauben aus PLA dar. Diese werden im menschlichen Körper mit der Zeit abgebaut, sodass eine zweite Operation zur Entfernung der Schrauben oder Implantate nicht mehr nötig ist.[2]

### Tank, Trog oder Teller-Debatte

Angesichts der oben beschriebenen für die Kunststoffherstellung infrage kommenden nachwachsenden Rohstoffquellen ist es wenig verwunderlich, dass immer wieder die sogenannte „Tank-Trog-oder-Teller-Debatte“ geführt werden muss. Die meisten der genannten Rohstoffquellen können auch als Futter- oder Nahrungsmittel Verwendung finden. Sollen diese nun zur Produktion von Kunst- oder auch Kraftstoffen genutzt werden, stellt sich angesichts der Nahrungsmittelknappheit in verschiedenen Regionen der Erde die Frage, ob es ethisch vertretbar ist, landwirtschaftliche Flächen, die zur Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln genutzt werden könnten, für den Anbau von Rohstoffen für die Kunst- oder Kraftstoffproduktion zu verwenden.[2]

Wie in Abbildung 3 dargestellt, werden über 90 % des weltweiten Ackerlands zum Anbau von Nahrungs- und Futtermitteln eingesetzt. Etwa 1 % der weltweiten Landwirtschaftsfläche beziehungsweise 4 % des Ackerlands werden für den Anbau von Pflanzen, die zu Biotreibstoff verarbeitet werden, genutzt. Von den 1,4 Mrd. ha Ackerland wurden im Jahr 2011 lediglich 300.000 ha für die Erzeugung von Biokunststoffen verwendet, was einem Anteil am Ackerland von 0,02 % entspricht und 0,006 % der weltweiten Landwirtschaftsfläche ausmacht. Auch bei einer Berücksichtigung des zunehmenden Produktionsvolumens der Biopolymere werden im Jahr 2016 voraussichtlich nur 0,022 % der weltweiten

Landwirtschaftsfläche für den Anbau von Biopolymer-Rohstoffen benötigt.[3]

In Anbetracht des äußerst geringen Flächenbedarfs erübrigt sich die Frage nach einer Nahrungsmittelkonkurrenz der Biopolymere. Zudem gibt es verschiedene Bestrebungen, derzeit nicht verwertete und in großen Mengen vorhandene Stoffe, wie Chitin aus Fischereiabfällen oder Melasse, Molke und Lignin aus Produktionsabfällen für die Herstellung von Biokunststoffen nutzbar zu machen.[2, 7, 9–10]

### Projektbeschreibung

Im Fokus dieses Projekts steht das Biopolymer Polymilchsäure (Polylacticacid, PLA), welches von Natur aus gute Festigkeits- und Steifigkeitswerte aufweist, jedoch sehr spröde ist und durch seine äußerst geringe Wärmeformbeständigkeit für viele Anwendungen nicht tauglich ist. Durch Blenden mit anderen (teilweise) biobasierten Kunststoffen oder Fasern und den Einsatz verschiedener Verträglichkeitsmacher sollen die Eigenschaften des PLA modifiziert werden. Die Untersuchung der rheologischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften soll zeigen, ob und inwieweit die unterschiedlichen Blendkomponenten einen Einfluss auf die Eigenschaften des PLA besitzen. Des Weiteren wird der Einfluss von Hanffasern auf die Eigenschaften von Bio-PE untersucht.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts kommen PLA-Materialien der NatureWorks LLC (Minnetonka, MN, USA) zum Einsatz. Aus Kostengründen wird für die Herstellung der Compounds PLA-Mahlgut verwendet, welches im Vergleich zu PLA-Neuware deutlich günstiger ist. Um abschätzen zu können, wie stark die Eigenschaften durch die bereits erfolgte Verarbeitung und die enthaltenen Pigmente beeinflusst werden, werden zusätzlich zu den Compounds das ungeblendete PLA-Mahlgut sowie PLA-Neuware untersucht.



Abbildung 3: Landnutzung für Biokunststoffe 2011 und 2016 [3, 5]

Als Blendpartner für PLA kommt zum einen ein biobasiertes PE der Braskem S.A. (Sao Paulo, Brasilien) zum Einsatz, welches als Drop-in-Lösung bekannte Verarbeitungseigenschaften mit sich bringt und aufgrund seiner hohen Schlagzähigkeit und Bruchdehnung als möglicher Blendpartner ausgewählt wurde. Mit dieser Materialtype werden zudem die PE-Hanf-Compounds hergestellt.

Als weiterer Blendpartner für PLA wird ein teilweise biobasiertes PA 610 der BASF SE (Ludwigshafen) untersucht. Dieses wird zum Teil aus biogener, aus Rizinusöl gewonnener Sebacinsäure hergestellt und besteht demnach zu mehr als 60 % aus nachwachsenden Rohstoffen. Dieses zeichnet sich durch gute mechanische Eigenschaften und hohe Hydrolyse- sowie Spannungsrissbeständigkeit aus.

Sollen zwei Polymere geblendet werden, findet in den meisten Fällen aufgrund von Unverträglichkeit eine Entmischung beider Komponenten statt. Das Blend ist demnach nicht mischbar beziehungsweise heterogen. Die Ausbildung von zwei Phasen im Blend ist jedoch nicht zwangsläufig als negativ zu werten. Um dennoch qualitativ hochwertige Blends zu erzielen, muss eine stabile Blendmorphologie angestrebt werden. Diese wird durch eine gleichmäßige Verteilung von Matrix und dispergierter Phase sowie eine gute Haftung zwischen den Phasen bestimmt.[1, 8] Um die Mischbarkeit und die Adhäsion zwischen den Phasen zu verbessern, werden im Rahmen dieses Projekts sechs verschiedene Verträglichkeitsmacher eingesetzt, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Verträglichkeitsmacher und dazugehörige Blends und Compounds

Verträglichkeitsmacher	Hersteller	Verwendet für
Elvaloy® PTW	DuPont	PLA/PE-Blends
TPPP 2003 GB	BYK-Chemie	PLA/PE-Blends
TPPP 2214 FB	BYK-Chemie	PLA/PE-Blends
PLA-g-GMA	BYK-Chemie	PLA/PA-Blends
TPEV 1112 PB	BYK-Chemie	PE/Hanf-Compounds
TPPE 5002 GALL	BYK-Chemie	PE/Hanf-Compounds

Die Mischungsverhältnisse der PLA/PE- und der PLA/PA-Blends folgen einem vollfaktoriellen 2<sup>2</sup>-Versuchsplan mit Zentralpunkt, mit welchem bei nur fünf Versuchsreihen zwei Faktoren auf drei Stufen variiert werden können.

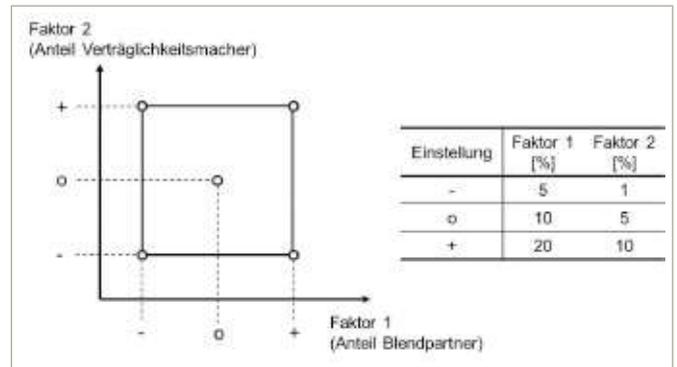


Abbildung 4: Vollfaktorieller 2<sup>2</sup>-Versuchsplan mit Zentralpunkt

Für die PE/Hanf-Compounds wurde folgender in Abbildung 5 zu sehender Versuchsplan verwendet, da höhere Hanffaseranteile aufgrund der stark ansteigenden Viskosität nicht realisiert werden konnten.

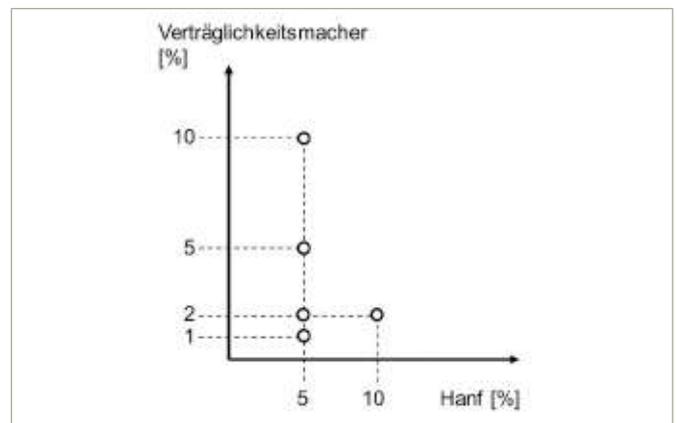


Abbildung 5: Versuchsplan PE/Hanf-Compounds

Zur Herstellung der oben beschriebenen Compounds wurde ein Zweischnellenextruder des Typs ZE 25R x 42D-UTS-UG der Berstorff GmbH (Hannover) mit einem maximalen Durchsatz von 40 kg/h verwendet. Nach dem Vortrocknen, das aufgrund der hygroskopischen Eigenschaften von PLA, PA 610 und den Hanffasern nötig war, wurden die PLA/PE- und die PLA/PA-Blends auf der Standard-Spritzgießmaschine Arburg Allrounder 320 S 500-150 der Firma Arburg (Loßburg) mit einer Schließkraft von 500 kN zu Probekörpern verarbeitet. Die Herstellung der Probekörper aus PE/Hanf-Compounds erfolgte nach dem Austausch der Spritzgießmaschine auf einer vollelektrischen Arburg Allrounder 370 E 600-170, ebenfalls Firma Arburg (Loßburg), mit einer Schließkraft von 600 kN.

Anschließend wurden die Materialien sowie die daraus hergestellten Probekörper mithilfe verschiedener Untersuchungsmethoden geprüft. Mithilfe eines Schmelzindexmessgeräts wurden sowohl der Schmelzindex (MFI) als auch die Volumen-Fließrate (MVR) der Compounds bestimmt. Damit lassen sich Aussagen über die Fließfähigkeit treffen. Zur Bestimmung von Glasübergangs-, Schmelz- und Kristallisationstemperaturen wurde die

dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) eingesetzt. Mit dem gleichen Verfahren können Schmelz- und Kristallisationsenthalpien gemessen und damit auf die Kristallinität der Proben geschlossen werden. Des Weiteren wurden die Vicat-Erweichungstemperatur (VST) sowie die Wärmeformbeständigkeit (HDT) der Probekörper untersucht. Mithilfe eines Pendelschlagwerks konnte die Schlagzähigkeit und damit das Verhalten der Materialien bei stoßartiger Beanspruchung geprüft werden. Weitere mechanische Kennwerte wie der E-Modul, die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung wurden im klassischen einachsigen Zugversuch ermittelt. Wo erforderlich wurden die Probekörper vor der Prüfung für eine vorgegebene Zeit im Exsikkator bei 23 °C und 50 % Luftfeuchtigkeit gelagert. Die benötigte Luftfeuchtigkeit wird dabei über eine gesättigte Magnesiumnitrat-Lösung eingestellt. Die Prüfung erfolgt jeweils direkt im Anschluss an die Entnahme aus dem Exsikkator.

## Versuchsergebnisse

Die Herstellung der Compounds war größtenteils problemlos möglich. Bei einigen Materialien konnten jedoch Auffälligkeiten wie abreißende Kunststoffstränge oder Material, das durch die Entlüftung herausgedrückt wurde, beobachtet werden. Bei der Verarbeitung zu Zugstäben fiel vor allem die für PLA typische lange Kühlzeit auf, die bei allen PLA-Blends benötigt wurde. Dadurch wurden zum Teil Zykluszeiten mit über 80 Sekunden erreicht, was für eine wirtschaftliche Produktion problematisch wäre. Bereits bei der Abtrennung des Angusses war bei den PLA/PE-Blends unabhängig vom verwendeten Verträglichkeitsmacher eine Delamination zu erkennen. Dies weist auf nicht wirkende Verträglichkeitsmacher hin, was auch durch die weiteren Versuchsergebnisse bestätigt werden kann.

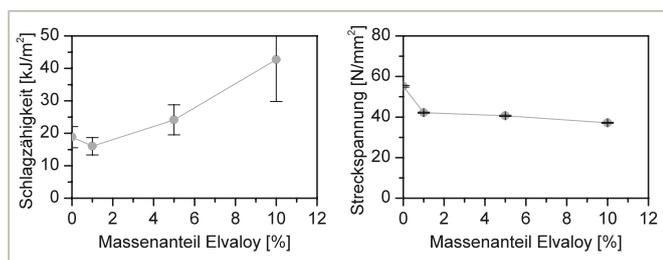


Abbildung 6: Einfluss von Elvaloy® PTW auf die Schlagzähigkeit und die Streckspannung

Durch den Verträglichkeitsmacher Elvaloy® PTW kann zwar die Schlagzähigkeit um bis zu 127 % gesteigert werden, wie in Abbildung 6 zu erkennen ist. Da dieses Additiv jedoch normalerweise als Schlagzähmodifikator eingesetzt wird, war dieser Einfluss zu erwarten und kann nicht als Hinweis auf dessen Wirksamkeit als Verträglichkeitsmacher gewertet werden. Auf andere mechanische Kennwerte wie den E-Modul sowie die Streckspannung wirkt sich Elvaloy® PTW dagegen negativ aus, siehe

Abbildung 6. Bei einem Verträglichkeitsmacheranteil von 10 % sinkt beispielsweise die Streckspannung gegenüber ungeblendetem PLA um 30 %.

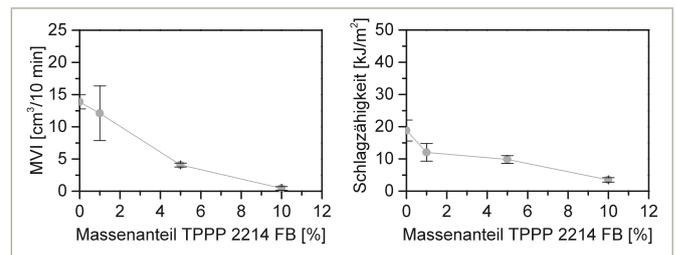


Abbildung 7: Einfluss von TPPP 2214 FB auf den MVI und die Schlagzähigkeit

Der stärkste negative Einfluss auf die Materialeigenschaften geht von TPPP 2214 FB als Verträglichkeitsmacher aus. Dieser senkt zum einen, wie in Abbildung 7 zu sehen ist, den MVI um bis zu 96 %. Dadurch wird die Fließfähigkeit der Blends stark beeinträchtigt. Zum anderen werden sämtliche mechanische Eigenschaften wie die Schlagzähigkeit, der E-Modul, die Streckspannung und auch die Bruchdehnung durch die Zugabe dieses Verträglichkeitsmachers deutlich negativ beeinflusst. Ein Anteil von 10 % verursacht bereits einen Rückgang der Schlagzähigkeit um 81 %. Die niedrigen Werte werden zudem durch das brüchige Erscheinungsbild und die erkennbare Delamination in Abbildung 8 bestätigt.

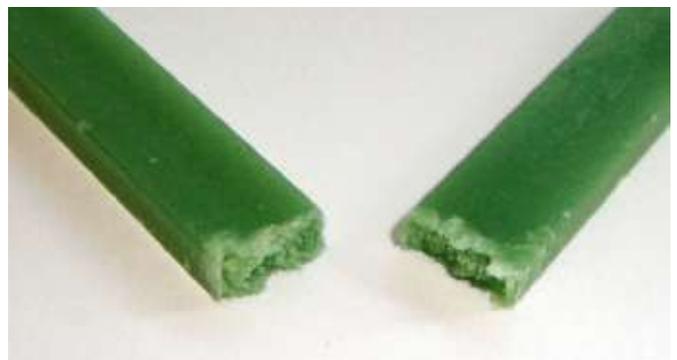


Abbildung 8: Brüchiges Erscheinungsbild und erkennbare Delamination nach Schlagzähigkeitsversuch

Wie Abbildung 9 zeigt, liegt die Zugfestigkeit der beiden Blends mit einem Verträglichkeitsmacheranteil von 10 % bei nur 10 N/mm². Dies entspricht einem Abfall der Zugfestigkeit im Vergleich zu PLA von 80 %. Auch die Bruchdehnung fällt mit unter 2 % bei diesen beiden Materialien noch geringer aus als bei PLA. Mit einem Rückgang von bis zu 20 % im Vergleich zu ungeblendetem PLA wird der E-Modul ebenfalls deutlich negativ beeinflusst.

Der Einfluss von TPPP 2003 GB auf die Eigenschaften der Blends ist ähnlich, jedoch deutlich schwächer ausgeprägt, sodass auf eine separate Betrachtung der Versuchsergebnisse verzichtet werden kann.

Grundsätzlich führt die Zugabe von PE zu sinkenden E-Modulen und Zugfestigkeiten. Die Steigerung der Bruchdehnung fällt trotz der Duktilität von PE eher moderat aus, da diese bei allen PLA/PE-Blends weiterhin unter 5 % liegt.

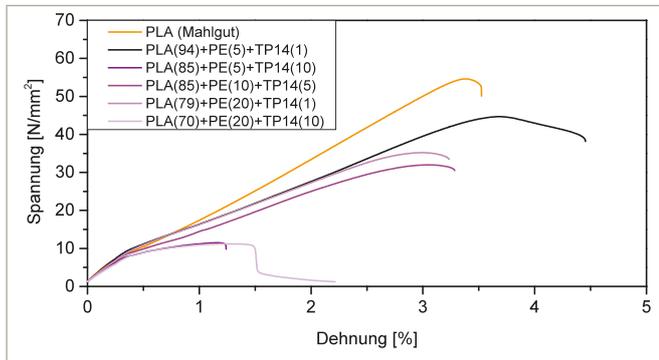


Abbildung 9: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der PLA/PE/TPPP2214-Blends

Aufgrund der beim Abtrennen des Angusses auftretenden Delamination sowie der Versuchsergebnisse lassen sich die für PLA/PE-Blends geprüften Verträglichkeitsmacher als nicht wirksam einstufen.

Anders sieht es bei den PLA/PA-Blends und den PE/Hanf-Compounds aus. Diese erscheinen bei der Abtrennung des Angusses homogen und weisen keine Delamination auf, was auf die Tauglichkeit der dafür verwendeten Verträglichkeitsmacher schließen lässt.

Von PLA-g-GMA wird zwar auch eine Senkung des MVI und damit eine Verschlechterung der Fließfähigkeit bewirkt, wie Abbildung 10 zeigt. Diese ist jedoch weniger gravierend als bei den PLA/PE-Blends. Zudem kann bei den PLA/PA-Blends eine leichte Steigerung der Schlagzähigkeit um 7,5 % beobachtet werden.

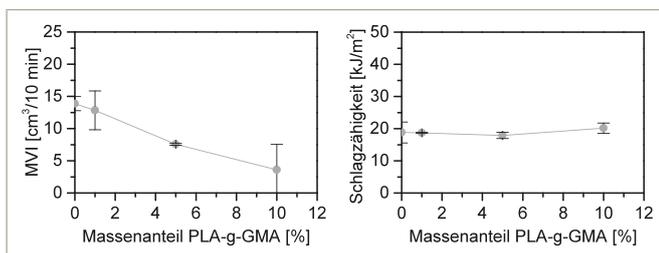


Abbildung 10: Einfluss von PLA-g-GMA auf den MVI und die Schlagzähigkeit

Des Weiteren führt die Zugabe von PA 610 als Blendpartner und PLA-g-GMA als Verträglichkeitsmacher zu einer Steigerung von Zugfestigkeit und Bruchdehnung, wie in Abbildung 11 zu sehen ist. Bei einem PA-Anteil von 5 % kann auch der E-Modul um 5,5 % gesteigert werden. Ansonsten liegt dieser Wert auf etwa gleichem Niveau mit dem Ausgangsmaterial PLA. Die Zugfestigkeit erreicht maximal einen Wert von 59 N/mm<sup>2</sup> und liegt damit um 7 % über derjenigen von ungeblendetem PLA. Zwar kann auch

die Bruchdehnung um 35 % gesteigert werden, liegt mit unter 5 % jedoch noch immer auf einem sehr niedrigen Niveau.

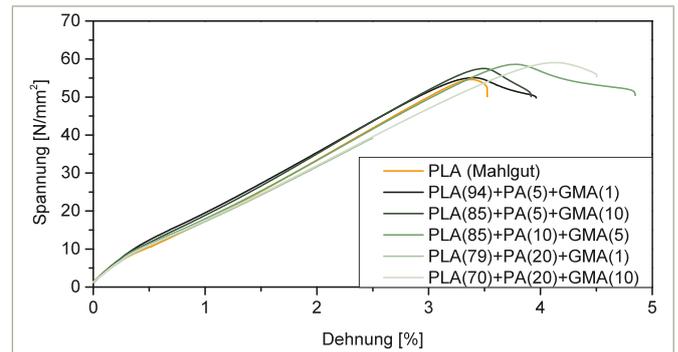


Abbildung 11: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der PLA/PA/GMA-Blends

Die Vicat-Erweichungstemperatur und die Wärmeformbeständigkeit konnte weder bei den PLA/PE- noch bei den PLA/PA-Blends im Vergleich zu PLA verbessert werden. Beide Werte liegen bei allen Blends auf einem Niveau von etwa 55 °C.

Aufgrund des homogenen optischen Eindrucks bei der Abtrennung des Angusses sowie der insgesamt positiven Versuchsergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass PLA-g-GMA als Verträglichkeitsmacher zwischen PLA und PA 610 tauglich ist.

Durch Tempern von Probekörpern aus PLA-Mahlgut, PLA-Neuware und den PLA/PA-Blends für 15 Minuten bei 80 °C und bei 120 °C kann die Kristallinität deutlich gesteigert werden. Dies ist an den DSC-Kurven in Abbildung 12 an der etwas geringeren (80 °C) beziehungsweise nicht vorhandenen Nachkristallisation (120 °C) zu erkennen. Die höhere Kristallinität der getemperten Probekörper führt bei einem Großteil der Materialien zu einer Steigerung der Schlagzähigkeit, des E-Moduls und der Zugfestigkeit, wie Abbildung 13 zeigt. So kann beispielsweise bei PLA-Mahlgut sowohl die Schlagzähigkeit als auch der E-Modul durch Tempern bei 120 °C um etwa 30 % gesteigert werden. Lediglich bei einem der PLA/PA-Blends können durch den Tempervorgang die Eigenschaften nicht verbessert werden. Dieses weist jedoch aufgrund des ungünstigen Verhältnisses zwischen dem Blendpartner PA 610 (20 %) und dem zugesetzten Verträglichkeitsmacher (1 %) grundsätzlich schlechtere Eigenschaften auf.

Des Weiteren beeinflusst die durch das Tempern erhöhte Kristallinität die Erweichungstemperatur positiv. Wie in Abbildung 14 am Beispiel von PLA-Mahlgut und einem der PLA/PA-Blends zu erkennen ist, kann die Vicat-Erweichungstemperatur durch den Tempervorgang auf 80 °C und damit um 43 % im Vergleich zu den ungetemperten Probekörpern gesteigert werden.

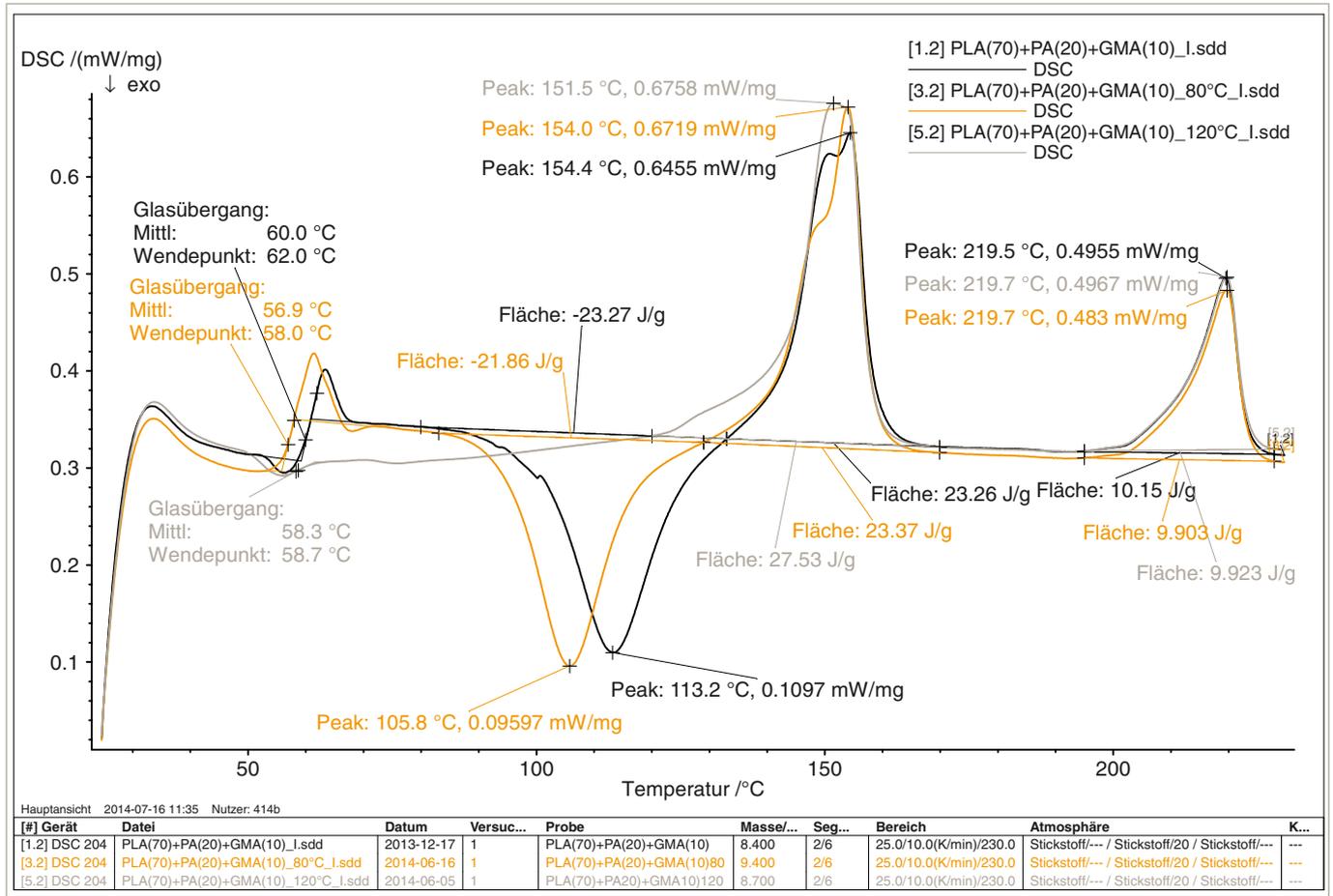


Abbildung 12: Erste Aufheizkurve eines PLA/PA-Blends, ungetempert (schwarz), bei 80 °C (orange) und bei 120 °C getempert (grau)

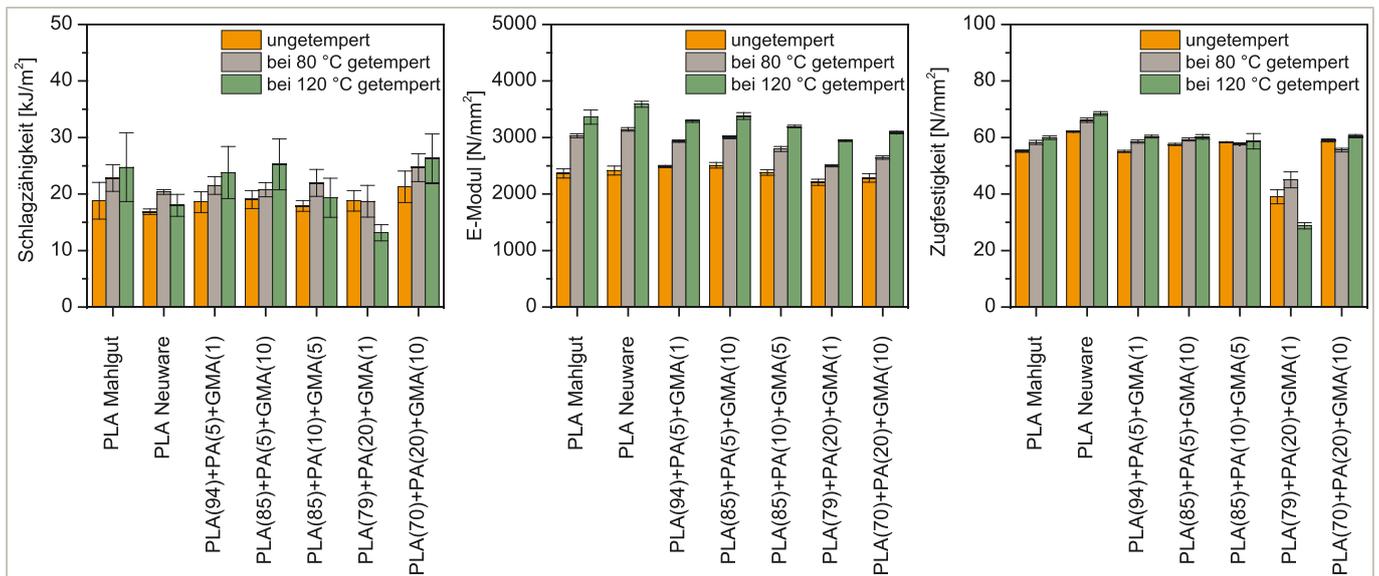


Abbildung 13: Schlagzähigkeit, E-Modul und Zugfestigkeit von PLA-Mahlgut, PLA-Neuware und den PLA/PA-Blends in ungetempertem Zustand und bei 80 °C beziehungsweise 120 °C getempert

Eine Erhöhung der Kristallinität bereits bei der Herstellung durch erhöhte Werkzeugtemperaturen ist jedoch nicht möglich, da die Spritzlinge selbst nach fünfminütiger Kühlzeit noch weich und deformierbar sind. Dies ist auf die sehr langsam ablaufende Kristallisation des PLA zurückzuführen.

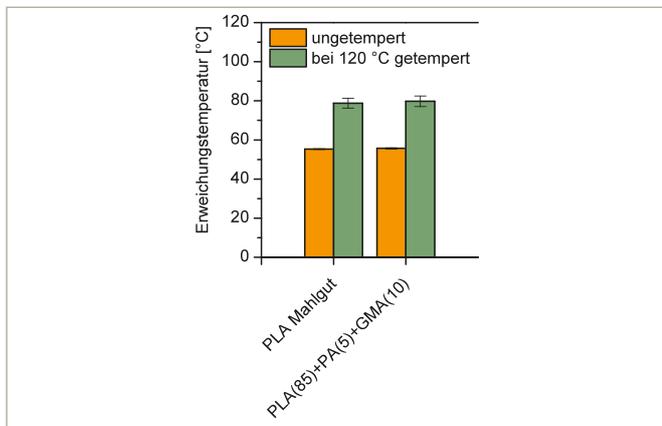


Abbildung 14: Erweichungstemperatur von ungetemperten und bei 120 °C getemperten Probekörpern

Bei den PE/Hanf-Compounds führt ein steigender Hanffaseranteil zu geringeren MVI-Werten und damit ebenfalls zu einer Verschlechterung der Fließfähigkeit, wie in Abbildung 15 zu sehen ist. Die verwendeten Verträglichkeitsmacher kompensieren diesen Effekt leicht oder haben nur geringfügigen Einfluss auf die Fließfähigkeit.

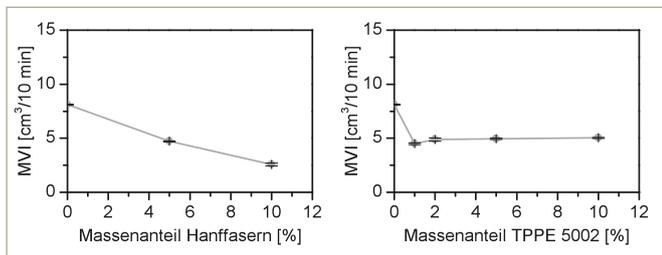


Abbildung 15: Einfluss von Hanffasern und einem Verträglichkeitsmacher auf den MVI der Compounds

Des Weiteren bewirkt ein steigender Hanffaseranteil eine signifikante Abnahme der Schlagzähigkeit, wie Abbildung 16 zeigt. Durch einen zunehmenden Anteil an Verträglichkeitsmacher kann diese Verschlechterung jedoch zu einem großen Teil kompensiert werden.

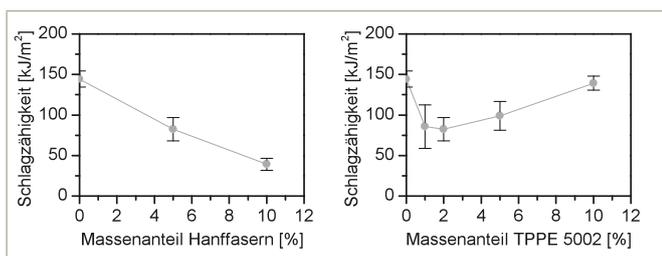


Abbildung 16: Einfluss von Hanffasern und einem Verträglichkeitsmacher auf die Schlagzähigkeit der Compounds

Auch bei den PE/Hanf-Compounds können verschiedene Abhängigkeiten der mechanischen Eigenschaften vom Hanffaser- und Verträglichkeitsmacheranteil beobachtet werden. So lässt sich der E-Modul bei einem Hanffaseranteil von 10 % um mehr als 30 % steigern. Mit steigendem Verträglichkeitsmacheranteil sinkt der E-Modul jedoch wieder. Der versteifende Effekt der Hanffasern wird demnach durch den Verträglichkeitsmacher kompensiert.

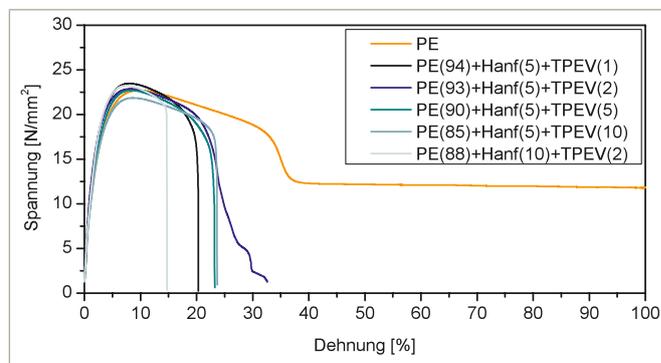


Abbildung 17: Spannungs-Dehnungs-Diagramm PE/Hanf/TPEV-Blends

Auch auf die Zugfestigkeit wirken sich die Hanffasern positiv aus. Der Verträglichkeitsmacher TPEV 1112 hingegen hat einen leicht negativen Einfluss auf die Zugfestigkeit. Bei einem Anteil von 10 % fällt die Zugfestigkeit unter den ursprünglichen Wert von ungeblendetem PE, siehe Abbildung 17. Der Verträglichkeitsmacher TPPE 5002 hat im Gegensatz dazu zunächst einen positiven Einfluss auf die Zugfestigkeit. Erst bei einem Verträglichkeitsmacheranteil von 10 % beginnt die Zugfestigkeit zu sinken, liegt jedoch immer noch über derjenigen von PE, wie Abbildung 18 zeigt.

Die Bruchdehnung des ungeblendeten PE liegt bei über 600 %. Durch die Zugabe von Hanffasern wird die Bruchdehnung signifikant reduziert. Mit Werten zwischen 15 % und 45 % liegt die Bruchdehnung der PE/Hanf-Compounds jedoch deutlich über derjenigen der PLA-Blends. Die PE/Hanf-Compounds verhalten sich demnach trotz der zugesetzten Hanffasern deutlich weniger spröde als die PLA-Blends.

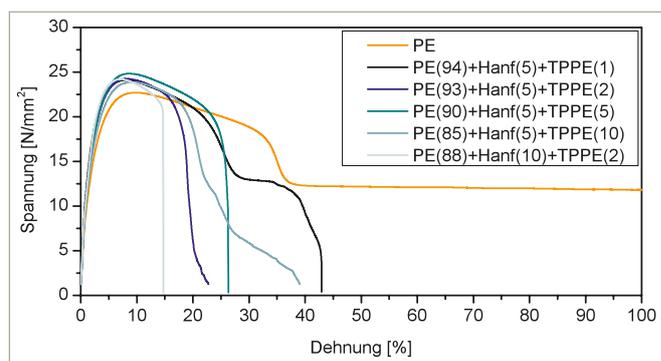


Abbildung 18: Spannungs-Dehnungs-Diagramm PE/Hanf/TPPE-Blends

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die für PLA/PE-Blends untersuchten Verträglichkeitsmacher nicht für die Anbindung von PLA an PE geeignet sind. Wie bereits beim Abtrennen des Angusses zu vermuten war, bestätigen dies auch die Versuchsergebnisse. Die erhofften Verbesserungen von Schlagzähigkeit und Bruchdehnung konnten somit nicht erzielt werden. Für diese Materialkombination muss zunächst ein geeigneter Verträglichkeitsmacher gefunden werden, bevor weitere Versuche durchgeführt werden können.

Im Gegensatz dazu konnte der für die PLA/PA-Blends verwendete Verträglichkeitsmacher seine Wirksamkeit unter Beweis stellen. Hier konnten infolgedessen gute mechanische Eigenschaften erzielt werden, vor allem bei den getemperten Probekörpern.

Die beiden für PE/Hanf-Compounds untersuchten Verträglichkeitsmacher können ebenfalls als wirksam eingestuft werden. Durch die Zugabe von Hanffasern konnte sowohl die Steifigkeit als auch die Festigkeit der PE-Probekörper gesteigert werden. Die Bruchdehnung sinkt dadurch zwar auf einen Bruchteil des Werts von ungeblendetem PE, liegt jedoch immer noch auf einem Niveau, das nicht als spröde bezeichnet werden kann.

## Fazit

In Hinblick auf die begrenzten Erdölvorräte und die negative CO<sub>2</sub>-Bilanz der erdölbasierten Kunststoffe muss es das langfristige Ziel der Kunststoffindustrie sein, erdölbasierte Kunststoffe zunehmend durch Kunststoffe mit biologischer Basis zu ersetzen. Der Anteil der Polymere mit einer nachwachsenden Rohstoffbasis wird jedoch nur in dem Maße steigen können, wie es den Herstellern gelingt, deren Eigenschaften so zu verändern, dass sie wettbewerbsfähig zu petrochemischen Kunststoffen sind.

Auch die sogenannten Drop-in-Lösungen erscheinen deshalb vielversprechend bezüglich der Substitution von konventionellen durch biologisch basierte Kunststoffe. Eine Anpassung der Verarbeitungsanlagen ist hier nicht erforderlich. Die Drop-in-Biopolymere können zudem durch Additivierung zur Erschließung von breiteren und neuen Anwendungsfeldern der Biopolymere beitragen.

Im Fall der neuartigen Biopolymere besteht noch erheblicher Forschungsbedarf, was die Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften angeht. Im Rahmen des TWO-Projekts „Biopolymere“ konnte eine Reihe von potenziellen Verträglichkeitsmachern als nicht wirksam identifiziert werden. Des Weiteren konnten einige vielversprechende Ansätze gefunden werden, die in weiteren Untersuchungen aufgegriffen werden können. Exemplarisch seien hier die Kombination von PLA mit PA 610 sowie das Tempern von Bauteilen aus PLA und PLA/PA-Blends zur Steigerung der Kristallinität und damit der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften genannt.

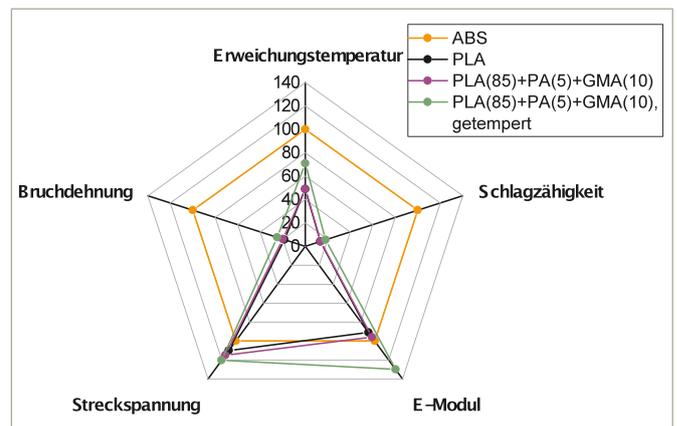


Abbildung 19: Vergleich der Eigenschaften von PLA und einem PLA/PA-Blend mit konventionellem ABS

Im Vergleich zu einem konventionellen ABS kann PLA nur bezüglich der Festigkeit und Steifigkeit ähnliche Werte aufweisen, welche durch Blenden mit PA 610 und Tempern noch gesteigert werden können. Im Hinblick auf die Schlagzähigkeit und die Erweichungstemperatur konnten durch Blenden allein nur geringfügige Verbesserungen erzielt werden, sodass hier gegenüber ABS noch deutliche Defizite bestehen. Durch das Tempern der Proben konnte eine deutliche Steigerung von Erweichungstemperatur und E-Modul erzielt werden. Die Verbesserung der Schlagzähigkeit und die weitere Steigerung der Erweichungstemperatur von PLA muss Gegenstand weiterer Untersuchungen sein, um langfristig ABS in verschiedenen Anwendungen durch PLA substituieren zu können.

---

## Literaturverzeichnis

- [1] EHRENSTEIN, G. W.: *Polymer-Werkstoffe. Struktur – Eigenschaften – Anwendung*. 2., völlig überarbeitete Auflage. Carl Hanser Verlag, München, 1999.
- [2] ENDRES, H.-J.; SIEBERT-RATHS, A.: *Technische Biopolymere*. Rahmenbedingungen, Marktsituation, Herstellung, Aufbau und Eigenschaften. Carl Hanser Verlag, München, 2009.
- [3] EUROPEAN BIOPLASTICS E.V.: Homepage von European Bioplastics e.V. URL: [www.european-bioplastics.org](http://www.european-bioplastics.org). (Abrufdatum: 29.11.2013).
- [4] GANSTER, J.: *Biobasierte Folien*. Materialien, Verarbeitung, Märkte. SKZ – ConSem GmbH (Veranst.): 1. Fachsymposium zur Verarbeitung von Biokunststoffen (Würzburg, 17.-18.04.2013). – Tagungsband, Beitrag K.
- [5] IFBB HANNOVER (Hrsg.): IfBB-Mediathek. URL: <http://ifbb.wp.hs-hannover.de/downloads/>. (Abrufdatum: 28.11.2013).
- [6] ILLINGER, P.: *Luxusgut Benzin. Erdöl wird knapp*. 17.05.2010 URL: <http://www.sueddeutsche.de/wissen/erdoel-wird-knapp-luxusgut-benzin-1.154334>. (Abrufdatum 21.11.13).
- [7] N.N.: *Krabbenschalen als Rohstoff für Chemikalien*. 21.11.2011 URL: <http://www.igb.fraunhofer.de/de/presse-medien/presseinformationen/2011/krabbenschalen-als-rohstoff-fuer-chemikalien.html>. (Abrufdatum 22.11.2013).
- [8] OBERBACH, K.; BAUR, E.; BRINKMANN, S.; SCHMACHTENBERG, E.: *Saechtling Kunststoff Taschenbuch*. 29. Aufl., Carl Hanser Verlag, München, 2004.
- [9] TAMSEN, S.: *Innovative Nebenschauplätze*. *Kunststoffe* 103 (2013) 9, S. 108–110.
- [10] TECNARO GMBH: Homepage der Tecnaro GmbH. URL: <http://www.tecnaro.de>. (Abrufdatum 16.12.2013).

## Kontakt:



**Manuela Weiß, M.Sc.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Projektingenieurin im Projekt Biopolymere  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

[ma.weiss@oth-aw.de](mailto:ma.weiss@oth-aw.de)



**Prof. Joachim Hummich**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Prodekan, Studiengangleiter MB, KT, PI und IM  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

[j.hummich@oth-aw.de](mailto:j.hummich@oth-aw.de)

# Entwicklung und Aufbau des Einpersonen- Transporters OTH-elo

Prof. Dr.-Ing. Armin Wolfram  
Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Stich

## Einführung

Mechatronische Systeme entstehen durch die synergetische Integration von Mechanik, Elektronik und Informationsverarbeitung. Die Lösung eines Entwurfsproblems erfolgt hierbei sowohl auf mechanischem als auch digital-elektronischem Wege, wobei die gegenseitigen Wechselbeziehungen von besonderem Interesse sind [3].

In diesem Beitrag soll der Aufbau eines selbstbalancierenden Elektrofahrzeugs als mechatronisches System mit einer Achse und zwei Rädern betrachtet werden. Es sind bereits einige industrielle Ausführungen derartiger Systeme bekannt, von denen der Segway (seit 2001, enthält zwei Räder) bzw. der Honda U3-X (seit 2009, enthält nur ein Rad) wohl zu den bekanntesten Vertretern zählen. Auch günstige Nachbauten des Segways wurden bereits veröffentlicht [2].

Als typisches mechatronisches System enthält das Fahrzeug einerseits einen mechanischen Grundaufbau, auf dem die Lenkeinrichtung, die Räder mit Antriebseinheiten sowie alle weiteren Komponenten angebracht sind. Des Weiteren wird Elektronik zur Ansteuerung der Elektromotoren, zur Messung verschiedener Signale, wie die aktuelle Neigung, der Lenkwinkelschlag, die Fahrzeuggeschwindigkeit usw., sowie zur Informationsverarbeitung benötigt. Daneben ist für die Bereitstellung der Funktionalität Software notwendig. Diese beinhaltet einerseits Verfahren zur Auswertung und Überwachung der Messsignale. Andererseits müssen während der Fahrt stets Regler im Eingriff sein, um das Fahrzeug zu stabilisieren. So erfolgt die Steuerung der Fahrzeuggeschwindigkeit durch den Fahrgast ausschließlich durch Gewichtsverlagerung, wobei die notwendige Gegenkraft, um das Fahrzeug in der senkrechten Position zu halten, von den Elektromotoren bereitgestellt wird.

Das Ziel bestand nun darin, in Anlehnung an den Segway ein selbstbalancierendes Elektrofahrzeug zu entwickeln,

## Introduction

Mechatronic systems arise from the synergetic integration of mechanics and electronics with computer control. The design problem is solved both, in a mechanical and a digital-electrical manner, whereby the interaction is of special interest.

This contribution deals with the development of a two-wheeled self-balancing electric vehicle, called "OTH-elo" as a typical mechatronic system. The driver controls the speed intuitively, by leaning slightly forward or backward, respectively. For steering purposes the handle bar can be shifted to the left or right.

The mechanical basic construction comprises a handlebar, the wheels, the drive units and further components. In addition, various electronic devices are required, such as the power stacks for serving the dc-motors, as well as the sensor technology for measuring the pitch angle, the speed and the steering angle. Here the focus is on low cost actuators and sensors.

The software of the system runs on a 32-bit microcontroller. The employed acceleration/gyroscope sensor is evaluated by means of complementary filters. Additionally a state space model of the system is used to design a state controller with integral part, which is employed to keep the vehicle in an upright position.

The OTH-elo will be used as a demonstration object for control engineering and mechatronic lectures.

mit vergleichbaren Regel- und Fahreigenschaften wie das Original. Bezüglich der verbauten Komponenten wurde ein Kostenrahmen von ca. 1000 € zum Ziel gesetzt.

Das Gefährt wird im Folgenden mit „OTH-elo“ bezeichnet, wobei die ersten drei Buchstaben für die Hochschule stehen und die letzten drei Buchstaben auf den elektrischen Antrieb verweisen.



Abbildung 1: Selbstbalancierendes Elektrofahrzeug OTH-elo

## 1 Mechanischer Aufbau

Den Ausgangspunkt der Entwicklung bildete zunächst der mechanische Grundaufbau, der von zwei Maschinenbaustudenten im Rahmen einer Projektarbeit konstruiert und aufgebaut sowie teilweise von der Zentralwerkstatt gefertigt wurde. Im Vorfeld wurden aufgrund der einfachen Ansteuerbarkeit zwei 24-V/500-W-Gleichstrom-Getriebmotoren mit einer Nenndrehzahl von  $375 \text{ min}^{-1}$  (Übersetzung 60:9) ausgewählt und angeschafft. Die im Vergleich zu bürstenlosen Motoren höhere Verschleißanfälligkeit wurde hier in Kauf genommen.

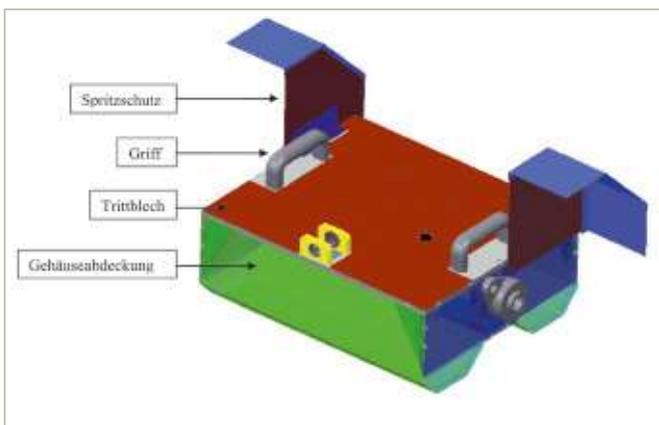


Abbildung 2: Gehäusebaugruppe

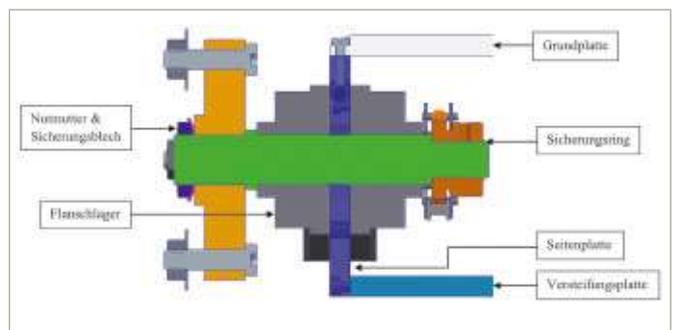


Abbildung 3: Radlagerung (ohne Reifen)

Angesichts der begrenzten Breite der Grundplatte (ca. 460 mm) konnten die beiden Motoren nicht als Direktantrieb nebeneinander montiert werden. Stattdessen wurden die Radachse und die Motorwelle versetzt angeordnet. Die Realisierung der Kraftübertragung erfolgt aufgrund des bereits am Motor vorhandenen Kettenritzels mithilfe eines Kettenantriebs. Die beiden Radwellen sind über jeweils zwei Flanschlager an den Seitenplatten der Grundplatte befestigt und können so die auftretenden Kräfte aufnehmen (vgl. Abb. 3). Als Räder kommen kostengünstige Luftreifen mit Metallfelgen (Durchmesser 400 mm) zum Einsatz.

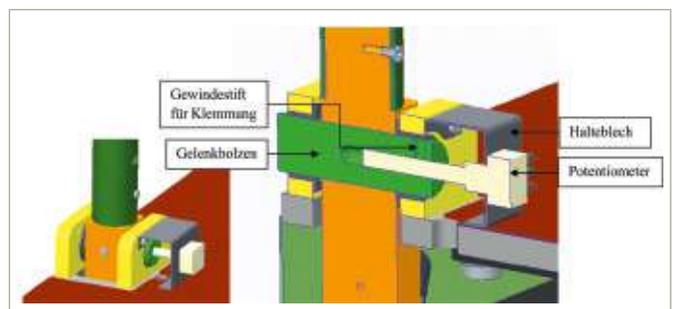


Abbildung 4: Lagerung der Lenkstange mit Potenziometer

Die Lenkstange hat einerseits die Funktion, dass sich der Fahrgast während der Fahrt abstützen kann. Um zudem die Fahrtrichtung vorgeben zu können, ist die Lenkstange am Chassis drehbar gelagert, was mittels kostengünstiger Gleitlager realisiert ist. Der Lenkwinkel wird mithilfe eines Potenziometers erfasst (siehe Abb. 4). Des Weiteren sind zur automatischen Rückstellung der Lenkstange in die senkrechte Position Zugfedern in den Aufbau integriert. Die Festigkeit des Gehäuses bei auftretenden Belastungen wurde mittels FEM-Analyse verifiziert. Demnach tritt bei einer Last von 2000-N eine maximale Verformung von 0,3 mm auf.

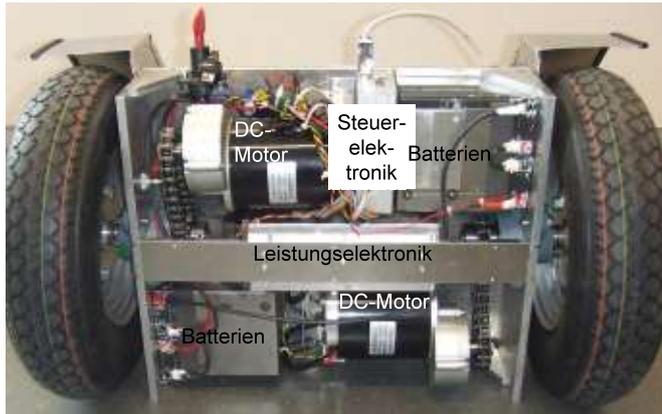


Abbildung 5: Unterseite des Chassis mit Elektronikkomponenten

## 2 Elektronik

Die Elektronik lässt sich in die beiden Teilkomponenten Leistungselektronik und Elektronik zur Informationsverarbeitung mit Messauswertung untergliedern. Zur Spannungsversorgung der Komponenten stehen vier 12-V-Blei-Vlies Batterien (Ladekapazität 7,2 Ah) bereit, die vom Rennwagenteam der Hochschule zur Verfügung gestellt wurden. Die Speisung der Leistungselektronik erfolgt mit einer Spannung von 36 V, wofür drei Batterien in Reihe geschaltet sind. Die Elektronik zur Informationsverarbeitung wird aus Sicherheitsgründen von einer separaten 12-V-Batterie versorgt.

### 2.1 Leistungselektronik

Zur Ansteuerung der beiden Gleichstrommotoren wurden zwei separate Vierquadrantensteller mit Snubber aufgebaut. Als Leistungsschalter kommen MOSFETs zum Einsatz, die angesichts kleiner Speicherladungen an der Steuerelektrode schnell geschaltet werden können. Es lassen sich dadurch vergleichsweise hohe Schaltfrequenzen erreichen, wobei im vorliegenden Fall, zur Begrenzung der Schaltverluste, nur eine Pulsfrequenz von 4 kHz zum Einsatz kommt.

Abbildung 6 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Leistungselektronik (ohne Snubber). Die Treiberschaltung zur Ansteuerung der MOSFETs wurde aus zwei Halbbrückentreibern vom Typ IR2184 realisiert, die die benötigten

Steuerspannungen der Leistungsschalter erzeugen und zudem den notwendigen Schaltverzögern benachbarter Bauelemente zur Vermeidung von Brückenkurzschlüssen berücksichtigen.

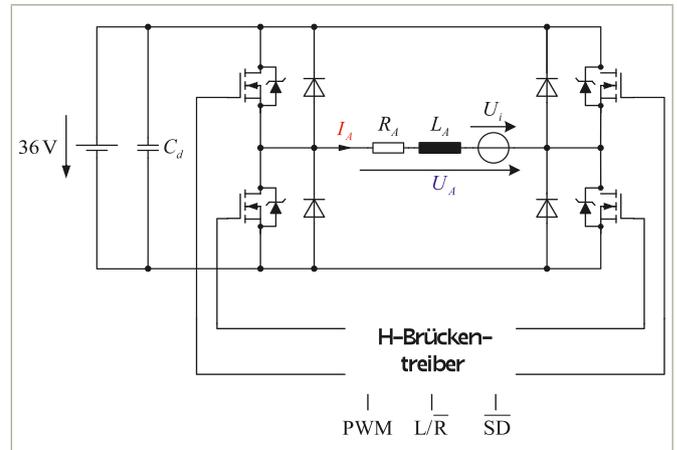


Abbildung 6: Prinzipschaltbild des Vierquadrantenstellers

Die H-Brückenschaltung kann von einem Mikrocontroller unmittelbar mithilfe der digitalen Eingänge SD (Shut-down), das zur Abschaltung der Leistungselektronik führt, dem Richtungssignal L/R sowie dem Signal PWM zur Vorgabe der Pulsweitenmodulation angesteuert werden. Die Leistungselektronik ist so ausgelegt, dass bei einer Schaltspannung von max. 100 V ein dauerhafter Ausgangsstrom von 50 A geliefert werden kann, was in etwa dem doppelten Nennstrom der verwendeten Gleichstrommotoren entspricht.

### 2.2 Sensorik

Den wohl wichtigsten Sensor des Systems stellt der MPU6050 dar, der eine Kombination aus Gyroskop und Beschleunigungsmesser für alle drei Achsen beinhaltet. Dieser lässt sich per I<sup>2</sup>C-Bus an herkömmliche Mikrocontroller anbinden und kann so zyklisch ausgelesen werden. Derartige Sensoren sind für eine Reihe verschiedener Einsatzbereiche, wie z. B. Bewegungssteuerungen, interessant und bei einem Stückpreis von unter 3 Euro sehr günstig erhältlich.

Einerseits messen die Beschleunigungssensoren des MPU6050 kapazitiv die Kraft, die auf eine seismische Masse einwirkt. Durch Bestimmung der auftretenden Gewichtskraft lassen sich die Sensoren zur Winkelbestimmung heranziehen. Wird die Sensorik zusätzlich Beschleunigungen ausgesetzt, so führt dies naturgemäß zu einer Verfälschung der ermittelten Winkelwerte.

Zum anderen wird im Gyroskop eine seismische Masse in periodische Schwingungen versetzt und die bei Drehbewegungen entstehende Corioliskraft kapazitiv gemessen. Auf diese Weise kann die in der jeweiligen Achse auftretende Winkelgeschwindigkeit bestimmt werden.

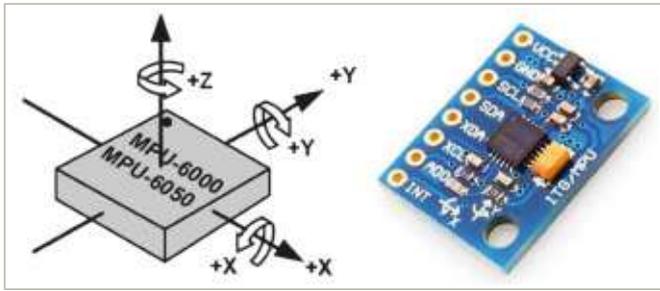


Abbildung 7: Drei Achsen Beschleunigungsmesser/Gyroskop MPU6050

Zur Erfassung der Drehzahl der beiden Räder kommen die Zahnradsensoren ATS692 von Allegro zum Einsatz, die in das Getriebe der Gleichstrommotoren eingebaut werden müssen. Hierfür wurden am Getriebegehäuse Bohrungen angebracht und speziell gefertigte Aluminiumeinsätze für die Sensoren eingeschraubt (vgl. Abb. 8).



Abbildung 8: Zahnradsensor mit Einbauort im Getriebe

Es handelt sich dabei um Halleffekt-Sensoren mit integriertem Permanentmagneten. Die durch die Zahnräder hervorgerufenen Schwankungen des Magnetfelds werden in den Sensoren erfasst und verarbeitet. Die ATS692 sind als Zwei-Draht-Sensoren ausgeführt, deren aktueller interner Zustand durch Variation der Stromaufnahme kommuniziert wird. So tritt nach der Detektion eines Getriebezahns ein schmaler Stromimpuls auf, dessen Impulsbreite die Drehrichtung angibt. Zur Auswertung der Impulse mittels Mikrocontroller wird ein Strom-/Spannungswandler verwendet, der durch einen Komparator mit Schmitt-Trigger-Eingangsstufe den Strom wieder in ein digitales Signal zurückwandelt.

Die beschriebene Drehzahlsensorik ist sehr preisgünstig, lässt sich einfach in das System integrieren und verfügt über eine Auflösung von 60 Pulsen pro Umdrehung, was bei Drehzahlen ab  $100 \text{ min}^{-1}$  als ausreichend erachtet werden kann.

### 2.3 Mikrocontroller

Zur Realisierung der Informationsverarbeitung wurde ein im Labor vorhandenes PIC32 Evaluationboard verwendet, das einen 32-Bit-Mikrocontroller vom Typ PIC32MX795F512L enthält, mit der Möglichkeit zum On-Board-Debugging über USB-Schnittstelle. Der Mikrocontroller verfügt über eine Takt- und

Peripheriebusfrequenz von 80 MHz und besitzt mehr als ausreichend Rechenleistung und Schnittstellen, um die notwendige Informationsverarbeitung des OTH-elos bewerkstelligen zu können. Folgende Schnittstellen des Mikrocontrollers kommen hierbei zur Anwendung:

- UART: Serielle Anbindung eines Servicerechners über RS232 zur Echtzeitausgabe von Messdaten und des aktuellen Status
- I<sup>2</sup>C: Anschluss des MPU6050
- Analogeingänge: Messung der beiden Batteriespannungen, des Spannungsabfalls am Lenkpotenziometer und der Motorströme
- OC: PWM-Signale für die beiden Leistungsteile
- Digitalausgänge: Richtungs- und Freigabesignale der Leistungsteile sowie der Ansteuersignale eines 4x20 LCD-Displays
- Digitaleingänge: Hand- und Fußschalter
- CN: Signale der beiden Zahnradsensoren

Die Elektronik zur Messdatenverarbeitung und Signalumwandlung wurde als Aufsteckboard für das PIC32 Evaluationboard ausgeführt und innerhalb eines Blechgehäuses vor Umwelteinflüssen abgeschirmt (siehe Abb. 5).

## 3 Informationsverarbeitung

Innerhalb des erwähnten PIC32 Mikrocontrollers findet die Informationsverarbeitung der verschiedenen Messsignale statt und es werden daraus die Ansteuersignale für die Leistungselektronik zur Stabilisierung des Fahrzeugs generiert. Die Programmierung der Software erfolgte in der Programmiersprache C.

Um die wesentlichen Messdaten jederzeit verfügbar zu haben, wurde an den Mikrocontroller ein 4-zeiliges LCD-Display angeschlossen. Es werden hier der aktuelle Nickwinkel, der Lenkwinkel der Lenkstange, die mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit, die Werte der Batteriespannungen sowie der Fahrzeugzustand ausgegeben, wobei ca. einmal pro Sekunde eine Aktualisierung der Daten stattfindet.

Um anfallende Messsignale in Echtzeit visualisieren zu können und dadurch die Inbetriebnahme zu erleichtern, ist der Mikrocontroller via RS232-Schnittstelle mit einem Service-PC verbunden. Dafür wurde eigens eine Visualisierungssoftware in Java geschrieben, die eine flexible grafische Ausgabe der Messdaten gestattet. Darüber hinaus stellt die Software eine Schnittstelle zum Auslesen und Ändern interner Variablen des PIC32 bereit, was die Reglereinstellung wesentlich vereinfacht.

Im Rahmen der Inbetriebnahme hat es sich als unangenehme Einschränkung erwiesen, wenn die Datenübertragung der RS232-Schnittstelle über ein herkömmliches serielles Kabel erfolgt. Aus diesem Grund wurden RS232-Bluetooth-Adapter angeschafft, die eine drahtlose Übertragung der Daten ermöglichen.

### 3.1 Auswertung des MPU6050

In Abschnitt 2.2 wurde bereits der 3-Achsen-Beschleunigungsmesser/Gyroskop MPU6050 vorgestellt. Das Problem bei der Auswertung der Winkelwerte besteht darin, dass Erschütterungen die Ergebnisse wesentlich verfälschen. Die Winkelgeschwindigkeit des Gyroskops weist eine geringere Empfindlichkeit auf, ist dafür jedoch Offsetbehaftet. Integriert man den so erhaltenen Messwert auf, so erhält man einen driftenden Winkel.

Es liegt daher die Idee nahe, eine Sensorfusion der beiden Messdaten Winkel und Winkelgeschwindigkeit  $\varphi[k]$  bzw.  $\omega[k]$  durchzuführen. Eine vergleichsweise aufwendige Möglichkeit stellt die Anwendung eines *Kalman-Filters* dar. Es wird hierbei davon ausgegangen, dass den internen Zustandsgrößen und dem Winkelwert weißes Rauschen überlagert ist. Für eine detailliertere Darstellung des Verfahrens sei auf die Literatur verwiesen [7].

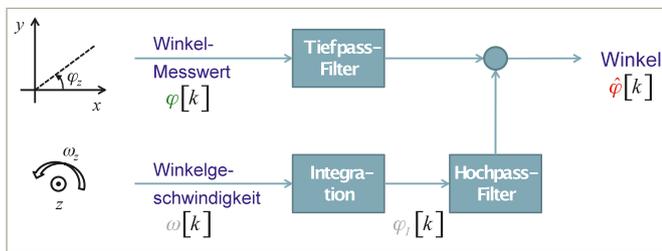


Abbildung 9: Komplementärfilter zur Sensorfusion

Eine einfachere Alternative bildet das sogenannte *Komplementärfilter*. Es liegt die Überlegung zugrunde, dass der Winkelmesswert  $\varphi[k]$  stationär, also bei tiefen Frequenzen, eine hohe Genauigkeit aufweist, während Erschütterungen zu Abweichungen im Bereich höherer Frequenzen führen. Der aufintegrierte Wert  $\varphi_I[k]$  der Winkelgeschwindigkeit zeigt sich dagegen wesentlich robuster gegenüber Erschütterungen und verfügt im Bereich mittlerer und hoher Frequenzen über eine gute dynamische Genauigkeit. Allerdings macht der Offsetdrift der Winkelgeschwindigkeit die stationäre Genauigkeit des Winkelwerts zunichte.

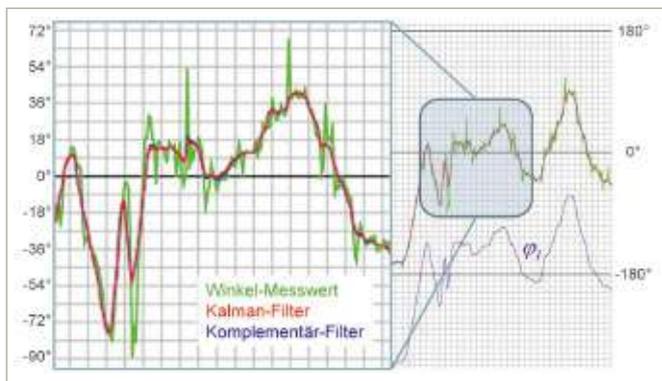


Abbildung 10: Vergleich von Kalman- und Komplementärfilter

Die unterschiedliche spektrale Genauigkeit der beiden Winkelwerte lässt sich zur Realisierung der Sensorfusion nutzen. So werden aus dem Winkelmesswert  $\varphi[k]$  mittels Tiefpassfilter die tiefen Spektralanteile extrahiert, während aus dem durch Integration der Winkelgeschwindigkeit gewonnenen Winkelwert  $\varphi_I[k]$  mittels Hochpass die hochfrequenten Anteile herausgefiltert werden. Durch additive Überlagerung der beiden Teilsignale erhält man einen guten Schätzwert für den tatsächlichen Winkelwert. Die drei Signalverarbeitungsschritte Tiefpass, Integration und Hochpass lassen sich zu der einfachen Differenzgleichung

$$\hat{\varphi}[k] = b \cdot (\hat{\varphi}[k-1] + \omega[k] \cdot T_a) + (1-b) \cdot \varphi[k], \text{ mit}$$

$$b = \frac{1}{1 + 2\pi f_g \cdot T_a}$$

zusammenfassen, wobei  $T_a$  die Abtastzeit und  $f_g$  die 3dB-Grenzfrequenz der Filter bezeichnet. Der Gleichung liegt eine Approximation der Integration mittels Obersummen zugrunde.

Gute Ergebnisse wurden mit einer Grenzfrequenz von  $f_g = 0,6$  Hz erzielt. In Bild 10 ist der Verlauf des Winkel-schätzwerts des Kalman-Filters dem des Komplementärfilters gegenübergestellt. Die beiden Signale zeigen nur kleine Unterschiede und die Anwendung des Komplementärfilters kann somit als ausreichend erachtet werden.

### 3.2 Modellbildung und Regelung

Voraussetzung für den Reglerentwurf ist die Kenntnis eines dynamischen Modells des OTH-elos. Die Modellbildung des *mechanischen Teilsystems* kann z. B. durch Formulierung der Lagrange-Gleichungen durchgeführt werden. Eine Herleitung ist in [1] erläutert, wobei von der vereinfachenden Annahme gleicher Winkelgeschwindigkeiten beider Räder ausgegangen wird. Da die Regelung dafür sorgen soll, dass der Nickwinkel des OTH-elos nur kleine Abweichungen um die senkrechte Nulllage aufweist, wird im Folgenden eine linearisierte Betrachtung durchgeführt.

Zusätzlich ist das Modell des *elektrischen Teilsystems* zu berücksichtigen, dessen Modellgleichungen z. B. [3] entnommen werden können. Angesichts der im Vergleich zum mechanischen System wesentlich schnelleren elektrischen Zeitkonstante kann der Einfluss der Motorinduktivität vernachlässigt werden. Es ergibt sich so ein rein statischer Zusammenhang zwischen den Motorspannungen, der Geschwindigkeit und dem entstehenden Drehmoment.

Durch Anregung der Motorspannungen  $U_A$  mittels Pseudo-Rausch-Binär-Signal und Auswertung des gemessenen Nickwinkels  $\varphi$ , der zugehörigen Winkelgeschwindigkeit  $\omega = \dot{\varphi}$  und der mittleren Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$ ,

konnte durch Anwendung des Verfahrens der kleinsten Fehlerquadrate das Zustandsraummodell des Gesamtsystems

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \ddot{\varphi} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 16,1 & -1,86 & 9,55 \\ -2,30 & 0 & -1,34 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi \\ \dot{\varphi} \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -12,0 \\ 1,68 \end{bmatrix} \cdot U_A$$

$$\varphi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x}$$

identifiziert werden [4]. Anhand der Zustandsgleichungen lässt sich leicht verifizieren, dass es sich um ein instabiles System handelt [5].

Eine gängige Methode zur Lösung derartiger Regelungsprobleme stellt das Verfahren des Zustandsreglers dar. Sämtliche Zustandsgrößen des vorliegenden Systems liegen messtechnisch vor und es lässt sich durch Rückführung der Signale auf den Systemeingang somit eine beliebige Regeldynamik einstellen. Die Eigenwerte des geschlossenen Regelkreises können entweder manuell oder durch Minimierung eines Gütefunktional (Optimalregler) vorgegeben werden [6].

Da sich Zustandsregler als P-Regler interpretieren lassen, besteht ein Nachteil des beschriebenen Ansatzes darin, dass bleibende Regelabweichungen auftreten. Bei einer Gewichtsverlagerung des Fahrgastes ist der Regler somit nicht in der Lage, das System wieder vollständig zurück in die senkrechte Lage zu überführen. Es ist daher zweckmäßig, einen Integralanteil in den Zustandsregler einzufügen, was durch eine Erweiterung des Zustandsraummodells ermöglicht wird.

Abbildung 11 zeigt die Reglerstruktur zur Stabilisierung des OTH-elos, wobei  $\varphi_w$  den Sollwert des Nickwinkels und  $M_z$  das vom Fahrgast auf das Chassis aufgebrachte Störmoment bezeichnet. Die Rückführmatrix

$$\mathbf{k}^T = [k_\varphi \quad k_\omega \quad k_v \quad k_e]$$

der Zustandsgrößen wurde aus dem Zustandsraummodell des Systems durch Vorgabe eines reellen Mehrfachpols berechnet [6].

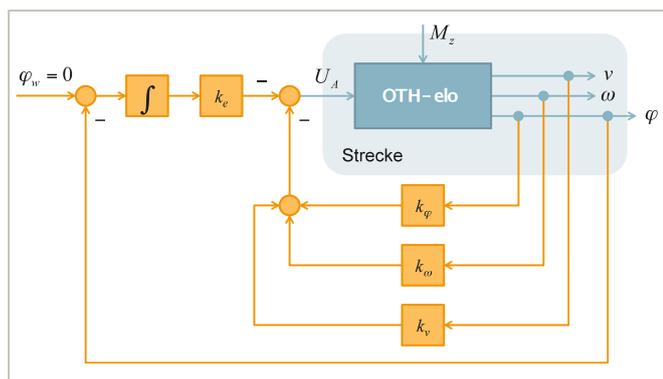


Abbildung 11: Zustandsregler mit Integralanteil

Daneben ist ein überlagerter Regelkreis zur Realisierung der Lenkbewegung nötig. Da die Motoren, angesichts vorhandener Toleranzen, bei gleicher Motorspannung nicht exakt das gleiche Drehmoment liefern, würde es im gesteuerten Betrieb bei Geradeausfahrt zu einem Ausbrechen des OTH-elo kommen. Der überlagerte Regelkreis gleicht diese Unterschiede aus, wobei die Winkelgeschwindigkeit  $\omega_z$  des Gyroskops in z-Richtung als Istwert der aktuellen Lenkbewegung herangezogen wird. Der Sollwert  $\omega_{zw}$  für die Lenkbewegung entspricht dem Winkel der Lenkstange.

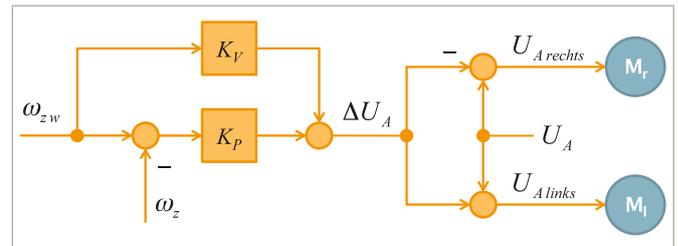


Abbildung 12: Überlagerter Regelkreis für Lenkbewegung

Hinsichtlich des Lenkreglers wurde eine Struktur mit P-Regler und Vorsteuerung gewählt. Während die Vorsteuerung schnell auf geänderte Lenkanforderungen des Fahrgasts reagiert, dient der P-Regler zum Ausgleich der Motortoleranzen.

Die Regelung sowie die Messauswertung werden in einer 200-Hz-Zeitscheibe gerechnet.

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden die wesentlichen Komponenten des an der Hochschule entwickelten selbstbalancierenden Elektrofahrzeugs OTH-elo vorgestellt. Es handelt sich dabei um ein mechatronisches System im klassischen Sinne, da nur durch das synergetische Zusammenspiel der drei Teilkomponenten Mechanik, Elektronik und Informationsverarbeitung die Funktion gewährleistet werden kann. Bei der Entwicklung wurde besonderes Augenmerk auf kostengünstige Sensorik und Aktorik sowie die räumliche Integration der elektrischen und mechanischen Komponenten gelegt.

Für den OTH-elo schlagen Bauteilekosten in Höhe von knapp unter 1000 Euro zu Buche und das ursprünglich gesteckte Kostenziel konnte somit erreicht werden. Im Vergleich dazu kostet die günstigste Version des Segways ca. 8500 Euro.

Ein Vergleich der Regeleigenschaften des „echten“ Segways mit dem OTH-elo ergab leichte Vorteile für den Segway. Dies liegt einerseits daran, dass die Motoren des Segways in etwa über die doppelte Leistung verfügen, sowie an der aufwendigeren Sensorik. Andererseits flossen laut einem Bericht des Handelsblatts ca. 100 Mio. Dollar in die zweijährige Entwicklung des Segways.

Der OTH-elo wird zukünftig als Praxisbeispiel in Regelungstechnik-, Messtechnik- und Mechatronikvorlesungen zum Einsatz kommen. Zudem ist eine zweite Version mit verbesserter Aktorik und Sensorik angedacht.

---

### **Literaturverzeichnis**

- [1] Adamy, J. (2014): *Nichtlineare Systeme und Regelungen*, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin.
- [2] Elektor (2009): *Elektor Wheelie*, Elektor Zeitschrift; Ausgaben 6, 7-8, 9/2009, Elektor-Verlag, Aachen
- [3] Isermann, R. (2008): *Mechatronische Systeme – Grundlagen*, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin.
- [4] Isermann, R. und M. Münchhof (2010): *Identification of Dynamic Systems – An Introduction with Applications*, Springer Verlag, Berlin.
- [5] Lunze, J. (2012): *Regelungstechnik 1 – Systemtheoretische Grundlagen*, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen, 9. Auflage, Springer Verlag, Berlin.
- [6] Schulz, G. und K. Graf (2013): *Regelungstechnik 2 – Mehrgrößenregelung*, Digitale Regelungstechnik, Fuzzy Regelung, 3. Auflage, Oldenbourg Verlag, München.
- [7] Welch, G. und G. Bishop (2006): *An Introduction to the Kalman Filter*. TR 95-041, Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill.

### **Kontakt:**



**Prof. Dr.-Ing. Armin Wolfram**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

[a.wolfram@oth-aw.de](mailto:a.wolfram@oth-aw.de)



**Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Stich**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

[j.stich@oth-aw.de](mailto:j.stich@oth-aw.de)

# world of cabling systems

BORDNETZE | KOMPONENTEN | ENGINEERING



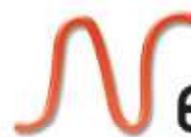
**ORANGE** ⚡ **POWER**

## TECHNIK FÜR MOBILITÄT MIT ZUKUNFT!

Ihre Einstiegsmöglichkeiten bei uns:

Duales Studium  
Praktika- und Werkstudententätigkeit  
Direkteinstieg nach Studium



 **nexans**  
autoelectric

Nexans autoelectric GmbH  
Vohenstraußer Straße 20  
D-92685 Floß

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

4 KONTINENTE | 23 STANDORTE | 8.500 MITARBEITER

# MotorBrain – Drivetrain Development for the 3<sup>rd</sup> Generation of Electric Vehicles

Johannes Zrenner, M.Eng.  
Heike Lepke, M.Eng.  
Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

## Zusammenfassung

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts MotorBrain wurde an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden an der Weiterentwicklung von Antriebstechnik und Steuerungskonzepten für Antriebsstränge elektrischer Fahrzeuge der 3. Generation gearbeitet. Forschungsziel war dabei eine allgemeine Effizienzsteigerung von Elektrofahrzeugen um bis zu 20 %, sowie das Entwickeln intelligenter Integrationslösungen für passive Komponenten, Sensoren und Energiewandler, um u. a. den Kühlaufwand zu verringern. Daneben wurde an neuartigen Antriebskonzepten geforscht, mit dem Ziel, die Abhängigkeit von Seltenerden-Permanent-Magneten bei der Motorentwicklung zu verringern. Aber auch Sicherheitsthemen im Zusammenhang mit Elektrofahrzeugen hatten einen besonderen Stellenwert. So sollte ein sensorgeführtes intelligentes Steuerungssystem entwickelt werden, in welches außerdem verschiedene Redundanzkonzepte einfließen sollten, um das Gesamtsystem fehlersicherer zu machen.

Um diese Ziele zu erreichen, wurde beispielsweise auf die Verwendung eines Multicore-Prozessors als zentrale Steuerungseinheit des Fahrzeugs zurückgegriffen, um – durch das Ausnutzen der Mehrkernarchitektur – ein leistungsfähiges redundantes Sicherheits- und Steuerungskonzept optimal umsetzen zu können. Um die Abhängigkeit von Selten-Erdmetallen aus China zu verringern, wurden beispielsweise die Möglichkeiten von SMC-Motoren untersucht.

## Abstract

Within the framework of the European research project MotorBrain, the University of Applied Sciences of Amberg-Weiden was working on the further development of drivetrain technologies and control concepts for powertrains of the 3<sup>rd</sup> Electric Vehicle Generation. Research objective was a general energy efficiency improvement of up to 20 %, as well as the development of intelligent integration concepts for passive components, sensors and power converters to reduce, among other things, cooling requirements. In addition, research was conducted on new drivetrain concepts in order to alleviate the dependency on rare-earth magnets. The focus was also on safety issues of the next generation of electric vehicles. Therefore a sensor-guided, intelligent control system should be developed, also by including different redundancy concepts, to increase the safety of the overall system.

For example, a multicore processor was used as the central engine control unit to optimally realize an efficient, redundant safety and controlling system by utilizing the multicore architecture. In order to reduce the dependency on rare-earth metals from China, for example, the possibilities of SMC-motors were studied.

## 1 Einleitung

Nach der von ERTRAC<sup>1</sup>, EPoSS<sup>2</sup> und SmartGrid Technology Platform veröffentlichten „electrification roadmap“ [1] geht 21 % des fossilen Brennstoffverbrauchs sowie 60 % der weltweiten Ölförderung zulasten von Straßenverkehr. Der Schritt in Richtung hybrider und vollelektrischer Fahrzeuge ist deswegen ein notwendiger Schritt zur Einsparung von Primärenergie und Emissionsreduzierung. Langfristig erfordert dies allerdings eine umfassende Anwendung neuer Technologien, darunter beispielsweise die Anpassung von Nanoelektronik an die Anforderungen der Elektromobilität. Mittelfristig stehen andere wichtige Aspekte im Vordergrund (z. B. Effizienz, Rohstoffmangel, Kosten), welche durch einen integrierten Ansatz beim Design und bei der Produktion von Elektromotoren angegangen werden müssen.

Aus diesem Grund wurde 2011 das Forschungsprojekt MotorBrain ins Leben gerufen, welches sich mit dem folgenden Themenschwerpunkten auseinandersetzen sollte:

- Leistungs- und Hochspannungselektronik sowie intelligente miniaturisierte Systeme für Hybrid- und Elektrofahrzeuge
- Entwicklung ausfallsicherer und fehlertoleranter Komponenten sowie umfassender (Sub-)Systeme für die Fahrzeugelektronik

Das Projekt profitierte hierbei von einem ausgeglichenen und starken Projektkonsortium, darunter Halbleiterhersteller, Anwendungspartner (OEMs), Forschungsinstitute und Universitäten. Insgesamt waren 30 europäische Partner (Abbildung 1) aus 10 Ländern beteiligt, darunter auch die Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, Fakultät Elektro- und Informationstechnik.

## 2 Technische Zielsetzung

Im Moment orientieren sich elektrische Maschinen im Automobilbereich (Motoren und Generatoren) noch sehr an der industriellen Antriebstechnik, wo sich die Anforderungen in Bezug auf Kosten, Zuverlässigkeit und Einsatzprofil völlig unterscheiden. Hinzu kommt, dass sich die Entwicklung von Elektrofahrzeugen sehr bald mit der Knappheit und den hohen Kosten von Rohstoffen (v. a. Kupfer und Seltenerden-Permanent-Magneten), insbesondere hinsichtlich einer angestrebten Massenproduktion, auseinandersetzen muss. Das Projekt MotorBrain beschäftigt sich in diesem Zusammenhang mit der Verbesserung der folgenden technischen Teilaspekte von Elektrofahrzeugen (vgl. [2]):

### 2.1 Energieeffizienz

Die Energieeffizienz eines heutigen Elektroantriebs ist in Abbildung 2 dargestellt. Sie setzt sich aus dem Wirkungsgrad der verschiedenen Teilkomponenten des Antriebs zusammen, welche zu einer Gesamteffizienz des Elektrofahrzeugs von 60 % führen.



Abbildung 1: MotorBrain-Konsortium

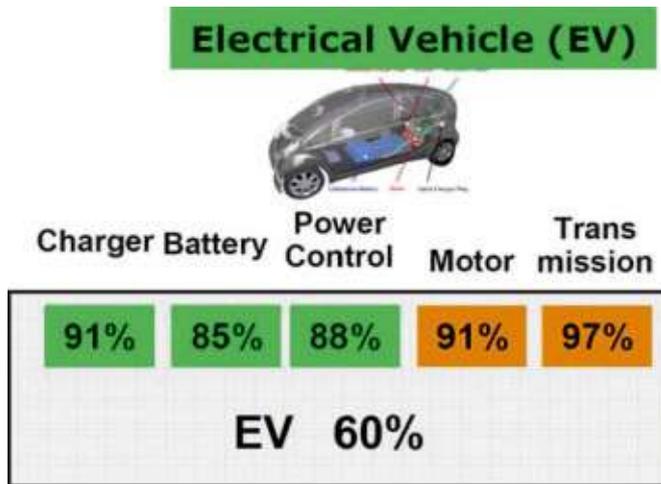


Abbildung 2: Energieeffizienz eines heutigen Elektrofahrzeugs

Das Projekt MotorBrain hat sich zum Ziel gesetzt, die Gesamteffizienz von Elektrofahrzeugen um 20 % auf bis zu 75 % zu steigern. Dazu sollten neue Motor- und Batteriekonzepte mit integrierter Leistungselektronik entwickelt werden.

## 2.2 Redundantes Sicherheitskonzept

In einem heutigen Elektrofahrzeug werden redundante Überwachungssysteme nicht eingesetzt (aufgrund der Kosten und Komplexität); im Falle eines Fehlers in z. B. einer Motorphase ist das komplette System gestört. Das Projekt MotorBrain hatte sich das Ziel gesetzt, ein redundantes, allumfassendes Sicherheitskonzept zu entwickeln um Sicherheit, Zuverlässigkeit und Effizienz zu verbessern. Der gesamte Antriebsstrang, einschließlich der Maschinen, Inverter, Energieversorgung, Sensoren und Steuerungen, inklusive der Fehlerüberwachung selbst, sollte dadurch fehlertoleranter werden.

## 2.3 Sichere Steuerungsarchitektur

Stand der Technik ist der Einsatz von „Singlecore“-Prozessoren als Steuerungseinheiten, welche speziell an die Anforderungen eines bestimmten Antriebssystems angepasst sind. Im Projekt MotorBrain sollte deswegen an einer besseren Wiederverwendbarkeit von Steuerungseinheiten gearbeitet werden. Vor allem wegen der Umsetzung eines höheren Sicherheitsgrades (ASIL-D-Klassifizierung) und besserer Fehlertoleranz sollten Mehrkernprozessoren als Steuerungseinheiten herangezogen werden.

## 2.4 Packaging

In aktuellen Elektrofahrzeugen sind Inverter, Konverter, Elektromotor und Batterie separate Einheiten, welche viel Platz und Verkabelungsaufwand beanspruchen. Dies führt zu einer hohen Komplexität, EMV-Problematik aufgrund der hohen Ströme zwischen Inverter/Konverter und Elektromotor/Batterie sowie Kühlaufwand für jede

einzelne Komponente. Das Projekt MotorBrain hatte sich deswegen eine bessere Integration von Leistungselektronik mit Motoren und Speichersystemen zum Ziel gesetzt. Durch die Integration von Leistungselektronik in das Motor/Batteriegehäuse können sich diese dieselben Kühlkreisläufe teilen, außerdem wurde eine Effizienzsteigerung durch die kürzere Anbindung erwartet.

## 2.5 Elektroantrieb inklusive Inverter

Die heute in Elektrofahrzeugen eingesetzten 3-phasigen Elektromotoren, welche auf Permanent-Magneten basieren, weisen eine eingeschränkte Effizienz und Sicherheit ohne Fehlertoleranz auf. Des Weiteren sind sie sehr abhängig von Selten-Erdmetallen aus China. Um Effizienz und Sicherheit zu steigern sowie materialabhängige Kosten zu reduzieren, sollte das Projekt MotorBrain auf verschiedenen Gebieten forschen:

1. Neue Maschinenkonzepte, basierend auf Mehrphasenmotoren (z. B. 6 Phasen) mit höherer Drehmoment-/Leistungsdichte und weniger Seltenerden-Permanent-Magneten.
2. Kostengünstige, hoch automatisierte Fertigungsprozesse und Recycling durch die Verwendung von weichmagnetischen Pulververbundwerkstoffen (SMC, siehe auch [3]). SMC-Motoren haben verschiedene Vorteile im Vergleich zu traditionellen Motoren: kleiner, leichter, effizienter mit geringerem Selten-Erdmetallanteil, geeignet für die automatisierte Produktion mit verbesserter Recyclebarkeit. Daneben sollte aber auch an anderen Maschinentypen mit ähnlichen Eigenschaften geforscht werden.
3. Neuartige Konzepte für leistungsstarke, mehrphasige Inverter mit dem Fokus auf Redundanznutzung, um Sicherheit, Fehlertoleranz und Effizienz zu steigern. Des Weiteren sollte sich die Forschung auf die Unterstützung höherer Frequenzen konzentrieren, um Hochgeschwindigkeitsmotoren (d. h. bis zu 15000 rpm) zu ermöglichen, welche eine weit höhere Schaltgeschwindigkeit benötigen.

## 2.6 Energiespeichersysteme

Die heutigen Speichersysteme in Elektrofahrzeugen basieren auf Hochleistungs-Lithium-Ionen-Zellen. Diese weisen allerdings verschiedene Schwachstellen auf, darunter die niedrige Energiedichte, geringere Effizienz aufgrund mechanischer Energiewandlung, die große Dimensionierung der Zelle sowie deren Gewicht und schließlich die geringe Stromdichte während der Aufladung. Das Projekt MotorBrain forscht in diesem Zusammenhang an einer höheren Energiedichte des Batteriepacks und einer Erhöhung der nutzbaren Batterieenergie (z. B. durch die Verwendung neuartiger chemischer Stoffe). Des Weiteren sollte ein intelligentes Batteriepack entwickelt werden, mit Batterieüberwachung auf Zellen-ebene und einem neuartigen Batteriemanagementsystem.

### 3 Erreichte Ergebnisse

#### 3.1 Systembeschreibung des MotorBrain-Antriebskonzepts

Der Antrieb ist für Fahrzeuge der Klasse A und B (z. B. Volkswagen Polo oder Golf) mit einem Gewicht von ungefähr 1000–1300 kg ausgelegt und basiert auf einem permanenterregten Synchronmotor (PMSM) mit formgepresstem Rotor, integrierter Sensorik und Leistungselektronik. Die Neuerung dieses Antriebs ist ein höchst betriebssicherer mehrphasiger Motor mit erweiterter Funktionalität, wie integrierte Wechselrichter, Leichtbauweise, effiziente Produzierbarkeit, hohe Rotorgeschwindigkeiten (ca. 13.000 U/min) und eine verbesserte Effizienz. Durch gezielte Integration wurden Synergien ausgenutzt, um die Bauform zu verbessern und das Kühlsystem zu vereinfachen. Die Leistungselektronik stellt eine unabhängig montier- und testbare Einheit dar, die direkt mithilfe von 18 Steckvorrichtungen mit den Motorspulen verbunden wird. Auf der runden Platine sind 9 Phasen symmetrisch und sternförmig angeordnet, die zudem über Sensoren zur Messung des Stroms, der Spannung und der Position des Rotors verfügen. Besondere Aufmerksamkeit wurde der Erkennung von abweichendem Verhalten des Motors beim Starten gewidmet. Dazu wurden Temperatursensoren in den Motor integriert. Diese Sensoren ermöglichen eine Überwachung des Motorzustands in Echtzeit und zudem ein aktives Motormanagement, das kritische Betriebszustände des Motors verhindert. Verglichen mit fremderregten Synchronmaschinen (EESM) und permanenterregten Synchronmaschinen, welche auf Seltene-Erden-Magneten basieren, ist der entwickelte Klauenpolmotor nicht auf Seltene Erden angewiesen und benötigt zudem keine Schleifringe, die oftmals eine potenzielle Fehlerquelle darstellen. Darüber hinaus zeigt der Klauenpolmotor zusätzliche Sicherheitseigenschaften, indem die Induktivität erhöht wird, was einen verringerten Kurzschlussstrom zur Folge hat. Mit Ferritmagneten wird die induzierte Spannung auf einen unkritischen Wert begrenzt, während die Klauenpolbauweise für zusätzliches Drehmoment sorgt. [3]

Abbildung 3 gibt einen Überblick über die im Projekt MotorBrain entwickelten Komponenten, die mit dem Antrieb zusammenhängen. Die neuartigen Motoren werden über Batterien versorgt und mit einer ECU (Engine Control Unit) von Infineon gesteuert, die auf der AURIX TriCore-Architektur basiert. Die ECU nutzt zur Steuerung die Signale von eigens entwickelten Sensoren, z. B. die Winkel- und Stromsensoren von NXP und Infineon. Infineon lieferte zudem schnellschaltende IGBT-Wechselrichter, die in das Leichtbaugehäuse von ZF integriert wurden. Der Stator für den Motor wurde von Egston in Kooperation mit Siemens hergestellt und der Hochgeschwindigkeitsrotor vom ILK – TUD (Institute of Lightweight Engineering and Polymer Technology) in enger Zusammenarbeit mit Siemens und Höganäs.

Was Sicherheit, Steueralgorithmen und Simulation betrifft, arbeitete ZF, Infineon und Siemens eng mit zahlreichen Projektpartnern zusammen.



Abbildung 3: Systemüberblick des Antriebs

#### 3.2 Mechanischer Aufbau

Um die Anforderungen von VW zu erfüllen, wurden zwei verschiedene Ansätze für das mechanische Design betrachtet: die bereits eingeführte Klauenpolbauform und ein neu entwickelter IPM-Motor (Interior Permanent Magnet). Bewertungskriterien waren unter anderem die Integrierbarkeit, elektromagnetische Eigenschaften sowie mechanische und elektrische Sicherheit.



Abbildung 4: Aufbau des Klauenpolrotors

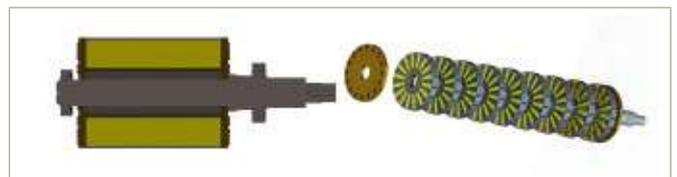


Abbildung 5: Aufbau des IPM-Rotors

Zusätzlich zum Rotor wurden während der Entwicklung auch die peripheren Komponenten und das Gehäuse berücksichtigt. Dadurch wurden alle in Abbildung 6 dargestellten Komponenten umkonstruiert, um die Anforderungen zu treffen.

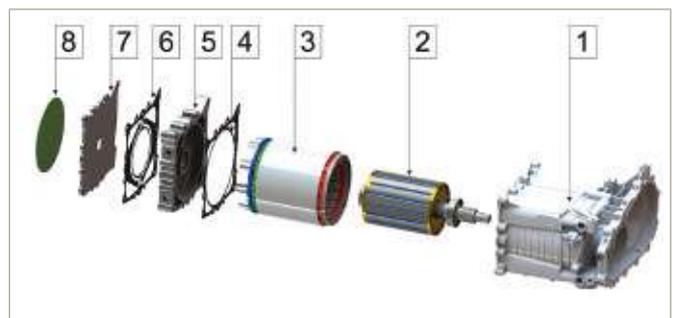


Abbildung 6: Explosionszeichnung des IPM-Antriebs

- (1) Gehäuse von ZF mit integriertem Getriebe.
- (2) Rotor, der entweder als Klauenpol- oder als IPM-Rotor ausgeführt wird.
- (3) Zeigt den neu entwickelten neunphasigen Stator mit dem Anschlusskonzept für den Wechselrichter und den Sternpunkt.
- (4) Dichtung, die den Kühler des Motorgehäuses mit dem Wechselrichter verbindet.
- (5) Lagerschild: Trägt das Gleitlager für die Welle und dient als Auflageplatte für den Wechselrichter.
- (6) Dichtung, die das Lagerschild mit der Bodenplatte des Wechselrichters verbindet.
- (7) Bodenplatte des Wechselrichters
- (8) Wechselrichter mit Leistungsmodulen, Zwischenkreiskondensatoren und der Treiber- und Steuerungsplatine. Er kann direkt auf die Bodenplatte gesetzt werden. [3]

### 3.3 Sensorgeführtes Steuerungssystem

Die entwickelte ECU-Plattform zur Steuerung des 9-phasigen Motors setzt sich aus 3 einzelnen Boards zusammen (Abbildung 7), welche ihren Namen nach unterschiedliche Funktionen aufweisen. Das Controllerboard enthält mit dem AURIX-Tricore-Prozessor die eigentliche Motorsteuerung sowie deren Peripherie und Schnittstellen. Das Driverboard ist für die Spannungsversorgung der drei Boards zuständig, zudem enthält es den IGBT-Gate-Treiber. Das Powerboard enthält schließlich die IGBT-Wechselrichter und ist in diesem Kontext u. a. für deren Gleichspannungsversorgung zuständig.

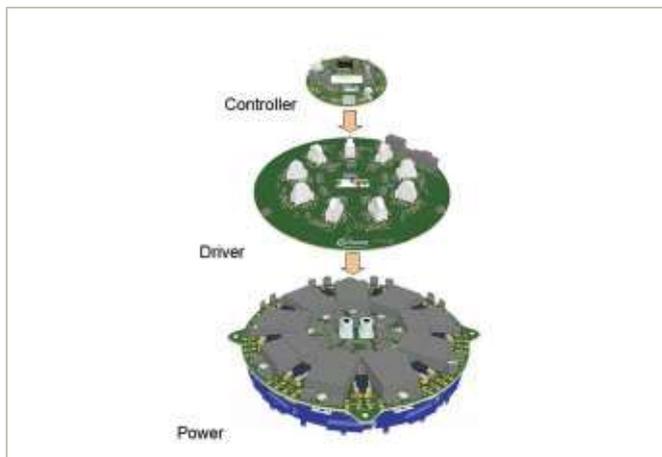


Abbildung 7: Board Stack

Aufgrund der runden Form kann die ECU-Plattform direkt an der axialen Seite des Motors angebracht werden (siehe auch (8), Abbildung 6). Die 9 Phasenanschlüsse am Motorlagerschild können direkt an das Powerboard angeschlossen werden.

Die sog. feldorientierte Regelung (englisch: field-oriented control, FOC) regelt den Wechselstrom, der dem Motor zugeführt wird, um das gewünschte Antriebsmoment abhängig vom aktuellen Systemzustand zu generieren.

Inverter und Motor agieren je nach Systemzustand unterschiedlich. So kann ein negatives Antriebsmoment beispielsweise ein Aufladen der Batterie bedeuten, für den Fall, dass diese nicht mehr voll ist. Der aktuelle Systemzustand ist dabei von verschiedenen physikalischen Größen abhängig:

- Phasenströme
- Winkelposition der Motorwelle
- DC-Link-Spannung
- Temperatur in Stator, Rotor und den IGBT-Modulen

Diese Größen werden innerhalb des Systems durch Sensoren gemessen.

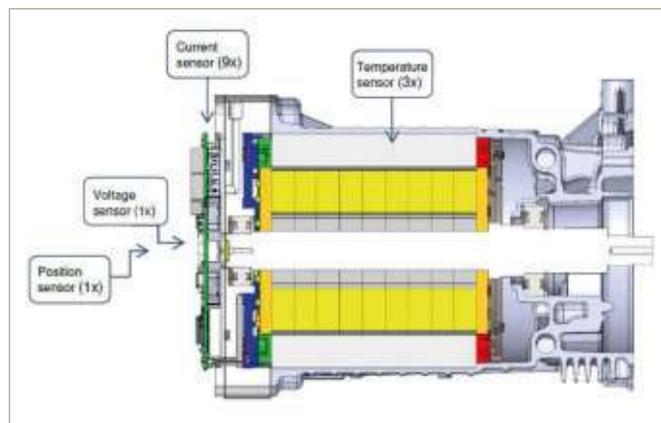


Abbildung 8: Sensoren im 9-phasigen System

Die Software für die FOC ist in den AURIX implementiert, und zwar derart, dass diese dessen Multicore-Architektur substanziell ausnutzt. Die Überwachungsfunktionen sind in einem Kern programmiert, während die Steuerungsalgorithmen in einem anderen untergebracht sind. Die Steuerung umfasst die Generierung von PWM-Signalen, welche aus dem angeforderten Drehmoment und dem Zustand der Überwachungsfunktionen (zur Aufrechterhaltung der Systemsicherheit) berechnet werden. Durch die vollständige Nutzung eines Kerns für die Systemüberwachung in Echtzeit wird die sicherheitsrelevante Redundanz des Steuerungssystems erreicht. [4]

## 4 Arbeiten der OTH Amberg-Weiden

Die Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, Fakultät Elektrotechnik, Medien und Informatik, hat innerhalb des Projekts an verschiedenen Softwarethemen mitgewirkt und dabei verschiedene Funktionalitäten in der AURIX-Motorsteuerung implementiert.

### 4.1 Erstellen einer erweiterten Hardwareabstraktionsschicht für das CAN-Modul der AURIX ECU

Für den Hardware-Zugriff auf das CAN-Interface der AURIX ECU bedarf es verschiedener Registerinstellungen, um dieses entsprechend konfigurieren zu können. Es macht Sinn, diese mit einer Softwareschicht in einfacher Weise

bedienbar zu machen. Zusätzlich zur normalen Hardwareabstraktionsschicht wurde eine weitere Abstraktionsschicht für die Handhabung einer CAN-Matrix (Tabellenstruktur mit Informationen zu allen CAN-Botschaften) im dbc-Dateiformat (Quasi-Standard für CAN-Matrizen der Firma Vector Informatik) integriert. Diese zusätzliche Schicht kann dann mithilfe der Informationen aus der CAN-Matrix eine Formatierung der empfangenen Nachrichten gewährleisten und damit der jeweiligen Anwenderapplikation einen Teil der Arbeit abnehmen.

Um dies zu bewerkstelligen, müssen die benötigten CAN-Nachrichten mit ihren beinhaltenden Signalen zunächst in geeigneter Weise definiert werden. Ist dies geschehen, kann beispielsweise mithilfe dem CANdb++ Editors von Vector eine CAN-Matrix erstellt werden. Um den Inhalt der dbc-Datei in der Anwenderapplikation verwerten zu können, muss dieser in geeignetem Quellcode vorliegen. Um diese Übersetzung effektiv zu gestalten, wurde an der OTH Amberg-Weiden ein Windows-Tool (Abbildung 9) entworfen, welches die automatische Umwandlung des dbc-Dateiformats in eine C-Source und C-Header-Datei gewährleistet.



Abbildung 9: DBC-Konverter-Tool

Dazu werden innerhalb der Header-Datei entsprechende Strukturen für die Informationen aus der dbc-Datei angelegt, welche in der Source-Datei schließlich für die verwendeten CAN-Nachrichten und -Signale definiert werden. Die CAN-Nachrichten und -Signale liegen dann als globale Variablen vor, die auf sehr einfache Weise von der jeweiligen Anwenderapplikation bedient werden können.

#### 4.2 Entwicklung einer Flash-over-CAN-Funktionalität für die AURIX ECU

Im Rahmen einer Master- und Bachelorarbeit wurde an der OTH Amberg-Weiden eine Möglichkeit entwickelt den Flashspeicher des AURIX-Prozessors mittels CAN-Kommunikation zu programmieren. Neben der Erarbeitung eines allgemeinen Konzeptes für diese Aufgabenstellung gehörte dazu die Erstellung des Bootloaders in einem geschützten Speicherbereich des AURIX sowie einer Windowsanwendung als GUI zur Steuerung des Flashvorgangs (Abbildung 10).

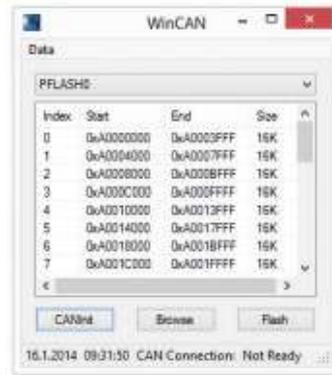


Abbildung 10: Windows-Programmingtool

Mit dem entwickelten Flash-over-CAN-Verfahren kann ein robuster Programmiervorgang für eine AURIX ECU durchgeführt werden, der verschiedene Sicherheitsaspekte berücksichtigt:

- Integrität der programmierten Flashware sowie des übertragenen Flashtreibers
- Authentizität des Programmiergeräts
- Integrität der verwendeten Binärdateien (Flashware, Flashtreiber)
- Kontrollierte Buskommunikation

Das entwickelte Flash-over-CAN-Verfahren ist damit kompatibel mit dem bestehenden Flashloader-Standard der Herstellerinitiative Software (HIS [6]), deren Forschungsarbeit auch Ausgangspunkt für diese Arbeit darstellte.

#### 4.3 Implementierung einer Diagnosefunktionalität zur Überwachung und Steuerung von Prozessordaten via Ethernet

Um einzelne Kenndaten dynamisch auslesen zu können, verfügte das zuerst verwendete AURIX-Entwicklungsboard u. a. über eine Ethernetschnittstelle. Da der AURIX-Demonstrator TC2D5 noch nicht über ein integriertes Ethernetmodul verfügt, wurde auf den separat auf dem Board befindlichen Ethernetchip (WIZnet W5100) zurückgegriffen, der seriell empfangene Daten des Mikrocontrollers in ein entsprechendes Ethernetformat konvertiert. Die einzelnen Teilarbeitsschritte, die im Rahmen der softwaretechnischen Umsetzung durchgeführt wurden, lassen sich dabei wie folgt gliedern:

1. Aufbau einer SPI-Kommunikation zwischen AURIX und WIZnet-Chip
2. Konfiguration des WIZnet-Chips
3. Erstellen einer Windowsanwendung zur Entgegennahme und Visualisierung sowie Ansteuerung von Prozessordaten (Abbildung 11)

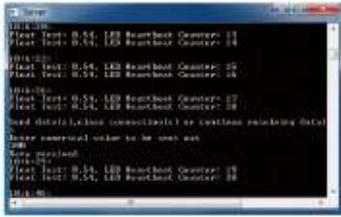


Abbildung 11: Konsolenanwendung zur Visualisierung und Ansteuerung von Prozessordaten

#### 4.4 Implementierung einer Funktionalität zur Messung von Rotortemperaturdaten

Die Rotortemperaturen werden mithilfe eines Transmitters über Funk an ein Receivermodul übertragen. Da Letzteres nicht direkt an das AURIX-Board angebunden werden konnte, sondern indirekt über USB-Schnittstelle an einem PC, von welchem die Daten dann via CAN an den AURIX-Prozessor weitergeleitet werden, war diese Funktionalität nur für den Prüfstand vorgesehen. Diese Tätigkeit gliederte sich, allein der dabei beteiligten Hardwareelemente wegen, in verschiedene Teilarbeitsschritte:

1. Inbetriebnahme des Transmittermoduls am Rotor, d. h. Programmierung der entsprechenden Transmittersteuerung hinsichtlich der Nutzung des Temperatursensors sowie des RF-Transmitters
2. Inbetriebnahme des Receivermoduls, d. h. Kommunikationsaufbau der Funkverbindung sowie der USB-Schnittstelle
3. Erstellung einer Windowsanwendung zur Entgegennahme, Visualisierung und Weitergabe der Temperaturmessdaten an das AURIX-Board über ein am PC angebrachtes CAN-Interface

#### 4.5 Implementierung einer Funktionalität zur Messung von IGBT-Temperaturen

Die Motorsteuerung überwacht ebenfalls die Temperaturen der IGBT-Module, welche mittels integrierter NTC-Sensoren gemessen werden können. Die analogen Messsignale werden von einem separaten A/D-Wandler IC (d. h. nicht mit dem internen A/D-Modul der AURIX ECU) konvertiert, von welchem diese wiederum per SPI-Kommunikation abgefragt werden können. An der OTH Amberg-Weiden wurde die Inbetriebnahme des A/D-Wandlers durchgeführt sowie die Skalierung der ausgelesenen Rohdaten in Temperaturmesswerte.

### 5 Ausblick

Mit der zunehmenden Verknappung von Rohöl sowie steigenden CO<sub>2</sub>-Emissionen inmitten des Klimawandels, wird das Thema Elektromobilität auch in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen. Noch sind Elektrofahrzeuge auf den Straßen kaum vertreten, im Vergleich zu einem Pkw mit Verbrennungsmotor weisen diese noch verschiedene Schwachstellen auf. Neben der noch fehlenden

Infrastruktur für Ladestationen werden von vielen Kunden beispielsweise Einschränkungen in der Fahrreichweite bemängelt. Neben besseren Akkukonzepten bedürfen die Leistungseinschränkungen von Elektrofahrzeugen auch spezieller Designs, um das Gesamtgewicht des Fahrzeugs so gering wie möglich zu halten. Dennoch wurden in den letzten Jahren zunehmend technische Fortschritte im Bereich der Elektromobilität erzielt, aber auch der starke Preisverfall bei Akkus könnte die Verbreitung von Elektrofahrzeugen bald signifikant verändern.

Die Innovationen des Projekts MotorBrain tragen einen Teil zu diesem Fortschritt bei. So konnte mit der Integration von Motor, Zahnradgetriebe und Inverter das Gewicht des Antriebs um ca. 15 %, d. h. von 90 kg zu weniger als 77 kg reduziert werden. Dies spiegelt sich letztlich in der Reichweite des Fahrzeugs wider. Ein mittelgroßer Wagen mit einem MotorBrain-Elektromotor und einer Leistung von 60 Kilowatt (entspricht in etwa 80 PS) kann bis zu 30–40 Kilometer weiter fahren, als heutige Elektrofahrzeuge mit ihrer durchschnittlichen Reichweite von 150 km per Akkuladung. Zudem waren die MotorBrain-Partner erfolgreich in der Entwicklung eines Motors, der ohne die Verwendung von Seltenerdmetallen auskommt, welche aktuell einen wesentlichen Kostentreiber in Hybrid- und Elektrofahrzeugen darstellen. Dazu griff das Forschungsprojekt für den Elektromotor auf kostengünstigere Ferritmagnete zurück und kompensierte die geringere Leistung, im Vergleich zu einem Seltenerden Permanentmagneten, durch den speziell entwickelten Hochgeschwindigkeitsrotor. [5]

Die Ergebnisse des Projekts MotorBrain stehen somit für den technischen Fortschritt, der sich aktuell im Bereich der Elektromobilität vollzieht, und geben eine Vision davon, wie stark sich der Markt für Elektrofahrzeuge in Zukunft vergrößern könnte.

---

## Fußnoten

- <sup>1</sup> European Road Transport Research Advisory Council
- <sup>2</sup> The European Technology Platform on Smart Systems Integration

---

## Referenzen

- [1] ERTRAC, „*Electrification Roadmap*,“ 2012. [Online]. Available: [http://www.ertrac.org/uploads/documentsearch/id31/electrification\\_roadmap\\_june2012\\_62.pdf](http://www.ertrac.org/uploads/documentsearch/id31/electrification_roadmap_june2012_62.pdf).
- [2] MotorBrain, „*Technical Annex*,“ 2010.
- [3] A. Hamler, „The use of soft magnetic composite materials in synchronous electric motor,“ *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, pp. e816-e819, 2006.
- [4] J. Zrenner, „*Deliverable D3.5, Design of a configurable powertrain control with sensor guiding*,“ 2014.
- [5] Herstellerinitiative Software. [Online]. Available: <http://www.automotive-his.de/>.

Weitere Informationen können unter [www.motorbrain.eu](http://www.motorbrain.eu) gefunden werden.

## Kontakt:



**Johannes Zrenner, M.Eng.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien  
und Informatik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg



**Heike Lepke, M.Eng.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien  
und Informatik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

[h.lepke@oth-aw.de](mailto:h.lepke@oth-aw.de)



**Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien  
und Informatik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

[a.hoess@oth-aw.de](mailto:a.hoess@oth-aw.de)

 **DIE BAUINDUSTRIE –  
PARTNER DER ENERGIEWENDE**

Erneuerbare Energie aus Sonne, Wind & Co., klimaschonende Kraftwerke, energieeffiziente Städte und Häuser. Für die Energiewende haben wir uns viel vorgenommen. Von der Erzeugung, Speicherung bis zum Transport muss die komplette Versorgung mit Energie umgebaut werden. Wer das macht? Die Bauwirtschaft.

Alle reden davon, die konkrete Umsetzung aber liefern die Bauprofis. Die Energiewende ist eine Bauaufgabe durch und durch. Willst auch Du dabei sein?

Die Bauindustrie bietet vielfältige Möglichkeiten für einen Berufseinstieg über Praktika, Bachelor- bzw. Masterarbeiten oder eine direkte Bewerbung. Informiere Dich bei Deiner Hochschule und werde auch „Partner der Energiewende“!



© Matthias Kjellson, Shutterstock

[www.bauindustrie-bayern.de](http://www.bauindustrie-bayern.de)

# RAUM FÜR DEINE ZUKUNFT!



**BAYERN'S  
BEST 50**

PREISTRÄGER 2014

2011 | 2008 | 2003



**FEE**

F.EE bietet in den Bereichen **Elektrotechnik, Maschinenbau und Informatik** die Möglichkeit, in Form von **Praktika, Bachelor-/Masterarbeiten** oder auch einer **Festanstellung** Ideen Wirklichkeit werden zu lassen.

Weitere Infos und aktuelle Jobangebote unter

[www.fee.de/jobs](http://www.fee.de/jobs)

**F.EE GmbH** | Udo Starck | Personalabteilung | In der Seugn 10 | 92431 Neunburg v. W. | [bewerbung@fee.de](mailto:bewerbung@fee.de)

**Herausgeber:**

Der Präsident der  
Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden  
Prof. Dr. Erich Bauer

**Redaktion:**

Technologie-Campus an der Ostbayerischen Technischen  
Hochschule Amberg-Weiden e.V.  
Andrea Breitschaft

**Titelgestaltung:**

Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden  
Prof. Dipl.-Kfm. Ralph E. Hartleben

**Inhalt/Bildmaterial:**

Die Verantwortung für Inhalt und Bildmaterial der Beiträge  
haben die jeweiligen Autoren der Fachbeiträge.

**Gesamtherstellung:**

mediaprint info verlag gmbh  
86415 Mering  
[www.mediaprint.info](http://www.mediaprint.info)

**Erscheinungstermin:**

Februar 2015



Ostbayerische Technische Hochschule  
Amberg-Weiden

**Standort Amberg:**

Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg  
Tel.: 09621/482-0  
Fax: 09621/482-4991  
Mail: [amberg@oth-aw.de](mailto:amberg@oth-aw.de)  
[www.oth-aw.de](http://www.oth-aw.de)



Ostbayerische Technische Hochschule  
Amberg-Weiden

**Standort: Weiden**

Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden  
Tel.: 0961/382-0  
Fax: 0961/382-2991  
Mail: [weiden@oth-aw.de](mailto:weiden@oth-aw.de)  
[www.oth-aw.de](http://www.oth-aw.de)

Die Onlineversion des Forschungsberichtes finden Sie unter:  
[www.oth-aw.de/aktuelles/veroeffentlichungen/forschungsbericht](http://www.oth-aw.de/aktuelles/veroeffentlichungen/forschungsbericht)

# Inserentenverzeichnis

Herding GmbH Filtertechnik.....U2  
 BHS Corrugated Maschinen- und Anlagenbau GmbH ..... 7  
 Wohnungswerk Siedlungswerk Werkvolk eG ..... 8  
 Constantia Hueck Folien GmbH & Co. KG ..... 8  
 Siemens AG Human Resources ..... 12  
 ARGES GmbH ..... 13  
 Baumann GmbH..... 13  
 DEPRAG Schulz GmbH u. CO. .... 13  
 Nexans autoelectric GmbH ..... 211  
 Bayerischer Bauindustrieverband e.V..... 220

F.EE GmbH..... 220  
 Nabaltec GmbH..... 222  
 Max Bögl Bauservice GmbH & Co. KG ..... 222  
 Verein zur Förderung der Hochschule Weiden e.V..... 222  
 Amberger Freunde der Hochschule Amberg-Weiden ... 222  
 Rohrwerk Maxhütte GmbH ..... U3  
 Bayernwerk AG ..... U4

U = Umschlagseite



Schwarzdeckeneinbau, B239 Amberg - Neumarkt  
 Fortschritt baut man aus Ideen.

Zur Verstärkung unseres Teams suchen wir

**Werkstudenten (m/w)**  
**Praktikanten (m/w)**  
**Absolventen (m/w)**

**Studienrichtungen**

- Bauingenieurwesen
- Elektroingenieurwesen
- Maschinenbau
- Wirtschaftsingenieurwesen



**MAX BÖGL**  
 Fortschritt baut man aus Ideen.

Bewerbungen bitte über unser Karriereportal:  
<http://karriere.max-boegl.de>

Aktuelle Jobangebote finden Sie unter:  
<http://www.max-boegl.de>



**Nabaltec**

**Für unsere Unternehmensbereiche Technische Keramik und Funktionale Füllstoffe suchen wir laufend Praktikanten (m/w) der Studiengänge Chemie, Verfahrens- oder Werkstofftechnik, Maschinenbau oder Kunststofftechnik**

Für nähere Informationen besuchen Sie unsere Homepage oder kontaktieren Sie uns:

**Nabaltec AG**  
 Personalwesen  
 Frau Glaser  
 Postfach 18 60  
 92409 Schwandorf

Telefon: 09431 53-242  
 E-Mail: [Personalwesen@nabaltec.de](mailto:Personalwesen@nabaltec.de)  
<http://www.nabaltec.de>





**Der Verein der Amberger Freunde der Technischen Hochschule Amberg-Weiden**

Seit 1995 unterstützt der Verein die Entwicklung der Technischen Hochschule Amberg-Weiden durch ideelle und finanzielle Beiträge, die durch das Budget nicht abgedeckt sind. Für Prämien besonderer Leistungen der Studierenden, für Zuschüsse bei Forschungsprojekten, für die Realisierung des Technologiecampus. Mit Ihrem Beitritt als Unternehmen oder Privatperson leisten Sie einen wichtigen Beitrag zur regionalen Stärkung des Standortfaktors Bildung und Ausbildung.

Besuchen Sie unsere Homepage über [www.haw-aw.de](http://www.haw-aw.de) – Hochschule/Förderer:  
 Dr. Erich Voss, 1. Vorsitzender, Ammerthaler Str. 10, 92260 Ammerthal,  
 Sekretariat +49 (9621) 80-2573, Telefax +49 (9621) 80-4331, Telefon +49 (9621) 25275,  
[freunde.haw-amberg@haw-aw.de](mailto:freunde.haw-amberg@haw-aw.de)



Wir sind ein Zusammenschluss von Bürger(inne)n, Institutionen, Unternehmen und Körperschaften in der Oberpfalz. Die OTH wird von uns in Bereichen unterstützt, wo öffentliche Mittel nicht oder nicht ausreichend zur Verfügung stehen, u. a. für die Projekte, Studienförderung, Fachzeitschriften oder Exkursionen.

Wir sind gemeinnützig und haben folgende wesentliche Ziele:

- Ideelle und materielle Unterstützung der OTH
- Förderung des OTH-Bildungsauftrages
- Ausbau enger Bindungen zwischen Hochschule und Praxis

**Wir freuen uns über Ihren Beitritt!**  
 Rudolf Winter, 1. Vorsitzender, c/o Volksbank Nordoberpfalz eG  
 Wörthstr. 14, 92637 Weiden, Tel. 0961/84-1 04, [www.foerderverein-oth-weiden.de](http://www.foerderverein-oth-weiden.de)



AUTOMOBIL

INDUSTRIE

ENERGIE

# Gemeinsam Zukunft gestalten.

Seit mehr als 60 Jahren können sich unsere Kunden weltweit auf unsere Kompetenz und Qualität bei der Herstellung nahtloser Stahlrohre verlassen. Wir übernehmen als zuverlässiger Partner dauerhaft Verantwortung und erarbeiten gemeinsam mit dem Kunden ausschließlich nachhaltige Lösungen.

Fortschritt braucht Freiräume. Wir bieten reichlich Spielraum zum Gestalten.

Mit einem breiten Abmessungs- und Qualitätsspektrum beliefern wir folgende Branchen mit maßgeschneiderten Lösungen und Komponenten:

**Automobil**

**Industrie**

**Energie**



**RMH**  
Rohrwerk Maxhütte



Rohrwerk Maxhütte GmbH  
Franz-Kunze-Straße 1  
92237 Sulzbach-Rosenberg  
rohrwerk-maxhuette.de

QUALITY  
MADE IN  
GERMANY

# *Netze für neue Energien.*

Der Anteil der regenerativ erzeugten Energie im Netz des Bayernwerks liegt bei über 50 Prozent. Bis heute haben wir mehr als 240.000 Photovoltaikanlagen in unser Netz integriert. Damit betreiben wir eines der ökologischsten Netze in Deutschland.

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

**bayernwerk**

