

# Forschungsbericht

2017





## Liebe Leserin, lieber Leser,

die OTH Amberg-Weiden liegt in der Forschung weiterhin auf Erfolgskurs. Die Bandbreite der Forschungsthemen an unserer Hochschule greift die gesellschaftlichen und technologischen Herausforderungen unserer Zeit auf – etwa Digitalisierung oder Energiewende – und treibt sie wesentlich voran. Dies spiegelt sich in den Leitthemen wider, in die sich die Forschungsprojekte der OTH Amberg-Weiden einordnen lassen: Produktion und Systeme, Information und Kommunikation, Energie und Mobilität, Lebenswissenschaften und Ethik. Auch die disziplinübergreifenden Querschnittstechnologien Sensorik und Digitalisierung stehen im Zentrum der Forschungsaktivitäten.

Vorhandenes umfassendes Know-how wird eingesetzt, um diese Themen weiterzuentwickeln und neue Erkenntnisse zu gewinnen. Die Ergebnisse der Forschungsprojekte fließen zum einen direkt in die Lehre und sichern eine hochaktuelle und bedarfsgerechte Ausbildung unserer Studierenden. Zum anderen führen die gemeinsamen Forschungsarbeiten in den Partnerunternehmen unmittelbar zu wirtschaftlich erfolgreichen Produkten und sichern somit die Innovationskraft der Region.

Einen konkreten Einblick erlauben die Berichte aus den Forschungsprojekten, in denen sich die Kompetenzen und Ressourcen der Forschung bündeln. Einige Highlights aus dem vergangenen Forschungsjahr möchten wir Ihnen im Folgenden kurz skizzieren:

Im März 2016 wurde auf dem Campus in Amberg das neue Technikum für Kraft-Wärme-Kopplung (KWK-Technikum) eingeweiht und mit der Inaussichtstellung des Freistaats Bayern vom September 2016 ist dessen Förderung bis zum Jahr 2020 gesichert. Effiziente und ressourcenschonende

Energieversorgung ist nicht erst seit der Energiewende zentrales Anliegen in der Forschung und in der Ausbildung unserer Studierenden. Mit dem KWK-Technikum steht nun ein optimales Instrument zur Verfügung: Vernetzt mit Wissenschaft und Wirtschaft werden Synergien gebildet, um Kraft-Wärme-Kopplung anwendungsorientiert weiterzuentwickeln.

Im E-House, das derzeit am Hochschulcampus in Weiden entsteht, werden sich in naher Zukunft unsere Kompetenzen in der Digitalisierung bündeln. Umfangreiche Erfahrung im Bereich E-Commerce und in den damit einhergehenden Geschäftsmodellen, Strategien und Prozessen liegt an der OTH Amberg-Weiden bereits vor. Darauf aufbauend können Forschende, Start-ups und etablierte Unternehmen unter idealen Bedingungen gemeinsam das Thema E-Commerce voranbringen und damit einen Meilenstein in der Region verankern. Wesentlicher Teil im Konzept ist die „Digitale Gründerinitiative Oberpfalz“, die sich unter Einbeziehung sämtlicher Landkreise und Städte der Oberpfalz im bayernweiten Wettbewerb durchsetzen konnte. Entlang der Linie Sensibilisierung und Motivation, Information und Qualifikation sowie Marktdiffusion werden Gründerinnen und Gründer bestmöglich unterstützt, um ihre herausragenden Ideen zu erfolgreichen Unternehmen in der Digitalisierung werden zu lassen.

Hinter ISAC@OTH-AW verbirgt sich ein „noch junges Projekt“, in dessen Rahmen ein Industry Software Application Center aufgebaut wird. Fakultätsübergreifend werden darin die Vorteile von Industrie 4.0 auch mittelständischen Unternehmen zugänglich gemacht. Eine Vereinfachung von meist hochkomplexer Industriesoftware durch neuartige Bedienkonzepte, die Entwicklung von Entscheidungshilfen bezüglich innovativer

Fertigungsprozesse sowie Methoden zur Effizienzsteigerung werden langfristig zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit mittelständischer Unternehmen beitragen.

Allein im Rahmen dieser genannten Projekte fließen rund 5,7 Mio. Euro öffentliche Fördermittel in unsere Region; ein deutliches Signal für die Wissenschaft und Wirtschaft weit über die mittlere und nördliche Oberpfalz hinaus. Dieser Erfolg ist auch dokumentiert in der Forschungslandkarte der Hochschulrektorenkonferenz (HRK). Seit September 2016 ist die OTH Amberg-Weiden neben der Energie- und Ressourcentechnik mit einem zweiten Forschungsschwerpunkt vertreten: der Informations- und Kommunikationstechnik. Die Forschungslandkarte informiert objektiv und neutral bundesweit und internati-

onal über exzellente Forschung. Sie versteht sich als eine Grundlage für neue Kooperationen, welche wiederum dazu beitragen, unser Forschungsprofil weiter zu schärfen.

Unser Dank gilt allen, die mit ihrer exzellenten Forschungs- und Entwicklungsarbeit zum Erfolg unserer Hochschule beitragen. Nur durch das enorme Engagement der betreuenden Professorinnen und Professoren sowie aller Beteiligten an unserer Hochschule konnte dieser beeindruckende Forschungsbericht veröffentlicht werden. Wir wünschen Ihnen eine anregende und spannende Lektüre und freuen uns, wenn weitere Forschungsk Kooperationen entstehen.

Prof. Dr. Andrea Klug

Präsidentin der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden

Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

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

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

## Dear Readers,

The Technical University of Eastern Bavaria Amberg-Weiden (OTH) continues to enjoy its ongoing path to success in research. The wide range of research topics at our university of applied sciences considers the social and technological challenges of our time – such as digitalisation or energy transition – and promotes them essentially. This reflects in the main issues classifying the research projects of the OTH Amberg-Weiden: Production and Systems, Information and Communication, Energy and Mobility, Life Sciences and Ethics. Research activities are also focussing the multidisciplinary cross-sectional technologies Sensor Technology and Digitalisation.

Available and comprehensive know-how is used to support further development of these issues and to gain new insights. On the one hand, the results of the research projects feed directly into teaching and ensure an up-to-date demand-orientated training of our students. On the other hand, the joint research activities with the partner companies lead directly to economically successful products, thus securing the region's innovative capacity.

The reports on research projects pooling research competences and resources provide a concrete insight. In the following, we would like to sketch out briefly some highlights of the past “research year”:

In March 2016, the new Technical Center for Combined Heat and Power (KWK-Technikum) was inaugurated on the Amberg Campus, and according to the “prospect” of the Land of Bavaria dating from September 2016, its funding is secured until 2020. Since well before the energy transition, efficient and resource-saving energy supply has been a major concern of research and in our students' education. With the KWK-Technikum, we have now at our

disposal an ideal instrument: networked with Science and Business, synergies are created in order to further develop combined heat and power generation in an application-oriented way.

In the near future, our competences in digitalisation will be pooled in the E-House, which is currently being built on the campus in Weiden. There is already a wealth of extensive experience at the OTH Amberg-Weiden in the field of e-commerce and the related business models, strategies and processes. Based on this, researchers, start-ups and established companies can jointly promote e-commerce subjects under ideal conditions, thus establishing a milestone throughout the region. An essential part of the concept is the “Digitale Gründerinitiative Oberpfalz” (Digital Business Incubator Upper Palatinate) which, involving all districts and cities of the Upper Palatinate, was able to assert itself against all other Bavarian competitors. Along the lines of awareness and motivation, information and qualification as well as market diffusion, company founders are supported in the best possible way to help them turn their outstanding ideas into successful companies in the digitalisation sector.

The idea behind ISAC@OTH-AW is “still quite a young project”, within the framework of which an Industry Software Application Center is established. As a consequence, all the benefits of “Industrie 4.0” are also made available to medium-sized companies in a cross-faculty way. A simplification of mostly very complex industrial software through novel operating concepts, the development of decision supports for innovative manufacturing processes as well as methods to improve efficiency will, in the long run, contribute to maintain the competitiveness of medium-sized companies.

In the context of these aforementioned projects alone, approximately 5.7 million Euro of public funding is channelled towards our region; a clear signal to Science and Business far beyond the borders of the central and northern Upper Palatinate region. This achievement is also documented in the research map of the German Rectors' Conference (HRK). Since September 2016, the OTH Amberg-Weiden is represented with a second research focus apart from Energy and Resources Technology: Information and Communication Technology. The research map offers, nationally and internationally, objective and neutral information about excellent research. It is intended as a basis for new cooperations

which would in turn help to further strengthen our research profile.

We would like to express our thanks to all those, who contribute to the success of our university by their excellent research and development activities. It was only due to the enormous commitment of the supervising professors as well as of all those involved in our university that this impressive research report could be published.

We wish you a stimulating and interesting read, and we are looking forward to the development of further research cooperations.

Prof. Dr. Andrea Klug

President of the Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden

Ltd. RD Ludwig von Stern

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

Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

Vice-President of the Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden/  
Scientific Director of the Institute of Applied Research IAF

Prof. Dr.-Ing. Markus Brautsch

Commissioner for Technology Transfer at the Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden

<b>Vorwort.....</b>	<b>1</b>	<b>Development of Micro Turbine Generators for Waste Heat Recovery .....</b>	<b>42</b>
<b>Digitalisierung</b>		Prof. Dr.-Ing. Andreas P. Weiß Dipl.-Ing. (Univ.) Gerd Zinn	
<b>Globalisierung und IT-Services – Trends im IT-Outsourcing nach Rumänien.....</b>	<b>7</b>	<b>eDAS – Holistic Energy Management for 3rd and 4th Generation of Electric Vehicles .....</b>	<b>48</b>
Prof. Dr. Frank Schäfer		Stephan Schärtl, B. Eng. Josef Schmid, M. Sc. Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß	
<b>Auswertung und Visualisierung von Industrie 4.0 Daten durch Anwendung von Clusteralgorithmen....</b>	<b>14</b>	<b>3Ccar – Integrated Components for Complexity Control in affordable electrified cars.....</b>	<b>53</b>
Prof. Dr. Dieter Meiller Dipl.-Phys. Florian Schöler-Niewiera		Stefan Stiegler, B. Eng. Heike Lepke, M. Eng. Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß	
<b>Energie und Mobilität</b>		<b>Ko-HAF: Kooperatives Hochautomatisiertes Fahren .....</b>	<b>58</b>
<b>Das neue KWK-Technikum auf dem Campus in Amberg .....</b>	<b>18</b>	Josef Schmid, M. Sc. Stephan Schärtl, B. Eng. Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß	
Dipl.-Ing. (FH) Johann Stauner Raphael Lechner, M. Sc. Johannes Kick, Bauoberrat Prof. Dr.-Ing. Markus Brautsch		<b>Der neue Radnabenantrieb für den Formula Student Rennwagen der OTH Amberg-Weiden .....</b>	<b>62</b>
<b>Experimentelle Untersuchungen zur Abwärmenutzung mit thermoelektrischen Generatoren (TEG) .....</b>	<b>24</b>	Prof. Dr.-Ing. Horst Rönnebeck	
Prof. Dr.-Ing. Stefan Beer Ludwig Kinzler, M. Eng. Dominik Bock, B. Eng.		<b>Information und Kommunikation</b>	
<b>Ladezustand von Stromspeichern: Impedanz- spektroskopische Kapazitätsbestimmung an Akkumulatoren und Kondensatoren.....</b>	<b>31</b>	<b>Implementierung und Evaluation von Algorithmen zur multimodalen Bildsegmentierung.....</b>	<b>69</b>
Prof. Dr. Peter Kurzweil		Prof. Dr. Ralf Ringle Manuel Stich, M. Sc. Jeannine Vogt, B. Eng. Michaela Lindner, B. Eng.	
<b>Systemdienlicher Betrieb von technischen Einheiten aus BHKW und elektrischen Lasten .....</b>	<b>36</b>	<b>Bedrohungslage fahrzeuginterner Kommunikationsnetzwerke und Bus-Systeme.....</b>	<b>75</b>
Thomas Gollwitzer, M. Eng. Raphael Lechner, M. Sc. Prof. Dr.-Ing. Markus Brautsch		Benjamin Weigl Prof. Dr. Andreas Aßmuth	

## Lebenswissenschaften und Ethik

**UNicert® für die Ausbildung im Bereich Herkunftssprachen am Beispiel Russisch.....86**  
Akad. Oberrätin PaedDr. Ladislava Holubová

**Fachkräftebedarf, Weiterbildungsinteresse und Verzahnung von beruflicher und akademischer Weiterbildung in der nördlichen Oberpfalz. Empirische Untersuchungen und Konsequenzen für die Entwicklung von Bildungsangeboten für technische Fachkräfte ..... 91**  
Susanne Herdegen, M. A.  
Raphael Cabrera, B. A.

**Auswirkungen des Einbezugs von hochschulinternen Stakeholdern für die Berichterstattung zur nachhaltigen Entwicklung..... 96**  
Alexander Herzner, M. Sc.  
Katharina Stucken, M. A.  
Prof. Dr. Bernhard Bleyer

**What can Biology tell us about Transaction Balances?..... 101**  
Prof. Dr. Franz Seitz  
Nikolaus Bartsch

**Decreased functional brain connectivity during itch compared to pain..... 105**  
Prof. Dr. Ralf Ringler  
Prof. Dr. Clemens Forster

**Hygiene und Medizintechnik – Untersuchungen zur Erhöhung der Patientensicherheit durch technische Maßnahmen ..... 109**  
Dr. rer. nat. Sebastian Buhl  
Sabine Hentschel, M. Sc.  
Nicole Eschenbecher, B. Eng.  
Carina Werner, B. Eng.  
Laura Walberer, B. Eng.  
Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

## Produktion und Systeme

**Wie genau sind additive Verfahren? Ein Qualitätsprüfteil zur Beurteilung der Form- und Lageabweichungen von „3D-Druckern“ ..... 115**  
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Blöchl  
Dipl.-Ing. (FH) Daniel Weiß

**Leichtbau in der Produktentwicklung ..... 119**  
Prof. Dr. Franz Magerl

**Entwicklung, Aufbau und Regelung einer Verladebrücke ..... 124**  
Prof. Dr.-Ing. Armin Wolfram  
Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Stich

**Tribologie von mikrostrukturierten polymeren Oberflächen für die Medizintechnik..... 130**  
Dominik Will, B. Eng.  
Prof. Dr.-Ing. Tim Jüntgen

**Test and On-Line Monitoring of Real-Time Ethernet with Mixed Physical Layer for Industry 4.0..... 135**  
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmidt  
Stefan Fuchs, M. Eng.  
Alexander Gercikow, M. Eng.  
Prof. Dr.-Ing. Stefan Witte

## Sensorik

**Magnetfeld-Sensorik für Schaltgeräte in der Digitalen Fabrik ..... 140**  
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmidt  
Christian Reil, M. Eng.

**Gammakamera vs. Sonden-Messplatz – Bestimmung des Schilddrüsen-Uptakes mittels zweier Messsysteme..... 144**  
Karina Schuller, M. Sc.  
Prof. Dr. Ralf Ringler

**Protonenleitende Metalloxide für die Wasseranalytik: Stand der Technik und neuartige Messkonzepte ..... 150**  
Prof. Dr. Peter Kurzweil  
Sebastian Chalupczok, M. Eng.  
Helmut Hartmann, M. Eng.

**Impressum..... 156**

**Inserentenverzeichnis ..... U 3**

U = Umschlagseite



# Globalisierung und IT-Services – Trends im IT-Outsourcing nach Rumänien

## Zusammenfassung

Personalintensive, standardisierbare IT-Dienstleistungen stehen in vielen Industrienationen unter hohem Rationalisierungsdruck, weswegen eine Verlagerung der Leistungserbringung in Niedriglohnländer (Offshoring) im Trend liegt. Die Digitalisierung vieler traditioneller Geschäftsmodelle (z. B. im Bereich Automotive) stellt die IT-Abteilungen dieser Unternehmen vor neue strategische Aufgaben. Um eigene IT-Kapazitäten dafür freizubekommen, ist eine Entlastung der eigenen IT-Organisation von Standardaufgaben unter Einbindung von externen Leistungspartnern (Outsourcing) häufig beobachtbar. Das Unternehmen VALEO IT bietet in diesem Kontext der Industrie diverse IT-Dienste als Outsourcing-Leistungen an, wobei strategisch neu Kapazitäten am kostengünstigen Standort Rumänien aufgebaut werden. Dieser Beitrag betrachtet entsprechende Markttrends näher und beschreibt zentrale Rahmenbedingungen sowie Vorgehensweisen bei einem Strukturaufbau in Rumänien.

## Abstract

In many industrialized nations, labor-intensive, standardizable IT services are under a strong pressure to rationalize, which is why shifting the work to low-wage countries (offshoring) has become a common trend. The digitalization of many traditional business models (e.g. in the automotive industry) brought new strategic challenges for the IT departments of such companies. To free up own IT capacities for addressing these challenges, relieving one's own IT organization from standard tasks with the involvement of external service partners (outsourcing) can be frequently observed. In this context, VALEO IT offers various IT services as outsourcing solutions whereby the strategy is to build up new capacities in the more competitively priced country of Romania. This paper takes a closer look at the relevant market trends and describes the key parameters and approaches for establishing a structure in Romania.

## 1 Einführung und Ziel der Untersuchung

Die VALEO IT Gruppe ist ein Provider für IT-Dienstleistungen mit einem strategischen Schwerpunkt im Bereich IT-Outsourcing sowie für sogenannte Help-Desk-Anwendungen. Das Unternehmen ist dabei im Geschäftsfeld Outsourcing-Dienste für sieben verschiedene Sprachräume mit „First-“ und „Second-Level-Support“-Anwendungen sowie im IT-Consulting aktiv. Die Firmenzentrale des signifikant wachsenden Unternehmens liegt in Luhe-Wildenaue in der nördlichen Oberpfalz. Aktuell im Sommer 2016 beschäftigte das Unternehmen ca. 85 Mitarbeiter, bis Ende 2016 wird die Mitarbeiterzahl voraussichtlich auf ca. 100 ansteigen. Das Unternehmen wurde 2004 von Bastian Braun gegründet, der als geschäftsführender Gesellschafter fungiert. Service Locations des Unternehmens befinden sich in Luhe-Wildenaue, Schwandorf,

Regensburg, Roding, Lindau, Stollberg und Timisoara (Rumänien). Ein weiterer außereuropäischer Standort ist aktuell in Vorbereitung.

Im Rahmen eines Praxis-Semesterprojektes bestand für den Verfasser die Aufgabe, die Geschäftsführung bei der Internationalisierungsstrategie des historisch national organisierten Geschäftsmodells zu unterstützen, wobei der Ausbau des Standortes Timisoara/Rumänien im Mittelpunkt stand.

Um diese Aufgabe zielgerichtet durchzuführen, wurde eine Analyse der strategischen Ausgangssituation auf der Marktseite durchgeführt. Es wurden dazu u. a. persönliche Experteninterviews mit Führungskräften aus dem IT-Bereich bei unterschiedlichen Unternehmen im In- und Ausland organisiert.

Die Erkenntnisse fließen in Konzepte der Geschäftsführung ein, welche den strategischen Wachstumspfad des Unternehmens hin zu weiterer Wertschöpfung auf internationalen Märkten auf drei Ebenen strukturieren:

- Produkte und Zielmärkte
- Mitarbeiter und Organisation
- Finanzwirtschaft und Controlling

Die folgenden Ausführungen beschäftigen sich mit relevanten Trends auf der Marktseite sowie konkreten Kundenbedürfnissen bei gegebenen und potenziellen Kunden von VALEO IT. Daneben werden praktisch relevante Aspekte der Mitarbeitergewinnung und -führung in Rumänien angesprochen.

Die Experteninterviews wurden inhaltlich sehr offen, jedoch auf Wunsch der Gesprächspartner auf vertraulicher Basis geführt, sodass die gegebenen Einschätzungen hier in zusammenfassender Art präsentiert werden.

## 2 Methodik der Datenerhebung

Um praxisrelevante Informationen zu Markttrends, Unternehmensstrategien und individuellen Anforderungen der Unternehmen zu gewinnen, führte der Verfasser diverse Experteninterviews bei Kunden und Nichtkunden der VALEO IT aus dem Bereich der Automobilzulieferindustrie durch. Dabei gab es in Timisoara/Rumänien insgesamt sechs Gespräche mit IT-Führungskräften aus drei international agierenden Unternehmen, orientiert an einem Befragungsleitfaden. Die Interviews dauerten jeweils zwischen einer und zwei Stunden. Weitere Expertengespräche wurden in Deutschland in der gleichen Zielgruppe sowie mit deutsch- bzw. rumänischstämmigen Vertretern eines global agierenden Software-Konzerns aus dem Bereich „Support“ abgewickelt. Eine weitere Aktivität bildeten Interviews einer zweistelligen Zahl operativ tätiger rumänischer Service Request Agents vor Ort in Timisoara. Themen dabei waren fachliche Qualifikation, Umfang von sprachlichen Fähigkeiten international relevanter Sprachen (insbesondere Englisch, Deutsch, Italienisch, Spanisch) und Erwartungen an Arbeitsbedingungen und Führungskultur.

Eine weitere Informationsquelle bildete die Auswertung einer Telefonbefragung zum Thema generelles Interesse an IT-Outsourcing bei Unternehmen aus der Automobilzulieferindustrie. Als „Kontrollgruppe“ wurden mehrere Unternehmen aus anderen Branchen (Maschinenbau, Metallverarbeitung, Elektrotechnik) zum gleichen Thema befragt, um mögliche Branchenspezifika zu erkennen.

Zu Ermittlung und Interpretation genereller Markttrends im IT-Bereich mit Bezug zum gegebenen Thema wurden ferner diverse Studien der führenden Beratungsunternehmen zu IT-Strategien und Vorgehensweisen in der Umsetzung identifiziert und ausgewertet.

## 3 Begriffsklärungen

Unter Outsourcing von IT-Leistungen wird hier die Übertragung von in der Ausgangslage in Eigenregie durchgeführten Arbeits- und Wertschöpfungsprozessen an unternehmensexterne Dienstleister verstanden. Die Motivation dafür bildet typischerweise die Notwendigkeit zur Qualitäts- und Kostenoptimierung. Die Outsourcing-Leistung kann dabei je nach Wunsch und Situation am bisherigen Standort des Auftraggebers, aber auch an Standorten des Outsourcing Partners durchgeführt werden.

Outsourcing-Anbieter postulieren dabei Kostensenkungspotenziale als Nutzenstiftung für den Auftraggeber, da sie Spezialisierungsvorteile und Skaleneffekte generieren können. (Vgl. [1])

Unter Offshoring von IT-Dienstleistungen wird hier dagegen die explizite Verlagerung von Arbeitsprozessen aus einem Hochlohn- in ein Niedriglohnland verstanden. Dies erfolgt innerhalb des Unternehmens bzw. Konzerns und setzt entsprechende eigene Unternehmensstrukturen in den adressierten Niedriglohnländern voraus. Die Motivation zielt typischerweise auf eine Kostenoptimierung bzw. die Erschließung von „neuen“ Arbeitsmärkten bei Engpässen in der Gewinnung von Fachkräften, die im IT-Bereich speziell in Zentraleuropa seit Jahren beobachtbar sind.

Outsourcing und Offshoring können auch kombiniert werden (sog. Offshore-Outsourcing), wenn ein Unternehmen bislang an einem Hochlohnstandort in Eigenregie erbrachte IT-Services an einen Outsourcing-Partner auslagert, der seinerseits diese Leistungen zukünftig aus einem Niedriglohnland heraus erbringt. (Vgl. zu dieser gesamten Begriffssystematik: [2]) VALEO IT bietet dem Markt bzw. den adressierten Zielgruppen u. a. genau dieses Leistungsprogramm an.

## 4 Generelle Markttrends bei IT-Services mit Bezug zu Outsourcing und Offshoring

Die Auslagerung von Sachgüterproduktion ins kostengünstige Ausland, welche den Industriesektor bereits seit Jahren prägt, zeigt sich nunmehr verstärkt auch im Dienstleistungsbereich. Großbetriebe waren hier die Vorreiter, typische standardisierbare Verwaltungsarbeiten in Niedriglohnländer auszulagern. (Vgl. dazu ausführlich: [3]) Häufig auch unter dem Begriff Business Process Outsourcing bzw. Offshoring geführt, geht es dabei auch um Tätigkeiten aus den Bereichen Buchhaltung, Personalverwaltung oder der Materialdisposition. So erbringt beispielsweise der Softwarekonzern Oracle bereits seit über 10 Jahren seine Kreditorenbuchhaltung und das Zahlswesen aus seinem Standort in Indien. Im nächsten Schritt wurden auch komplexere Dienstleistungen, z. B. im Bereich Entwicklung oder IT-Services, in Niedrig-

lohnländer verlagert. So beschäftigt beispielsweise Continental in Rumänien ähnlich viele Ingenieure wie an seinen Standorten in Bayern, während Hella im Standortvergleich die größten IT-Kapazitäten ebenfalls in Rumänien vorhält.

Betrachtet man standardisierbare und zugleich personalintensive Dienstleistungen im IT-Supportbereich, sind generell beträchtliche Verlagerungstendenzen in Länder mit niedrigen Faktorkosten beobachtbar. In Europa besteht hier ein Trend hin zu osteuropäischen Ländern, wobei Rumänien ein besonders beliebtes Ziel darstellt. So hat beispielsweise der Software-Konzern Oracle Ende 2015 seine Support-Struktur in mehreren Hochlohnländern West- und Zentraleuropas weitestgehend aufgelöst und zentralisiert nach Rumänien verlagert. Die Verlagerung von Arbeitsplätzen im Dienstleistungsbereich über Offshoring-Strategien wird dabei nicht nur in den EURO-Hochlohnländern umgesetzt, sondern wird z. B. auch in der Schweiz thematisiert, wie eine entsprechende Studie der Credit-Suisse zeigt (Vgl. dazu ausführlich: [3]): Durch die Frankenstärke und die folgende reduzierte Wettbewerbsfähigkeit im internationalen Umfeld stehen die Unternehmen dort unter einem hohen Rationalisierungsdruck. Dies zwingt neben den Großunternehmen zunehmend auch mittelgroße und kleinere Unternehmen entsprechende Potenziale zu nutzen. Die Umsetzung wird dabei durch die Digitalisierung und durch moderne Kommunikationstechnologien erleichtert. Prominente Beispiele sind etwa die Großbank UBS, die innerhalb zweier Jahre die Verlagerung von 4000 Informatikerstellen aus Zürich und London an günstigere Standorte umsetzen wird. Ein weiteres Beispiel aus der Schweiz bildet das Unternehmen Novartis, das mehrere Service-Center in Osteuropa und Indien betreibt. So hat Novartis aktuell in Hyderabad ein Bürogebäude mit Raum für weitere 8000 Mitarbeiter erworben. Wie im Euro-Raum geht es also dabei primär um Kostenoptimierung, auf einer zweiten Ebene häufig aber auch um die Erschließung neuer Arbeitsmärkte in Berufsbildern, für die in den zentralen Ländern Europas Engpässe bzw. ausgeschöpfte Arbeitsmärkte bestehen.

Dies gilt beispielsweise bei Fachkräften im IT-Sektor bzw. bei Ingenieuren im Softwarebereich. So berichten mehrere befragte Automobilzulieferbetriebe, dass sie ihre IT-Kapazitäten mangels Bewerbern in Deutschland gezielt auch in osteuropäischen Ländern aufbauen. In der Folge präsentieren sich die Arbeitsmärkte für IT-Fachkräfte selbst dort inzwischen angespannt, sodass intensives Personalmarketing erforderlich ist und steigende Lohnkosten beobachtbar sind.

Die Mehrzahl der dargestellten Beispiele betreffen Großunternehmen, welche häufig über die wirtschaftlichen und organisatorischen Möglichkeiten verfügen, entsprechende Offshoring-Strategien selbst zu gestalten. Die Erkenntnisse aus den Einzelinterviews und der

Auswertung der Telefonbefragung zeigen jedoch, dass die Selbstorganisation eines Offshoring-Programms häufig auch aus einer strategischen Grundsatzentscheidung resultiert, IT-Themen unter eigener Gestaltungshoheit und Kontrolle halten zu wollen. (Vgl. zu negativen Erfahrungen mit Outsourcing: [4]) Auf der anderen Seite finden sich auch Unternehmen, die bereit sind, entsprechende Dienstleistungen von außen zuzukaufen, und somit eine Outsourcing-Lösung anstreben. Es handelt sich hier oft um unternehmenspolitische Grundsatzentscheidungen aus dem Themenbereich Eigenerstellung versus Fremdbezug mit Blick auf die IT-Landschaft im Unternehmen. Die Befragungsergebnisse legen nahe, dass es einerseits die Tendenz gibt, dass eine zunehmende Organisationsgröße die Unternehmen zunehmend (selbstorganisierte) Offshoring-Lösungen präferieren lässt. Andererseits ist aber auch erkenntlich, dass es größenunabhängig Unternehmen gibt, die Fremdbezugslösungen (also Outsourcing) bei Themen außerhalb ihres definierten Kernkompetenzbereiches sehr wohl akzeptieren.

Gerade hier zeigen sich im Automobilzuliefersektor interessante neue Schwerpunktsetzungen. Im Zusammenhang mit Stichworten wie Digitalisierung von Mobilitätskonzepten und Big-Data-Anwendungen im Automobil ergeben sich gerade auch für Automobilzulieferer neue fundamentale Geschäftsmöglichkeiten, die stark IT- und Software-getrieben sind. (Vgl. dazu auch: [5]) Die befragten Unternehmen dieser Branche erleben daraus starke Veränderungen im Selbstverständnis ihrer IT-Abteilungen. Waren diese bislang eher als „Enabler“ und in einer Unterstützungsfunktion für den eigentlichen Kernwertschöpfungsprozess positioniert, rücken diese nun direkt in den Kernwertschöpfungsbereich hinein. In der Folge werden IT-Management-Kapazität und Umsetzungs-Ressourcen in diesen neuen Themen gebunden. Dann bestehen zunehmend Überlegungen in anderen, weniger strategisch zentralen Themenbereichen, eine Entlastung zu schaffen. Die Fremdvergabe von bislang selbst durchgeführten Standard-IT-Support-Dienstleistungen kann hierzu eine Maßnahme sein und eröffnet Anbietern wie VALEO IT neue Gesprächsansätze im Vertrieb.

## 5 Timisoara als Standort für die Erbringung von IT-Service-Dienstleistungen

Timisoara liegt im äußersten Westen Rumäniens im Grenzgebiet zu Ungarn und Serbien und bildet die Hauptstadt des historisch auch von „Donauschwaben“ besiedelten Banats. Mit ca. 320.000 Einwohnern ist Timisoara die drittgrößte Stadt Rumäniens. Bereits in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts kam Timisoara durch die Ansiedelung von Leicht- und Nahrungsmittelindustrie zu beträchtlichen Wohlstand. Diverse erhaltene Baudenkmäler in der historischen Innenstadt bezeugen auch heute noch diese Phase.



Abbildung 1: Opernplatz



Abbildung 2: Kathedrale

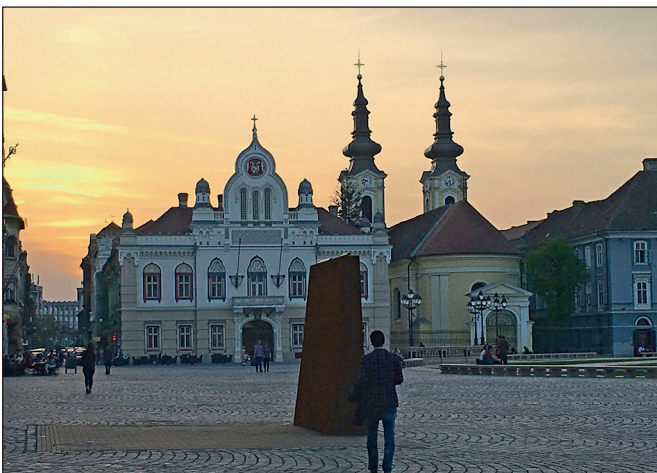


Abbildung 3: Stadtplatz (Piata Unirii)

Im Ersten Weltkrieg von Zerstörungen weitgehend verschont, litt die Stadt zwischen den Weltkriegen wirtschaftlich stark unter der weltweiten Depression. Nach dem Zweiten Weltkrieg ging es unter sozialistischer Regie weiter bergab, auch die Ansiedelung von Schwer-

industrie konnte diesen Trend nicht wirklich stoppen. In den 80er-Jahren des letzten Jahrhunderts war der wirtschaftliche Tiefpunkt schließlich erreicht. Dem Sturz des sozialistischen Regimes, der übrigens in Timisoara seinen historischen Anfang nahm, folgte nach einer kurzen Anpassungsdepression in den 90er-Jahren des letzten Jahrhunderts ein wirtschaftlicher Aufstieg, der stark durch Direktinvestitionen, insbesondere aus Deutschland und Italien, getragen wurde. Fährt man heute durch die traditionellen und neu angelegten Industriegebiete, so fallen die neu errichteten Standorte zahlreicher global agierender Konzernunternehmen auf, die teilweise vor Ort jeweils vierstellige Mitarbeiteranzahlen aufweisen. Unternehmensbeispiele mit deutschem Headquarter bilden Continental, Hella, Dräxlmaier, Kathrein. (Vgl. zu diesem Abschnitt: [6])

Folgende Abbildungen zeigen dazu einige Beispiele:



Abbildung 4: Standort Hella, Timisoara



Abbildung 5: Standort Continental, Timisoara

Timisoara stellt heute einen Agglomerationsraum gerade auch im Bereich von IT, Elektrotechnik und Software dar, der in den letzten 20 Jahren entstanden ist. Diese Entwicklung wird auch durch die Existenz mehrerer Hochschulen (4 staatliche und 4 private Hochschulen) unterstützt.

Es finden sich ferner diverse IT- und Softwareunternehmen, die ebenfalls Support-Dienstleistungen aus Timisoara heraus für Europa, den Mittleren Osten und Afrika anbieten. Wichtige Unternehmensbeispiele dafür sind Microsoft (seit 2012 vor Ort) und das französische Unternehmen Atos SE mit ca. 1000 IT-Mitarbeitern am Standort. Es existiert in der Folge ein lebendiger Arbeitsmarkt im IT-Sektor.

Wichtig für einen Offshoring-Standort erweist sich auch die physische und virtuelle Erreichbarkeit bzw. Vernetzung mit der Unternehmenszentrale. Aus deutscher und insbesondere bayerischer Perspektive ist Timisoara über Flugverbindungen sehr gut angebunden. So fliegt die Lufthansa dreimal täglich von München aus Timisoara direkt an mit einer Flugzeit von knapp über einer Stunde. Dies ist von besonderem Vorteil, da in einer typischen rumänischen Unternehmenskultur die persönliche Beziehungsbildung zu einem „Chef“ wichtig ist und größere Loyalität und Motivation der Mitarbeiter erwarten lässt. Sinnvolle regelmäßige Besuche der Geschäftsleitung aus der Zentrale werden durch die gute verkehrstechnische Erreichbarkeit somit deutlich erleichtert.

Dank der Tatsache, dass Timisoara bereits vollständig glasfaserverkabelt ist, gelingen auch der Datentransport und die VoIP-Anbindung reibungslos.

## 6 Verfügbarkeit und Gewinnung von IT-Fachkräften in Timisoara

Für den Aufbau eines Auslandsstandortes sind aus VALEO IT-Perspektive neben der Verfügbarkeit von Mitarbeitern mit der benötigten fachlichen Qualifikation besonders auch die sprachliche Qualifikation in diversen Landessprachen entscheidend. Die Kunden der VALEO IT haben hier hohe Erwartungen an die sprachliche Perfektion der erbrachten Dienstleistung, da die meisten Anfragen als persönliche Anfrage per Telefon an die Supportkräfte herangetragen werden.

VALEO IT beschäftigt aktuell ca. 20 Mitarbeiter am Standort, wobei die Mitarbeiterbasis kontinuierlich anwächst. Der Verfasser hatte die Möglichkeit, sowohl vorhandene Mitarbeiter zu interviewen als auch diverse Vorstellungsgespräche zu begleiten. Absolut positiv überraschend war dabei die beobachtbare Qualität der z. B. deutschen Sprachkenntnisse bei vorhandenen Mitarbeitern und Bewerbern, welche sich häufig völlig akzentfrei präsentieren und annähernd muttersprachliches, hochdeutsches Niveau erreichen. Da die Anrufer der Kunden aus Deutschland typischerweise eine deutsche Servicenummer anwählen und im Hintergrund ein Routing nach Rumänien erfolgt, wird der jeweilige Anrufer kaum merken können, dass er aktuell mit einem Offshoring-Standort außerhalb des Heimatlandes kommuniziert. Dies ist auch deswegen wichtig, da dieser Standort innerhalb der VALEO IT Gruppe mit den anderen Leistungsstandorten in Deutschland vernetzt ist und die Telefonanlage teils flexibel und je nach Gesprächslast und jeweiliger Warteschleife Anrufer an Standorte mit freier Kapazität verteilt. Folgende Abbildung zeigt das vorhandene Leistungszentrum der VALEO IT in Timisoara:

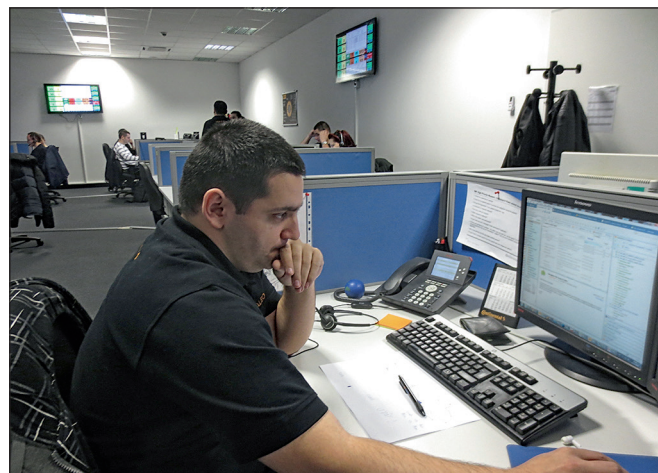


Abbildung 6: Leistungszentrum der VALEO IT in Timisoara

Wie angesprochen, befinden sich diverse schlagkräftige Unternehmen mit Bedarfen nach entsprechenden fachlich und sprachlich qualifizierten IT-Mitarbeitern am Standort. Sämtliche vor Ort befragte Unternehmen formulieren tendenziell steigende Mitarbeiterzahlen und -bedarfe. Es besteht somit inzwischen ein lebendiger Wettbewerb zwischen den Unternehmen um gute Leute. Gleichzeitig zeigen die Befragungen der Mitarbeiter und Vorgesetzten vor Ort durchgehend einen sehr großen Ehrgeiz, beruflich und wirtschaftlich voranzukommen. In der Folge ergeben sich einerseits eine vergleichsweise hohe Personalfluktuation deutlich über dem in Deutschland beobachtbaren Niveau und andererseits kontinuierlich steigende Personalkosten mit durchschnittlichen Lohnerhöhungen von oft 10 Prozent p. a. Es empfiehlt sich in einem größeren Team daher eine permanente Akquisitions- und Einarbeitungsstrategie neuer Mitarbeiter, um das häufige Abschmelzen des vorhandenen Mitarbeiterstamms zu kompensieren. Der Aufbau entsprechender lokaler Personalmarketingstrukturen bildet einen wichtigen Erfolgsfaktor. Der in Folge hohe Anteil junger, in Einarbeitung befindlicher Mitarbeiter reduziert die Produktivität und wirkt sich in permanent höheren Stellenplänen im Vergleich zu Deutschland aus. Diese Gesamtkonstellation erfordert auch bereits bei einer mittleren Organisationsgröße das Vorhandensein lokaler Führungsstrukturen, um die Organisation permanent auf Soll-Stärke arbeitsfähig zu halten. Diese Sachverhalte sind in der Kostenkalkulation der zu erbringenden Dienstleistungen ganzheitlich zu berücksichtigen und relativieren den auf den ersten Blick erwarteten Kostenvorteil teilweise.

Ein weiterer wichtiger organisatorischer Aspekt ist die zuverlässige Einbindbarkeit rumänischer Teams in international arbeitsteilige Prozesse sowie in strukturierte Abläufe und bewährte Vorgehensweisen, die aus anderen Standorten typischerweise weitgehend unverändert übertragen werden.

Die befragten international erfahrenen Führungskräfte im IT-Supportbereich stellen dabei der typischen beruflich-kulturellen Prägung rumänischer Teams im Vergleich zu

alternativen „cost-efficient-countries“ ein durchaus positives Zeugnis aus: Solides Fachwissen und Sprachkenntnisse, Lernbereitschaft sowie eine kulturelle Prägung, vorstrukturierte Arbeitsabläufe einzuhalten und zu respektieren, ermöglichen eine zügige Integration rumänischer Teams im Rahmen einer international arbeitsteiligen Organisation zu einem insgesamt attraktiven Preis-Leistungs-Verhältnis.

## 7 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass in der Industrie und bei großen Dienstleistern ein beträchtlicher Trend zur Verlagerung von standardisierbaren IT-Dienstleistungen aus Kosten- und Kapazitätsgründen in Niedriglohnländer besteht.

Für einen ursprünglich regional geprägten mittelständischen Betrieb wie VALEO IT ist es einerseits somit strategisch nachvollziehbar, diesem Kundenbedürfnis zu folgen.

Andererseits liegt hier auch eine beträchtliche Herausforderung in der praktischen Umsetzung. Als hilfreiche Erfolgsfaktoren wirken neben einer strategischen Vorbereitung sämtlicher Haupt- und Unterstützungsprozesse eine sichere Prozessbeherrschung der Kernleistung im Inland, um klare und bewährte Ablaufstrukturen übertragen zu können. Ferner reduziert sich die Komplexität einer Niederlassungsgründung durch die Zugehörigkeit Rumäniens zur EU mit ihrem einheitlichen Rechtsraum und vergleichbaren Strukturmerkmalen (Vgl. zu zusätzlichen Herausforderungen für den Mittelstand bei einer Expansionsstrategie außerhalb der EU: [7]) Ferner gilt auch in diesem Kontext ein Stück weit das Prinzip „all business is local“, besonders mit Blick auf Personalmanagement, Organisation und die lokale Unternehmenskultur.

---

### Referenzen:

- [1] PriceWaterhouseCoopers AG (Hrsg.): IT-Sourcing Studie – die Perspektive der Anbieter, Frankfurt, Februar 2015, Seite 2
- [2] Deutsche Bank Research (Hrsg.): Outsourcing nach Indien: der Tiger auf dem Sprung, Frankfurt, 2005, Seite 3
- [3] Credit Suisse Economic Research (Hrsg.): Schweizer Immobilienmarkt 2016 – Vertreibung aus dem Paradies, Publikationsreihe Swiss Issues Immobilien, Zürich, März 2016, Seite 37 f
- [4] Roland Berger Strategy Consultants (Hrsg.): IT-Outsourcing – Searching for the big Prize, Hamburg, Oktober 2012, Seite 3 f
- [5] Capgemini Deutschland (Hrsg.): Studie IT Trends 2015, Berlin, 2015, Seite 4 f
- [6] Wikipedia, Suchbegriff „Timisoara“
- [7] Schäfer, Frank: Strategische Motive und praktische Erfahrungen eines mittelständischen Bauinstallationsunternehmens bei einem Markteintritt in den VAE, in: Forschungsbericht HAW Amberg-Weiden, Jg. 2012/2013, S. 86–97.

**Projektpartner:**

VALEO IT Personalservice GmbH, 92706 Luhe-Wildenau, [www.valeo-it.de](http://www.valeo-it.de)

**Kontakt:**



**Prof. Dr. Frank Schäfer**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen  
Leitung Masterstudiengang Interkulturelles  
Unternehmens- und Technologiemanagement  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

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

# Auswertung und Visualisierung von Industrie 4.0 Daten durch Anwendung von Clusteralgorithmen

Prof. Dr. Dieter Meiller  
Dipl.-Phys. Florian Schöler-Niewiera

## Zusammenfassung

Die Entwicklungen innerhalb des vorgestellten Projektes fokussieren die Ausarbeitung eines innovativen Analyse-Tools, welches für die Visualisierung und Optimierung von Produktionsprozessen und deren Daten eingesetzt werden soll. Für die Auswertung sollen Technologien der Bereiche Visual Analytics, Machine Learning und Clustering zum Einsatz kommen und weiterentwickelt werden. Die interaktive Darstellung wird durch Adaption und Anwendung von Algorithmen aus dem Schwarmverhalten realisiert und mit der automatisierten Auswertung gekoppelt. Durch den Einsatz des Systems soll es ermöglicht werden, die Effizienz, Qualität und Übersicht innerhalb eines Prozesses oder der Produktion zu steigern. Dies ist besonders im Kontext der derzeitigen Entwicklungen im Themenbereich Industrie 4.0 erstrebenswert.

## Abstract

The developments in the introduced project focus on the evaluation of an innovative analysis tool which will be used for the visualization and optimization of product processes and other data. Technology from the areas visual analytics, machine learning and clustering will be used and developed further for the evaluation. The interactive display will be created through the adaptation and use of algorithms out of the swarm behavior and will be coupled with the automatized evaluation. The use of the system will enable the efficiency, quality and oversight within a process or the production to be improved. This is especially desirable in the context of the current development in the area industry 4.0.

---

## 1 Einleitung

Heutzutage werden Anlagen in modernen digitalen Fabriken bereits überwacht und ferngesteuert. Dabei werden große Datenmengen für das Monitoring und die Steuerung generiert und an die Maschinenschnittstellen übermittelt. Der nächste Schritt ist eine Analyse dieser Daten, um unter anderem zielgerichtete Vorhersagen von Produktionsvariablen zu ermöglichen.

Die im Rahmen dieses Projektes entstehende Lösung soll als eine sich abwechselnde Kombination aus maschineller Auswertung und interaktiver Visualisierung konzipiert und realisiert werden.

Innerhalb des Forschungsberichts werden die ersten Ergebnisse und umgesetzte Ideen sowie geplante Arbeiten auf diesem Gebiet vorgestellt. Die Ergebnisse zielen insbesondere auf Anwender aus dem Bereich der kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMUs) ab, welchen

durch die Arbeiten und Resultate die Vorteile von Industrie 4.0 nutzbar gemacht werden sollen. Das Projekt ist eines von vier Teilprojekten des vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie geförderten Projektes ISAC@OTH-AW.

## 2 Aktuelle Anforderungen im industriellen Umfeld

Der Wunsch und eine bestehende Notwendigkeit nach Optimierungen, Visualisierungen und der Handhabung von großen Datenaufkommen ist bei den Unternehmen ausgeprägter als jemals zuvor. Technologien, die mit der Einführung der Industrie 4.0 nutzbar gemacht werden können, könnten das Potenzial haben, bestehende Probleme zu lösen und Produktionsprozesse intelligenter und einfacher zu gestalten. Dieses soll in dem vorliegenden Projekt angegangen und entsprechend angepasst werden.



Der Kundensupport von Helpdesk Centern ist beispielsweise eines dieser Probleme. Eine innovative Speichermöglichkeit sowie die automatische Analyse von Kundenanfragen könnten eine schnellere und verlässlichere Grundlage bilden, um eine für jede Anfrage eindeutige Lösung aufzuweisen. Hierbei könnte eine Zeitreduzierung bei der Bearbeitung der Kundenanfragen zu einer gesteigerten Effizienz, einer höheren Kundenzufriedenheit und weniger Aufwand für die Mitarbeiter führen.

Ein weiteres unverzichtbares Aufgabenfeld für die Anwendung der Industrie 4.0 Vorteile ist die Weiterentwicklung und Optimierung von Produktionsabläufen und Maschinenparametern, zum Beispiel bei CNC-Fräsen, Bohren, Spritzgussgießen oder 3D-Druck. Die Verbesserung dieser Parameter durch eine intelligente Analyse von Daten würde beispielsweise dabei helfen, schnellere Prozesszeiten oder materialschonendere Werkzeugeinsätze zu erreichen.

Eine weitere mögliche Anwendung ist die Auswertung von Sensordaten aus Produktionsprozessen: Heutzutage ist es möglich, für sämtliche Produktionsschritte eine Datenbank aufzubauen. Diese bietet dann die Möglichkeit, bereits im Vorfeld optimale Parameter für wechselnde und neue Prozesse auszuwählen, ohne diese in aufwendigen Vorversuchen oder durch erfahrene Profis ermitteln zu müssen. Mit dieser Hilfe wären auch Nichtexperten in der Lage, Prozesse zu initialisieren, da sie hierbei aktiv vom System unterstützt werden, indem sie neben den notwendigen auch die nahezu optimalen Parameter aus der Datenbank erhalten würden.

Ein Anwendungsszenario ist zudem auch die langfristige Archivierung von großen Datenvorkommen sowie die anschließende Analyse ausgewählter relevanter Daten in Kombination mit innovativen und informativen Visualisierungsmethoden. Ziel ist die Identifizierung unerkannter Prozesskorrelationen, die Darstellungsverbesserung von Produktionsübersichten oder eine einfachere Erkennung von unbekanntem Fehlerquellen.

Weiterhin kann die Datenauswertung für logistische Probleme von diesen Optimierungen profitieren, um Betriebszeiten zu reduzieren oder eine Verschwendung von Platz und Ressourcen zu vermeiden.

### 3 Aktueller Stand des Teilprojekts

Real aufkommende Produktionsdaten aus Industriemaschinen, wie beispielsweise einer CNC-Fräsmaschine, wurden im ersten Schritt des Projekts gesammelt. Diese Daten umfassen Informationen wie z. B. Zeitstempel, Werkzeugpositionsdaten, Geschwindigkeitsparameter. Alle aufkommenden Informationen werden in einer echtzeitkompatiblen „NoSQL“-Datenbank gespeichert. Im derzeitigen Projektverlauf ist dies eine Datenbank des Typs „MongoDB“. Hierbei handelt es sich um eine Open-

Source, Cross-Plattform und dokumentenorientierte Datenbank. Aufgrund ihrer Schemafreiheit ist es möglich, verschiedenste Arten von Daten in großen Mengen zu sammeln. Zusätzlich werden statische Informationen (Werkzeugparameter, Werkstückparameter etc.) zu diesen dynamischen Maschineninformationen in der Datenbank gespeichert.

Die Hauptaspekte des folgenden Analyseprozesses sind das Clustering und die Klassifizierung von Daten mittels unüberwachtem maschinellen Lernens<sup>[1]</sup>. Insbesondere sollen große Datenpools mit hochdimensionalen Daten und einer Vielzahl unterschiedlicher Datentypen verarbeitet werden. Um eine rechenintensive Dimensions-Reduktion zu vermeiden, werden die Daten in einem ersten Schritt mittels Modellen und Algorithmen aus den Bereichen der Schwarmvisualisierung<sup>[2]</sup> und Partikel-Schwarm-Optimierung<sup>[3],[4],[5]</sup> visualisiert, um eine Selbstorganisation diverser Datenobjekte zu ermöglichen. Dabei werden die Daten-Objekte in einem zweidimensionalen Raum dargestellt, wobei dort die Achsen keine Objekt-Merkmale repräsentieren. Sich ähnelnde Objekte bewegen sich aufeinander zu, wobei die Ähnlichkeit von der Übereinstimmung der jeweiligen Merkmale bestimmt wird<sup>[6]</sup>. Hierfür wurde ein eigenes Framework „DataOcean@ISAC“ (Abbildung 1) für die Visualisierung und Datenanalyse implementiert, welches kontinuierlich weiterentwickelt wird. Dieses stellt Prozessdaten und Parameter als individuelle autonome Partikel in einer web-basierten Umgebung dar. Damit sich diese Datenstrukturen selbst organisieren können, wurden entsprechende Algorithmen implementiert, welche auf Schwarm-Modellen<sup>[7]</sup> und Partikel-Schwarm-Optimierung basieren. Hierdurch finden sich Partikel zu kleinen Gruppen (Clustern) zusammen, die sich auf der Darstellungsfläche durch den „Ocean“ bewegen.

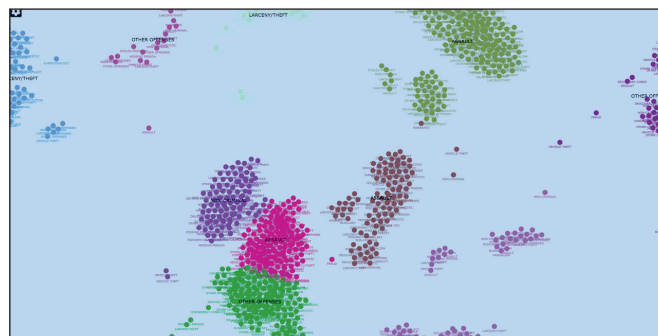


Abbildung 1: Clusterbildung während einer laufenden Instanz bei der Schwarmvisualisierung „DataOcean@ISAC“

Darüber hinaus wird eine Performance-Optimierung der DataOcean@ISAC-Visualisierung angestrebt. Der endgültige Algorithmus ist darauf ausgelegt, mehrere tausend Datenobjekte zu verwalten, abhängig von der verwendeten Hardware. Die Anzahl darstellbarer Partikel muss verbessert werden, um das Visualisierungs-Framework mit großen Datenstrukturen nutzbar zu machen. Die Verwendung einer JavaScript Visualisierungs-Runtime für

das Framework bietet den Vorteil, dass das Programm browserbasiert ausgeführt werden kann und an jede Anzeigengröße anpassungsfähig ist. Einer Verbesserung der Leistungsfähigkeit garantiert zudem die Anwendung der Software, sowohl auf leistungsschwächeren Geräten wie Tablets oder Smartphones als auch auf leistungsstarken PCs, Touch-Tischen oder großen Touch-Wänden.



Abbildung 2: „DataOcean@ISAC“ im Einsatz auf einer 84"-Touch-Wall zur Visualisierung und Manipulation für den Nutzer

#### 4 Ergebnis/Zusammenfassung/Ausblick

Aktuelle Förderausschreibungen und Anfragen aus der Industrie zeigen, dass Bedarf zur Handhabung und Auswertung von großen Datenmengen besteht, um die Effizienz in verschiedenen Bereichen der Produktion zu steigern. Die ersten Ergebnisse dieses Projektes veranschaulichen, dass die Darstellung von Daten in Form von Partikelschwärmen in Kombination mit interaktiven Clusterverfahren eine vielversprechende Möglichkeit ist, aufschlussreiche Daten übersichtlich zu visualisieren und zu analysieren. Dieser Bericht erwähnt nur eine Möglichkeit der Realisierung des Clustervorgangs und der Schwarmbildung. Im Fortlauf des Projektes werden weitere Verfahren getestet und mit der aktuellen Implementierung verglichen: Da der k-Means-Algorithmus nur (hyper-)sphärische Cluster ermöglicht, sollen zukünftig dichtebasierte Algorithmen eingesetzt werden<sup>[8]</sup>. Auch sollen andere Schwarm-Algorithmen getestet werden, wie beispielsweise Ameisen-Algorithmen<sup>[9]</sup>.

---

#### Referenzen:

- [1] Na, Wenbo. (2015). Research on well production prediction based on improved extreme learning machine, in International Journal of Modelling, Identification and Control, S. 238–247
- [2] Meiller, D. (2015). Diving into the Data Ocean, International Federation for Information Processing 2015, Interact 2015, Part IV, LNCS 9299, S. 465–468
- [3] Maltese, J., and Ombuki-Berman, B. (et al.) (2015). Co-operative Vector-Evaluated Particle Swarm Optimization for Multi-Objective Optimization, in Conf.proc. Computational Intelligence 2015, IEEE Symposium Series on IEEE
- [4] Shafeeq, A., & Hareesha, K. S.(2012). Dynamic Clustering of Data with Modified k-Means Algorithm, International Conference on Information and Computer Networks (CICIN 2012), IPCSIT vol. 27, S. 221–225
- [5] Kuo, R. J., and Wang, M. J. (eds.) (2011). An application of particle swarm optimization algorithm to clustering analysis, Soft Computing, 15(3), S. 533–542
- [6] Meiller, D. & Niewiera, F. (2016). Data Visualization and Evaluation for Industry 4.0 using an interactive k-Means Algorithm, in Conf. Proc. WSCG 2016 – 24nd International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision
- [7] Reynolds, C. W. (1987). Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behavioural Model, in In ACM SIGGRAPH computer graphics 21 (4), S. 25–34
- [8] Birant, D., & Kut, A. (2007). ST-DBSCAN: An algorithm for clustering spatial–temporal data, Data & Knowledge Engineering, 60(1), S. 208–221
- [9] Coloni, A. et al. (1992). An Investigation of some Properties of an “Ant Algorithm”, in PPSN, S. 509–520

## **Fördergeber:**

Bayerisches Staatsministerium für  
Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie



## **Kontakt:**



**Prof. Dr. Dieter Meiller**

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

d.meiller@oth-aw.de  
www.isac-oth.de



**Dipl.-Phys. Florian Schöler-Niewiera**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien  
und Informatik  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
im Projekt ISAC@OTH-AW,  
Arbeitsgruppe HMI  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

f.schoeler-niewiera@oth-aw.de  
www.isac-oth.de

# Das neue KWK-Technikum auf dem Campus in Amberg

Dipl.-Ing. (FH) Johann Stauner  
Raphael Lechner, M. Sc.  
Johannes Kick, Bauoberrat  
Prof. Dr.-Ing. Markus Brautsch



## Zusammenfassung

Im März dieses Jahres wurde das neue KWK-Technikum auf dem Campus der OTH in Amberg eingeweiht. Das Technikum wurde im Rahmen des Kompetenzzentrums für Kraft-Wärme-Kopplung (KoKWK) errichtet und mit 1,8 Millionen Euro durch das Staatsministerium für Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst finanziert. Die Planung und Durchführung der Baumaßnahme erfolgte durch das Staatliche Bauamt Amberg-Sulzbach in enger Zusammenarbeit mit Mitarbeitern des Technischen Betriebs der OTH Amberg-Weiden und des KoKWK. Im neuen Technikum stehen vier Prüfplätze für Kleinanlagen bis 25 kW elektrischer Leistung und zwei Prüfplätze bis 600 kW elektrischer Leistung zur Verfügung, was den Bereich vom Einfamilienhaus bis hin zum größeren Krankenhaus oder Mittelstandsbetrieb abdeckt. Mit dem neuen Technikum verfügt die Fakultät Maschinenbau und Umwelttechnik nun über knapp 260 m<sup>2</sup> an zusätzlicher Laborfläche, die in Zusammenarbeit mit den Partnern aus Hochschulen, Forschungsinstituten und Industrie künftig für die anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung im Feld der Kraft-Wärme-Kopplung und die praxisnahe Ausbildung von Studierenden genutzt wird.

## Abstract

In March of 2016 a new laboratory for power heat coupling tools was inaugurated on the campus of the university in Amberg. The lab is a part of the project Centre of Competence for Combined Heat and Power, which is funded by the state ministry of education and culture, science and art. The new building cost 1.8 million euro. It was designed and built in close cooperation with the staff of the university by the state Department of Planning and Building of Amberg-Sulzbach. The building has 4 test benches with up to 25 kW of electric power each and 2 test benches with up to 600 kW of electric power each. With these test benches it is possible to analyze for instance CHP plants for small houses as well as ones for large industrial facilities or hospitals. The faculty of mechanical and environmental engineering can now use 260 m<sup>2</sup> of additional laboratory facilities for the application-oriented education of students as well as for research and development projects together with partners from other universities, research institutes and industry.

## 1 Einleitung

Das Kompetenzzentrum für Kraft-Wärme-Kopplung (KoKWK) bündelt seit 2012 die Forschungsaktivitäten und das Know-how der Fakultät für Maschinenbau/Umwelttechnik und ihrer Partner im Bereich der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Betrachtet wird die gesamte Anwendungsbreite der KWK, von Privathaushalten über kommunale Einsatzbereiche bis hin zur Industrie. Untersuchte Technologien sind u. a. verbrennungsmotorische Blockheizkraftwerke, Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerke, Stirling-Motoren, Dampfkraft- und ORC-Prozesse und Verbundsysteme aus diesen Einzeltechnologien.

Der unmittelbare Praxisbezug der Forschungsarbeiten wird über die Umsetzung der Ergebnisse im Rahmen von wissenschaftlich begleiteten Demonstrations- und Pilotvorhaben gewährleistet.

Forschungspartner des Kompetenzzentrums KWK sind u. a. die Universität Bayreuth, die FAU Erlangen-Nürnberg, das Bayerische Zentrum für Angewandte Energieforschung, das Regensburg Center of Energy and Resources der OTH Regensburg, das Fraunhofer Institut UMSICHT in Sulzbach-Rosenberg und die An-Institute für Energietechnik und Energieverfahrenstechnik und Fluidmechanik der OTH Amberg-Weiden.

Das Kompetenzzentrum KWK wurde in der ersten Phase von 2012 bis 2016 vom Bayerischen Staatsministerium für Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst mit einem Gesamtbudget von zunächst 5 Millionen Euro finanziert. Für die Jahre 2017 bis 2020 ist eine Weiterförderung des Forschungsverbunds vorgesehen.

Wesentlicher Bestandteil der ersten Phase war der Bau eines neuen Forschungs- und Demonstrationstechnikums (Vgl. Abbildung 1) für KWK-Systeme auf dem Campus in Amberg, für das ein Budget von 1,8 Mio. Euro festgelegt wurde. Geplant und durchgeführt wurde die Baumaßnahme durch das Staatliche Bauamt Amberg-Sulzbach in enger Zusammenarbeit mit dem Technischen Betrieb der OTH Amberg-Weiden und Mitarbeitern des KoKWK. Der Bauantrag für das Technikum wurde im Januar 2013 eingereicht und im Herbst 2014 konnte nach umfangreichen Planungsarbeiten mit dem Bau begonnen werden. Nach eineinhalb Jahren Bauzeit wurde das Technikum im Beisein des Bayerischen Staatsministers für Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst, Dr. Ludwig Spaenle, am 10. März 2016 feierlich eingeweiht. Nach Abschluss aller Gewerke und den erforderlichen sicherheitstechnischen Abnahmen konnte das Technikum im Sommer 2016 endgültig in Betrieb genommen und an die OTH Amberg-Weiden zur Nutzung übergeben werden.



Abbildung 1: KoKWK-Technikum Außenansicht

Mit dem neuen Technikum verfügt die Fakultät MB/UT nun über knapp 260 m<sup>2</sup> an zusätzlicher Laborfläche, die in Zusammenarbeit mit den Partnern aus Hochschulen, Forschungsinstituten und Industrie künftig für die anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung im Feld der Kraft-Wärme-Kopplung und die praxisnahe Ausbildung von Studierenden genutzt wird.

## 2 Aufgabenstellung und Anforderungen

Für die Planung des neuen Gebäudes, das sowohl funktionalen als auch ästhetischen Ansprüchen genügen sollte, war die erste Aufgabenstellung, beides mit dem festgelegten Budget von 1,8 Mio. Euro und zahlreichen zu beachtenden Rahmenbedingungen zu realisieren. Die wesentlichen Vorgaben des Nutzers für die Planung waren:

- Prüfmöglichkeiten für KWK-Aggregate bis zu 600 kW elektrischer Leistung, aufgeteilt auf zwei unabhängig voneinander betreibbare Bereiche mit zum Raum hin offenen Prüfplätzen für KWK-Kleinanlagen (Vgl. Abbildung 2) und abgeschlossenen Prüfkabinen für die größeren Aggregate
- Schallgedämmte und schwingungsentkoppelte Ausführung der abgeschlossenen Prüfkabinen, um auch Aggregate ohne Schallkapselung testen zu können
- Brennstoffversorgung mit Erdgas aus dem öffentlichen Netz
- Abführung der Abgase über eine Kaminanlage
- Rückspeisung der während des Versuchsbetriebs erzeugten Energiemengen in das Strom- bzw. Wärmenetz des Hochschulcampus in Amberg
- Versorgung mit Wasser, Abwasser, Brennstoff, Druckluft, elektrischer Energie und Datenleitungen an allen Prüfplätzen sowie deren Anbindung an die Heizungs- und Kälteversorgung
- Installation einer Gebäudeleittechnik zur Steuerung der Prüfstände
- Anbindung an das Rechenzentrum der OTH über Lichtwellenleiter
- Nutzung der bereits vorhandenen Messtechnik, insbesondere der Emissionsmesstechnik
- Ausreichende Belastbarkeit der Dachkonstruktion, um auf dem Dach Rückkühlwerke und an der Decke Krananlagen installieren zu können
- Ebenerdige Einbringung der Aggregate vom Campus aus und Befahrbarkeit der Halle mit Flurförderzeugen
- Berücksichtigung von Nebenräumen, die z. B. als Besprechungszimmer oder als Mess-/Vorbereitungsräume genutzt werden können
- Ausreichend Platz für größere Versuchsaufbauten und die Einrichtung eines kleinen Werkstattbereichs
- Befahrbarkeit der Zufahrtswege zum Technikum mit Lastkraftwagen und Flurförderzeugen
- Positionierung des Technikums möglichst innerhalb des Campusgeländes, um Konkurrenz zu den Parkflächen zu vermeiden



Abbildung 2: KoKWK-Technikum Halle Kleinanlagen

Neben den Nutzervorgaben waren zahlreiche weitere Rahmenbedingungen zu beachten:

- Vorgaben des Denkmalschutzes und des Bebauungsplans hinsichtlich des Campusensembles
- Immissionsschutzrechtliche Anforderungen hinsichtlich der Luftschadstoffemissionen (Vorgaben der TA Luft für Prüfstände) und der Schallemissionen (Schalldruckpegel nicht höher als 55 dB[A] auf der Campuseite und nachts nicht höher als 40 dB[A] auf der Seite zur Wohnbebauung hin)
- Erfüllung der Vorgaben hinsichtlich der Barrierefreiheit
- Unterschreitung der Vorgaben der Energieeinsparverordnung 2009 an die Gebäudehülle um mindestens 30 Prozent gemäß Vorgabe für staatliche Baumaßnahmen in Bayern
- Flexible Nutzbarkeit des Gebäudes für eine spätere Umnutzung
- Einhaltung aller maßgeblichen Brandschutz- und Sicherheitsbestimmungen für Sonderbauten
- Vorgegebene Beschränkungen durch die am Campus verfügbare Infrastruktur (Gasleitungen, Wärmeleitungen, Leistung der vorhandenen Trafostation)

### 3 Architektonische Umsetzung

Der Neubau des KWK-Technikums ergänzt den Campus der OTH Amberg-Weiden und schließt am Standort Amberg eine Baulücke innerhalb des Gevierts der ehemaligen Kaiser-Wilhelm-Kaserne. Er befindet sich im Nordwesten des Innenhofes vor Gebäude F (ATC) und zwischen den Gebäuden der Bibliothek und der Cafeteria.

Bereits beim Umbau der Kaiser-Wilhelm-Kaserne zur Hochschule lag allen Planungsüberlegungen die Idee zugrunde, dass die städtebaulich dominante Kasernenanlage auch bei Neubauten im Innenhof ablesbar bleiben soll. Diese Überlegungen sind auch in die Planung des KWK-Technikums eingeflossen. Folglich nimmt das Gebäude bestehende Gebäudefluchten auf und passt sich in seiner Gebäudehöhe an die Höhe von Bibliothek und Cafeteria an. Die alten denkmalgeschützten Kasernengebäude bilden weiterhin das dominante Gebäudeensemble des Campus.

Das Technikum besteht aus einer flexibel nutzbaren Halle, einer separaten Prüfkabine, einem Besprechungs- sowie einem Auswerte- bzw. Vorbereitungsraum. Die flexibel nutzbare Halle kann auf ca. 150 m<sup>2</sup> in Werkstatt-, Lager- und Prüfflächen aufgeteilt werden. Es können kleinere, eigenständig funktionsfähige KWK-Aggregate aufgebaut und erprobt werden. Die Prüfkabine mit zwei Prüfständen auf ca. 75 m<sup>2</sup> wird für die Erprobung größerer KWK-Aggregate genutzt. Der Technikraum, Besprechungsraum und der Auswerte- bzw. Vorbereitungsraum verteilen sich auf die verbleibenden 45 m<sup>2</sup>. Insgesamt verfügt die Anlage über eine Nutzfläche von ca. 260 m<sup>2</sup>. Die flexibel nutzbare

Halle und die dort montierten Prüfstände sind zum Innenhof angeordnet. Als Schaufenster zum Campus kann sie über die nach Osten orientierte Glasfassade eingesehen werden.

Um der Lage am Campus, der Nutzung des Gebäudes und der Kostensituation gerecht zu werden, ist das Gebäude in einer klaren zurückhaltenden Formensprache ausgeführt. Die Materialien sind auf diese Formensprache abgestimmt. Die Gebäudehülle besteht aus einer vorgehängten Metallfassade und einer Pfosten-Riegelkonstruktion im Bereich der großflächigen Verglasung. Die Gebäudekonstruktion ist aus Stahlbeton gefertigt und das Flachdach ist als Gründach ausgeführt.

### 4 Technische Ausstattung

Das neue Technikum verfügt über insgesamt sechs Prüfstände für KWK-Anlagen, aufgeteilt auf 2 x 600 kW in der Prüfkabine (Vgl. Abbildung 3) und 4 x 25 kW elektrischer Leistung in der Halle, was den Bereich vom Einfamilienhaus bis hin zum größeren Krankenhaus oder Mittelstandsbetrieb abdeckt. Als Brennstoff dient sowohl in der Prüfkabine als auch in der Halle Erdgas aus dem Netz der Stadtwerke Amberg. Die Prüfstände für Kleinanlagen sind ebenso wie die Prüfstände in der Prüfkabine an das bestehende Wärme- und Stromnetz des OTH-Campus in Amberg angeschlossen und tragen somit auch zur Energieversorgung der Hochschule bei.



Abbildung 3: KoKWK-Technikum Prüfkabine

Alle Prüfplätze sind mit einer vollständigen Medienversorgung (Erdgas, Heizungsanbindung, Kälteanbindung, Druckluft, Elektro, EDV) ausgestattet. In der Prüfkabine ist darüber hinaus als Teil des Sicherheitskonzepts eine Hochdrucksprühnebellöschanlage installiert. Die Versorgung mit Löschwasser und Druckluft erfolgt durch Ziehschächte, die die Gebäude auf dem Campus in Amberg miteinander verbinden, zentral vom Gebäude D (Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik) aus. Durch die Nutzung der vorhandenen Löschzentrale und Kompressorstation konnten im Technikum Kosten und Platz eingespart werden.

Die beiden Prüfstände für die großen Anlagen befinden sich in der Prüfkabine und sind für einen wechselweisen, nicht gleichzeitigen Betrieb mit bis zu 600 kW elektrischer Leistung, 700 kW thermischer Leistung und 1.500 kW Brennstoffleistung ausgelegt.

Da in der Prüfkabine Aggregate ohne Schallkapselung aufgestellt werden sollen, wurde hier speziell darauf geachtet, dass beim Betrieb der Aggregate keine Beeinträchtigung am Campus durch Lärm, Körperschall oder Vibrationen auftritt. Die Fundamente, auf denen die Prüflinge aufgestellt werden, sind über vollflächig verlegte Elastomer-Platten vom Rest des Gebäudes und der Umgebung entkoppelt, wodurch der mögliche Körperschall und etwaige Vibrationen unterbunden werden können. Optional besteht die Möglichkeit, die Fundamente mit Federelementen nachzurüsten. Die Einbringung der Prüflinge erfolgt über Schallschutztore zur Seite der Bibliothek hin.

Die Prüfkabine ist mit einer Zu- und Abluftanlage ausgestattet, die ebenfalls auf den Schallschutz hin optimiert wurde und mit Schalldämmkulissen ausgestattet ist. Über die Lüftungsanlage kann die für die unterschiedlichen Prüflinge benötigte Verbrennungsluftmenge geregelt zugeführt werden und der notwendige Mindestluftwechsel sichergestellt werden. Die Ableitung der Abgase aus der Prüfkabine erfolgt über 2 Kamine, von denen einer als Reserve dient. Der zweite Kaminanschluss ist mit je einem Absorptions- und einem Reflexionsschalldämpfer ausgestattet, die die Abgasgeräusche im Bereich von ca. 60 Hz bis 8.000 Hz auf den geforderten Schallintensitätspegel von 73 dB(A) bedämpfen.

Neben dem Thema Schall wurden in der Prüfkabine klimatische Aspekte wie gleichmäßige Temperaturverteilung und Frostschutz betrachtet. Hierfür wurde ein Umluftkühler installiert, welcher bei hohen Temperaturen die Raumtemperatur auf ein gewünschtes Niveau reguliert. Für den Fall, dass die Temperaturen dort zu niedrig sind, stehen Heizregister zur Verfügung, um die Kabine aufheizen zu können und um Frostschäden an den Anlagen durch eine zu kühle Atmosphäre vorbeugen zu können.

Für etwaige Umbauarbeiten an den Aggregaten sind über jedem der beiden Prüfplätze in der Prüfkabine Kranlaufbahnen für einen Flaschenzug (per Hand oder elektrisch) montiert, um schwere Bauteile oder Aggregatsteile bis zu einem Gewicht von 1.000 kg anheben zu können. Um die Raumhöhe möglichst gut nutzen zu können, wurde hier auf eine möglichst flach bauende Lösung gesetzt, da die geplanten Anlagen relativ hoch aufbauen.

In der Halle sind vier Prüfstände für Kleinanlagen mit einem elektrischen Leistungsbereich bis maximal 25 kW pro Prüfplatz untergebracht. Die thermische Leistung beträgt maximal 50 kW, die verfügbare Brennstoffleistung

80 kW. An den Prüfplätzen können KWK-Aggregate für eine Vielzahl kleinerer Anwendungen vom Einfamilienhaus bis zum kleinen Gewerbe- oder Industriebetrieb getestet werden, wie zum Beispiel Brennstoffzellen oder gasmotorische BHKWs.

Die Abgase der Kleinanlagen werden über einen gemeinsamen Abluftventilator abgesaugt und über einen dritten Kamin nach außen geleitet. Hierzu befinden sich über jedem der vier Prüfplätze Absaughutzen. Der Absaugvolumenstrom kann über Drosselklappen individuell für jeden der vier Prüfplätze eingestellt werden. Die Zuführung der Verbrennungsluft erfolgt über eine Lüftungsklappe an der Nordseite des Gebäudes.

Die Beheizung der Halle für die Kleinanlagen erfolgt über Deckenstrahlplatten, eine aktive Klimatisierung ist hier nicht vorgesehen. Die Regulierung der Raumtemperatur im Sommer erfolgt hier über Fensterlüftung sowie eine automatisch in Abhängigkeit des Sonnenstands gesteuerte Jalousienanlage an der Glasfassade (sommerlicher Wärmeschutz).

Für etwaige Transporte oder Umbauarbeiten wurde im Bereich der Prüfplätze in der Halle ein verfahrbarer Elektrokran installiert. Dieser hat wie auch die Kranlaufbahnen in der Prüfkabine eine maximale Belastbarkeit von 1000 kg.

Neben den Prüfplätzen befindet sich in der Halle die übliche Betriebseinrichtung wie Schränke, Werkbank und Werkzeuge. Auf der Seite der Prüfkabine befinden sich in der Halle das Bedienpodest mit einem Sichtfenster in die Prüfkabine und die Gebäudehauptverteilungsschränke für die Elektro- und Einspeiseverteilung. An die Halle angegliedert sind der Technikraum, ein Besprechungszimmer sowie ein Auswerte- bzw. Vorbereitungsraum (Vgl. Abbildung 4).

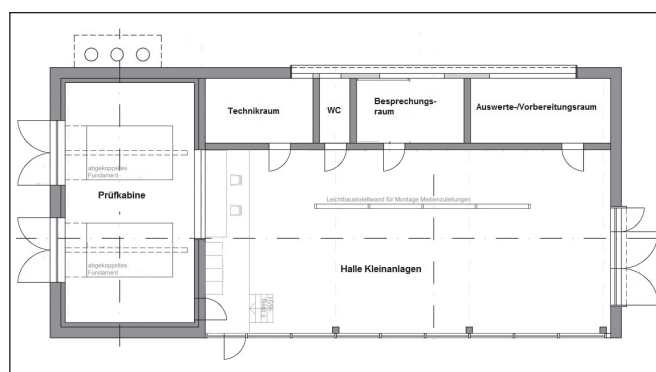


Abbildung 4: KoKWK-Grundriss

Im Technikraum sind die Schaltschränke der Gebäudeleittechnik (GLT), die Heizungs- und Kälteverteilung mit Pufferspeicher, ein Druckluftzwischenpeicher, die Gaswarnanlage, die Löschanlagenverteilung und -steuerung sowie die Wärmetauscher zum Heizungsnetz des Campus untergebracht.

Ergänzend wird im Laufe der nächsten Zeit noch ein Kaltwassersatz und ein Rückkühlwerk auf dem Gebäudedach installiert werden, um die Prüfstände auch im Sommer bei hohen Umgebungstemperaturen betreiben zu können und damit die Auslastung und Wirtschaftlichkeit des Technikums zu erhöhen.

## 5 Sicherheitskonzept

Neben der technischen Ausstattung und dem Betrieb des Technikums am Campus war das Thema Sicherheit und Brandschutz ein umfangreicher Planungsabschnitt, welcher gemeinsam mit dem Staatlichen Bauamt und dem TÜV Süd bearbeitet wurde.

Zu unterscheiden ist hierbei zwischen Anforderungen, die sich aus dem Baurecht ergeben und für die in den entsprechenden Regelwerken Ausführungsvorschriften gegeben sind (z. B. Brandschutz, Entrauchung, Vorschriften für Feuerstätten), und den Anforderungen aus der Betriebssicherheitsverordnung und der Gefahrstoffverordnung (Explosionsschutz). Bei Letzteren obliegt dem Betreiber die Verantwortung, geeignete Schutzmaßnahmen nach dem Stand der Technik festzulegen, um die Sicherheit der Beschäftigten zu gewährleisten. Grundlage für die Erarbeitung dieser Schutzmaßnahmen ist eine Gefährdungsbeurteilung, anhand derer die Gefahren oder Fehlerquellen identifiziert sowie Schutzziele definiert werden.

Das im Technikum umgesetzte Sicherheitskonzept folgt dem Prinzip der Redundanz über verschiedene voneinander unabhängige Sicherheitssysteme. So ist z. B. zur Verhinderung einer explosionsfähigen Atmosphäre in der Prüfkabine eine technische Lüftungsanlage mit Überwachung des Luftvolumenstroms installiert. Zusätzlich wird über eine Gaswarnanlage im Fehlerfall die Unterbrechung der Gasversorgung eingeleitet, und zwar über zwei voneinander unabhängige in Reihe geschaltete Magnetventile sowohl an der Entnahmestelle als auch in der Hauptgasleitung im Technikraum. Als drittes Sicherheitssystem besteht die Möglichkeit einer manuellen Abschaltung über einen Not-Aus-Taster, sowohl innerhalb als auch außerhalb der Prüfkabine. Ein Betrieb der Prüfstände ist nur möglich, wenn alle Sicherheitssysteme ordnungsgemäß funktionieren und kein Alarmfall vorliegt.

Zur Begrenzung der Brandlast und der Brandausbreitung ist das Gebäude in drei Brandabschnitte unterteilt (Prüfkabine, Halle, Nebenräume) und zudem soweit als möglich aus nicht brennbaren Materialien errichtet (z. B. nichtbrennbare mineralische Dämmung der Fassade). Die Prüfkabine als besonders gefährdeter Raum ist darüber hinaus mit einer Hochdruckwassernebel-Löschanlage ausgestattet, die ihr Löschwasser aus der Zentrale in Gebäude D bezieht.

Das Technikum verfügt über eine eigene Brandmeldeanlage der Kategorie 1 (Vollschutz mit Überwachung aller Räume) mit akustischen und optischen Meldern sowie über eine eigene Gaswarnanlage für Methan (CH<sub>4</sub>), Kohlenstoffmonoxid (CO) und Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) mit Sensoren in der Prüfkabine, in der Halle und im Technikraum. Sollte Gas austreten, wird ab einer Methankonzentration von 20 Prozent der unteren Explosionsgrenze (UEG) ein akustischer und optischer Alarm ausgelöst, ab 40 Prozent UEG wird die Gasversorgung unterbrochen und die Freigabe für die Prüfstände entfällt. Für CO und CO<sub>2</sub> wurden die in der TRGS 900 niedergelegten Arbeitsplatzgrenzwerte als Warn- bzw. Abschaltsschwellen festgelegt.

Unabhängig von den automatischen Sicherheitssystemen besteht für den Nutzer jederzeit die Möglichkeit, über Not-Aus-Taster am jeweiligen Prüfplatz den Betrieb manuell zu unterbrechen oder an den Notausgängen den Betrieb aller Prüfstände auf einmal über Not-Aus-Taster zu stoppen, z. B. bei der Flucht aus dem Gebäude.

## 6 Fazit, Danksagung

Das neue KWK-Technikum stellt eine bedeutende Aufwertung des Hochschulstandorts Amberg-Weiden dar und eröffnet im Partnernetzwerk des Kompetenzzentrums für Kraft-Wärme-Kopplung künftig attraktive neue Forschungs- und Entwicklungsmöglichkeiten.

Für die Förderung des Kompetenzzentrums und die Finanzierung des neuen Technikums bedanken wir uns beim Bayerischen Staatsministerium für Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst und bei allen Beteiligten für die gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit.



---

**Projektpartner:**

Staatliches Bauamt Amberg-Sulzbach

**Fördergeber:**

Bayerisches Staatsministerium für  
Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst

**Kontakt:**

**Dipl.-Ing. (FH) Johann Stauner**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Kompetenzzentrum für Kraft-Wärme-Kopplung  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

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



**Raphael Lechner, M. Sc.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Kompetenzzentrum für Kraft-Wärme-Kopplung  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

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



**Johannes Kick, Bauoberrat**

Staatliches Bauamt Nürnberg  
Zollhof 6  
90443 Nürnberg



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

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Kompetenzzentrum für Kraft-Wärme-Kopplung  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

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

# Experimentelle Untersuchungen zur Abwärmenutzung mit thermoelektrischen Generatoren (TEG)

Prof. Dr.-Ing. Stefan Beer  
Ludwig Kinzler, M. Eng.  
Dominik Bock, B. Eng.

## Zusammenfassung

Das Ziel des F&E-Projekts war es, zunächst einen TEG-Prüfstand aufzubauen, mit dem es möglich ist, unterschiedliche TEG-Module in verschiedenen Temperaturbereichen zu testen und Ergebnisse sowohl bezüglich zu- und abgeführter Wärme als auch Werte zur maximalen entnommenen elektrischen Leistung zu erhalten.

Im weiteren Verlauf des Projekts sollten dann verschiedene Möglichkeiten getestet werden, den Betrieb eines TEG-Moduls möglichst effizient zu gestalten, indem die Wärmeübertragung auf das Modul optimiert wird.

Grundsätzlich werden zwei Konzepte des Wärmeübergangs verwendet. Zum einen durch erzwungene Konvektion von Luft auf einen Wärmeübertrager bei ca. 600 °C, zum anderen mit Thermoöl auf einen Wärmeübertrager bei ca. 300 °C.

Die erste Herausforderung ergab sich durch die hohe Temperatur von 600 °C. Es gibt kaum ausgiebig getestete und haltbare Wärmeübergangsmaterialien.

Hauptausforderung ist es, einen möglichst effektiven Wärmeübergang zu realisieren, was bei einer recht hohen Wandwärmestromdichte von 140 kW/m<sup>2</sup> eine Herausforderung darstellt.

Folglich sind nicht nur die Zusammensetzung und der Aufbau eines TEG-Moduls wichtig, sondern dass vor allem auch die Einbaubedingungen entscheidenden Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Moduls haben. Die Verbesserung der Wärmeübertragung soll im weiteren Projektverlauf noch eingehender untersucht werden.

## Abstract

The objective of the R&D project was first of all to build up a TEG test bench that allows to test different TEG modules in different temperature ranges and to receive results concerning heat transfer and dissipation and concerning the maximum value of the extracted electric power.

In the further course of the project different options for heat transfer optimization are tested to make the running of a TEG module more effective.

In principle, two concepts of heat transfer are used: The forced convection of air on a heat exchanger at about 600 °C and the use of a heat transfer fluid on a heat exchanger at about 300 °C. The first challenge resulted from the very high temperature of 600 °C. There are rarely thoroughly tested and durable heat transfer materials.

The main challenge is to realize the most effectively heat transfer that represents a big challenge by reason of the quite high heat flux density of 140 kW/m<sup>2</sup>.

As a result regarding the efficiency of a module it should be noted not only the importance of the composition of a TEG module but also especially the installation conditions. The improvement of the heat transfer will be investigated in the further course of the project.

## Aufbau eines TEG

Thermoelektrische Generatoren (kurz: TEG) erlauben es, unter Ausnutzung des Seebeck-Effekts eine zugeführte Wärmeenergie direkt in elektrische Energie umzuwandeln. Zwischen zwei Keramikplatten befinden sich mehrere Thermopaare, welche jeweils aus einem p-dotierten und einem n-dotierten Halbleiterelement bestehen. Um in der Praxis nutzbare Spannungen zu erzeugen, werden mehrere dieser Thermopaare elektrisch in Reihe geschaltet.

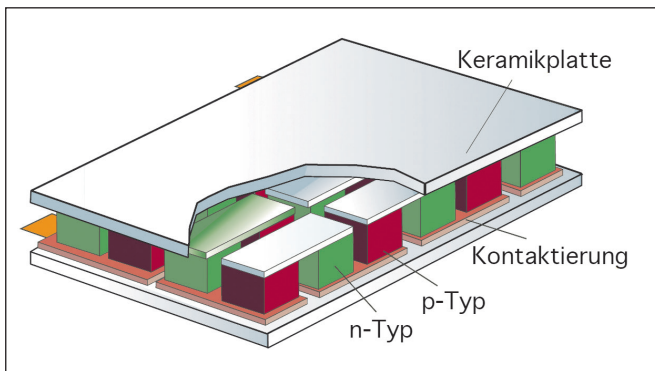


Abbildung 1: Aufbau eines TEG-Moduls <sup>[1]</sup>

Erzeugt man durch Verändern der Temperatur einer Keramikplatte einen Temperaturgradienten im Modul, verursacht dies eine Potenzialdifferenz in den Halbleitern. Die Ladungsträger in den Halbleiterelementen fließen dabei von der warmen zur kalten Seite, wodurch eine elektrische Spannung entsteht.

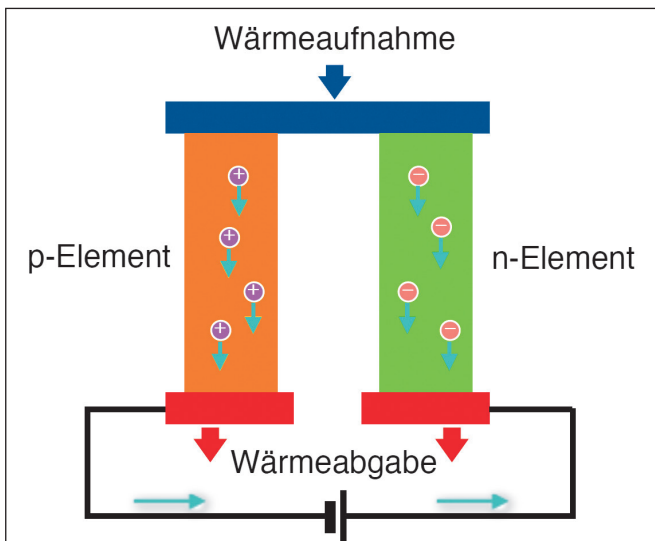


Abbildung 2: Thermopaar aus p- und n-dotiertem Halbleiter <sup>[1]</sup>

Ähnlich wie in der Fotovoltaik können dann durch Anpassung der elektrischen Belastung Stromstärke und Spannung so variiert werden, dass die maximale elektrische Leistung entnommen werden kann.

## Güteziffer und Wirkungsgrad von TEG

Wie gut ein TEG funktioniert, hängt sehr stark vom verwendeten Material der Halbleiterelemente ab. Eine wichtige Kenngröße, um die Effektivität der verschiedenen Materialien zu unterscheiden, ist die temperaturabhängige dimensionslose Güteziffer (figure of merit)  $zT$ :

$$zT = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma \cdot T}{\lambda}$$

$\alpha$  Seebeckkoeffizient  $\left(\frac{\mu V}{K}\right)$ ,  $\sigma$  spez. el. Leitfähigkeit  $\left(\frac{S}{m}\right)$ ,

$T$  Temperatur (K),  $\lambda$  Wärmeleitfähigkeit  $\left(\frac{W}{m \cdot K}\right)$

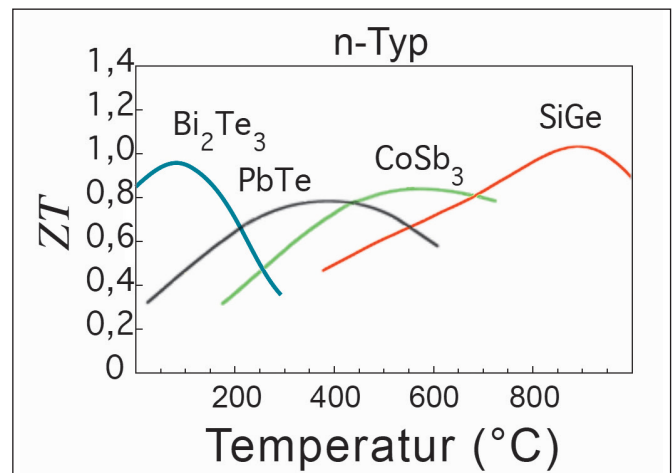


Abbildung 3: Güteziffer für verschiedene n-Halbleiter <sup>[2]</sup>

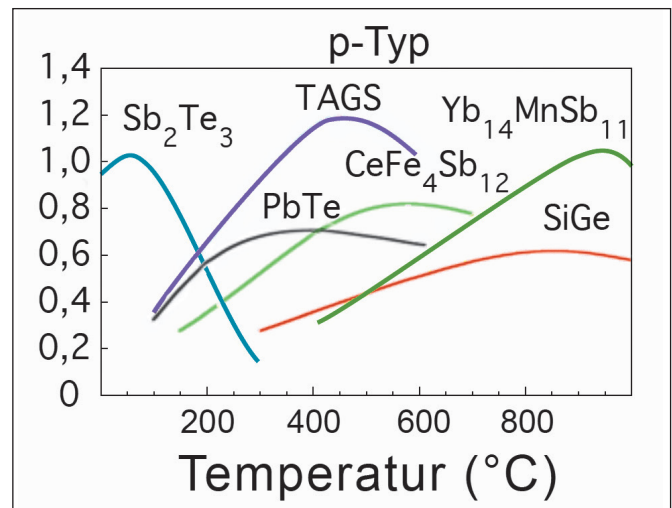


Abbildung 4: Güteziffer für verschiedene p-Halbleiter <sup>[2]</sup>

Wie in den Abbildungen 3 und 4 erkennbar ist, liegt das Maximum der Güteziffer für jedes Material in einem anderen Temperaturbereich, was zur Folge hat, dass jedes TEG-Modul ebenfalls je nach Materialwahl nur in einem bestimmten Temperaturbereich gute Leistungen erzielt.

Der Wirkungsgrad eines TEG-Moduls hinsichtlich zugeführter Wärmemenge, bezogen auf die gewonnene elektrische Leistung, ist relativ gering. So ist selbst bei Modulen mit den besten thermoelektrischen Materialien nur ein Bruchteil des Carnot-Wirkungsgrades möglich,

sodass häufig nur Wirkungsgrade im einstelligen Prozentbereich zu erreichen sind. Der limitierende Faktor ist hierbei die Güteziffer:

$$\eta = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{zu}} = \frac{T_{hot} - T_{cold}}{T_{hot}} \cdot \frac{\sqrt{1 + zT} - 1}{\sqrt{1 + zT} + \frac{T_{cold}}{T_{hot}}}$$

$P_{el} = I^2 \cdot R_L$  elektrische Leistung ( $W$ ),  $\dot{Q}_{zu}$  zugeführter Wärmestrom ( $W$ ),  $T_{hot}$  Temperatur auf der heißen Seite ( $K$ ),  $T_{cold}$  Temperatur auf der kalten Seite ( $K$ )  
 $zT$  Güteziffer

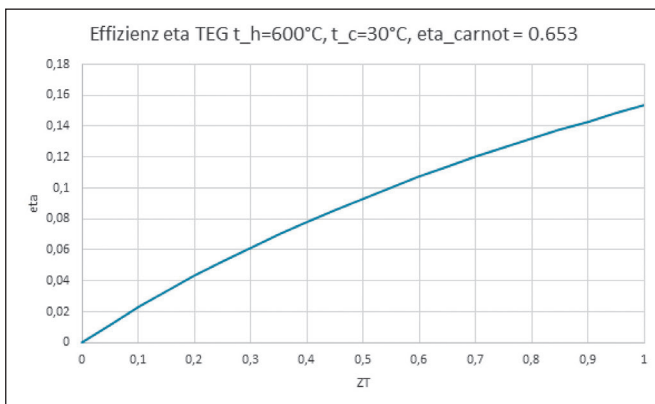


Abbildung 5: Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Güteziffer  $zT$

Neben der Materialwahl hat auch die Art und Weise, wie die Wärme auf das TEG-Modul übertragen wird, entscheidenden Einfluss auf die Effizienz des Moduls. Während im Bereich der Herstellung und der Materialien bei hohem Forschungsaufwand nur mehr geringfügige Leistungsverbesserungen erzielt werden können, bietet die Optimierung der Wärmeübertragung zwischen Wärmeübertrager und TEG-Modul hingegen ein sehr großes und dazu noch relativ kostengünstig zu erschließendes Potenzial, weshalb es das Hauptziel dieses Projekts ist, diesen Wärmeübergang zu maximieren.

Grundsätzlich soll beim Einbau eines TEG-Moduls zunächst ein System vorhanden sein, das Wärme auf der einen Seite für das Modul bereitstellt und auf der anderen Seite abführt. Dazu bieten sich zwei verschiedene Arten der Wärmeübertragung an: die direkte und die indirekte. Die direkte Wärmeübertragung hat jedoch vor allem bei der Verwendung von Flüssigkeiten die Schwierigkeit, ein flüssigkeitsdichtes System zu schaffen, was häufig der indirekten Wärmeübertragung den Vorrang gibt. Bei dieser wird ein Kontaktkörper verwendet, der von der Flüssigkeit oder dem Gas durch- bzw. umströmt wird. Zu beachten ist hierbei der unterschiedliche Wärmeübergangskoeffizient der Medien. Mit einem Wärmeübergangskoeffizienten von etwa  $1.000 \text{ W/m}^2\text{K}$  besitzt Thermoöl beispielsweise eine mehr als fünfmal so hohe Intensität, Wärme an eine Fläche abzugeben, als dies mit einem Gas zu bewerkstelligen ist, was zur Folge hat, dass die Oberfläche des Kontaktkörpers bei einer Verwendung

von Heißgas durch Berippung sehr stark vergrößert werden muss.

Neben der Dimensionierung eines geeigneten Wärmeübertragers, der die Wärme bereitstellt, ist es ebenfalls sehr wichtig, den Kontaktwärmübergang zwischen TEG-Modul und Wärmeübertrager zu optimieren. Um große Leistungsverluste zu vermeiden, sollte ein TEG-Modul deshalb nicht einfach nur lose zwischen die beiden Wärmeübertrager gelegt werden. Bestehende Lufteinschlüsse würden so eine sehr ungleichmäßige Temperaturverteilung erzeugen, was zu Verlusten führt, und könnten das TEG-Modul im schlimmsten Fall sogar beschädigen. Um dies zu verhindern und um eine möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung zu erreichen, sollten deswegen einerseits Wärmeleitpasten oder -folien verwendet werden, die den Kontakt zwischen TEG-Modul und Kontaktkörper verbessern. Zusätzlich sollte auch der Anpressdruck des Moduls auf die Kontaktkörper erhöht werden und im Bereich von etwa 12 bis 15 kg pro  $\text{cm}^2$  liegen.

### Grundüberlegungen zum Wärmeübergang bei Gasen und Flüssigkeiten

Zu Beginn der Auslegung wurden die verschiedenen Möglichkeiten der Wärmeübertragung (Konvektion, Strahlung ...) betrachtet. Daraus ergeben sich die verschiedenen Wärmeübergangskoeffizienten der verschiedenen Medien. Die maximal zu erreichenden Wärmeübergangskoeffizienten sind in den Tabellen 1 und 2 aufgezeigt.

#### TEG: Methode zur Wärmeübertragung

Tabelle 1: Übersicht Methoden der Wärmeübertragung

Medium	WÜ-Koeffizient $\alpha$ [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]	WÜ-Modus
Gas	200	Konvektion
Wasser	2000	Konvektion
Thermoöl	1000	Konvektion
Cu/Al	$\geq 5000$	Kontakt
Wasser	10000	Blasensieden
Dampf	10000	Filmkondensation

Durch diese Vorüberlegungen entschied man sich den Wärmeübergang mit Gas und Thermoöl genauer zu betrachten.

Tabelle 2: Wärmeübergang von Heißluft

$q_{p,Wand}$ [ $\text{kW/m}^2\text{K}$ ]	WÜ-Koeffizient [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]	Temperatur des Fluides bezogen auf T-Oberfläche TEG von $600 \text{ }^\circ\text{C}$
140	200	$1573 \text{ K} \approx 1300 \text{ }^\circ\text{C}$

Eine sinnvolle Nutzung mit Heißluft ist daher nur über einen berippten Kontaktkörper mit starker Oberflächenvergrößerung möglich.

Es wird eine ca. 28-fache Oberflächenvergrößerung bei einem realistischen Wärmeübergangskoeffizienten von  $100 \text{ W/m}^2\text{K}$  und einer vorgegebenen Heißlufttemperaturdifferenz von  $50 \text{ K}$  für die Anwendung von Gas für ein TEG benötigt.

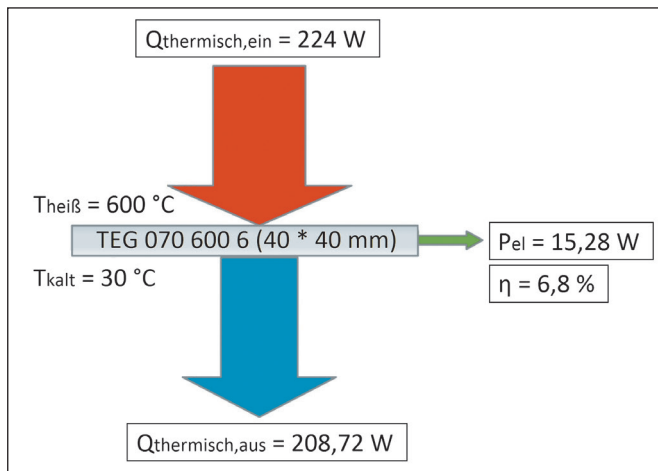


Abbildung 6: Energiebilanz an einem TEG bei  $600 \text{ °C}$

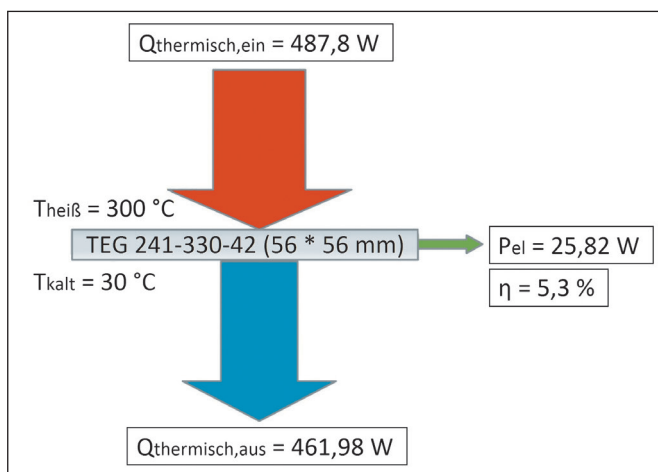


Abbildung 7: Energiebilanz an einem TEG bei  $300 \text{ °C}$

### Aufbau der Versuchsanlage

Der im Projekt erbaute TEG-Prüfstand unterteilt sich in den Thermoöl-Bereich und in den Heißluft-Bereich, was einen Betrieb mit zwei Medien mit verschiedenen Wärmeübergangskoeffizienten ermöglicht. Zugleich bietet der Aufbau auch die Möglichkeit, unterschiedliche TEG-Module, die jeweils bei anderen Temperaturdifferenzen ihre optimale Leistung erzielen, zu analysieren ( $240 \text{ °C}$  beim Thermoöl- und  $570 \text{ °C}$  beim Heißluft-Aufbau).

Beide Versuchsaufbauten bestehen aus jeweils einem oder mehreren TEG-Modulen, einem Wasser-Kühlkörper und einem Wärmeübertrager mit den jeweiligen Medien Thermoöl und Heißluft. Die TEG-Module werden zusätzlich mit einer elektronischen Last verkabelt, die es ermöglicht, verschiedene elektrische Widerstände einzustellen, um so die optimale vom TEG-Modul abgegebene elektrische Leistung bestimmen zu können.

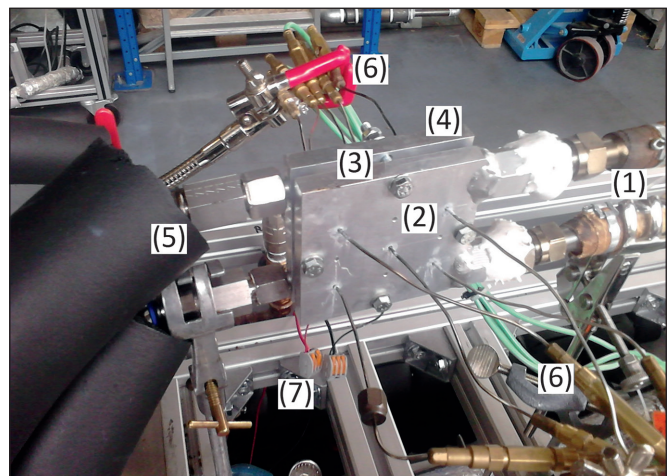


Abbildung 8: Versuchsaufbau Thermoöl  
(1) Thermoölaufuhr, (2) Wärmetauscher, (3) TEG-Modul, (4) Kühlkörper, (5) Wasserzufuhr, (6) Temperaturfühler, (7) Verkabelung zur elektronischen Last

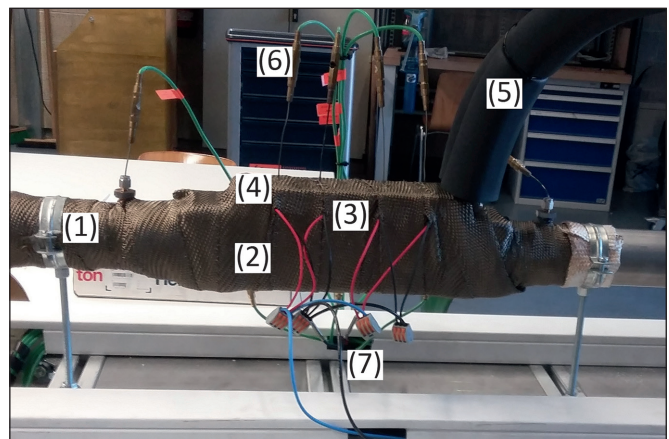


Abbildung 9: Versuchsaufbau Heißluft  
(1) Heißluftzufuhr, (2) Wärmetauscher, (3) vier TEG-Module, (4) Kühlkörper, (5) Wasserzufuhr, (6) Temperaturfühler, (7) Verkabelung zur elektronischen Last

Ein Versuchsablauf baut sich so auf, dass die warme Seite des TEG-Moduls bis auf Maximaltemperatur aufgeheizt wird, während die kalte Seite bei einer Temperatur von  $30 \text{ °C}$  gehalten wird. Beim Aufheizvorgang werden in bestimmten Temperaturschritten die maximal erreichbaren elektrischen Leistungen festgehalten.

### Untersuchung des Anpressdrucks

Schon früh zeigte sich in den Versuchen, dass die gewonnene elektrische Leistung stark vom Anpressdruck der Wärmeübertrager auf das TEG-Modul abhängig ist. Das heißt, je fester diese mit dem Modul verbunden sind, desto besser kann die Wärme zu- bzw. abgeführt werden. Um künftige Versuchsreihen miteinander vergleichbar zu machen, wurde deshalb die Verschraubung, welche die Wärmeübertrager zusammenpresst, im Thermoöl-Aufbau mithilfe eines Drehmomentschlüssels auf bestimmte Drehmomente eingestellt. Diese Drehmomente konnten hinterher wieder in den Anpressdruck umgerechnet werden. Mehrere Messreihen mit verschiedenen Drücken zeigten dann genauere Ergebnisse zum Einfluss des Anpressdrucks auf die elektrische Leistung.

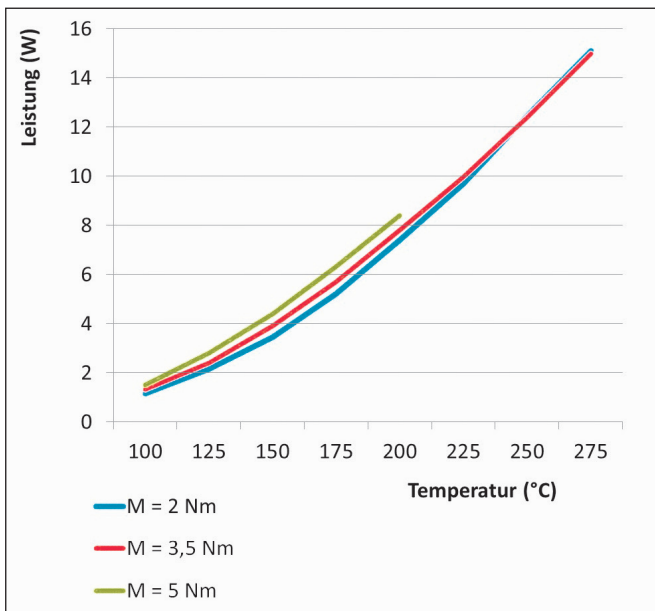


Abbildung 10: Vergleich verschiedener Anpressdrücke anhand des eingestellten Drehmoments M

Die Ergebnisse zeigen, dass die Leistungskurve mit steigendem Anpressdruck wie erwartet immer steiler wird und die Wärmeübertragung auf das TEG-Modul und damit einhergehend auch die gewonnene Leistung immer besser wird.

Zur Kompensierung des nicht konstanten Anpressdrucks, der durch die Wärmedehnung der unterschiedlichen Materialien der Wärmeübertrager und der Verschraubung entsteht, wurde im Verlauf des Projekts für den Heißluft-Aufbau ein Feder-System entwickelt, welches diese Schwankungen ausgleichen soll.

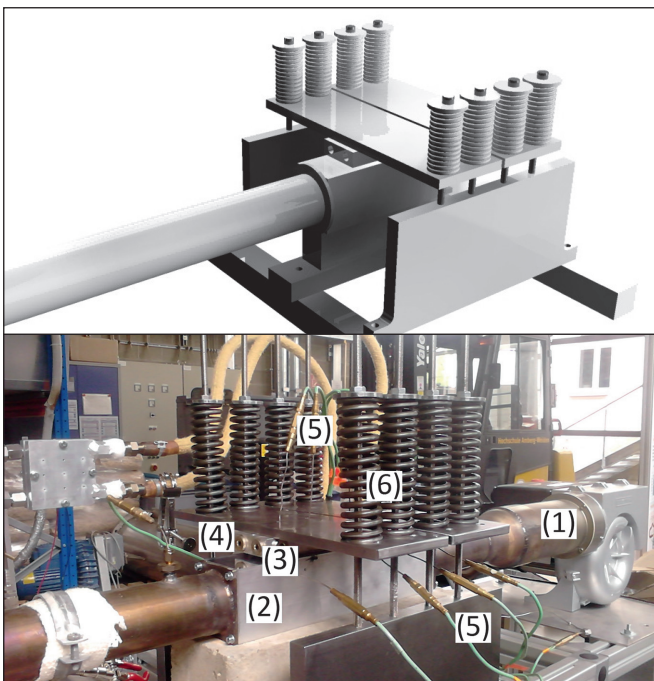


Abbildung 11: Feder-System  
 (1) Heißluftzufuhr, (2) Wärmetauscher, (3) vier TEG-Module, (4) Kühlkörper, (5) Temperaturfühler, (6) Federkonstruktion mit Druckplatten

## Versuche mit unterschiedlichen Wärmeleitmedien

Wie bereits erwähnt, stellt ein weiterer sehr wichtiger Aspekt bei der Effizienz eines TEG-Moduls neben dem Anpressdruck auch das verwendete Wärmeleitmedium dar. Um einen möglichst optimalen Wärmeübergang zwischen dem TEG-Modul und dem Wärmeübertrager bzw. dem Kühlkörper zu erreichen, können verschiedenste Wärmeleitmedien verwendet werden. Diese umfassen unterschiedliche Pulver, Folien und Pasten aus Metallen oder anderen Materialien wie Graphit oder Diamant. Auch hier wurden mehrere Versuchsreihen mit unterschiedlichen thermischen Leitmedien, unter anderem auch mit handelsüblicher Alufolie, durchgeführt, wobei sich herausstellte, dass mit Grafitfolie und Diamantwärmeleitpaste die besten Ergebnisse erzielt werden können. In zukünftigen Versuchsreihen wird jedoch aufgrund der besseren Handhabung beim Austausch vor allem auf Folien zurückgegriffen.

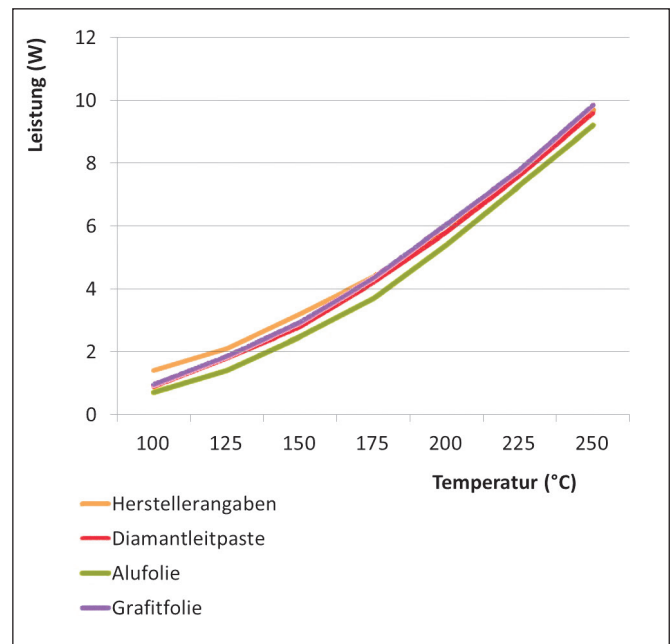


Abbildung 12: Vergleich verschiedener Wärmeleitmedien

## Entwicklung eines Systems zur Erfassung des Wärmestroms

Die Erfassung des Wärmestroms beim Thermoöl-Aufbau, der vom Thermoöl an das TEG-Modul abgegeben wird, wurde zunächst mithilfe eines Durchflussmessgerätes vorgenommen. Mithilfe der Dichte des Mediums, seiner Wärmekapazität und der Temperaturdifferenz des zum TEG-Modul zufließenden und abfließenden Stroms sollte so der Wärmestrom errechnet werden:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T$$

$$\dot{Q} \text{ Wärmestrom (W)}, \dot{m} = \dot{V} \cdot \rho \text{ Massenstrom } \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right),$$

$$c \text{ spezifische Wärmekapazität } \left( \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right), \Delta T \text{ Temperaturdifferenz (K)}$$

Aufgrund unzuverlässiger Messwerte des Durchflussmessgerätes im oberen Temperaturbereich wurde zur Erfassung des Wärmestroms jedoch ein neues Konzept erarbeitet. Dazu wird auf der gekühlten Seite ein Kupferblock (mit bekannter Wärmeleitfähigkeit) zwischen den Kühlkörper und das TEG-Modul gesetzt. Präzise Pt100-Temperaturfühler messen dann bei laufendem Versuch die Temperaturdifferenz zwischen Vorder- und Rückseite des Kupferblocks. Mithilfe dieser Daten und der Abmessungen des Kupferblocks kann dann der abgeführte Wärmestrom berechnet werden, welcher wiederum Rückschlüsse auf den zugeführten Wärmestrom zulässt:

$$\dot{Q} = \lambda \cdot \frac{A}{d} \cdot \Delta T$$

$\dot{Q}$  Wärmestrom,  $\lambda$  Wärmeleitfähigkeit,  $A$  Fläche,  $d$  Dicke,  $\Delta T$  Temperaturdifferenz

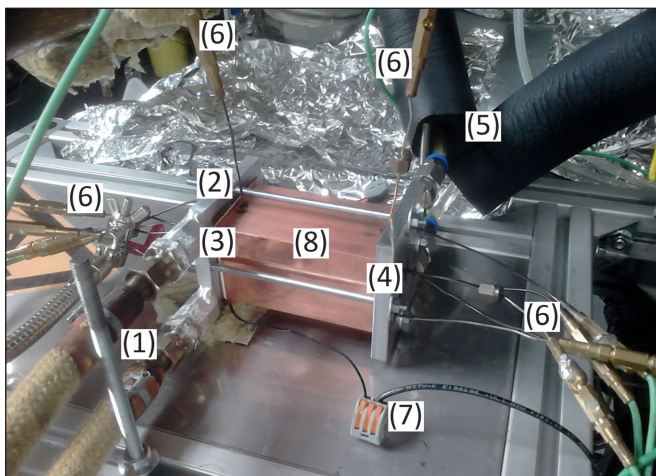


Abbildung 13: Thermöl-Versuchsaufbau mit Kupferblock  
 (1) Thermoölzufuhr, (2) Wärmetauscher, (3) TEG-Modul,  
 (4) Kühlkörper, (5) Wasserzufuhr, (6) Temperaturfühler,  
 (7) Verkabelung zur elektronischen Last, (8) Kupferblock

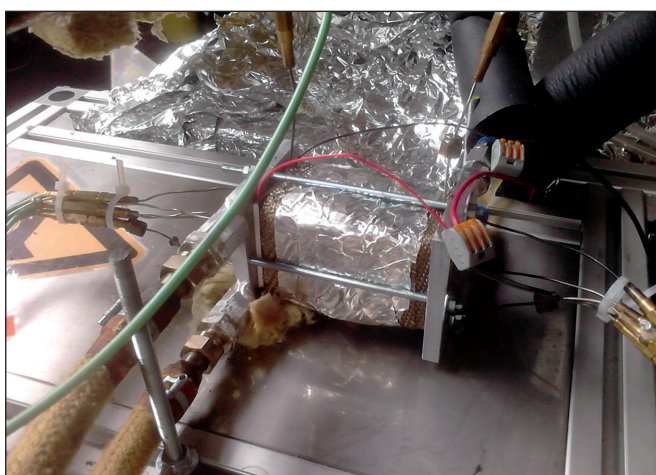


Abbildung 14: Kupferblock mit Dämmung

## Ausblick

Die bisher gewonnenen Ergebnisse des Projekts geben einen kurzen Ausblick darauf, wie wichtig nicht nur die Zusammensetzung und der Aufbau eines TEG-Moduls sind, sondern dass vor allem auch die Einbaubedingungen entscheidenden Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Moduls haben. Die Verbesserung der Wärmeübertragung soll im weiteren Projektverlauf noch eingehender untersucht werden.

Durch ihre hohen Anschaffungskosten und ihren niedrigen Wirkungsgrad fanden TEG-Module zunächst nur in Nischenbereichen wie der Raumfahrt, z. B. zur Stromversorgung von Satelliten, Beachtung. Durch die derzeit sinkenden Herstellungskosten werden sie jedoch auch für breitere Geschäftsfelder immer interessanter und werden heutzutage bereits im Alltag für kleinere Anwendungen wie Taschenlampen oder Akkuladegeräte vielfach genutzt. Vor allem aber rücken TEG-Module mit dem Gedanken des „Energy Harvesting“ immer mehr in den Vordergrund. So könnten in naher Zukunft TEG-Module durch ungenutzte Abfallwärme betrieben werden, wie sie bei Verbrennungsmotoren, Heizungsanlagen oder Ähnlichem entsteht, um kostengünstig kleine Mengen an elektrischer Energie zu erwirtschaften, die dann wiederum für den Betrieb von elektrischen Anzeigen, der Bordelektronik in Fahrzeugen usw. verwendet werden kann. Die sehr große Zuverlässigkeit und der sehr geringe Wartungsbedarf sind weitere Vorteile der Module. Durch den Umstand, dass TEG-Module sehr kompakt gebaut sind und keine beweglichen Teile besitzen, überstehen sie sogar mehrere Jahrzehnte ohne größere Leistungseinbußen, wie die jahrelange Verwendung in der Raumfahrt beweist.

---

### **Referenzen:**

- [1] C. B. Vining: Semiconductors are cool. Nature 413 (2001) 577.
- [2] G. J. Snyder, E. S. Toberer: Complex thermoelectric materials. Nature Mater. 7 (2008) 105.

### **Fördergeber:**



Kompetenzzentrum für Kraft – Wärme – Kopplung

### **Kontakt:**



**Prof. Dr.-Ing. Stefan Beer**

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

s.beer@oth-aw.de



**Ludwig Kinzler M. Eng.**

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

l.kinzler@oth-aw.de



# Ladezustand von Stromspeichern: Impedanzspektroskopische Kapazitätsbestimmung an Akkumulatoren und Kondensatoren

## Zusammenfassung

Die elektrische Spannung ist ein unsicheres Maß für den tatsächlichen Ladezustand (SoC) einer Batterie, wie Fahrer eines Elektrofahrzeugs wissen. Mithilfe der Impedanzspektroskopie haben wir den Ladezustand elektrochemischer Speicher schnell und verlässlich bestimmt. Die Methode gibt darüber hinaus Aufschluss über die elektrochemischen Mechanismen bei der Selbstentladung von Lithiumionen-Batterien und Superkondensatoren.

## Abstract

Electric voltage is an inappropriate measure of the actual state-of-charge (SoC) of a battery – a fact which is known to drivers of electric vehicles. By the aid of impedance spectroscopy, we were able to determine fast and reliably the state-of-charge of electrochemical storage devices. Moreover, the method gives valuable hints at the electrochemical mechanisms causing the self-discharge of lithium-ion batteries and supercapacitors.

## 1 Einleitung

Elektrofahrzeuge und die Rückspeisung von Bremsenergie (Rekuperation) sind ohne elektrische Speicher nicht denkbar.

*Superkondensatoren*<sup>[1]</sup> eröffnen neue Möglichkeiten für die unterbrechungsfreie Stromversorgung von Konsumgeräten, als Booster in Hybridbatterien und reversible Kurzzeitspeicher für Elektrofahrzeuge. Zwischen den Elektroden aus Aluminiumfolie mit Aktivkohlebeschichtung befindet sich ein dünner Polymer- oder Papierseparator, getränkt mit einer elektrisch leitfähigen Lösung aus einem Leitsalz in einem organischen Lösemittel. An der Grenzfläche zwischen Elektronenleiter (Elektrode) und Ionenleiter (Elektrolyt) bildet sich die wenige Nanometer dünne Doppelschicht aus, die durch eine äußere Spannung aufgeladen werden kann, indem Ladungsträger aus dem Elektrolyten an den elektrisch gegensinnig gepolten Elektrodenoberflächen adsorbieren. Elektronen treten von den adsorbierten Teilchen auf das Elektrodenmaterial über und umgekehrt. Das Spannungsfenster ist wegen der Zersetzungsspannung des Elektrolyten auf 2,7 bis 3,0 V begrenzt. Für Anwendungen bei höheren Spannungen müssen Kondensatoren elektrisch in Serie geschaltet werden. Je Kilogramm speichern Superkondensatoren

weniger Energie als herkömmliche Batterien (5 Wh/kg gegenüber 100 Wh/kg), aber es besticht ihre Leistungsdichte (bis zu 10 kW/kg gegenüber 0,1 kW/kg) und Wiederaufladbarkeit (mehrere 100.000 Zyklen gegenüber einigen Hundert).

Diffusionsvorgänge in die Tiefe der porösen Elektrodenbeschichtung erzeugen ein batterieähnliches Verhalten, die frequenz-, temperatur- und spannungsabhängige Pseudokapazität  $C(\omega, T, U)$ <sup>[2]</sup>, die aus den gemessenen Impedanzwerten  $Z(\omega)$  in Abhängigkeit der Frequenz berechnet wird.

$$C(\omega) = \operatorname{Re} \underline{C}(\omega) = \frac{\operatorname{Im} \underline{Y}}{\omega} = -\frac{\operatorname{Im} \underline{Z}}{\omega |\underline{Z}|^2} = -\frac{\operatorname{Im} \underline{Z}}{\omega [(\operatorname{Re} \underline{Z})^2 + (\operatorname{Im} \underline{Z})^2]}$$

$$C(\omega) \approx -\frac{1}{\omega \cdot \operatorname{Im} \underline{Z}}$$

Superkondensatoren sind unterhalb 1 kHz bis Gleichstrom einsetzbar und versagen bei hohen Frequenzen, wenn die Kondensatorplatten durch eine Wechselspannung zu schnell umgeladen werden. Oberhalb von etwa 10 kHz verursacht der Kondensatorwickel ein induktives Verhalten. Die komplexe Kapazität  $C(\omega)$  ist eine verlustbehaftete Größe, die die tatsächliche Energiespeicherfähigkeit des Bauteils abbildet<sup>[3]</sup>. Dies ermöglicht eine empirische

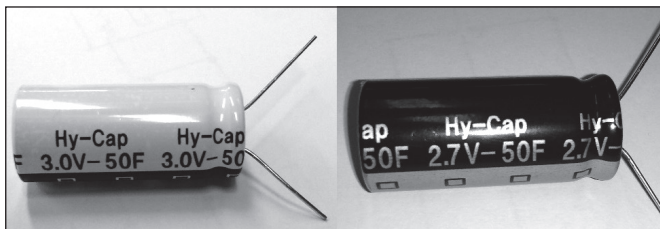
Auswertung der Messungen ohne Notwendigkeit der Anpassung bestimmter Ersatzschaltbilder<sup>[2,4]</sup>. Die Näherung gilt für Kondensatoren mit vernachlässigbarem Leckstrom, d. h. unendlich großem Gleichstromwiderstand (Spezialfall des R-C-Reihenschaltbilds).

**Lithiumionen-Batterien**<sup>[1]</sup>. Aktuatoren und komfortable Accessoires in modernen Fahrzeugen fordern immer größere elektrische Leistungen. Der Trend geht von 12-V zum 48-V-Bordnetz. Elektroantriebe und Speicheraufgaben forcieren fortschrittliche Batterietypen. Lithiumionen-Batterien vereinigen hohe Energiedichte und Zellspannung bei leichter Bauweise. Spezifischen Leistungen um 140 Wh/kg stehen moderate Empfindlichkeit gegen Überspannungen und Tiefentladung, erhöhte Kosten und eine Schutzschaltung (Batterie-Management) entgegen.

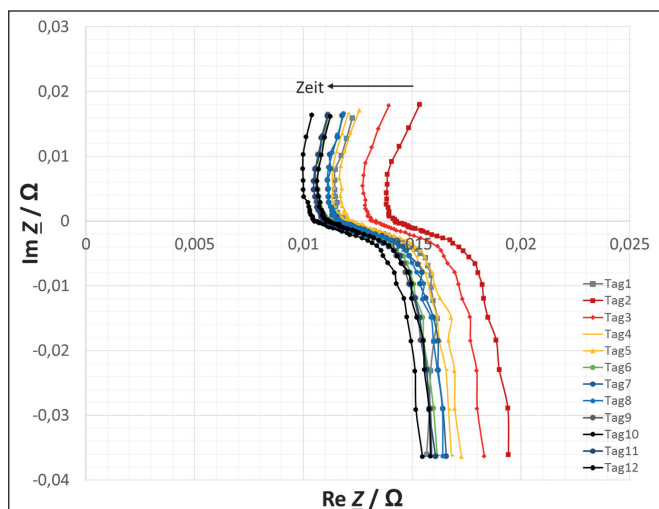
## 2 Selbstentladung von Superkondensatoren

Der Begriff *Selbstentladung* bezeichnet den selbsttätigen Verlust der gespeicherten elektrischen Ladung beim mehrwöchigen Lagern eines Superkondensators mit offenen Klemmen.

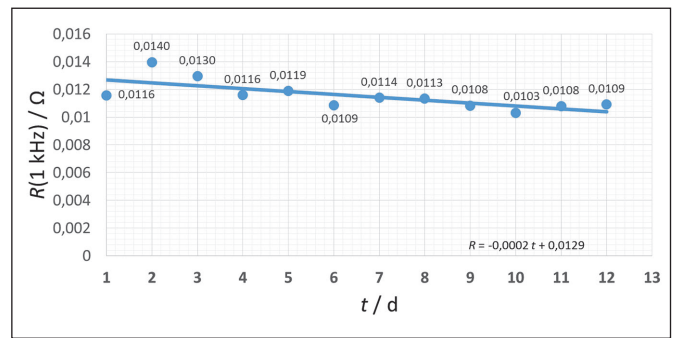
Kommerzielle 50-F-Superkondensatoren wurden unter 2,7 V Nennspannung aufgeladen, bis nur noch der Leckstrom von 2 mA fließt. Die Bauteile wurden mit offenen Klemmen bei Raumtemperatur gelagert und täglich eine Impedanzmessung mit 50 Messpunkten im Frequenzbereich 10 kHz bis 0,1 Hz mit 50 mV Spannungsamplitude durchgeführt, die weniger als 6 min dauerte und den Kondensator unmerklich entlud.



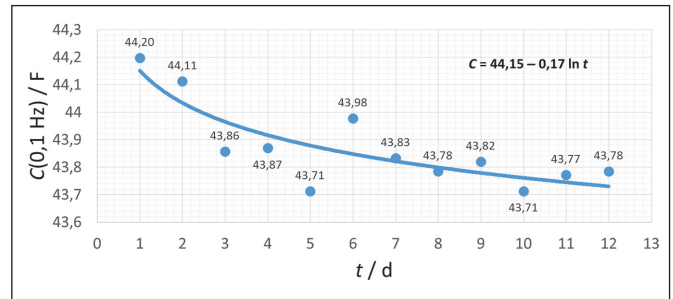
(a)



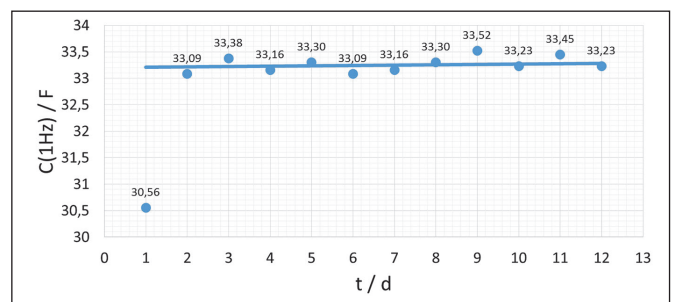
(b)



(c)



(d)



(e)

Abbildung 1: (a) Kondensatoren im Test: VINA Hy-Cap 3 V/50 F und 2,7 V/50 F, (b) Selbstentladung des 2,7-V-Superkondensators. Impedanzspektren im Frequenzbereich von 10 kHz bis 0,1 Hz, (c) ESR, (d) logarithmischer Trend der Kapazität, (e) nahezu konstante Kapazität bei mittleren Frequenzen

Die Ortskurven der Impedanz (Abbildung 1) zeigen qualitativ denselben Verlauf.

1. Der Elektrolytwiderstand  $R_e$  (Nulldurchgang der Ortskurve bei etwa 200 Hz) ändert sich nicht. Willkürliche Verschiebungen der Ortskurve auf der reellen Achse im Milliohmbereich werden durch die Kontaktierung verursacht. Der um den Elektrolytanteil korrigierte Innenwiderstand  $R(0,1 \text{ Hz}) - R_e \approx 6,0 \pm 0,1 \text{ m}\Omega$  ist konstant.
2. Die Kapazität  $C = [\omega \text{ Im } Z]^{-1}$  bei 0,1 Hz zeigt den Ladezustand eindeutig an. Es besteht eine logarithmische Abhängigkeit von der Zeit (Abbildung 1 c), was typisch für eine Redoxreaktion als Ursache der Selbstentladung ist. Diffusionsvorgänge würden einem  $t^{1/2}$ -Gesetz folgen und wären linear im doppelt-logarithmischen Diagramm. Die Kapazität bei 1 Hz streut zu stark für die praktische Nutzung zur Ladezustandsbestimmung.

Die Selbstentladung wächst nach unseren früheren Untersuchungen mit steigender Temperatur nach einer Kinetik 1. Ordnung gemäß dem Arrhenius-Gesetz

$$k = k_0 e^{-E_A/(RT)}$$

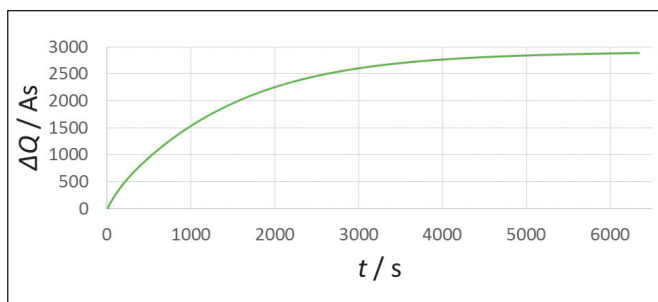
mit einer Aktivierungsenergie  $E_A$  in der Größenordnung von  $50 \text{ kJ mol}^{-1}$ , die typisch für heterogen-katalytische Sorptionsprozesse ist. Langsame elektrochemische Reaktionen zwischen Elektroden und Elektrolyt treiben einen geringen Leckstrom über die Doppelschicht. Redoxreaktionen durch Verunreinigungen und Gelöstgase mögen eine Rolle spielen, aber auch die Relaxation überladener Zustände zu einem niedrigeren Potenzial.

### 3 Ladezustand einer Batterie

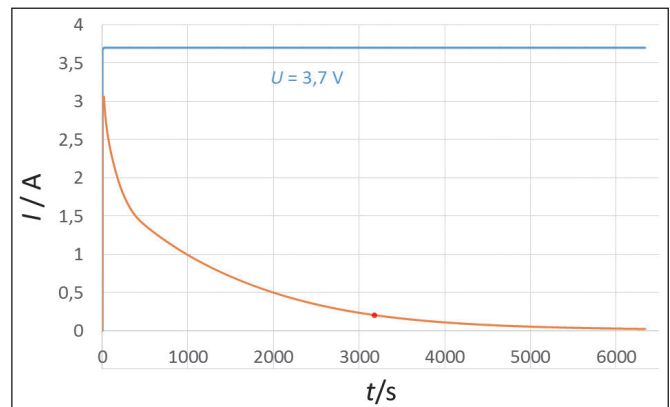
Lithiumionen-Batterien wurden mit konstanter Spannung auf einen definierten Ladezustand (SoC) geladen (Abbildung 2). Die Impedanzmessung im Frequenzbereich von 10 kHz bis 0,1 Hz belegt die Abhängigkeit vom Ladezustand (Abbildung 3):

1. Mit zunehmendem Ladezustand (SoC) wird die Ortskurve enger, d. h., der Innenwiderstand  $R(0.1 \text{ Hz})$  nimmt signifikant ab.
2. Für die kapazitive Ladezustandsbestimmung sind die Frequenzen 0,1 Hz und 100 Hz geeignet. Die Kapazität ändert sich besonders stark gegen Ende der Ladung. Die S-förmig Kurve von  $C(0,1 \text{ Hz})$  gegen den Ladezustand folgt keiner Geraden-, Polynom- oder Exponentialfunktion. Die  $C(100 \text{ Hz})$ -Kurve verläuft grob linear:  $\text{SoC} \approx (C+1,27)/2,59$ .

Die geschickte Skalierung der berechneten Ladung  $Q = CU$  auf den tatsächlichen Ladezustand ist noch zu lösen. Der spannungsbasierte Wert  $U/U_0$  weicht vom ladungsbezogenen SoC-Wert  $Q/Q_0$  ab. Die aus den Diagrammen ermittelten Werte sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

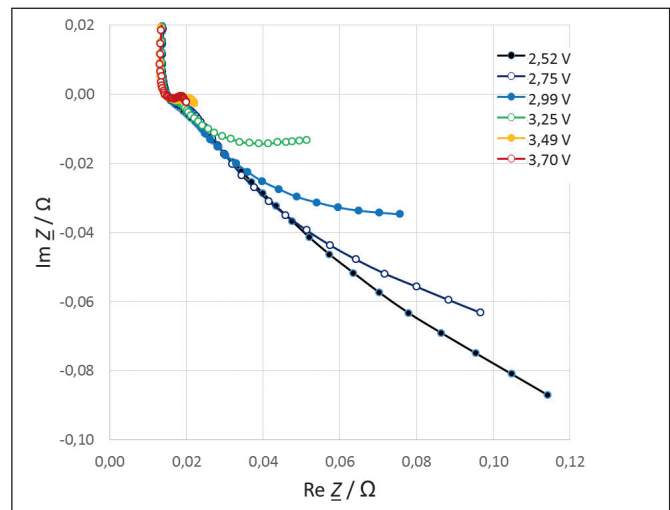


(a)

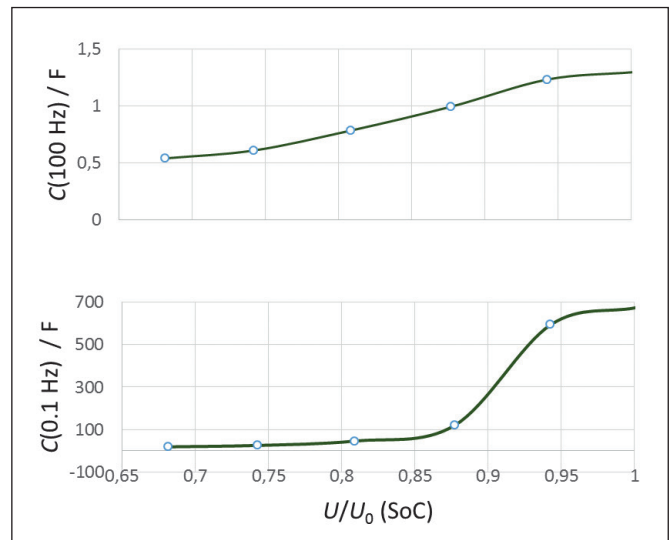


(b)

Abbildung 2: Ladekurve einer Lithiumionen-Batterie (Samsung NR18650-25R, 2,5 Ah): (a) elektrische Ladung  $2889 \text{ As} = 0,8 \text{ Ah}$ , (b) Stromverlauf bei Laden von 3,5 V auf 3,7 V.



(a)



(b)

Abbildung 3: (a) Impedanzspektren einer Lithiumionen-Batterie (Samsung NR18650-25R) bei unterschiedlichen Ladezuständen, (b) frequenzabhängige Kapazität gegen Ladezustand

Tabelle 1: Ladezustand einer Lithiumionen-Batterie  
(Samsung NR18650-25R)

SoC		68 %	74 %	81 %	88 %	94 %	100 %
$U$	(V)	2,522	2,747	2,992	3,245	3,488	3,703
$R_e$	(m $\Omega$ )	14,8	14,9	14,9	14,7	14,5	14,5
$R_{0,1}-R_e$	(m $\Omega$ )	99	82	61	37	7,7	5,5
$C_{100}$	(F)	0,540	0,609	0,784	0,993	1,231	1,295
$C_{0,1}$	(F)	18,3	25,2	46,8	119,2	592,9	674,4
$Q$	(As)	–	27,6	95,9	265,0	1366	2889
$C \cdot U$	(As)	46,2	69,2	137	386,8	1883	2497

## 4 Folgerungen

Die Impedanzmethode zeigt den Ladezustand von Doppelschichtkondensatoren und Lithiumbatterien eindeutig an.

---

### Referenzen:

- [1] P. Kurzweil, O. K. Dietlmeier, Elektrochemische Speicher: Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, rechtliche Grundlagen, Springer Vieweg, Wiesbaden, 1. Aufl., 2015.
- [2] P. Kurzweil, H.-J. Fischle, A new monitoring method for electrochemical aggregates by impedance spectroscopy, Journal of Power Sources 127 (2004) 331–340.
- [3] P. Kurzweil, B. Frenzel, A. Hildebrand, Voltage-dependent capacitance, aging effects, and failure indicators of double-layer capacitors during lifetime testing, ChemElectroChem 2(1) (2015) 6–13.
- [4] P. Kurzweil, Verfahren und Apparat zur Überwachung und Steuerung elektrochemischer Zellen und Aggregate, DE 102 20 172 (2005).
- [5] P. Kurzweil, M. Chamonine, A. Udalzew, Selbstentladung und Leckstromverhalten elektrochemischer Speicher: Impedanzspektroskopie im Langzeitversuch, Forschungsbericht 2016, OTH Amberg-Weiden, S. 90–94.

### **Projektpartner:**

Das Projekt betrifft die standortübergreifende Zusammenarbeit der Forschungscluster „East Bavarian Centre for Intelligent Materials“ (CIM) <sup>[5]</sup> und NANO-CHEM (NaCh).



### **Fördergeber:**

Bayerisches Staatsministerium für  
Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst



### **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

# Systemdienlicher Betrieb von technischen Einheiten aus BHKW und elektrischen Lasten

Thomas Gollwitzer, M. Eng.  
Raphael Lechner, M. Sc.  
Prof. Dr.-Ing. Markus Brautsch

## Zusammenfassung

Seit Mai 2015 erforschen das Institut für Energietechnik (IfE) GmbH und das Kompetenzzentrum Kraft-Wärme-Kopplung (KoKWK) an der OTH in Amberg den systemdienlichen Betrieb von sog. technischen Einheiten aus Blockheizkraftwerken (BHKW) und elektrischen Lasten im Rahmen des dreijährigen Forschungsprojekts „BHKWflex“. Das Projekt wird durch das Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie gefördert und leistet einen wichtigen Beitrag zur Flexibilisierung der Erzeugungs- und Nachfrageseite im elektrischen Versorgungsnetz. Es handelt sich um ein anwendungsorientiertes Forschungsprojekt, welches die Bereitstellung von Regelenergie durch technische Verbundsysteme (Erzeuger und Verbraucher) analysiert. Das Projekt ist in mehrere sachlogische Arbeitspakete aufgeteilt, welche beispielsweise auch bei der Vermarktung von Regelleistung in Industriebetrieben zu befolgen sind.

## Abstract

Since May 2015 the Institute for Energy Technology (IfE) and the Centre of Excellence for Combined Heat and Power at the OTH Amberg-Weiden have been researching the system conducive operation of technical units consisting of CHP plants and electrical loads as part of the research project „BHKWflex“. The project is funded by the Bavarian Ministry of Economy, Media, Energy and Technology and is contributing to the increasing flexibility of supply and demand in electric grids. It is an application-oriented project analyzing the supply of balancing energy by technically linked systems consisting of producers and consumers. The project is divided into various factual work packages, which also apply to the marketing of balance energy in industrial plants.

## 5 Einleitung

Die Energiewende führt in Deutschland zu großen Veränderungen im Bereich der Stromversorgung. Zukünftig wird die Abdeckung der sogenannten „Residuallast“ (= Stromverbrauch abzgl. Stromproduktion aus fluktuierenden, erneuerbaren Energien) an Bedeutung zunehmen. Durch die witterungsbedingte Einspeisung der Wind- und Solarkraftwerke schwankt der Residuallastbedarf (in  $\text{GW}_{\text{el}}$ ) bereits heute erheblich. Die hohe installierte Leistung dieser fluktuierend einspeisenden regenerativen Energieformen führt zudem zu hohen Leistungsgradienten (in  $\text{GW}_{\text{el}}/\text{h}$ ), die durch steuerbare Kraftwerke ausgeglichen werden müssen. Dies führt vermehrt dazu, dass steuerbare flexible Stromerzeuger und Stromverbraucher benötigt werden, um die Residuallast abzudecken.

Bereits heute können flexible einsetzbare und hocheffiziente Blockheizkraftwerke (BHKW) in Kombination mit steuerbaren industriellen Stromverbrauchern einen Beitrag zur Abdeckung der Residuallast und zur Regelenergiebereitstellung leisten. Durch die große Anzahl industrieller Verbraucher und Prozesse sowie die hohe installierte Leistung bei BHKW bietet sich eine sehr gute Chance, die Residuallastabdeckung zu flexibilisieren, indem industrielle Verbraucher den Stromverbrauch und regelbare Blockheizkraftwerke die Stromerzeugung in Abhängigkeit der Produktion aus fluktuierenden erneuerbaren Energien (Wind und Sonne) verändern und zu sogenannten „technischen Einheiten“ verbunden werden. Dies geschieht in den letzten Jahren vermehrt durch den Aufbau von virtuellen Kraftwerken, die von Betreibern zur Regelenergiebereitstellung genutzt werden.

## 6 Aufgabenstellung

Bei Blockheizkraftwerken sind derzeit noch verschiedene motor- und systemtechnische Restriktionen, insbesondere in Bezug auf die Reaktionszeiten und den Teillastbetrieb, zu beachten, welche die Regelenergiebereitstellung (insbesondere Primär- und Sekundärregelleistung) erschweren und zu lösen sind. Von großer Bedeutung sind beispielsweise die installierte Leistung, die Reaktionszeiten und Regelgüte, die darstellbaren Leistungsgradienten, die zulässigen Mindestleistungen, die Überlastfähigkeit oder die Einhaltung vorgegebener Temperaturgrenzen (Mindesttemperatur für Katalysator, erforderliche Temperaturen für Dampfauskopplung, ...).

Im Bereich der elektrischen Lasten, wie beispielsweise Elektroöfen, Druckluftsysteme oder Kälteanlagen, wird das Potenzial maßgeblich durch die vorhandenen Redundanzen, systembedingten Trägheiten, darstellbaren Lastgradienten und nutzbaren Speichervolumina (Wärmespeicher, Kältespeicher, Druckluftspeicher) sowie vom nachgelagerten Nutzungsprozess bestimmt.

Alle diese Parameter werden bei der systemtechnischen Auslegung von industriellen oder kommunalen Energiesystemen bisher nur in unzureichendem Maße betrachtet, da die heutigen Dimensionierungs-, Betriebs- und Regelstrategien sich auf die Deckung des unmittelbaren Bedarfs vor Ort konzentrieren und nicht auf die optimale Einbindung in das öffentliche Stromversorgungssystem ausgerichtet sind.

Das IfE betreibt an der Ostbayerischen Technischen Hochschule in Amberg einen Teststand mit einer typischen BHKW-Anlage mittlerer Größe, wie sie in zahlreichen Kommunen und Industriebetrieben installiert ist:

- elektrische Leistung: 240 kW
- thermische Leistung: 220 kW
- Pufferspeichervolumen: 30.000 Liter

Die BHKW-Anlage wird derzeit ausschließlich wärmegeführt (Einspeisung in ein Nahwärmenetz) betrieben und der erzeugte Strom wird zu 100 Prozent in das öffentliche Stromnetz eingespeist, ohne flexible Fahrweisen zu berücksichtigen. Dieser Ausgangszustand kann stellvertretend für die Mehrzahl der derzeit in der Industrie sowie in der Objekt- und öffentlichen Versorgung betriebenen BHKW-Anlagen angesehen werden.

Aufbauend auf diese bereits vorhandene Infrastruktur wird im Rahmen des geplanten Forschungsvorhabens die Regelenergiebereitstellung mittels Blockheizkraftwerken umfassend technisch-wirtschaftlich untersucht und im Praxisbetrieb umgesetzt und erprobt. Dabei sollen reale Abrufzeitpunkte und Abrufdauern im Regelenergiemarkt in Deutschland berücksichtigt werden, um die Integration

von industriellen und kommunalen Verbrauchern (insbesondere bei Neuplanungen) in vorhandene Regelenergie-Pools zu erleichtern.

Im Vordergrund steht dabei nicht die konkrete Produktentwicklung, sondern die Erforschung der motor- und systemtechnischen Grundlagen für die optimale Gestaltung flexibler Energiesysteme. Ausgehend von den Projektergebnissen können dann konkrete Entwicklungen erfolgen (z. B. Entwicklung optimierter BHKW-Module für den Regelenergiebetrieb, Auslegung konkreter Energiesysteme für spezielle Anwendungsfälle). Die Projektziele sind im Einzelnen:

- Umfassende messtechnische Untersuchung der technischen Eignung sowie des An- und Abfahrverhaltens verschiedener BHKW-Technologien für Regelenergiebereitstellung. Hierbei werden neben der BHKW-Versuchsanlage des IfE auch weitere BHKW-Anlagen bei Forschungs- und Industriepartnern untersucht.
- Untersuchung von technischen Maßnahmen und motortechischen Regelstrategien zur Optimierung von BHKW-Modulen für die Regelenergiebereitstellung, insbesondere Primär- und Sekundärregelleistung (Reaktionszeiten, Start-Stopp-Zeiten, An- und Abfahrverhalten, Emissionsverhalten) und daraus folgend die Ableitung der technischen Anforderungen an BHKW-Module für den flexiblen Betrieb.
- Dimensionierung, Einbindung und regelungstechnische Abstimmung einer regelbaren elektrischen Last zur Simulation typischer industrieller und kommunaler Großverbraucher, die in die Regelenergiebereitstellung einbezogen werden können.
- Kombination des BHKW mit der regelbaren elektrischen Last zu einer sogenannten „technischen Einheit“ zur Erweiterung der Regelenergiekapazitäten. Untersuchung und Entwicklung von Betriebs- und Regelstrategien für die kombinierte Regelenergiebereitstellung mittels BHKW und elektrischer Last unter Beachtung der Randbedingungen (thermische Versorgungssicherheit, verfügbares Puffervolumen, ...).
- Erfassung und Analyse der Regelenergieabrufe im Praxisbetrieb und Ermittlung optimaler Betriebsstrategien zur Regelenergiebereitstellung mittels KWK-Anlagen im Praxisbetrieb.
- Entwicklung einer systematischen Vorgehensweise zur Auslegung und wirtschaftlichen Bewertung vernetzter Energiesysteme für den flexiblen Betrieb in kommunalen und industriellen Anwendungen ausgehend von den technischen Projektergebnissen und unter Berücksichtigung der rechtlichen und wirtschaftlichen Randbedingungen.

- Dokumentation und Aufbereitung der Projektergebnisse zur Übertragung auf kommunale und industrielle Anwendungsfälle.

Als Partner für die BHKW-Entwicklungen konnte die Fa. Burkhardt GmbH aus Mühlhausen gewonnen werden. Für die Untersuchung des Betriebs- und Emissionsverhaltens von BHKW-Modulen im Regelleistungsbetrieb ist das Kompetenzzentrum für Kraft-Wärme-Kopplung mit eingebunden. Die Direktvermarktung des produzierten Stroms im Rahmen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes erfolgt über die Lechwerke AG und die Vermarktung von Regelleistung im Pool der Südvolt GmbH.

## 7 Der Regelleistungsmarkt in Deutschland

In Deutschland wird Regelleistung von den vier deutschen Übertragungsnetzbetreibern zentral über eine Internetplattform ([www.regelleistung.net](http://www.regelleistung.net)) beschafft. Die entsprechenden Rahmenbedingungen für die Regelernergievermarktung wurden von der Bundesnetzagentur in verschiedenen Beschlüssen für die drei Regelleistungsarten Primärregelleistung (PRL), Sekundärregelleistung (SRL) und Minutenregelleistung (MRL) festgelegt. Diese unterscheiden sich neben vermarktungstechnischen Aspekten auch hinsichtlich der technischen Anforderungen, die bei der Erfüllung einzuhalten sind. So sind bei der Bereitstellung von Regelleistung in Deutschland laut TransmissionCode 2007 folgende Anforderungen zu berücksichtigen:

- Minutenregelleistung: Die angebotene Leistung ( $P_{el,MRL}$ ) muss innerhalb von max. 15 Minuten an- und abgefahren werden können (Lastrampe: mind. 6,67 Prozent  $P_{el,MRL}/min$ ).
- Sekundärregelleistung: Die angebotene Leistung ( $P_{el,SRL}$ ) muss innerhalb von max. 5 Minuten an- und abgefahren werden können (Lastrampe: mind. 20,0 Prozent  $P_{el,SRL}/min$  bzw. 0,33 Prozent  $P_{el,SRL}/sec$ ).
- Primärregelleistung: Die angebotene Leistung ( $P_{el,PRL}$ ) muss innerhalb von max. 30 Sekunden linear an- und abgefahren werden können (Lastrampe: 3,33 Prozent  $P_{el,PRL}/sec$ ).

Im Bereich der Bereitstellung von SRL und insbesondere bei der PRL sind noch umfassende, praxisorientierte Forschungsarbeiten hinsichtlich der Motortechnik, Motorsteuerung bei BHKW und der Einbindung in das Gesamtsystem notwendig, die den Regelernergiebedarf und -abruf in Deutschland entsprechend berücksichtigen. Derzeit sind Blockheizkraftwerke vor allem hinsichtlich eines möglichst störungsfreien Betriebs auf Nennlast, eine hohe Betriebssicherheit und zunehmend auf einen hohen elektrischen Wirkungsgrad optimiert. Für die Regelernergiebereitstellung und zukünftige Abdeckung der Residuallast sind allerdings vermehrt schnell regelbare, flexible Stromerzeuger mit

möglichst hohem Wirkungsgrad auch im Teillastbereich notwendig. Wie aus Messungen am eigenen BHKW-Prüfstand des IfE hervorgeht (vgl. nachfolgend Abbildungen), können diese Anforderungen von heutigen Blockheizkraftwerken nur zum Teil eingehalten werden.

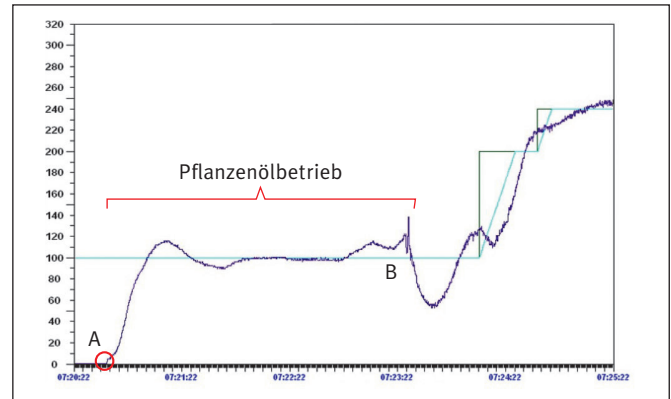


Abbildung 1: BHKW Kaltstart (Darstellung 1 von 07:20:22 bis 07:25:22 Uhr)

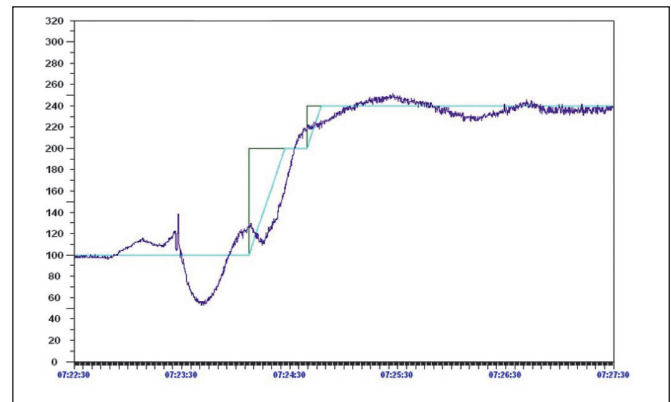


Abbildung 2: Fortsetzung BHKW Kaltstart (Darstellung 2 von 07:22:23 bis 07:27:30 Uhr)

Aus diesem Grund sind weitere Forschungsarbeiten notwendig, die eine schnellere Regelbarkeit der Motoren erlauben. Darüber hinaus muss bei der PRL die Leistung immer symmetrisch angeboten werden. Dies bedeutet, dass die angebotene Regelleistung (z. B. 1 MW<sub>el</sub>) sowohl positiv als auch negativ bereitgestellt werden muss. Dies hat zur Folge, dass BHKW zur Bereitstellung von PRL durchgehend im Teillastbereich betrieben werden müssen, um die Leistung bei Bedarf sowohl verringern als auch erhöhen zu können. Neben einem schlechteren elektrischen Wirkungsgrad, vgl. Abbildung 3, führt dies auch zu einer sogenannten Must-Run-Kapazität, welche die Flexibilität der Residuallastabdeckung einschränkt, um die Systemsicherheit zu gewährleisten.



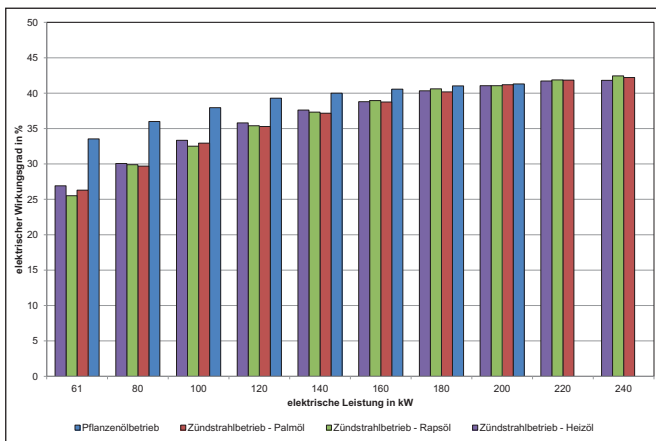


Abbildung 3: Elektrischer Wirkungsgrad bei unterschiedlichen Betriebspunkten

Bei den industriellen Prozessen (sog. „Demand Side Management“ oder „Demand Response“ durch Steuerung elektrischer Lasten) ist in Abhängigkeit der individuellen Prozessparameter prinzipiell die Bereitstellung aller Regelleistungsarten technisch möglich, wird jedoch in der Praxis nur zum Teil angewendet. Insbesondere hinsichtlich der Systemintegration der einzelnen Prozesse – auch in Verbindung mit sog. Querschnittstechnologien (Heizen, Kühlen usw.) – besteht noch großer anwendungsorientierter Forschungsbedarf, ebenso wie bei Identifikation technisch und wirtschaftlich geeigneter Dimensionierungs-, Betriebs- und Regelstrategien für technische Einheiten aus BHKW-Modulen und steuerbaren Verbrauchern.

## 8 Präqualifikation für die Bereitstellung von Regelleistung

Erster Schritt des Vorhabens war die Klärung der technischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Randbedingungen für die Regelenergiebereitstellung mittels BHKW und elektrischer Lasten. Dies beinhaltet u. a. die Identifikation geeigneter Regelenergiepools, die Festlegung der technischen Kommunikationsschnittstellen für die Regelenergieanforderung sowie die elektrische, thermische und steuerungstechnische Einbindung elektrischer Lasten.

Aus rechtlicher und wirtschaftlicher Sicht müssen die Wechselwirkungen der Regelenergiebereitstellung mit den bestehenden Brennstoff-, Strom- und Wärmelieferverträgen untersucht und im Rahmen einer Vollkostenrechnung mit Sensitivitätsanalyse bewertet werden. So muss z. B. für die Teilnahme an der Regelenergiebereitstellung der vom BHKW erzeugte Strom zwingend direkt vermarktet werden (Regelenergiebereitstellung im Rahmen des EEG ist nicht möglich), sodass hierfür zunächst die rechtlichen und wirtschaftlichen Risiken bewertet werden müssen. Die in diesem Schritt erarbeitete Vorgehensweise zur rechtlichen und wirtschaftlichen Bewertung kann als Muster für die Übertragung auf zahlreiche weitere kommunale und industrielle Anwendungsfälle dienen.

Im Rahmen von ersten Versuchen am Prüfstand des Instituts für Energietechnik wurde festgestellt, dass das vorhandene BHKW die geforderten Rahmenbedingungen der positiven SRL nicht in jedem Fall einhalten kann, da es bis zu 8 Minuten dauert, bis das BHKW die Nennleistung erreicht, vgl. Abbildung 1 und Abbildung 2. Durch Optimierungsmaßnahmen konnten die geforderten Rampen allerdings eingehalten werden, wie durch Messungen nachgewiesen wurde, vgl. Abbildung 4.

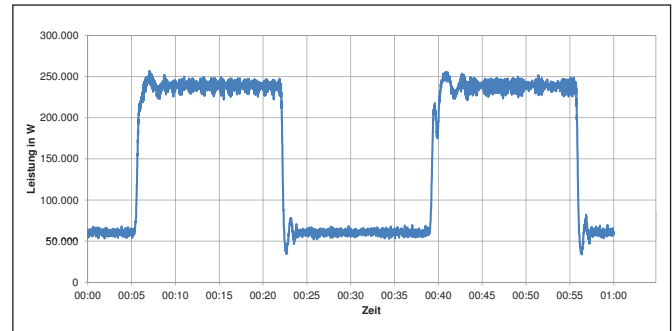


Abbildung 4: Präqualifikationsmessung zur Bereitstellung von positiver Sekundärregelleistung

Es ist aber notwendig, die Reaktionszeiten weiterer BHKW-Typen unterschiedlicher Technologien (Dieselmotor, Zündstrahlmotor, Gas-Otto-Motor) im Betrieb mit verschiedenen Brennstoffen (z. B. Erdgas, Heizöl, Pflanzenöl, Holzgas) zu ermitteln, um den Stand der Technik und die technologischen Grenzen abzubilden. Schwerpunkt der Untersuchungen bildet das An- und Abfahrverhalten für die unterschiedlichen Formen der Regelenergiebereitstellung (positiv/negativ, Minutenreserve/Sekundärregelleistung/Primärregelleistung) bei unterschiedlichen Betriebszuständen (warmer Motor, kalter Motor, vollständige Zu-/Abschaltung aus dem Stand, Leistungsreduzierung bzw. Leistungserhöhung bei laufendem Motor, ...).

Ein weiterer wichtiger Punkt, insbesondere für nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) genehmigungsbedürftige Anlagen, ist die Untersuchung des Emissionsverhaltens während des Regelleitungsabrufs, da hier u. U. die genehmigten Emissionsgrenzwerte überschritten werden. Zudem erlaubt die Messung der Emissionen Rückschlüsse auf die Gemischzusammensetzung (fett, mager), die das Startverhalten und darstellbaren Rampen (kW/sec) von BHKW-Modulen entscheidend beeinflusst. Für diese Untersuchungen wird das IfE durch das Kompetenzzentrum für Kraft-Wärme-Kopplung an der OTH Amberg-Weiden unterstützt.

## 9 Systemanalyse und Simulation

Bei der Regelenergiebereitstellung können neben Erzeugern (z. B. BHKW) auch große elektrische Verbraucher mit einbezogen werden, die durch Zu- oder Abschaltung negative bzw. positive Regelenergie liefern können.

Zur Simulation dieses Anwendungsfalls soll im konkreten Fall eine regelbare elektrische Last eingebunden werden. Durch Zuschaltung der Last kann der Regelenergieabruf großer industrieller oder kommunaler elektrischer Verbraucher (z. B. Wärmepumpen, Öfen, Kompressoren, ...) im Verbund mit dem BHKW simuliert und erforscht werden. In der nachfolgenden Abbildung ist beispielhaft der elektrische Leistungsbezug einer Kompressionskältemaschine dargestellt, welche über die steuerbare Last simuliert werden kann.

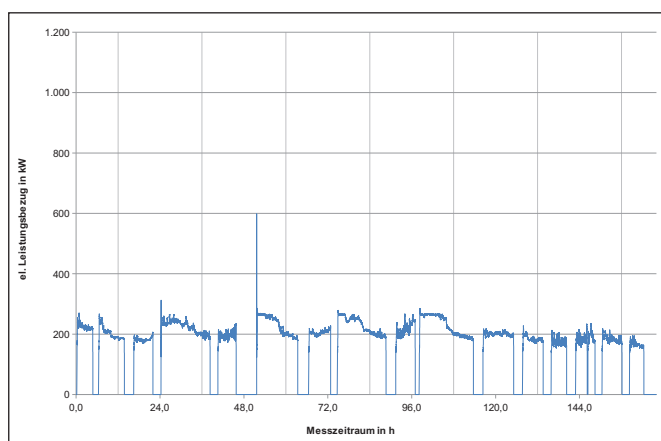


Abbildung 5: Zeitlicher Verlauf der el. Leistungsaufnahme einer Kompressionskältemaschine

Diese „technische Einheit“ aus BHKW und elektrischem Verbraucher ermöglicht prinzipiell die Bereitstellung von Primärregelleistung. Die entsprechende praktische Anwendung muss im Rahmen des Forschungsvorhabens umfassend untersucht und auf ihre Anwendbarkeit hin geprüft werden.

Schwerpunkt der Untersuchungen ist die Erforschung optimaler Regelungs- und Betriebsstrategien für die elektrische Last im Verbund mit dem bestehenden Energieversorgungssystem aus BHKW, Pufferspeicher und Spitzenlastkessel. So muss z. B. für die gesicherte Regelenergiebereitstellung stets ein ausreichendes Puffervolumen vorgehalten werden, um die thermische Leistung aufnehmen zu können. Andererseits müssen thermische Lastspitzen, insbesondere bei Beginn des Arbeitstages, ausgeglichen werden können. Zudem ist es denkbar, durch die regelungstechnische Kombination von BHKW und elektrischer Last die Reaktionszeiten zu erhöhen (elektrischer Verbraucher schaltet sofort zu, BHKW folgt zeitverzögert). Bei Industrieprozessen sind zum Teil anderweitige Speichersysteme (z. B. Hochtemperaturspeicher mit Thermoöl oder Dampf) notwendig, welche für die Regelenergievermarktung ebenfalls anwendungsspezifisch zu dimensionieren sind.

## 10 Regelenergieabrufe und Dimensionierung

Die verbesserte Koordination bereits vorhandener Versorgungsstrukturen zur Regelenergiebereitstellung im Rahmen der Simulationen verlangt genaue Kenntnisse

über Zeitpunkt und Dauer der einzelnen Abrufe. Derzeit stehen nur öffentlich verfügbare Daten der Übertragungsnetzbetreiber zur Untersuchung der Regelenergieabrufe und zur Dimensionierung der technischen Einheiten zur Verfügung. Die Aussagekraft dieser Daten wird im Rahmen des Forschungsprojekts analysiert und darüber hinaus werden weitere anlagenscharfe Daten aufgezeichnet. Die aufgezeichneten Daten werden im Rahmen des Projekts mit dem entwickelten System aus BHKW (240 kW<sub>e</sub>) und elektrischer Last im Praxisbetrieb detailliert erforscht. Schwerpunkt der Untersuchungen sind dabei die möglichen Auswirkungen der realen Regelenergieabrufe auf die vorhandenen Energieversorgungssysteme sowie die Wechselwirkungen zwischen den Erzeugern und Verbrauchern (BHKW ↔ elektrischer Verbraucher ↔ Pufferspeicher ↔ Gaskessel).

Von Interesse sind u. a. die Auswirkungen der Regelenergiebereitstellung auf den elektrischen und thermischen Lastgang der Liegenschaft. So führt z. B. die Anforderung von negativer Regelenergie lokal zu einer elektrischen Lastspitze, gleichzeitig aber auch zu einer kurzzeitigen Unterbrechung des Gasbezugs (Abschaltung BHKW) mit anschließender Lastspitze beim Wiedereinschalten. Dies kann Auswirkungen auf die Bezugskonditionen für Strom und Gas haben, die bei der Wirtschaftlichkeit der Regelenergiebereitstellung zu berücksichtigen sind.

## 11 Ausblick

Basierend auf den bisherigen Untersuchungen sollen in Zusammenarbeit mit der Fa. Burkhardt GmbH, Mühlhausen, geeignete Regelverfahren und An- bzw. Abfahrstrategien entwickelt werden, die ein schnelleres Start- und Stopp-Verhalten, ggf. bis hin zur Bereitstellung von Primärregelleistung, ermöglichen. Zu beachten sind dabei die technologischen Grenzen (z. B. Anlassvorgang bei Gasmotoren, Netzsynchrisation, ...) und die praxistaugliche Anwendbarkeit in Standardaggregaten. Die notwendigen Rahmenbedingungen sollen im Forschungsprojekt identifiziert und dokumentiert werden.

Neben dem Start-Stopp-Verhalten sollen auch gezielt die Leistungsregler bzw. Regelparameter so angepasst werden, dass die geforderten Rampen (Leistungsreduzierung bzw. Leistungserhöhung in kW/sec) dargestellt werden können. Dabei ist zu beachten, dass auch bei schnellen Rampen stets die erforderliche Gemischzusammensetzung eingehalten werden kann, um eine unzulässige Überfettung oder Abmagerung zu vermeiden, die zu hohen Abgasemissionen oder kritischen Verbrennungszuständen führen können (z. B. Beschleunigungsklopfen). Die bisher in BHKW eingesetzten Gasmischer und Leistungssteller reagieren meist vergleichsweise träge, da sie nicht auf die Regelenergiebereitstellung angepasst sind. Für die erforderlichen Emissionsmessungen steht wiederum das Kompetenzzentrum für Kraft-Wärme-Kopplung an der OTH Amberg-Weiden unterstützend zur Verfügung.

## 12 Danksagung

Wir bedanken uns beim Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie für die Förderung des Projekts im Rahmen des Bayerischen Energieforschungsprogramms. Außerdem bedanken wir uns beim Kompetenzzentrum Kraft-Wärme-Kopplung und

bei den beteiligten Firmenpartnern Burkhardt GmbH, Südvolt GmbH und Lechwerke AG für die technische und organisatorische Unterstützung. Ein ganz besonderer Dank geht darüber hinaus an das technische Betriebspersonal der OTH für das entgegengebrachte Vertrauen und die hervorragende Zusammenarbeit.

---

### **Projektpartner:**

Burkhardt GmbH, Mühlhausen  
Südvolt GmbH, München  
Lechwerke AG, Augsburg

### **Fördergeber:**

Bayerisches Staatsministerium für  
Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie



### **Kontakt:**



**Thomas Gollwitzer, M. Eng.**

Institut für Energietechnik IfE GmbH  
an der Ostbayerischen Technischen  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

th.gollwitzer@oth-aw.de



**Raphael Lechner, M. Sc.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Kompetenzzentrum für Kraft-Wärme-  
Kopplung  
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  
Kompetenzzentrum für Kraft-Wärme-  
Kopplung  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

m.brautsch@oth-aw.de

# Development of Micro Turbine Generators for Waste Heat Recovery

Prof. Dr.-Ing. Andreas P. Weiß  
Dipl.-Ing. (Univ.) Gerd Zinn

## Abstract

The paper introduces a micro turbine generator construction kit and discusses possible applications of such small machines below  $100 \text{ kW}_{\text{el}}$ . The reasons why a simple single stage axial impulse turbine is used as standard expander are explained as well as its efficiency disadvantages. Thus, as an alternative a radial-inflow cantilever turbine was designed and numerically and experimentally investigated in comparison to the axial impulse stage. The expected and predicted efficiency benefit of about 3 % points could be confirmed.

## Zusammenfassung

Der Aufsatz stellt die Entwicklung eines Baukastensystems für Mikroturbinengeneratoren  $\leq 100 \text{ kW}_{\text{el}}$  und deren Anwendungen in der Abwärmeverstromung in der Industrie vor. Es wird erläutert, warum das Baukastensystem eine einfache axiale Impulsturbine als Expander einsetzt und wie deren wesentlicher Nachteil – ein geringes Wirkungsgradpotenzial – durch die Cantilever-Bauart überwunden werden könnte. Um die theoretischen Überlegungen zu überprüfen, wurden eine Impuls- und eine Cantilever-Turbine für eine identische Expansionsaufgabe ausgelegt, gebaut und sowohl numerisch als auch experimentell miteinander verglichen. Der prognostizierte Wirkungsgradvorteil von 3 Prozent-Punkten konnte bestätigt werden.

## 1 Introduction

In a big scale – several or hundreds of megawatts – waste heat recovery is state-of-the-art yet. Consider for example gas turbine power plants where the exhaust heat of the gas turbine is converted into additional electric power by a steam power cycle downstream.

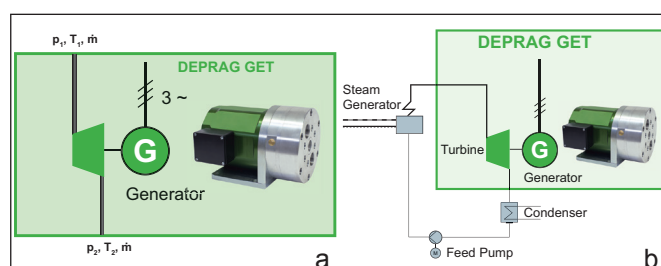


Figure 1: Different application principles of a micro turbine generator<sup>[1]</sup>

However, in a very small scale – below  $100 \text{ kW}_{\text{el}}$  there are only very few solutions on the market to convert waste

heat to electricity although there is a big potential in industry<sup>[2]</sup>. In many decentralized combined heat and power plants which burn natural gas or bio gas in combustion engines ( $< 500 \text{ kW}_{\text{el}}$ ), the waste heat in the exhaust gas and/or cooling water has not been used so far. Here, a micro turbine generator directly installed in the exhaust flow of the combustion engine (Figure 1 a) or as an expander in a bottoming steam or organic Rankine cycle (Figure 1 b) could increase electrical efficiency up to 5 % points.

Natural gas is transported under high pressure in order to reduce the volume flow rate. At the end of the line, high pressure must be reduced to the pressure level of the customer. In many cases, the pressure is just throttled down – valuable energy is wasted. Again, a micro turbine generator could recover a portion of the energy which was necessary to bring the gas to the original high pressure level (Figure 1 a).

Regarding all these possible applications, the authors are convinced that there is a growing market for micro turbine generators below 100 kW<sub>el</sub>. Thus, the company DEPRAG SCHULZ GMBH u. CO. and the University of Applied Sciences (UAS) Amberg-Weiden have been collaborating successfully for many years in developing those systems.

## 2 The micro-turbine-generator-construction-kit

Due to the various possible applications with different heat sources, heat flow rates, temperature levels, pressure levels and working fluids it is not appropriate to design and build some standard machines to stock. In fact, it is necessary to develop a very flexible micro-turbine-generator-construction-kit by means of which a customized turbine generator can be designed and built quickly for any required power output, any working fluid and any boundary conditions out of a wide range. In [3] the author discussed this task in more detail and came to the conclusion that a single stage axial impulse turbine mounted on a permanent magnet high-speed generator is the best i.e. most flexible compromise. Compared to a (radial-inflow) reaction turbine the axial single stage impulse turbine is able to process theoretically unlimited pressure ratios, requires lower rotational speed, does not produce axial thrust and can be designed with partial admission what allows the implementation of smaller turbines.

Figure 2 displays the developed micro turbine generator concept. Its main features are:

- hermetically sealed turbine-generator (3 –120 kW<sub>el</sub>, implemented with 5 different sizes)
- single stage axial impulse turbine (10,000 – 70,000 rpm)
- integrally manufactured turbine wheel (Ø 50 – 250 mm)
- permanent magnet high-speed generator
- turbine wheel directly mounted on generator shaft: just one set of bearings required, no gear, no coupling
- compact design, low material usage
- design can be easily adapted to different boundary conditions, fluids etc.

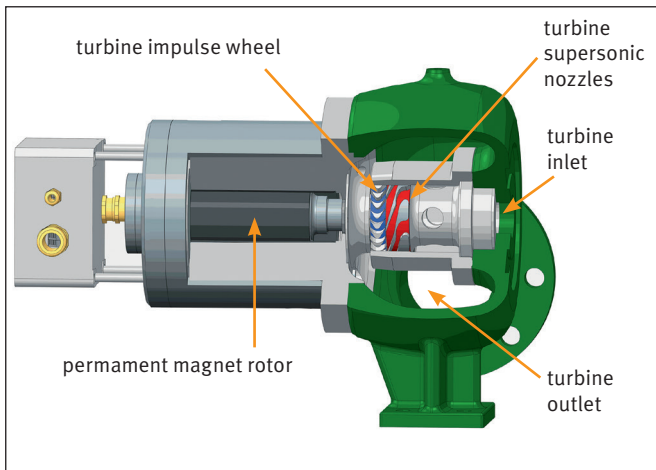


Figure 2: The micro turbine generator concept

## 3 The potential of the cantilever turbine concept

As mentioned in the chapter above the advantages of a pure impulse turbine design are the ability to process very high pressure ratios per stage and the option to design the turbine stage with partial admission due to the fact there is no pressure drop across the rotor blading (see Figure 3 a).

Partial admission means that a portion of the total arc of the annulus is blocked off. Hence, the flow impinges only on-parts of the rotor blading. Thereby very small power output turbines can be implemented without requiring blading heights that are too small to be manufactured with sufficient accuracy.

However, the disadvantage of the impulse design is the lower efficiency potential compared to the reaction design. In an impulse stage the nozzles convert the entire required stage enthalpy drop  $\Delta h$  into kinetic energy. The rotor blades turn the flow without changing the magnitude of velocities ( $|w_1| = |w_2|$ ). Equation (1) shows the EULER-equation which describes the work done in a stage of a turbo-machine. In an axial impulse stage where  $u_1 = u_2$  only the “ $c_1^2 - c_2^2$ ”-term can make a contribution. Thus, the nozzle exit velocity  $c_1$  and thereby the flow losses are very high.

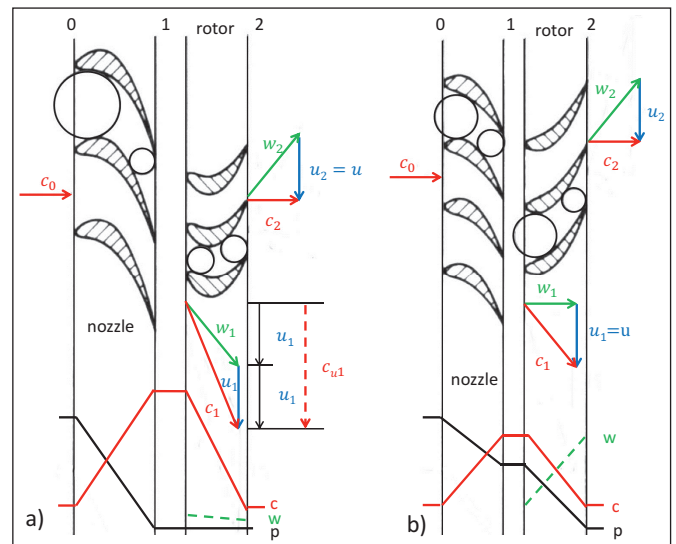


Figure 3: Comparison impulse (a) and reaction stage (b); (both axial)

$$\Delta h_{blading} = c_{u1} * u_1 - c_{u2} * u_2 = \frac{1}{2} * [(c_1^2 - c_2^2) - (w_1^2 - w_2^2) + (u_1^2 - u_2^2)] \quad (1)$$

In a 50 % reaction stage ( $|w_2| > |w_1|$ ; see Figure 3 b) the conversion of the stage enthalpy drop is equally distributed between nozzle and rotor blades. Thus, the nozzle exit velocity  $c_1$  is not as high as in the impulse stage. Lower velocity means lower loss. The following acceleration ( $|w_2| > |w_1|$ ) and pressure drop in the rotor blades have the same magnitude as in the nozzle blades

(i.e. 50 % reaction). Due to the acceleration and the smaller amount of flow turning in the rotor passages the reaction rotor losses are smaller than those of an impulse rotor.

If the flow through a turbine wheel is subjected to a significant change in radius i.e. a change in circumferential velocity, the “ $u_1^2 - u_2^2$ ”-term contributes a substantial part to the overall enthalpy conversion. The radial inflow cantilever turbine (Figure 4 b) benefits from this “ $u_1^2 - u_2^2$ ”-effect.

The author’s research group has recently developed small cantilever “quasi-impulse”-turbines which do not accelerate the fluid in the rotor ( $|w_1| = |w_2|$ ) and are therefore able to work with partial admission. Nevertheless, there is a small amount of reaction caused by the “ $u_1^2 - u_2^2$ ”-term (ca. 10 %). The Mach numbers at nozzle exit and rotor inlet remain smaller than for the axial counterpart. Thus, the losses are smaller and the efficiency is higher than in an axial impulse turbine. Of course, this benefit does have a disadvantage: the cantilever “quasi-impulse”-turbine requires a slightly higher circumferential speed.

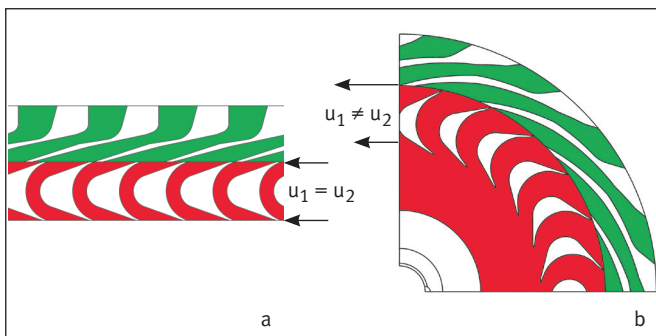


Fig. 4: Comparison axial impulse (a) and radial inflow cantilever stage (b)

#### 4 Numerical and experimental investigation of a cantilever turbine compared to an axial impulse turbine

In order to prove the described considerations, a single stage axial impulse turbine and a single stage cantilever “quasi impulse”-turbine were designed by means of an in-house 1D-design tool for identical boundary conditions. The expansion task was defined with respect to the upper limits of the available high speed drive test facility (see <sup>[4]</sup>):

Working fluid:	compressed air (pressure dew point ca. – 40 °C at 10 bar)
Mass flow rate:	0.065 kg/s
Inlet pressure:	10 bar (a)
Outlet pressure:	1 bar (a)
Inlet temperature:	about 20–22 °C
Rotational speed:	49,000 rpm
Wheel Diameter	Ø 80 mm

The axial turbine (Figure 5, left) which serves as reference and the cantilever turbine (Figure 5, right) were built by DEPRAG. Before testing, each design was investigated by 3D flow simulation. This allowed a deeper view inside the flow field, revealing for example flow separations or shock waves. The commercial software “FINE™/Turbo 8.9-2” by NUMECA/Germany (see <sup>[5]</sup>) was used for the calculations. It uses a Reynolds-averaging Navier-Stokes solver for turbulent and compressible flow. The Spalart-Almaras turbulence model was applied.

For simplified simulations with full admission, it was possible to model just a segment of the turbine which was discretized by about two million grid points. For partial admission, which is applied in both turbines (axial about 60 %, cantilever about 50 %), 360° of the turbine had to be discretized by about 50 million grid points. In these cases only one frozen rotor position was simulated.

Figure 6 displays the Mach number distributions of the axial impulse turbine at 50 % blade height. The calculation was carried out with 60 % partial admission. The nozzles accelerate properly to a Mach number of about 2.4. The rotor inlet Mach number in the relative frame is transonic. In contrast to the 1D design calculation, the flow decelerates within the rotor blading to subsonic outlet Mach number. The flow separates from the buckets in the region of the highest curvature of the suction side. However, before leaving the blade channel it reattaches. The variation of the flow field in circumferential direction is caused by the partial admission. The calculated isentropic expansion efficiency (total-to-static) is 61.0 % in the 3D-simulation and 63.4 % in the 1D-calculation.

The radial nozzles of the cantilever turbine (Figure 7) accelerate the flow continuously to a Mach number of about 2.2. The Mach number is slightly lower because part of the enthalpy or pressure drop is done within the radial buckets as described earlier. The inlet as well as the exit relative Mach number of the buckets is transonic as designed. Within the bucket flow channel a significant deceleration with flow separation occurs in the area of maximum curvature. However, the flow reattaches before outlet. The calculated isentropic expansion efficiency (total-to-static) is 65.4 % in the 3D-simulation and 67.5 % in the 1D-calculation. So, the 3D-simulations confirm the magnitude of about 4 % points for the efficiency benefit of the cantilever concept.

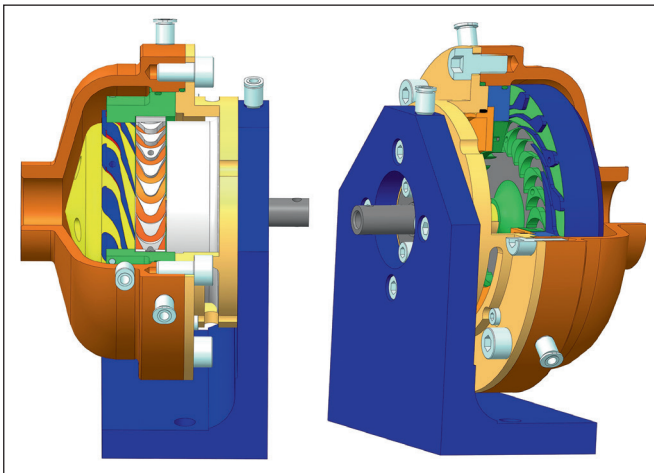


Figure 5: The axial impulse turbine (left) and the cantilever turbine (right)

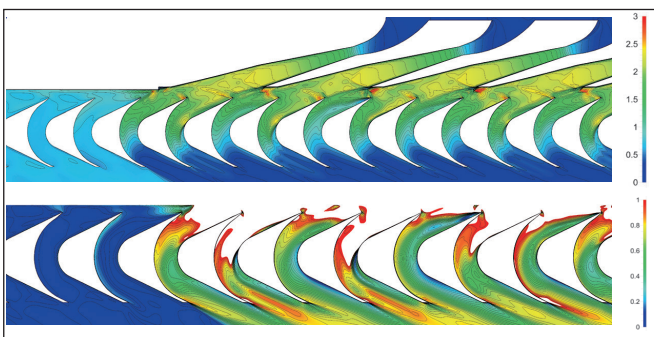


Figure 6: Mach number distributions at 50 % blade height for the axial impulse turbine; upper part: absolute Mach number in nozzles and buckets; lower part: relative Mach number in buckets

Both turbine geometries were built and tested in the “Test facility for compressed air drives” of the University of Applied Sciences Amberg-Weiden. The test facility is described in [4]. The main component of the facility is an eddy current brake which allows braking of drives up to 6 kW and 50,000 rpm. Torque, rotational speed and air consumption of the investigated drive can be measured simultaneously. So, the drive efficiency can be calculated. Inlet and outlet temperatures and pressures of the air are measured and four further pressure readings can be determined. Usually, the pressures in the nozzle throat and between nozzle and blade wheel are measured.

Figure 8 compares the total-to-static isentropic efficiency of the axial impulse and the cantilever turbine for the design inlet pressure of 10 bar. At design rotational speed of 49,000 rpm the cantilever shows about 60 % efficiency compared to 57 % of the axial turbine. So, measured efficiencies are significantly lower than calculated values. However, as expected, the cantilever turbine concept proves its efficiency advantage thanks to the small amount of reaction – although it works with 50 % partial admission.

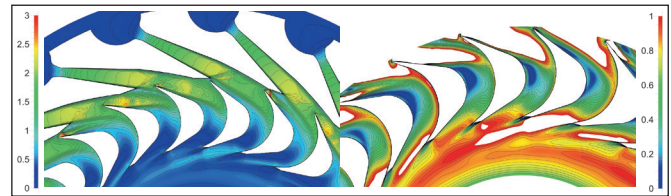


Figure 7: Mach number distributions at 50 % blade height for the cantilever turbine; upper part: absolute Mach number in nozzles and buckets; lower part: relative Mach number in buckets

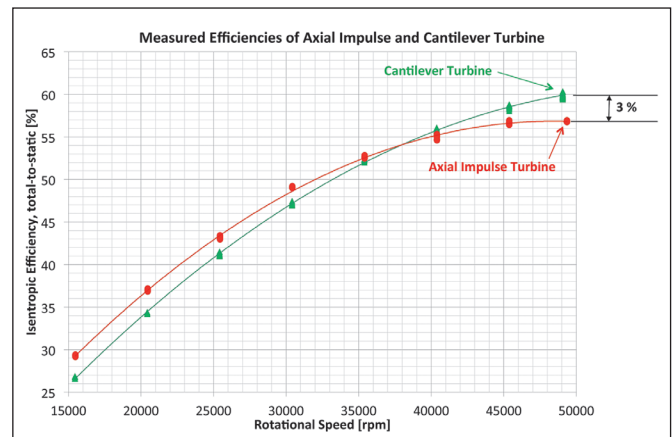


Figure 8: Measured total-to-static isentropic efficiencies of axial impulse and cantilever turbine

Another major difference between the two curves is their slope. That of the axial turbine starts steeper and reaches a clear plateau or maximum respectively at design rotational speed (49,000 rpm). For the cantilever turbine, even in the area of design rotational speed, there is still a dependency on rotational speed apparent. This is due to the fact, that the intermediate pressure between radial nozzles and blade wheel is a function of the circumferential speed ( $p \sim (u_1^2 - u_2^2)$ , see chapter 3). Thus, the nozzle design pressure ratio occurs only at design rotational speed. Although this is the case for the investigated turbine – the intermediate pressure was measured – the cantilever turbine shows a positive efficiency gradient at 49,000 rpm. Because of the rotational speed limitation of the brake it was not possible to determine maximum efficiency probably occurring at higher speeds.

## 5 Conclusion

The task of increasing energy efficiency in industry requires new solutions for small scale waste heat recovery. For those applications, the DEPRAG SCHULZ GMBH u. CO. in collaboration with the UAS Amberg-Weiden, have developed a micro-turbine-generator-construction-kit which relies on a simple single stage impulse turbine. Thanks to its simplicity this concept is easily adaptable to different heat sources, boundary conditions, fluids etc. However, its efficiency potential is limited as discussed. The “quasi-impulse” radial inflow cantilever turbine is an alternative which allows a small amount of reaction and thereby higher efficiencies without losing the partial admission ability.

In order to verify the theoretical considerations a radial cantilever turbine and an axial impulse turbine (as reference) for a defined expansion task with compressed air were designed, built and tested. The experimental verification in the “Test facility for compressed air drives” was supported by numerical investigations which allowed a deeper view inside the flow field.

Although, the measured efficiencies of both demonstrator turbines were lower than in the design calculations and the 3D flow simulations the predicted magnitude of the efficiency advantage of the cantilever turbine compared to the axial impulse turbine could be confirmed experimentally with about 3 % points in total-to-static isentropic efficiency.

To sum up, the cantilever turbine provides a higher efficiency potential than the axial impulse stage. The required rotational speed has to be slightly higher, as well. However, the cantilever wheel generates some axial thrust due to the occurring reaction. Furthermore, this thrust is function of rotational speed. Thus, bearing design and balancing, especially for fluid bearings, will be more challenging than in the case of the axial impulse stage. So, in most applications the axial impulse will be the simpler choice.

### Nomenclature

c	absolute velocity	(m/s)
D	diameter	(m)
h	enthalpy	(J/kg)
p	pressure	(N/m <sup>2</sup> )
u	circumferential velocity	(m/s)
v	specific volume	(m <sup>3</sup> /kg)
w	relative velocity	(m/s)
Δ	difference	

### Subscript

0	nozzle blading/stage inlet
1	nozzle blading outlet, rotor blading inlet
2	rotor blading/stage outlet
el	electric
u	in circumferential direction



---

### **Referenzen:**

- [1] DEPRAG SCHULZ GMBH u. CO.: Green Energy Turbine GET®, <http://www.deprag.com/en/green-energy/home-green-energy-turbine/green-energy-turbine.html> , 14.04.16
- [2] PEHNT M., BÖDEKER J., ARENS M., JOCHEM E., IDRISOVA F.: Die Nutzung industrieller Abwärme – technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Heidelberg, Karlsruhe 2013
- [3] WEISS A. P.: Volumetric Expander Versus Turbine – Which is the better Choice for Small ORC Plants?, 3rd International Seminar on ORC Systems, October 12–14, Brussels, Belgium
- [4] WEISS A. P.: Der Prüfstand für Druckluftantriebe und -technik, Interner Bericht, OTH Amberg-Weiden, 2012
- [5] NUMECA Ingenieurbüro: FineTM/Turbo, [http://www.numeca.de/index.php?article\\_id=37](http://www.numeca.de/index.php?article_id=37), 14.04.16

### **Projektpartner:**

DEPRAG SCHULZ GMBH u. CO., Amberg

### **Fördergeber:**

Bayerisches Staatsministerium für  
Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst



### **Kontakt:**



**Prof. Dr.-Ing. Andreas P. Weiß**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Kompetenzzentrum für Kraft-Wärme-Kopplung  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

a.weiss@oth-aw.de



**Dipl.-Ing. (Univ.) Gerd Zinn**

DEPRAG SCHULZ GMBH u. CO.  
Abt. Forschung & Entwicklung  
Carl-Schulz-Platz 1  
92224 Amberg

g.zinn@deprag.de

# eDAS – Holistic Energy Management for 3rd and 4th Generation of Electric Vehicles

Stephan Schärtl, B. Eng.  
Josef Schmid, M. Sc.  
Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

## Abstract

The European research project eDAS has set itself the goal to improve the prediction of mileage in future electric vehicles of the third and fourth generation. Within the framework of this project, the University of Applied Sciences Amberg-Weiden was developing an energy management system (EMS). This article describes the optimization of this system on software level. Therefore the safety mechanisms of the utilized real-time operating system (RTOS) as well as the safety mechanisms of the used microcontroller were taken into account. The goal of the project is to improve the application safety of an AURIX<sup>1</sup> based ECU.

Keywords: energy management, electric vehicles, eDAS, automotive, freedom from interference

<sup>1</sup> AURIX (Automotive Realtime Integrated NeXt Generation Architecture) is a 32-bit multicore microcontroller family developed by Infineon. It targets the automotive industry in terms of performance and safety.

## Zusammenfassung

Das europäische Forschungsprojekt eDAS hat sich zum Ziel gesetzt, die Restreichweite und deren Vorhersagbarkeit zukünftiger Elektrofahrzeuge der dritten und vierten Generation zu verbessern. Im Rahmen dieses Projekts wurde an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden unter anderem ein Energiemanagementsystem (EMS) entwickelt. Dieser Artikel beschreibt die softwaretechnische Optimierung dieses Systems. Dabei werden die Sicherheitsmechanismen des verwendeten Echtzeitbetriebssystems, sowie des eingesetzten Mikrocontrollers berücksichtigt. Ziel ist es, die Anwendungssicherheit einer AURIX<sup>1</sup>-basierenden ECU zu verbessern.

Schlüsselworte: Energiemanagement, Elektrofahrzeuge, eDAS, Automotive, Rückwirkungsfreiheit

## 1 Introduction/Objectives of the project

In Germany the government works intensive to increase the interest of the population on electric vehicles (EV). In doing so the electric mobility should be pushed. In addition to tax saving and preferences in road traffic, e.g. with free parking areas, buying an EV is now subsidized with up to 4000 Euro. Nevertheless, the desire to buy has not increased as expected. The actual goal of the government to bring a million EVs on the road by 2020, seems unreachable <sup>[1]</sup>.

The reachable mileage is still seen as the most negative argument <sup>[2]</sup>. Today, EVs have a range of about 150 km. However, the mileage is subject to large fluctuations, depending on various conditions like temperature, route

profile or driving behavior of the driver. The most obvious measure to raise the mileage is to use batteries with more capacity. This will result in a huge growth of the costs and the weight of the car, so a not feasible option. For this reason eDAS is working on new designs and architectures combining battery, e-motor, electronics, charger and energy management.

eDAS is an acronym for Efficiency powered by smart Design meaningful Architecture connected Systems. It started in October 2013 and is planned to be finished in December 2016. A large consortium and expertise is needed to cope all the challenges of this project. All eDAS partners can be found in figure 1 as well as on our partner's website <sup>[3]</sup>.

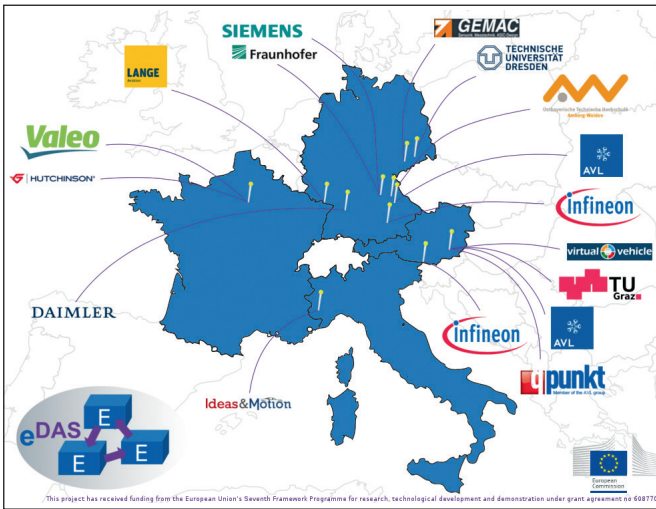


Figure 1: eDAS project partners

The main task of the University of Applied Sciences Amberg-Weiden was the development of an energy management system. Since safety is one of the most important properties in automotive sector, this system should cause as little complications as possible. Consequently the software has to be adjusted and extended with various safety mechanisms.

## 2 Energy management system (EMS)

A specific central computing unit (CCU) hosts the central software components of the overall eDAS system, in particular the energy management system (EMS). The EMS consists of an energy resource scheduler (ERS) and an energy resource manager (ERM). These components were implemented as two main applications in the software.

Figure 2 gives an overview of the CCU architecture. The ERS and ERM are depicted as software layer. In doing so the ERS works like a supervisor middleware that controls the entire network of components by checking safety functions and disallowing unwanted system states based on the calculated data of the ERM and the states of the components. In contrast to the ERS, the ERM runs on the top of the hardware abstraction and drivers layer. The ERM layer is a collection of different tasks, which handle complex functions of the CCU software like balancing the battery cells and regulating the charging current.

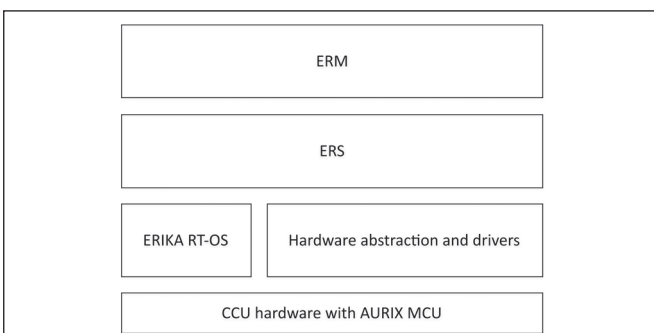


Figure 2: CCU software architecture

## 3 Freedom from interference

Due to its supervising character the ERS forms the safety-related part of the application layer. Under the assumption that the ERS cannot be affected in its operation by other applications software, the software layer above the ERS (i.e. the ERM) can be developed by applying lower standards which reduce the development costs. Therefore the ERM was considered as potentially unsafe software which could interfere with the ERS. Freedom from interference describes the absence of cascading failures between two or more elements that could lead to the violation of a safety requirement [4]. The aim of the optimization is to protect the ERS from interferences by the ERM.

In this project, software can interfere in the data, resource or time domain. Figure 3 shows examples of interferences from the ERM in the data and resource domain. Interference in the data domain means that a hardware or software element corrupts information belonging to another element, for instance the ERM could modify the memory of the ERS where the system state is stored. The other interference example in figure 3 is in the resource domain, the ERS could be directly influenced by the ERM, e.g. if control registers of the CAN module being modified.

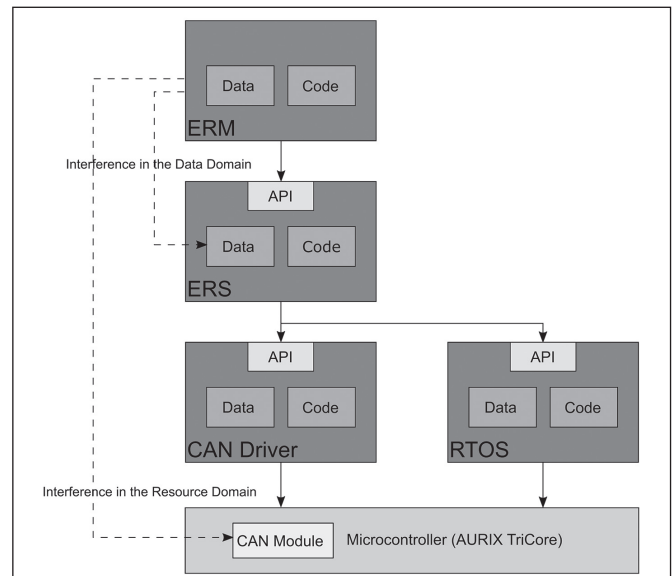


Figure 3: Interference in the data and resource domain

Interference in the time domain means that a hardware or software element consumes too much CPU performance, or uses a shared resource (i.e. peripheral) for a too long time, preventing other elements to reach their execution latency requirements. Figure 4 illustrates two cases where the execution of the ERS task is delayed by the ERM task. In the first case ERS task finished its execution within the deadline, because the ERM task was terminated within its specified time frame. The second case shows an example for interference in the time domain. The execution of the ERS task is delayed due to the ERM task needs to much time, so ERS misses its deadline.

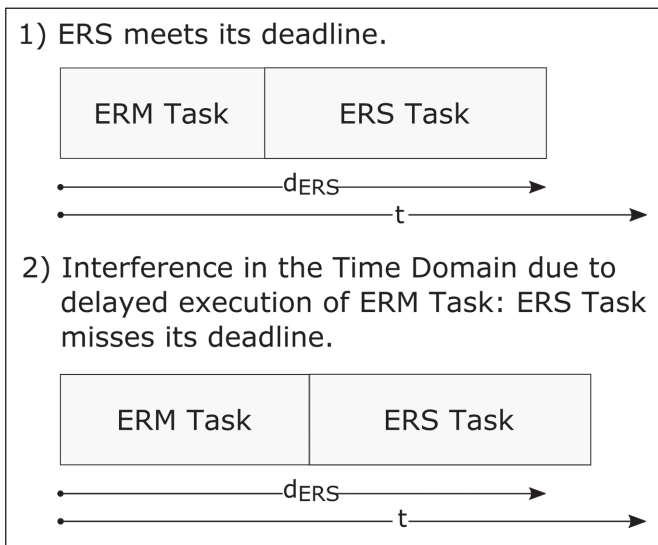


Figure 4: Interference in the time domain

#### 4 Safety mechanisms supporting Freedom from Interference

In order to protect the ERS, the safety mechanism of the RTOS and the microcontroller were evaluated and utilized. The CCU platform of the eDAS project is based on an AURIX microcontroller. Figure 5 lists the safety mechanisms of the microcontroller supporting freedom from interference. Some of these mechanisms are managed by the operating system (OS), like CPU privilege levels or CPU memory protection unit (MPU).

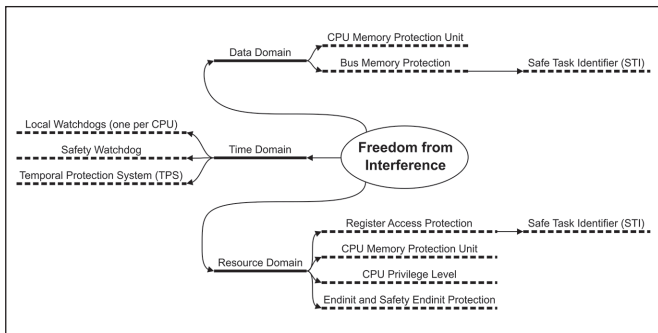


Figure 5: Safety mechanism of the microcontroller supporting freedom from interference

The used RTOS is called ERIKA enterprise. ERIKA fulfills the requirements of the AUTOSAR 4 OS specification with a high coverage<sup>[5]</sup>. This means that the most of the protection mechanisms which were specified in AUTOSAR OS<sup>[6]</sup> release are also available in ERIKA<sup>[7]</sup>. For this reason ERIKA also provides mechanism to ensure freedom from interference, illustrated in figure 6.

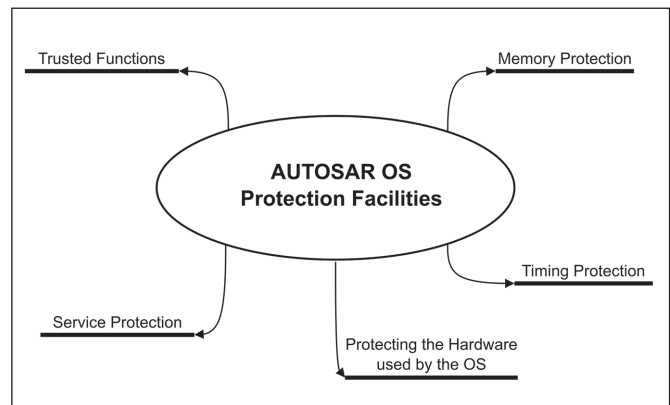


Figure 6: Safety mechanisms of the RTOS supporting Freedom from Interference

In addition to the safety mechanisms AUTOSAR OS introduce “OS-Applications”, which also available in ERIKA. An OS-Application works as a cohesive functional unit containing OS objects like tasks, interrupt service routines, alarms and counters. There are two types of OS-Application: trusted and non-trusted. Trusted OS-Applications are executed without any restriction. Non-trusted OS-Application have restricted access to memory and to the APIs provided by the OS. In multicore systems, each OS-Application has to be assigned to one processor core in the configuration phase.

#### 5 Safety optimizations

##### 5.1 Partitioning of the software

With figure 7 the software partitioning is shown. The ERS is assigned to Core0 and runs as a trusted OS-Application. Core1 executes the ERM in a non-trusted context to restrict its access rights as good as possible. The inter-core communication between the ERS and ERM is based on a shared memory. However, since non-trusted OS-Application has no access right to the shared memory section, a new functional module called “Shared Data Access Layer” had to be implemented. This module includes trusted functions to enable the communication in a controlled way. The ERS closely interacts with the bottom software layers. From the safety perspective, the most restrictive approach would be the best, i.e. execute all software in application layer in non-trusted context. However, the ERS is typically a small piece of software and it does also execute safety tasks anyway, the ERS was considered as a trusted OS-Application.

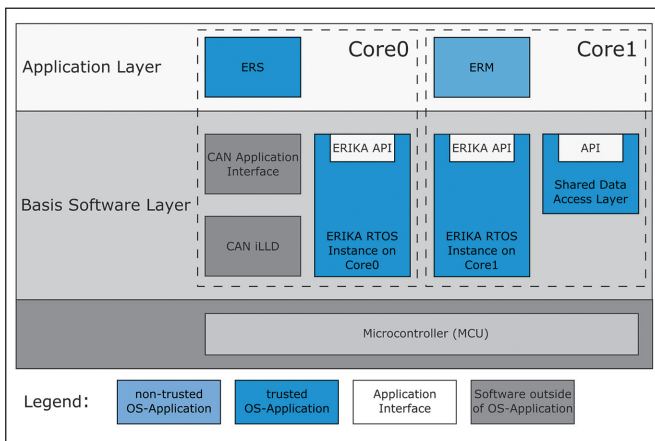


Figure 7: Software partitioning

## 5.2 Task scheduling

Both applications were separated into different tasks. The whole application is executed in a fixed input-process-output cycle. In Detail, the ERS controls the input and the output phase with its tasks called ERSIn and ERSOut. Processing is done by the ERM. Both ERS tasks belong to the ERS OS-Application, so they are also assigned to Core0. The input task ERSIn receives CAN messages from the system, performs preprocessing on the received data and activates the actual processing that is done by the ERM. The ERSOut is the last one executed in one computing cycle. It reads and checks the data that was processed by the ERM and finally sends CAN messages.

While ERSIn and ERSOut are cyclically executed, the tasks of the ERM are dynamically activated by the ERSIn depending on the operating mode and the system state.

Figure 8 depicts the time schedule of the tasks. As already mentioned the ERM tasks are executed between ERSIn and ERSOut, since they are activated by the ERSIn. The ERSOut needs the data from the ERM, therefore the ERSOut is activated after ERM has finished processing. The time between ERSIn and ERSOut is statically configured hence the execution time of the ERM is limited. The cycle time is dimensioned to 50ms. In order that the configured execution times are fulfilled and no interference in the time domain occurs, timing protection mechanisms of the RTOS were implemented. Additionally the timing watchdog of the microcontroller is utilized.

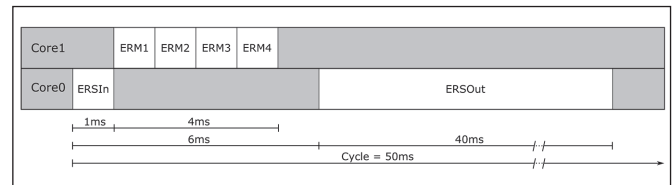


Figure 8: Task scheduling

## 6 Conclusion

The protection of the ERS in all three domains was improved by utilizing the safety mechanisms of the RTOS and the microcontroller. In a next step the software has to be migrated on a new CCU platform. Furthermore in regards to a fail-safe system, a specific software library has to be implemented which enables the verification of the safety mechanisms integrity.

---

## References:

- [1] Handelsblatt, Die verschmähte E-Prämie, <http://www.handelsblatt.com/my/downloads/13968604/3/verschmaeh-te-e-praemie-.html>, 11.08.2016
- [2] Auto Zeitung, Was stört Sie an Elektroautos besonders?, <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/582878/umfrage/umfrage-zu-negativen-aspekten-von-elektroautos-in-deutschland/>, 11.08.2016
- [3] A. Waigel, “eDAS internet site”, <http://www.edas-ev.eu/>, 08.2016
- [4] ISO 26262-1:2011, Road vehicles – Functional Safety – Part 1: Vocabulary, <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:26262:-1:ed-1:v1:en>, 08.2016
- [5] A. Tischner, 2015, Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, Development and implementation of software solutions for improving the application safety of an Infineon AURIX application
- [6] AUTOSAR, 11.2011, Specification of Operating System 4.0.3
- [7] Evidence S.r.l., ERIKA & AUTOSAR OS Requirements, [http://erika.tuxfamily.org/wiki/index.php?title=ERIKA\\_%26\\_Autosar\\_OS\\_Requirements](http://erika.tuxfamily.org/wiki/index.php?title=ERIKA_%26_Autosar_OS_Requirements), 08.2016

## Acknowledgment:

This project eDAS has received funding from the European Union’s Seventh Framework Program for research, technological development and demonstration under grant agreement no 608770.



## Kontakt:



**Stephan Schärtl, B. Eng.**

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

s.schaertl@oth-aw.de



**Josef Schmid, M. Sc.**

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

j.schmid@oth-aw.de



**Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß**

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

a.hoess@oth-aw.de

# 3Ccar – Integrated Components for Complexity Control in affordable electrified cars

## Zusammenfassung

An dem von der Europäischen Union geförderten Forschungsprojekt „Integrated Components for Complexity Control in affordable electrified cars“ – **3Ccar** arbeiten 50 Projektpartner aus zwölf verschiedenen Ländern aus Industrie und Forschung zusammen.

Ziel dieses auf drei Jahre ausgelegten Forschungsprojektes ist es, die immer komplexer werdenden mobilen Systeme, speziell in Elektrofahrzeugen, zu vereinfachen, was zu einer Kosten- und Gewichtseinsparung führen soll. Somit werden die Attraktivität und die Kaufbereitschaft für Elektrofahrzeuge gesteigert.

Beginnend mit einer kurzen Einleitung über Elektrofahrzeuge wird in diesem Artikel im Anschluss das Forschungsprojekt genauer beschrieben und dessen Ziele aufgezeigt. Anschließend wird der Tätigkeitsbereich der Ostbayerischen Technischen Hochschule (OTH) Amberg-Weiden beleuchtet, der aktuelle Fortschritt dargestellt und das weitere Vorgehen beschrieben.

## Abstract

The research project “Integrated Components for Complexity Control in affordable electrified cars” – **3Ccar** is funded by the European Union. 50 partners from industry and research from 12 different countries are cooperating.

3Ccar addresses the control architecture and its subsystems in vehicles. The main objective of the research project with 3 years duration is to reduce the complexity in mobile systems, especially in electric vehicles. This implicates a reduction of costs and weight of the vehicle. Overall, the attractiveness of electric vehicles and the consumer acceptance should be increased.

This paper has been divided into six parts. It starts with a short introduction on electric vehicles. In part 2 and 3 the project and its different objectives will be presented in detail. The fourth part will describe the activity of the OTH Amberg-Weiden. Part 5 presents the progress of the project. The last part gives a summary of future tasks.

## 1 Einleitung

Zu Beginn des Automobils waren Elektroautos sehr weit verbreitet. Vor über 100 Jahren wurden in vielen Industrienationen rein elektrisch betriebene Fahrzeuge produziert und gefahren, allein in den USA waren es 60.000 Stück<sup>[1]</sup>. Im Gegensatz dazu sind in Deutschland aktuell nur etwas mehr als 25.000 reine Elektrofahrzeuge zugelassen<sup>[2]</sup>. Trotz der anfänglichen starken Verbreitung des elektrisch betriebenen Fahrzeuges hat sich der Verbrennungsmotor weltweit durchgesetzt. Dies lag unter anderem an der deutlich größeren Reichweite und dem günstigeren Treibstoff. Elektroautos besetzten in der Zwischenzeit nur Nischen.

Seit den 1990er-Jahren wird durch das größere Umweltbewusstsein und die Ölkrise vermehrt auf elektrisch betriebene Fahrzeuge gesetzt<sup>[3]</sup>. Seitdem wurde die Technologie der Akkumulatoren zum Speichern der elektrischen Energie stetig weiterentwickelt. Mittlerweile ist weltweit eine Vielzahl von rein elektrisch betriebenen Automobilen auf dem Markt verfügbar. Die bekanntesten Marken hierbei sind in Europa Tesla, Renault, Nissan und BMW.

Für konventionell betriebene Autos wird mittlerweile eine immer größere Vielfalt an Grund- und Sonderausstattungen angeboten, wie zum Beispiel Klimaanlage, Standheizung oder verschiedenste Fahrerassistenzsysteme. Damit Elektroautos seitens der Ausstattung die gleiche Attraktivität haben, werden auch hier immer mehr Extras angeboten,

was sich sowohl auf das Fahrzeuggewicht als auch auf den Energieverbrauch auswirkt. Durch immer mehr Einzelkomponenten steigt die Komplexität innerhalb eines Fahrzeuges immer weiter an. Dies führt zu einem erhöhten Produktions- und Wartungsaufwand und somit auch zu höheren Kosten. Um die Akzeptanz und die Kaufbereitschaft für Elektroautos innerhalb der Bevölkerung zu steigern, ist es nötig, die Komplexität deutlich zu verringern, um die Fahrzeuge kostengünstiger anbieten zu können. Ebenso muss die Benutzerfreundlichkeit deutlich erhöht werden.

Ein vermehrter Einsatz von Elektrofahrzeugen ist zudem nötig, um die Klima- und Energieziele der Europäischen Union bis 2020 einzuhalten. Hierbei soll der Ausstoß an Treibhausgasen um 20 Prozent im Vergleich zu 1990 gesenkt werden [4].

In diesem Artikel soll ein Überblick gegeben werden, wie durch das europäische Forschungsprojekt 3Ccar die Komplexität verringert und die Akzeptanz für Elektrofahrzeuge innerhalb der Bevölkerung gesteigert werden soll. Es wird zudem aufgezeigt, welche Aufgaben die Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden hierbei hat.

## 2 Projektübersicht

3Ccar ist ein Projekt, das durch das ECSEL Joint Undertaking der Europäischen Union gefördert wird. Das Forschungsprojekt wird durch Firmen der europäischen Halbleiterindustrie und zwei führende deutsche Automobilhersteller vorangetrieben. Während der dreijährigen Projektlaufzeit werden über 54 Millionen Euro investiert. Die 50 Projektpartner aus Industrie und Forschung kommen aus 12 verschiedenen Ländern. In der nachfolgenden Abbildung 1 sind die wichtigsten Projektdaten noch einmal grafisch dargestellt.

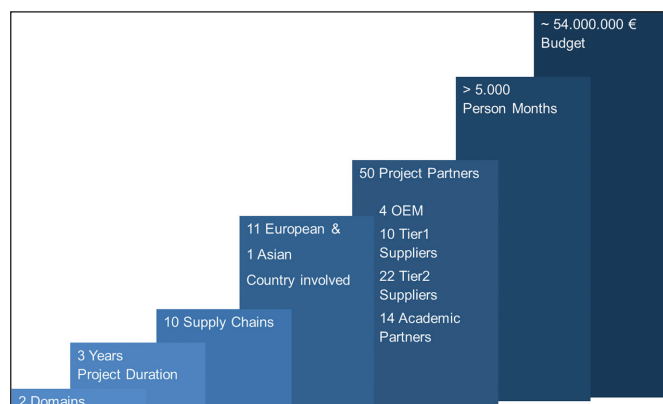


Abbildung 1: Projektübersicht

Zu den beteiligten Firmen gehören neben der OTH Amberg-Weiden auch Daimler, BMW, Siemens, NXP, ST, Fraunhofer IISB, die Technische Universität Dresden und die Technische Universität Graz. Somit sind Firmen aus den wichtigsten Branchen zu Fertigung von Elektroautos vertreten.

Abbildung 2 zeigt hierbei auf der Europakarte die beteiligten Länder und Firmen



Abbildung 2: Übersicht der beteiligten Firmen

Das Forschungsprojekt ist in insgesamt 10 Bereiche aufgeteilt [5][6]:

- **Smart Battery Cells**  
Hierbei werden für die nächste Generation von Akkumulatorzellen für den Automobilbereich Kommunikations- und Messlösungen entwickelt. Die entsprechenden Daten werden im Batteriemanagementsystem (BMS) verarbeitet, um über einzelne Zellen und den gesamten Akkumulator weitreichende Aussagen über ihren Zustand treffen zu können.
- **Functionally Integrated Powertrain**  
In diesem Bereich wird ein neuer Elektromotor für den Antriebsstrang entwickelt, in dem Steuerung, Kühlung, Inverter und Techniken zur Gewinnung von Bremsenergie integriert sind. Die hohe Integration der Komponenten soll einerseits Gewicht einsparen, andererseits die Kosten reduzieren.
- **Smart Semiconductors for Fuel Cells**  
Alternativ zu Akkumulatoren können auch Brennstoffzellen für den Antrieb des Fahrzeuges verwendet werden. Durch einen Demonstrator soll die Funktionsweise von neu entwickelten Gleichstromwandlern gezeigt werden, die an das Energienetz des Fahrzeuges angeschlossen sind. Diese sollen unter anderem ein skalierbares Design und diverse Diagnosefunktionen besitzen.
- **Domain Controller and Algorithms**  
Das Hauptziel ist die Anzahl der Steuergeräte im Fahrzeug zu verringern und deren Funktionalität in



wenigen zentralisierten Steuergeräten zu bündeln. Ebenso sollen neue Funktionalitäten und Algorithmen sowie Anforderungen zur funktionalen Sicherheit nach ISO-26262 implementiert werden.

- **High Speed Data Communication**  
Dieser Bereich ist durch die Netzwerke innerhalb des Fahrzeuges wie auch durch die Anbindung nach außen (Car2X) geprägt. Im Fahrzeug selbst soll die Anzahl der Netzwerke und somit auch die Größe des Kabelbaums verringert werden. Zusätzlich soll das Fahrzeug über ein LTE-Modul mit der Umgebung kommunizieren, um dem Fahrer verschiedene Dienste zur Verfügung zu stellen.
- **Embedded Power Modules**  
Hier wird die integrierte Leistungselektronik für den Bereich „Functionally Integrated Powertrain“ entwickelt. Hierbei spielen zum einen die hohe Zuverlässigkeit von intelligenten Antrieben und zum anderen die Entwicklung von Wide-Bandgap-Halbleitern für die funktionale Integration eine wichtige Rolle.
- **MEMS & Sensors as Cyber-Physical Systems**  
Das Ziel in diesem Bereich ist es, neuartige und robuste Microsysteme (MEMS) zu entwickeln, die für abtastfähige LIDAR(Light detection and ranging)-Systeme im Automobilbereich verwendet werden können. Damit soll es möglich sein, kostengünstige Module für das automatisierte und autonome Fahren zu produzieren.
- **Robustness and Reliability**  
Ziel dieses Bereiches ist unter anderem die Entwicklung von modellbasierten Algorithmen zur Bestimmung der Lebensdauer und der Funktionsfähigkeit für Komponenten in Elektrofahrzeugen.
- **Comfort and Usability**  
Hier werden Energieeinsparungskonzepte erforscht, die die Effizienz von Elektrofahrzeugen verbessern sollen. Hierzu zählen Systeme zur Wärmerückgewinnung, Wärmepumpen für den Automobilbereich oder lärmreduzierte Motoren für HVAC(heating, ventilating and air condition)-Systeme.
- **Cost Effective Technology Platform**  
Das Ziel ist die Entwicklung eines fahrzeugeigenen Akkuladegerätes, bei dem im Speziellen auf Gewicht, Volumen, Kostenoptimierung sowie Effizienz geachtet wird.

### 3 Zielsetzung des Projektes

Das europäische Forschungsprojekt 3Ccar hat Auswirkungen auf Hersteller in der Automobilindustrie, Halbleiterhersteller und die Umwelt. Die Projektziele können in sechs Gruppen aufgeteilt werden, wie in Abbildung 3 zu sehen ist<sup>[5]</sup>. Insgesamt ist festzuhalten, dass die Komplexität von Elektrofahrzeugen reduziert werden soll, was

Auswirkungen auf die Kosten, Wartung und Updatefunktionalitäten hat.

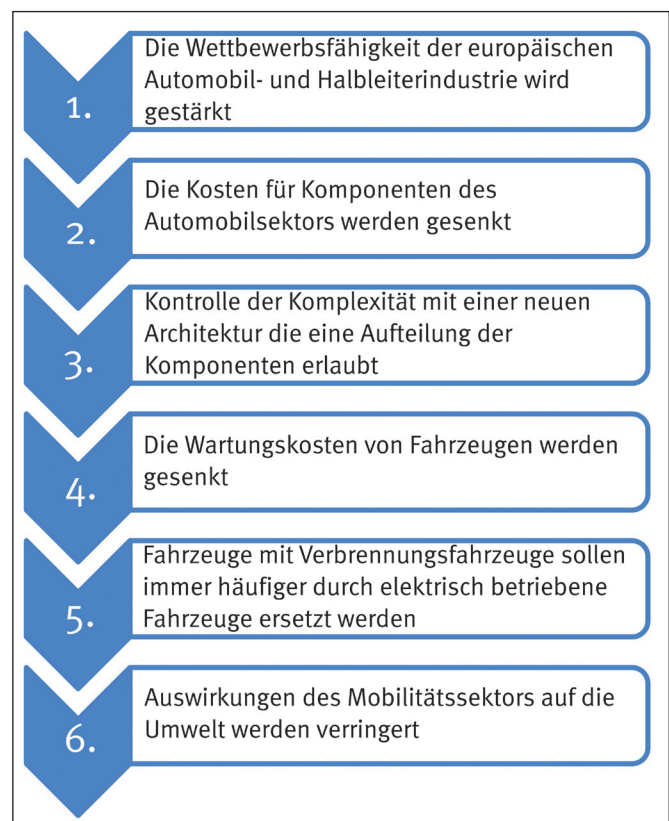


Abbildung 3: Zielsetzung des Projekts 3Ccar

### 4 Arbeiten der Hochschule Amberg-Weiden und deren Projektpartner

Im Bereich der „High Speed Data Communication“ arbeitet die OTH Amberg-Weiden unter anderem mit den Firmen TTTech, NXP und Tecnalia sowie einer Forschungseinrichtung der TU Eindhoven zusammen.

Die einzelnen Projektpartner verfolgen verschiedene Ziele, deren technische Umsetzbarkeit zum Ende des Projektes mittels eines Demonstrators aufgezeigt werden soll. Zu den Zielen zählt unter anderem die Reduzierung der Kommunikationsnetze im Fahrzeug. Dies führt nicht nur zu einer Verringerung des Kabelbaumes im Automobil, sondern auch zu einer erhöhten Zuverlässigkeit des Netzwerks. Hierzu soll zum Beispiel das Hauptnetz im Fahrzeug mit Standard-Ethernet-Komponenten betrieben und deren Grenzen für sicherheitskritische Anwendungen evaluiert werden.

Die OTH Amberg-Weiden arbeitet in diesem Bereich speziell an einer Weiterentwicklung der C2X(Car-to-X)-Kommunikation für Elektrofahrzeuge. Das Fahrzeugnetzwerk wird durch eine LTE-Verbindung mit hohen Datenraten erweitert, um mit anderen Fahrzeugen oder der Verkehrsinfrastruktur zu kommunizieren. Entsprechende Voraussetzungen für diese Verbindung werden während der Projektlaufzeit evaluiert und umgesetzt. Das LTE-Modul soll auf das Netz des Fahrzeuges mit verschiede-

nen Automotive-Schnittstellen wie Flexray, CAN oder Time-Triggered Ethernet zugreifen. Der Aufbau ist hierbei schematisch in Abbildung 4 dargestellt.

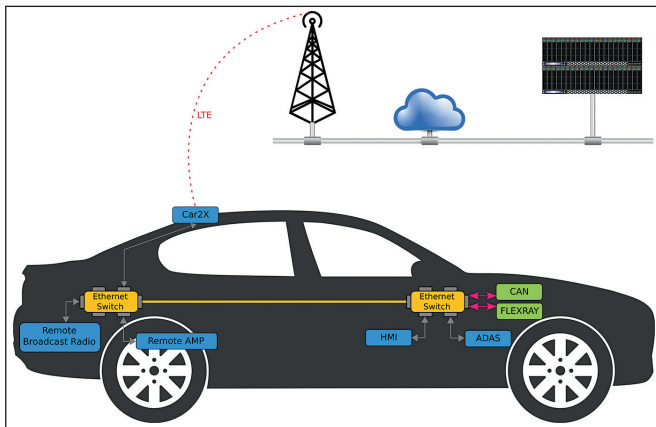


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Kommunikation

Aufbauend auf diese Hardware sollen verschiedene Dienste entwickelt werden, um den Komfort bei der Verwendung von Elektrofahrzeugen zu steigern. Dies kann zum Beispiel durch die Erweiterung der Funktionen für die Routenplanung ermöglicht werden. Aus den Daten der noch zu fahrenden Strecke, der Restreichweite des Akkus und dem verfügbaren Netz an Ladestationen entlang der anfangs festgelegten Fahrtroute können alternative Routen mit Lademöglichkeiten angegeben werden, um das Fahrziel sicher und komfortabel zu erreichen.

## 5 Derzeitiger Stand an der Hochschule Amberg-Weiden

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt wurde seitens der Projektbeteiligten an der Hochschule Amberg-Weiden eine mit den Vorgaben vergleichbare Hardwareplattform ausgewählt. Diese Vorgaben sind von den Projektpartnern zu Beginn festgelegt worden. Die verwendete Hardware stellt nicht nur verschiedene Anschlussmöglichkeiten wie USB, Ethernet oder CAN zur Verfügung, sondern beinhaltet eine frei skalierbare CPU von einem bis hin zu vier Kernen. Auf dieser CPU wurde nach einem Vergleich verschiedener Betriebssysteme für Mikroprozessoren, speziell dem i.MX 6 Quadcore von Freescale, Linux mit einer Debian Distribution in Betrieb genommen. Debian wurde aufgrund der umfangreichen Sammlung von Softwarepaketen, der breiten Unterstützung verschiedenster CPU-Architekturen, der hohen Stabilität sowie der guten Systemsicherheit gewählt. Aktuell wird an dem Aufbau einer Kommunikation über LTE gearbeitet.

## 6 Ausblick

Nach Inbetriebnahme der prototypischen Hardware, die als Clientplattform im Automobil dient, soll ein zentraler Server zum Verwalten entsprechender Daten aufgesetzt werden. Die Daten auf dem Server sollen in Kombination mit der Anwendung im Fahrzeug die Benutzerfreundlichkeit von Elektrofahrzeugen erhöhen. Dies soll unter anderem durch verschiedene Dienste wie die automatische Berechnung von alternativen Fahrrouten, auf denen Elektrotankstellen vorhanden sind, ermöglicht werden. Abbildung 5 zeigt hier eine mögliche Darstellung der Fahrtroute und der Ladestationen.

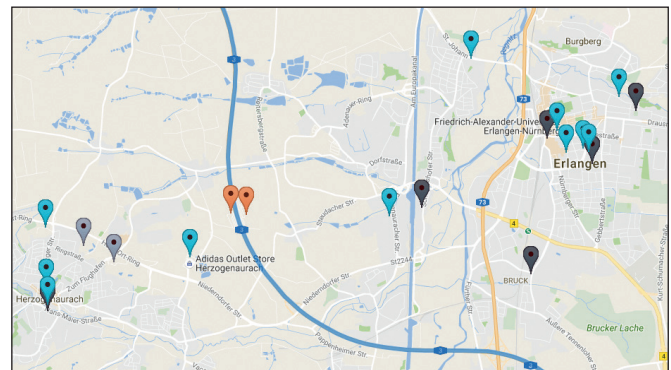


Abbildung 5: Ladestationen mit verschiedenen Leistungsklassen in der Nähe der Fahrtroute

Ebenso soll der Fahrer die Möglichkeit haben, auf ein möglichst lückenloses Kartennetz zuzugreifen, um sich Elektrotankstellen, die mögliche Nutzung von Busspuren sowie kostenlose Parkplätze für Elektrofahrzeuge übersichtlich und benutzerfreundlich darstellen zu lassen. Diese Dienste sollten möglichst nahe an den Bedürfnissen der Nutzer orientiert werden. Hierzu ist das Nutzungsverhalten von privaten und gewerblichen Fahrern mitzubetrachten. Bei einer an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg durchgeführten Studie konnte festgestellt werden, dass Nutzer von Elektrofahrzeugen dieses nicht ausschließlich bei einer niedrigen Anzeige der Akkukapazität, sondern eher bei jeder Gelegenheit laden würden [7].

## Referenzen:

- [1] Peter Maxwill, 11.06.2012, Spiegel Online. „Elektroauto-Revolution vor 100 Jahren“, <http://www.spiegel.de/einestages/elektroauto-revolution-vor-100-jahren-a-947600.html> [Zugriff vom: 30.08.2016]
- [2] Hedda Nier, 26.04.2016, Statista. „Anzahl von Elektroautos steigt langsam“, <https://de.statista.com/infografik/4733/anzahl-von-elektroautos/> [Zugriff vom: 30.08.2016]
- [3] Wikipedia, 2016. „Elektroauto“, <https://de.wikipedia.org/wiki/Elektroauto> [Zugriff vom: 31.08.2016]
- [4] European Commission, 17.08.2016. „2020 climate & energy package“, [http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020/index_en.htm) [Zugriff vom: 31.08.2016]
- [5] 3Ccar Internetseite, 2016. [www.3ccar.eu](http://www.3ccar.eu) [Zugriff vom: 31.08.2016]
- [6] 3Ccar, 2015. „Grant Agreement“
- [7] Katharina Papendick, 2011. „Nutzerverhalten beim Laden von Elektrofahrzeugen“ [http://www.iaf-ag.ovgu.de/inaifag\\_media/downloads/publikationen/Nutzerverhalten+beim+Laden+von+Elektrofahrzeugen.pdf](http://www.iaf-ag.ovgu.de/inaifag_media/downloads/publikationen/Nutzerverhalten+beim+Laden+von+Elektrofahrzeugen.pdf) [Zugriff am 31.08.2016]

## Acknowledgement:

The project 3Ccar has received funding from the European Union's ECSEL Joint Undertaking under the grand agreement No. 662192. This Joint Undertaking received support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme as well as from Germany, Austria, Czech Republic, Romania, Belgium, United Kingdom, France, Netherlands, Latvia, Finland, Spain, Italy, Lithuania.



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## Kontakt:



**Stefan Stiegler, B. Eng.**

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

[st.stiegler@oth-aw.de](mailto:st.stiegler@oth-aw.de)



**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  
Vizepräsident Forschung und  
Technologietransfer  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

[a.hoess@oth-aw.de](mailto:a.hoess@oth-aw.de)

# Ko-HAF: Kooperatives Hochautomatisiertes Fahren

Josef Schmid, M. Sc.  
Stephan Schärtl, B. Eng.  
Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

## Zusammenfassung

Das Projekt Ko-HAF beschäftigt sich mit dem kooperativen hochautomatisierten Fahren bei höheren Geschwindigkeiten, wie z. B. auf Autobahnen. Dies stellt den nächsten Schritt zum autonomen Fahrzeug dar. Die Aufgabe der OTH-AW im Projekt Ko-HAF besteht vor allem darin, die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen sicher und zuverlässig zu gestalten. Die Vorgehensweise wird im folgenden Artikel beschrieben.

## Abstract

The project Ko-HAF focuses on cooperative highly-automated driving at higher speed like on motorways. This is the next step to an autonomous driving vehicle. The main objective of the OTH-AW in this project is a secure and reliable communication between the vehicles. The methods used are described in the following article.

## 1 Einleitung

Ziel des Projekts Ko-HAF ist der nächste wesentliche Schritt in Richtung autonomes Fahren, das hochautomatisierte Fahren bei höheren Geschwindigkeiten. Dieses charakterisiert sich dadurch, dass der Fahrer das System nicht mehr dauerhaft überwachen muss. Er muss jedoch in der Lage sein, die Steuerung nach Aufforderung mit einer gewissen Zeitreserve übernehmen zu können.

Während für das hochautomatisierte Fahren (HAF) bei niedrigen Geschwindigkeiten bordautonome Sensorik verwendet werden kann, soll bei diesem Projekt wegen der höheren Geschwindigkeitsbereiche auf eine Kommunikation der Fahrzeuge mit einem Server gesetzt werden. Ziel ist es dabei, die Sicherheit und den Komfort des Fahrens zu steigern.<sup>[1]</sup>

Hierbei wird die Kommunikation vor allem für den Austausch von Verkehrereignissen wie z. B. Unfällen oder Glatteis benötigt. Des Weiteren können aber auch Informationen über Änderungen der Fahrstreifen ausgetauscht werden. Benötigt werden diese Informationen unter anderem für ein vorausschauendes Fahren sowie zur Routenplanung. So kann das Fahrzeug bei einer Beeinträchtigung des Fahrstreifens frühzeitig entscheiden, ob eine alternative Route gefahren werden sollte oder das

Fahren durch vorausschauendes Abbremsen des Fahrzeuges angenehmer und sicherer gestaltet werden kann.

Der sogenannte Safety Server hält die Kartendaten und die aktuellen Ereignisse der Fahrstrecke vor. Diese können bei Bedarf an die Fahrzeuge ausgeliefert werden. Die Kommunikation zwischen dem Server und dem Fahrzeug geschieht mittels Mobilfunk, wobei im Projekt vor allem LTE als aktueller Mobilfunkstandard zum Einsatz kommen soll. Wo dies aufgrund des Netzausbaus nicht möglich ist, wird automatisch auf eine andere verfügbare Mobilfunktechnik wie z. B. UMTS zurückgegriffen.

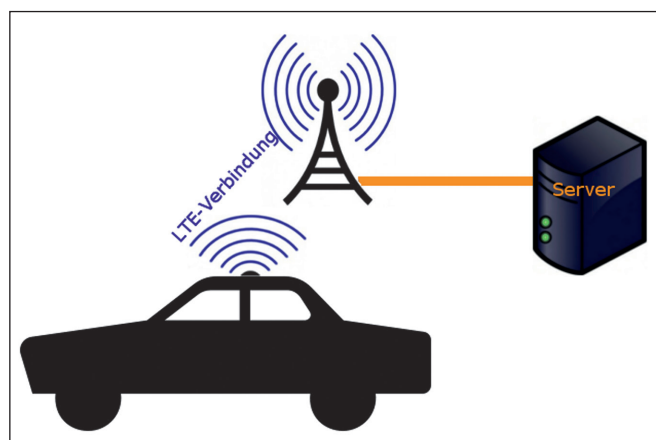


Abbildung 1: Das Auto wird über LTE an den Server angebunden.

Die OTH-AW stellt in diesem Projekt sowohl die Kommunikationshardware als auch die Software zur priorisierten und sicheren Kommunikation der Fahrzeuge zur Verfügung. Dieses Modul soll im Laufe des Projekts in allen Versuchsträgern verbaut werden und den gesamten Datenaustausch im Projekt abwickeln.

## 2 Vorgehensweise

Um die Anforderungen an die Kommunikation zu realisieren, soll durch die OTH-AW sowohl eine passende Hardware ausgewählt als auch die entsprechende Software entwickelt werden.

### 2.1 Problemstellung

Zur vollen Potenzialausschöpfung des autonomen Fahrens ist nicht nur die Kommunikation der Fahrzeuge untereinander notwendig. Es müssen zudem zusätzliche Informationen einbezogen werden. Diese werden von einem Server verwaltet und können auf Anfrage an die Fahrzeuge verteilt werden. Durch die Einbeziehung solcher Informationen kann eine Voraussicht generiert werden, die sich über mehrere Kilometer erstreckt. Dies kann mit aktueller Onboard-Sensorik nicht abgedeckt werden.

Abgesehen davon kann eine Online-Karte im Bereich unter einem Kilometer als zusätzlicher Sensor verwendet werden. Dessen Informationen könnten mit denen anderer Sensoren (wie z. B. Long-Range Radar) verrechnet werden.

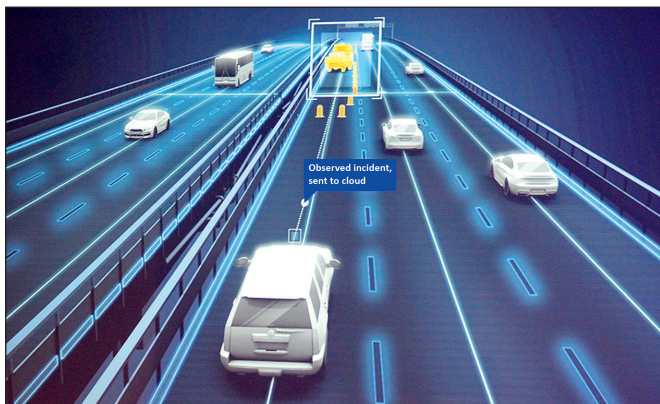


Abbildung 2: Erkennen und Melden eines Verkehrseignisses [2]

Dabei sind bei der Kommunikation mehrere Randbedingungen zu beachten. Beispielsweise spielt der Datenschutz eine große Rolle, da mit der zunehmenden Vernetzung auch eine größer werdende Überwachung der Fahrer möglich wird. So ist beim Design der Kommunikationsprotokolle darauf zu achten, welche Daten wirklich benötigt werden und ob sich diese Daten einer konkreten Person zuordnen lassen. Darüber hinaus muss auch der Schutz dieser Daten, z. B. vor Manipulation, sichergestellt werden. Neben diesen aus der Internetkommunikation resultierenden Anforderungen gibt es zudem auch Voraussetzungen an die Verfügbarkeit der Funktion. So

sollte die Verbindung zum einen möglichst robust sein, d. h. eine geringe Störungsanfälligkeit zeigen. Zum anderen sollte sie auch latenzarm ausfallen. Um die ohnehin schon relativ hohe Latenz von Mobilfunkverbindungen nicht noch zu erhöhen, muss folglich eine Priorisierung der zu übertragenden Daten vorgenommen werden.

### 2.2 Bereits vorhandene Technik

Aktuell wird für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen ein Verfahren standardisiert, welches auf den WLAN-Standard IEEE 802.11p aufbaut. Dieses dient allerdings hauptsächlich dazu, die Positionen und Fahrtrichtungen anderer Fahrzeuge zu übermitteln. Da sich die Sender der Informationen jedoch bewegen, bietet dies keine Möglichkeit, stationäre Ereignisse über einen längeren Zeitraum zu verbreiten. So kann z. B. eine detektierte Gefahrenstelle an Verkehrsteilnehmer, die sich in unmittelbarer Nähe befinden, übertragen werden. Jedoch ist es nicht möglich, diese Nachricht an einen Verkehrsteilnehmer zu übermitteln, der erst in einigen Minuten die Gefahrenstelle passieren wird.

Zusätzlich existiert der in Deutschland bereits 2005 eingeführte TMC (Traffic Message Channel)-Dienst, welcher Verkehrsbeeinträchtigungen über ein UKW-Signal überträgt. Dieser ermöglicht beispielsweise eine zentrale Verbreitung von Straßensperrungen, allerdings bietet er nicht die Möglichkeit des Meldens eines Ereignisses durch ein Fahrzeug.

### 2.3 Lösungsansatz

Die im letzten Abschnitt erwähnten Technologien zeigen auf, dass es derzeit an einem Verfahren zur überregionalen Verteilung von dezentral erfassten Verkehrseignissen fehlt. Um diese zu ermöglichen, ist es nötig, vom Fahrzeug generierte Meldungen über das Mobilfunknetz an einen Server zu senden.

Hierzu muss ein geeignetes Übertragungsprotokoll für das Senden der Daten zum Server sowie zum Empfangen der Karten in den Fahrzeugen ausgewählt und gegebenenfalls angepasst werden. Für den Upload – das Senden von Daten zum Server – kommt sowohl das Protokoll ADASIS als auch der quelloffene Standard SENSORIS infrage. Nach einer genaueren Analyse der beiden Protokolle wurde festgestellt, dass keines der beiden Protokolle die Projektanforderungen vollständig abdeckt. SENSORIS zeigte sich jedoch als wesentlich geeigneter, weshalb es für das Projekt angepasst wird.

Um die zur Verfügung stehende Bandbreite zu analysieren, soll eine Messung der LTE-Abdeckung auf der Teststrecke durchgeführt werden. Neben den direkt zu messenden Daten wie Signalstärke und Signal-Rausch-Abstand werden auch Daten zur Übertragungsgeschwindigkeit und Latenz erhoben. Diese Daten sollen im Projekt

später auch bei jeder Testfahrt neu aufgenommen und zur Vorhersage der Übertragungsgeschwindigkeit genutzt werden.

Zusätzlich zu diesen für hochautomatisiertes Fahren unbedingt erforderlichen verkehrlichen und vom Safety Server stammenden Informationen sind die Fahrzeug-Daten zu berücksichtigen, die dem Bereich Infotainment (Musik, Video usw.) zuzuordnen sind und aus anderen Quellen stammen. Infolgedessen ist im Fahrzeug eine Kategorisierung und situationsabhängige Priorisierung der Informationen dringend erforderlich, um der verkehrlichen Sicherheit den obersten Vorrang zu gewähren. Die Entwicklung eines solchen Verfahrens wird durch die OTH-AW im Rahmen des Projekts Ko-HAF umgesetzt.

Neben der Softwareauswahl spielt auch die Auswahl der Hardware eine wesentliche Rolle im Projekt. Die Entscheidung fiel hier auf einen Automotive-PC des Herstellers NEXCOM. Der VTC 7220 stellt einen Intel Core i7 mit 8 GB Arbeitsspeicher sowie eine SSD zur Speicherung von

Daten zur Verfügung. Außerdem wird er mit einem LTE-Modem der Firma HUAWEI ausgestattet, welches das Auslesen der oben genannten Werte für die LTE-Verbindung ermöglichen soll.



Abbildung 3: Fahrzeug-PC (VTC 7220) [3]

### Referenzen:

- [1] ZENTEC Zentrum für Technologie, Existenzgründung und Cooperation GmbH, Das Projekt, <https://www.ko-haf.de/das-projekt/>, 05.09.2016
- [2] Dietmar Rabel, Dietmar Rabel von HERE hielt auf der Tech.AD 2016 einen Vortrag über das Kartenmaterial, <http://www.autonomes-fahren.de/wp-content/uploads/2016/03/HERE-Strassenanalyse.jpg>, 05.09.2016
- [3] NEXCOM International Co., Ltd, VTC 7220, <http://www.nexcom.com/Products/mobile-computing-solutions/in-vehicle-pc/in-vehicle-pc/in-vehicle-computer-vtc-7220>, 05.09.2016

### **Projektpartner:**

3D Mapping Solutions GmbH, Holzkirchen

Adam Opel AG, Rüsselsheim

Audi AG, Ingolstadt

BMW AG, München

Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach

Continental Automotive GmbH, Hannover

Continental Safety Engineering International GmbH, Alzenau

Continental Teves AG & Co. oHG, Frankfurt am Main

Daimler AG, Stuttgart

Hessen Mobil – Straßen- und Verkehrsmanagement, Wiesbaden

Robert Bosch GmbH, Hildesheim

Technische Universität Braunschweig – Institut für Fahrzeugtechnik, Braunschweig

Technische Universität München – Lehrstuhl für Ergonomie, München

Universität Passau – Institut für Softwaresysteme in technischen Anwendungen, Passau

Universität Würzburg – Interdisziplinäres Zentrum für Verkehrswissenschaften, Würzburg

Visteon Electronics Germany GmbH, Karlsruhe

### **Fördergeber:**



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

### **Kontakt:**



**Josef Schmid, M. Sc.**

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)



**Stephan Schärtl, B. Eng.**

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

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



**Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß**

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

[a.hoess@oth-aw.de](mailto:a.hoess@oth-aw.de)

# Der neue Radnabenantrieb für den Formula Student Rennwagen der OTH Amberg-Weiden

Prof. Dr.-Ing. Horst Rönnebeck

## Zusammenfassung

Im Unterschied zu dem elektrischen Radnabenantrieb des allradgetriebenen Rennwagens der Saison 2014, bei dem ein getriebeloser Radnabenmotor mit permanent erregtem Synchron-Außenläufermotor zum Einsatz kam, wurde für die nachfolgenden Saisons ein schnelldrehender, permanent erregter Synchron-Innenläufermotor mit nachgeschaltetem Planetengetriebe entwickelt. Zwar erhöhte sich dadurch die Teilevielfalt in der neuen Konstruktion, das Gewicht der Antriebseinheit konnte aber deutlich reduziert werden. Auf das Fahrzeug betrachtet konnte allein durch das neue Antriebskonzept mehr 40 kg Masse eingespart werden. Durch das deutlich kleinere Packing konnte zudem von 13-Zoll- auf 10-Zoll-Räder umgestiegen werden, was nochmals zu einer Reduktion der Masse führte. Das gesamte Fahrzeug wiegt trotz des ca. 50 kg schweren Akkucontainers nur noch ca. 195 kg. Der optimierte Radnabenantrieb konnte sein Potenzial bei den diesjährigen Formula Student Weltmeisterschaften unter Beweis stellen. Ein exzellenter vierter Platz bei der Formula Student Germany und ein erster Platz bei der Formula Student Hungary sind eindrucksvolle Belege hierfür.

## Abstract

In 2014 the formula student team “Running Snail Racing Team” of the OTH Amberg-Weiden developed an electrical wheel hub motor for its four-wheel-driven electrical race car. This permanent excited synchronous motor directly impelled the wheel connected with the external rotor of the motor. For the following seasons a new motor concept was preferred: Now the students developed a small permanent excited synchronous motor with a fast rotating internal rotor with downstream connected planetary gear. Although, the amount of parts increases in comparison to the former design the weight of the new power train decreases dramatically: In total for all four drive trains the weight reduces by 40 kg overall. In addition, due to the much smaller packing of the new drive train it was possible to switch from 13-inch-wheels to 10-inch-wheels that reduce the weight of the race car again. In spite of the accumulator’s weight of 50 kg the total mass of the race car is only 195 kg in total. The optimized drive train showed its potential at this year’s formula student world championships. An excellent fourth place overall at the Formula Student Germany competition and the first place overall at the Formula Student Hungary competition is the impressive proof for that.

## 1 Einleitung

Das Rennwagenprojekt Running Snail Racing Team der OTH Amberg-Weiden nimmt erfolgreich seit 2005 mit einem in jeder Saison neu entwickelten Rennwagen an der Formula Student Weltmeisterschaft teil – der weltweit größte und anspruchsvollste studentische Konstruktionswettbewerb. Dabei wurden die Rennwagen bis 2012 mit Verbrennungsmotoren angetrieben. Zur Saison 2013 erfolgte der Umstieg auf einen rein elektrisch angetriebenen Rennwagen. Der Rennwagen der Saison 2013 besaß einen zentralen Elektromotor, der über ein Differenzial die

beiden Hinterräder antrieb. Mechanisch betrachtet bestanden damit noch gewisse Ähnlichkeiten zum Antriebskonzept der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, wengleich der Rahmen wie in den Folgejahren nun aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK-Monocoque) bestand.

Im Jahr 2014 erfolgte der Umstieg auf einen allradgetriebenen Rennwagen mit vier Radnabenmotoren. Bei den Motoren handelte es sich um permanent erregte Synchronmotoren als sogenannte Außenläufer. Ein wesentlicher Vorteil der Konstruktion war, dass dieser Motor



direkt und damit ohne zusätzliches Getriebe die Räder antrieb. Darüber hinaus wurden die Massenkräfte des Fahrzeuges direkt zu den Radaufstandspunkten geleitet, was zusätzliche Steifigkeitsvorteile versprach. Wie in <sup>[1]</sup> dargestellt, bewährte sich das Konzept jedoch in den Wettbewerben nicht. Ein wesentlicher Grund war die relativ hohe Masse des Direktantriebes, da gegenüber schnelllaufenden Motoren mit Getriebe hier der Motor mit derselben Drehzahl wie die Räder dreht und deshalb bei gleicher Leistung der Außenläufermotor ein bedeutend höheres Drehmoment aufbringen muss, was nur mit deutlich größeren Magneten, Eisenkernen und Spulen zu realisieren ist. Weiterhin traten in den zwischen Außenläufer, der unmittelbar mit den Felgen verschraubt war, und dem Stator befindlichen Wälzlager aufgrund der relativ großen Wälzlagerdurchmesser hohe Umfangsgeschwindigkeiten auf, die zu einer beträchtlichen Erwärmung der Drahringlager führten. Konstruktionsbedingt kam es zusätzlich insbesondere bei Kurvenfahrten zu deutlichen elastischen Verformungen des Motors, was das Lagerspiel und damit die Laufeigenschaften der Schrägkugellager ungünstig beeinflusste.

Insbesondere weil bei keinem Wettbewerb das Ausdauerrennen erfolgreich beendet werden konnte, entschloss sich das Running Snail Racing Team, das Außenläuferkonzept nicht mehr weiterzuverfolgen und für die Saison 2015 auf schnelldrehende Elektromotoren mit Innenläufer und nachgeschaltete Planetengetriebe umzusteigen. Dieses neue Konzept, das nur in Details in der Saison 2016 abgewandelt wurde, soll im Folgenden näher dargestellt werden.

## 2 Radnabenantrieb mit Innenläufer

Bei der Entwicklung eines schnelldrehenden Innenläufer-Synchronmotors mit nachgeschaltetem Getriebe zur Realisierung der erforderlichen Raddrehzahlen und der Antriebsmomente versprachen sich die Studierenden im Rennwagenprojekt insbesondere wesentliche Gewichtsvorteile gegenüber dem vergangenen Konzept mit getriebelosem Außenläufermotor. Tatsächlich ergeben sich erhebliche Gewichtsvorteile, wie in Abbildung 1 zu erkennen ist.

		
	Nabenantrieb RS14	Nabenantrieb RS16
Masse	16,8 kg	5,6 kg
Spitzenleistung	22,2 kW	25,8 kW
Spitzendrehmoment am Rad	218 Nm	354 Nm

Abbildung 1: Gegenüberstellung Antriebskonzept RS14 und RS16 <sup>[2]</sup>

Die erheblichen Vorteile des neuen Antriebskonzeptes sind deutlich zu erkennen: Konnte das Gewicht um mehr als 10 kg pro Motor (d. h. 40 kg auf das gesamte Fahrzeug!) reduziert werden, so stiegen umgekehrt die erzielbare Spitzenleistung und im besonderen Maße das Spitzenmoment an. Beim Vergleich der Massen müsste beim neuen Antriebskonzept die Masse des Achsschenkels hinzugerechnet werden, da diese Funktion beim vorherigen Antrieb mit übernommen wurde. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass bedingt durch den deutlich kleineren Motor und die dadurch deutlich günstigeren Packaging-Verhältnisse es möglich geworden ist, von den 13-Zoll-Rädern auf die leichteren 10-Zoll-Räder umzusteigen, wodurch die Massen nochmals deutlicher reduziert werden, als Masse durch den Achsschenkel (Gesamtmasse des Achsschenkels mit Dreieckslenkeranbindung und Bolzen ca. 600 g) hinzugekommen ist.

Die wesentlichen Komponenten des Radnabenantriebes sind in Abbildung 2 wiedergegeben.

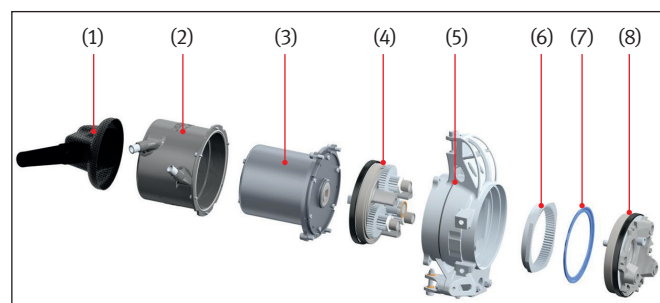


Abbildung 2: Hauptkomponenten des Radnabenantriebes <sup>[2]</sup>

Der wassergekühlte Motor (3) ist von einem lasergesinterten Kühlmantel (2) aus Kunststoff umhüllt, der das Kühlwasser wendelförmig um das Motorgehäuse führt. Eine Abdeckkappe (1) aus CFK mit Kabelknickschutz verhindert den Kontakt mit spannungsführenden Teilen. Das Planetengetriebe besteht aus der inneren Hälfte des Planetenträgers (4) mit den drei aufgesetzten Stufenplaneten und der zentral angeordneten Sonnenritzelwelle, dem Hohlrad (6), einem Stützring (7) und der äußeren Hälfte (8) des Planetenträgers, auf dessen Außenseite sich die Anbindungen für das Rad befinden. Das Planetengetriebe wird in den Achsschenkel (5) integriert, der über die Querlenker die Verbindung zum Chassis herstellt. Bei dem Achsschenkel handelt es sich um eine mithilfe von Hyperworks Optistruct der Fa. Altair topologieoptimierte Konstruktion aus einer hochfesten, lasergesinterten Aluminium-Scandium-Legierung, die durch die Fa. Airbus zur Verfügung gestellt wird.

### 2.1 Der Synchronmotor

Wie bereits bei dem Außenläufermotor der Saison 2014 wurden auch die Innenläufermotoren der anschließenden Saisons gemeinsam mit der Fa. Fischer Elektromotoren in Billigheim entwickelt. Auch dieses Mal lag die Auswahl und Auslegung der Permanentmagnete, der Statorbleche

und der Wicklungen bei der Fa. Fischer Elektromotoren, während die konstruktive Gestaltung die Studierenden verantworteten.

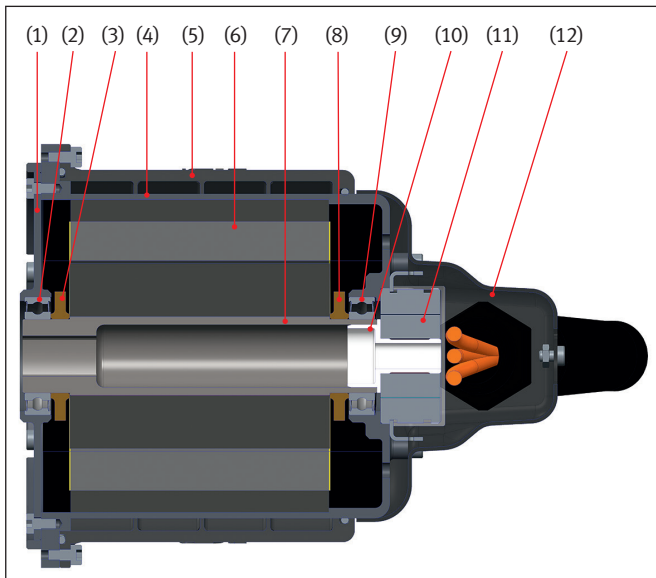


Abbildung 3: Längsschnitt durch den Synchronmotor

Der permanent erregte Innenläufer-Synchronmotor besteht im Wesentlichen aus dem Gehäuse (4) mit Lagerschild (1) aus hochfestem Aluminium, dem Kühlmantel (5) der hohlgebohrten Rotorwelle (7) aus Titan mit eingearbeiteten Neodym-Magneten und dem Statorpaket (6), das in das Gehäuse eingeschrumpft wird und einen Außendurchmesser von lediglich 85 mm aufweist.

Die Rotorwelle ist schwimmend in zwei Rillenkugellagern (2), (8) vom Typ 61804 2RZ gelagert. Die gestalterisch einfache schwimmende Lageranordnung bietet sich bei Elektromotoren an, da bei diesen wie im vorliegenden Fall keine Axialkräfte auftreten und keine zusätzlichen Anbauteile zur axialen Fixierung benötigt werden. Um unterschiedliche Temperaturdehnungen von Welle und Gehäuse ausgleichen zu können, ist die Lagerung mit axialem Spiel ausgeführt. Um die axiale Position des Rotors gegenüber dem Gehäuse eindeutig zu realisieren, ist zwischen rechtem Lageraußenring und dem Gehäuse eine federnde Kugellagerausgleichscheibe eingelegt, die den Rotor in Richtung des Lagerdeckels schiebt. Die Wälzlager sind mit Fett befüllt und gegen austretendes Fett bzw. eindringende Verunreinigungen mit berührungsfreien Dichtscheiben abgedichtet. Die Berührungsfreiheit stellt sicher, dass die Lager reibungsarm sind und vor allem der hohen Maximaldrehzahl des Rotors von 18500 1/min sicher standhalten. Die Tarierscheiben (3) und (8) aus Messing ermöglichen das Anbringen von Bohrungen beim Feinwuchten des Rotors. Die relativ hohe Dichte von Messing stellt sicher, dass trotz der kleinen Maße der Tarierscheiben ausreichend Masse entfernt und damit eine Wuchtgüte von kleiner 1,6 mm/s erzielt werden kann.

Über ein Adapterstück (10) ist der Resolver (11) drehfest mit dem Rotor verbunden. Der Resolver hat die Aufgabe, die augenblickliche Winkelposition des Rotors gegenüber dem Stator an den Wechselrichter weiterzugeben, um das Drehfeld entsprechend korrekt regeln zu können. Die Abdeckkappe (12) aus CFK verhindert den Kontakt mit spannungsführenden Teilen.

## 2.2 Planetengetriebe

Ein Getriebe hat die Aufgabe, die Drehzahl und das Drehmoment zwischen An- und Antriebsseite zu wandeln, wobei der Wirkungsgrad bei der Leistungsübertragung sehr hoch sein muss. Die geforderte Maximalgeschwindigkeit des Rennwagens sollte bei ca. 120 km/h liegen. Das ist etwa die Geschwindigkeit, die beim Zieleinlauf innerhalb des Beschleunigungsrennens über eine Strecke von 75 Metern maximal erreicht werden kann. Die Maximalgeschwindigkeiten bei allen übrigen dynamischen Wettbewerben innerhalb der Formula Student Weltmeisterschaft bewegen sich auf einem deutlich niedrigeren Niveau. Bei gegebenem dynamischem Radhalbmesser von etwa 22,9 cm ergibt sich eine Zielübersetzung von etwa 13,3.

Da in einem Planetengetriebe mehrere Planetenräder um die Zentralräder laufen, verteilen sich die Lasten auf mehrere Zahneingriffe. Dies hat zur Folge, dass Planetengetriebe im Vergleich zu Standgetrieben bei gleicher zu übertragender Leistung stets einen kleineren Bauraum und somit auch eine geringere Masse aufweisen. Dies ist der wesentliche Grund, warum bei der Wahl des Getriebes ein Planetengetriebe zum Zuge kam.

Es gibt eine Vielzahl von verschiedenen Planetengetrieben. In Abbildung 4 sind schematisch und im Halbschnitt drei verschiedene Typen dargestellt, die grundsätzlich in Betracht gekommen wären.

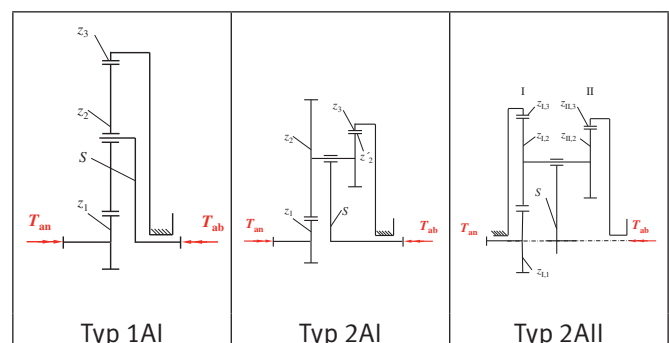


Abbildung 4: Auswahl verschiedener Planetengetriebetypen

Lässt sich mit dem Planetengetriebetyp 1AI eine Übersetzung bis maximal ca.  $i = 8$  erzielen, ist es beim Typ 2AI ca.  $i = 15$  und im Fall des Typ 2AII, der auch Wolframsatz genannt wird, sogar ca.  $i = 100$ . Wesentliche Kriterien bei der Auswahl des geeigneten Typs waren zum einen die erzielbare Übersetzung, weshalb der konstruktiv sehr einfache Typ 1AI bereits ausschied, zum anderen aber die

Anzahl der erforderlichen Komponenten. Deshalb fiel die Wahl auf den Typ 2AI, der sowohl die Übersetzungsanforderung erfüllt als auch mit relativ wenigen Komponenten auskommt.

Im Wesentlichen besteht das Planetengetriebe aus dem angetriebenen Sonnenzahnrad  $z_1$ , das vom Synchronmotor angetrieben wird. Die Sonne treibt über das Zahnrad  $z_2$ , die Planetenräderwelle an, die im sogenannten Planetenträger (S) – oder auch Steg genannt – gelagert ist. Im tatsächlich ausgeführten Planetengetriebe werden insgesamt drei Planetenwellen gleichzeitig angetrieben, die jeweils im Winkel von  $120^\circ$  gleichmäßig um die Sonne verteilt sind. An den kinematischen Verhältnissen ändert sich dadurch nichts. Die zu übertragenden Lasten werden jedoch auf drei Zahneingriffe gleichmäßig verteilt, sodass das Planetengetriebe deutlich kompakter bauen kann als ein Standgetriebe. Die Planetenwelle rotiert und läuft gleichzeitig um die Sonne (daher der Name Planeten- oder auch Umlaufgetriebe). Der Steg dient als Abtrieb des Getriebes. Auf der Planetenwelle sitzt ein weiteres Planetenrad  $z'_2$ , das im Hohlrad  $z_3$  kämmt. Dieses Hohlrad wird drehfest im Achsschenkel aufgenommen. Damit keine Axialkräfte in den Lagerstellen aufgenommen werden müssen und da Laufruhe bei Getrieben in Rennfahrzeugen keine hohe Priorität haben, sind sämtliche Zahnräder im Planetengetriebe geradzahnt.

In Abbildung 5 ist das im Rennwagen ausgeführte Getriebe abgebildet. Aus Gründen der Übersicht wurden nur die Zahnräder wiedergegeben, nicht der Planetenträger und sämtliche weiteren Elemente.

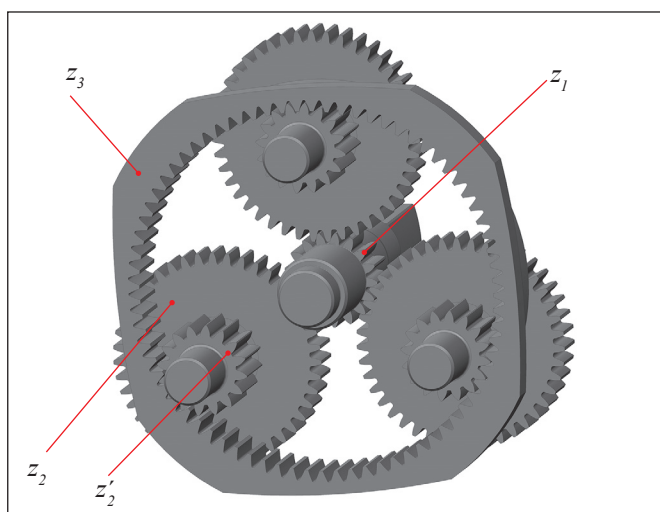


Abbildung 5: Planetengetriebe im RS16 [2]

Die sogenannte Standübersetzung ergibt sich allein über die Zähnezahverhältnisse. Hierbei wird im Gegensatz zur Realität der Steg zunächst gedanklich festgehalten und die Übersetzung zwischen der Sonne und dem Hohlrad bestimmt. Diese ergibt sich zu:

$$i_0 = -\frac{z_2}{z_1} \cdot \frac{z_3}{z'_2} = -\frac{43}{17} \cdot \frac{76}{16} = -12,01 \quad (1)$$

Mithilfe der Formel nach Willis kann nun die Gesamtübersetzung berechnet werden.

$$n_1 - n_3 \cdot i_0 - n_s \cdot (1 - i_0) = 0 \quad (1)$$

Die Hohlradzahl ist im vorliegenden Fall  $n_3 = 0$ , sodass sich für die Gesamtübersetzung nach kurzer Umstellung folgender Wert ergibt:

$$i_{ges} = \frac{n_1}{n_s} = 1 - i_0 = 13,01 \quad (2)$$

Diese Gesamtübersetzung liegt nahe genug an der Zielübersetzung. Zudem wird mit den vorliegenden Zähnezahverhältnissen auch die sogenannte Einbaubedingung erfüllt, womit sichergestellt werden kann, dass alle drei Planetenwellen gleichmäßig in einem Winkel von  $120^\circ$  um die Sonne verteilt werden können.

Um das Getriebe in den Achsschenkel verbauen zu können, musste dieses außerordentlich klein gewählt werden, ohne dass die Gefahr besteht, dass die Getriebe-komponenten versagen. Schließlich konnte durch entsprechende Festigkeitsnachweise mit der Zahnradberechnungssoftware KISSsoft der Nachweis erbracht werden, dass mit entsprechend einsatzgehärteten Stahlwerkstoffen auch bei einem kleinen Modul von  $m_n = 1$  mm die vorliegenden Belastungen innerhalb der zu erwartenden Betriebszeit von den Zahnrädern ertragen werden. Aufgrund des kleinen Moduls ergeben sich sehr kleine Getriebe-maße. So ist der Teilkreisdurchmesser des Hohlrades lediglich 76 mm. Mit der Fa. Prozamet aus Radom (Polen) konnte das Running Racing Team der OTH Amberg-Weiden einen kompetenten Partner gewinnen, der im steten Austausch mit den Studierenden an der OTH die Zahnräder für die Getriebe fertigte.

In Abbildung (6) ist ein Längsschnitt durch das im Achsschenkel verbaute Planetengetriebe dargestellt.

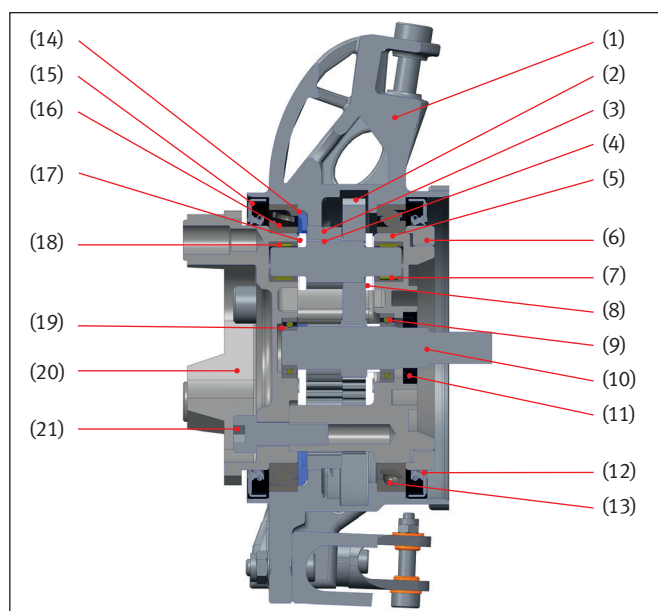


Abbildung 6: Planetengetriebe im Achsschenkel des RS16

Der Antrieb des Planetengetriebes erfolgt über die Sonnenwelle (10), die ähnlich wie die Motorwelle schwimmend mit den Rillenkugellagern (9) und (19) im zweiteiligen Planetenträger (5), (20) gelagert ist. Auch hier wird die Position der Sonnenwelle durch eine Kugellagerausgleichsscheibe – hier am Außenring des äußeren Rillenkugellagers (19) – nach rechts eindeutig festgelegt.

Das direkt auf der Sonnenwelle gefertigte Sonnenzahnrad treibt die Planetenräder (2) auf den Planetenwellen (4) an. Die Planetenwellen sind über Nadelhülsen (7) und (18) im Planetenträger gelagert. Dieser dient auf der äußeren Seite (20) zur Aufnahme für den Felgenstern des Rades. Die beiden Hälften des Planetenträgers werden durch drei Schrauben (21) aus Titan miteinander verbunden. Der Planetenträger seinerseits ist im Achsschenkel (1) mit zwei Schrägkugellagern (13), (16) in O-Anordnung gelagert. Zur Einstellung des Lagerspiels der Schrägkugellager dient die Wellenmutter (6), die auf der linken Fahrzeugseite mit einem Links- und auf der rechten Seite mit einem Rechtsgewinde versehen ist. Auf diese Weise sollte sicher verhindert werden, dass sich infolge der starken Antriebs- und Bremsdynamik die Vorspannung der Lager lockern kann. Im Fahrbetrieb hatte sich jedoch gezeigt, dass durch diese konstruktive Maßnahme eine Lockerung zwar sicher vermieden werden konnte, aber umgekehrt trotz Sicherungsfahnen zur Unterbindung einer Drehbewegung im Betrieb die Wellenmutter sich festzogen und somit das Lagerpiel unzulässig reduzierten. Glücklicherweise führte dieser Umstand in keinem dynamischen Wettbewerb zu einem Problem. Dennoch wird die (nicht im Schnitt erkennbare) Konstruktion der Sicherungsfahnen im Fahrzeug der kommenden Saison durch eine deutlich zuverlässigere Konstruktion ersetzt.

Das kleinere Planetenrad  $z'_2$  ist direkt in die Planetenwelle gefertigt. Da es aus fertigungstechnischen Gründen nicht möglich war, auch das größere Planetenzahnrad  $z_2$  auf die Planetenwelle zu fertigen, wurde mit einem besonderen konstruktiven „Kniff“ gearbeitet: Das kleinere Planetenzahnrad  $z'_2$  wurde so lang ausgeführt, dass es noch unter das größere Planetenzahnrad  $z_2$  reicht. Anschließend wurde die Verzahnung des kleineren Planetenzahnrades

an der Position des großen Planetenzahnrades ein wenig im Durchmesser heruntergedreht, sodass ein Absatz entstand, der die axiale Position des Zahnrades  $z_2$  eindeutig fixiert. Die verbleibende Verzahnung dient nun als Drehmomentübertragung zwischen dem großen Planetenzahnrad  $z_2$  und der Planetenwelle. Der Sachverhalt ist zur Veranschaulichung in Abbildung 7 wiedergegeben.

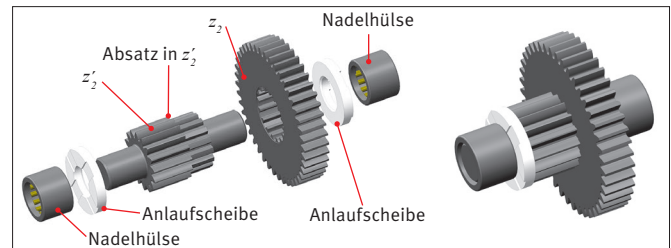


Abbildung 7: Explosionsdarstellung (links) der Planetenritzelwelle mit abgedrehter Verzahnung als Welle-Nabe-Verbindung für das Planetenzahnrad  $z_2$ . Zusammengebauter Zustand rechts. <sup>[3]</sup>

Die Planetenwellen werden durch Anlaufscheiben (8) und (17) aus PTFE axial im Planetenträger fixiert. Zur sicheren Schmierölversorgung der Nadelhülsen sind die Anlaufscheiben mit vier radial verlaufenden Nuten versehen. Das Hohlrads (3) ist mit einem sogenannten P4C-Polygon drehfest mit dem Achsschenkel verbunden. Zur axialen Fixierung des Hohlrades dient der Stützring (4), der das Hohlrads gegen den Außenring des Schrägkugellagers (16) abstützt. Diese Konstruktion wurde im RS16 eingeführt, nachdem im RS15 die M2-Schrauben zur axialen Sicherung des Hohlrades abgerissen sind, obwohl diese der Theorie nach infolge der Geradverzahnung der Zahnräder keiner Axialkraft ausgesetzt sein müssten.

Zur Vermeidung des Ölaustrittes an den Drehdurchführungen dienen die Radialwelldichtringe (11), (12) und (15). Wie in den vergangenen Jahren nahm die Auslegung der Komponenten des Antriebes einen großen Raum ein und wurde komplett von den Studierenden durchgeführt. Neben rein analytischen Berechnungen kamen im Wesentlichen Simulationsmethoden wie Finite-Elemente-Berechnungen zum Nachweis der Strukturfestigkeit und zur Analyse der Wärmeentwicklung und Strömungen an thermisch kritischen Stellen zum Einsatz.

Zwei Beispiele hierfür seien exemplarisch herausgegriffen:

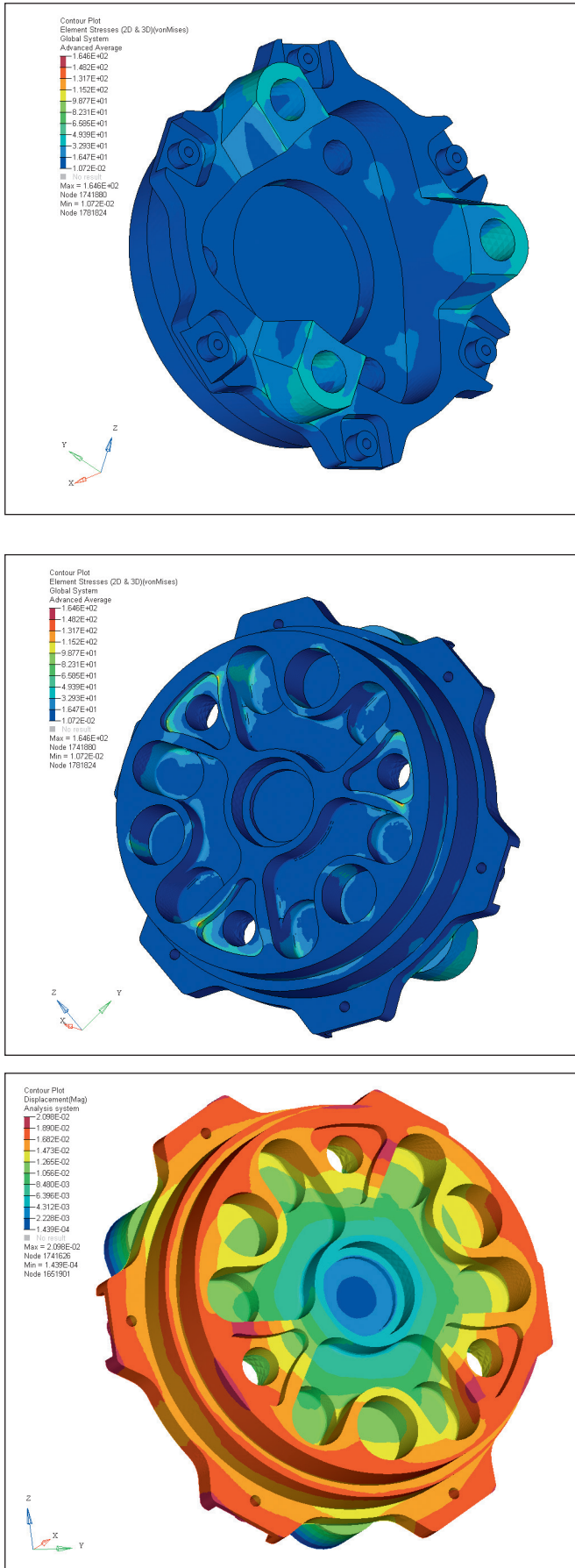


Abbildung 8: Spannungen (oben und mitte) und Verformungen (unten) an der Radnabe des RS16. [2]

Die äußere Hälfte des Planetenträgers aus hochfestem Aluminium, die gleichzeitig auch die Funktion der Radnabe zur Anbindung des Rades übernimmt, wurde neben vielen anderen Komponenten am Fahrzeug einer intensiven Festigkeitsanalyse unterzogen. Ziel war eine möglichst geringere Masse bei gleichzeitig nicht zu hohen Maximalspannungen und moderaten Verformungswerten. Siehe Abbildung 8! Ohne die intensive Unterstützung verschiedener Softwareanbieter wie ANSYS, Altair und Dassault Systems, die Formula Student Teams intensiv mit der Bereitstellung hochwertiger Software unterstützen, wären derartig tiefgehende Untersuchungen nicht in diesem Umfang möglich.

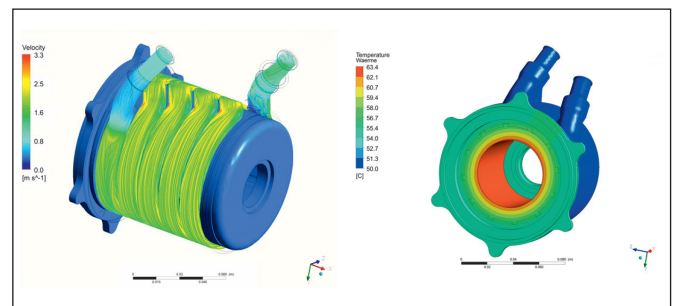


Abbildung 9: Strömungsgeschwindigkeit des Kühlwassers durch den Kühlmantel und Temperaturverteilung über den Stator des Elektromotors. [4]

In Abbildung 9 sind links die Strömungsgeschwindigkeit des Kühlwassers durch den Kühlmantel des Elektromotors und rechts die resultierende Temperaturverteilung am Stator des Elektromotors dargestellt. Die Ergebnisse dienen zur Auslegung der Kühlpumpen und Kühler des Fahrzeuges.

### 3 Fazit

Die vorgestellte Konstruktion des Antriebes mit permanent erregten Innenläufer-Synchronmotoren und nachgeschalteten Planetengetrieben hat sich in den Wettbewerben der Formula Student Weltmeisterschaften bewährt. Musste in der Saison 2015 noch der dritte massive Konzeptwechsel in Folge verkräftet werden, konnte in der Saison 2016 auf dem Konzept der vorhergehenden Saison aufgebaut werden. Hier zeigte sich nun, welches Potenzial in dem Antriebskonzept des Rennwagens der OTH Amberg-Weiden steckt. Ein exzellenter vierter Platz bei der Formula Student Germany und ein erster Platz bei der Formula Student Hungary sind eindrucksvolle Belege hierfür.

## Referenzen:

- [1] Rönnebeck, H.: Elektrischer Radnabenmotor für den Formula Student Rennwagen der OTH Amberg-Weiden, OTH Amberg-Weiden, Forschungsbericht 2015
- [2] Kerner, M.; Montsho, N.; Kummert, M.: Ausarbeitung zur Studienarbeit „Konstruktion des Antriebes des Rennwagens für die Formula Student 2016“ im Fach Konstruktion II, OTH Amberg-Weiden, Februar 2016
- [3] Sailer, J.: Ausarbeitung zur Studienarbeit „Konstruktion des Planetengetriebes des Rennwagens für die Formula Student 2016“ im Fach Technische Produktentwicklung, OTH Amberg-Weiden, Dezember 2015
- [4] Wüst, J.: Ausarbeitung zur Studienarbeit „Entwicklung und Konstruktion der Kühlung des Rennwagens für die Formula Student 2016“ im Fach Konstruktion II, OTH Amberg-Weiden, Februar 2016

## Fördergeber:

Das Running Snail Racing Team der Ostbayerischen Technischen 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)

# Implementierung und Evaluation von Algo- rithmen zur multi- modalen Bild- segmentierung

## Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich einerseits mit der Implementierung und Evaluierung sechs leistungsstarker Segmentierungsalgorithmen für die medizinische Bildverarbeitung, andererseits mit der Analyse geeigneter Materialien zur Entwicklung eines Hybridphantoms, welches im Bereich der Radiologie sowohl mit ionisierender Strahlung als auch in der Magnetresonanztomografie eingesetzt werden soll. In dieser Arbeit werden die implementierten Algorithmen zur automatischen bzw. semiautomatischen Segmentierung anhand dreier Patientendaten analysiert. Anschließend werden die Ergebnisse mit einem Goldstandard verglichen und bewertet. Letztendlich kann keines der Verfahren omnipotent eingesetzt werden; die Segmentierungsergebnisse waren abhängig vom Kontrast zu den Nachbarregionen und der Struktur bzw. Geometrie des Segmentierungsobjekts. Zudem zeigte sich im Allgemeinen keine Korrelation zwischen den SNR- oder CNR-Werten und der Fehlsegmentierung.

## Abstract

This study reports on the implementation and evaluation of six powerful segmentation algorithms for medical imaging, which can be used in radiology, both with ionizing radiation, as well as in magnetic resonance imaging. In this work, the implemented algorithms for automatic or semi-automatic segmentation are analyzed based on three patient data. Subsequently, the results will be compared to a golden standard. In general, none of the methods can be used omnipotent. The segmentation results were depending on the image contrast to the neighboring regions and on the structure or geometry of the object. In addition, no correlation was found generally between the SNR or CNR values and incorrect segmentation.

## 1 Einleitung

Die Segmentierung von Bildern ist eine Schlüsselaufgabe in vielen und in den Anwendungen des maschinellen Sehens (*Computer Vision*). In der medizinischen Bildverarbeitung ist der Stellenwert der Bildsegmentierung beispielsweise mit Anwendungen in Operationsplanung oder in der Detektion von pathologischen Gewebeeränderungen in der bildgebenden Diagnostik ebenfalls von großer Bedeutung. Segmentierungsverfahren werden beispielsweise für die Erkennung von organischen Strukturen oder Organen verwendet, um die segmentierten Objekte zu vermessen und deren Flächeninhalt bzw. Volumen zu bestimmen. Des Weiteren gewinnt die Personalisierte Medizin, d. h. die auf das einzelne menschliche Individuum angepasste Diagnostik und Therapie, aufgrund der demografischen Entwicklung

zunehmend an Bedeutung. Diese Entwicklung zeichnet sich insbesondere im Bereich der medizinisch-bildgebenden Verfahren aus der Röntgendiagnostik und Nuklearmedizin ab. Mit den bildgebenden Verfahren, z. B. mit der Gammakamera, dem SPECT oder PET aus der Nuklearmedizin bzw. dem CT oder MRT aus der traditionellen Röntgendiagnostik, soll ein besseres Verständnis von Krankheiten und Therapieverläufen und deren zugrunde liegende Anatomie sowie die physiologischen und biochemischen Strukturen und Vorgänge im menschlichen Körper visualisiert werden. Die computergestützte Bildsegmentierung und Klassifizierung von Gewebestrukturen ist bei der Analyse der Bilddaten eine elementare Aufgabe, die einer kontinuierlichen Weiterentwicklung und Verbesserung unterliegt.

Bei der Segmentierung wird das Bild in verschiedene Regionen eingeteilt, um bestimmte Objekte (*objects-of-interest*) von den restlichen Bildinhalten zu trennen. Bei den Segmentierungsverfahren wird in erster Linie zwischen kontextbasierten *contextual* (nutzen die Beziehungen zwischen den Bildmerkmalen) und nicht kontextbasierten *non-contextual* (bauen nicht auf den Pixelbeziehungen auf) Verfahren unterschieden [1]. Die kontextbasierten Techniken lassen sich weiter in regionenbasierte (region-based), grenzbasierte (*boundary-based*), kantenbasierte (*edge-based*) oder andere modellbasierte (*modell-based*) Ansätze gliedern (siehe Abbildung 1). Auf der Anwendersseite kann man zwischen automatischen (z. B. k-means Clustering) und semiautomatischen (z. B. Saatpunkt-Verfahren) Verfahren unterscheiden.

In dieser Arbeit werden einige Segmentierungsalgorithmen vorgestellt und anhand von klinischen, randomisierten Patientenbildern (MRT, CT) hinsichtlich des Segmentierungsergebnisses mit einem manuell segmentierten Bild (Goldstandard) verglichen. Klinische Bilder, wie z. B. MRT-Bilder des Gehirns mit der grauen und weißen Substanz, stellen einen guten Benchmark für die Algorithmen dar, da die anatomischen Strukturen hinsichtlich ihrer Geometrie sehr komplex sind [2]. Des Weiteren werden die Aufnahmen schrittweise mit Bildrauschen in steigender Standardabweichung überlagert und anschließend segmentiert, um das Verhalten der Verfahren bei unterschiedlichen SNR-Werten (*signal-to-noise*) zu analysieren und zu bewerten (siehe Abbildung 1). Nach [3] sind Hardware-Phantome eine gute Möglichkeit, diese Algorithmen zu evaluieren, ersetzen aber nicht das Testen an Patientendaten, die in der klinischen Routine gewonnen wurden. Die hochschulinternen Arbeiten [4] und [5] beschäftigen sich bereits mit Segmentierungsalgorithmen und konnten dabei Methoden im Bereich der kantenbasierten-Verfahren implementieren und an nuklearmedizinischen Bildern evaluieren.

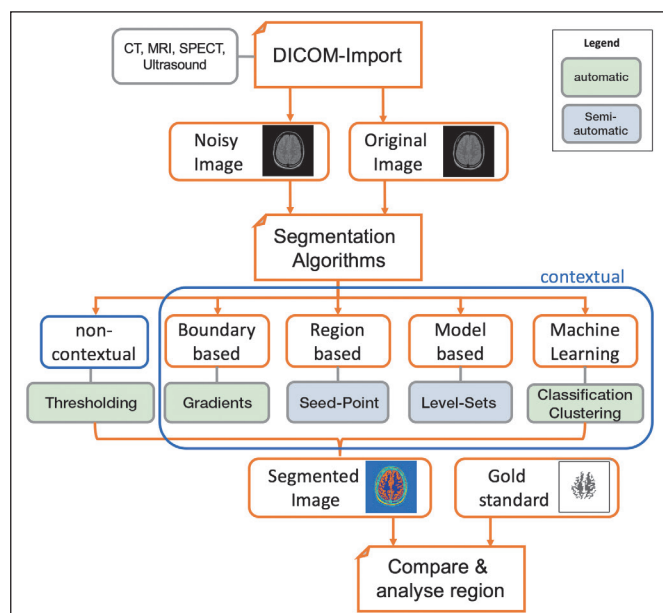


Abbildung 1: Darstellung der sequentiellen Bildverarbeitungsschritte.

## 2 Beschreibung der Segmentierungsverfahren und Algorithmen

### 2.1 Wasserscheidentransformation

Die Grundidee der Wasserscheidentransformation lässt sich durch folgendes Modell bildlich und anschaulich beschreiben: In einem protonendichtegewichteten MRT-Schnittbild werden zwei benachbarte Organstrukturen dunkel gegenüber dem Hintergrund dargestellt. Man interpretiere nun das Schnittbild als topografisches Höhenprofil der Grauwerte im  $R^3 : g_{(x,y)} = f(x,y)$ . Die Organstrukturen stellen sich innerhalb dieses Profils mit ihren niedrigen Grauwerten als Senken bzw. Täler, umgeben von dem Gebirge der hohen Grauwerte dar [6]. Die lokalen Minima der Täler werden nun von unten mit Wasser aufgefüllt und der Wasserspiegel in den Becken steigt. Die Flutung beginnt auf dem Pixel mit dem niedrigsten Höhenwert (Grauwert). Stoßen zwei Wasserbecken zusammen, werden an diesen Stellen Dämme – die sogenannten Wasserscheiden – errichtet. Wird der Flutungsprozess weitergeführt, ist am Ende des Verfahrens jedes lokale Minimum von Dämmen umgeben, die die Becken ringsum abgrenzen. Die Wasserscheiden segmentieren also die Organstrukturen (Becken) von dem umliegenden Hintergrund.

### 2.2 Segmentierung von Bildinhalten im Merkmalsraum

Segmentierungsverfahren im Merkmalsraum gehören zu den kontextbasierten Bildsegmentierungstechniken [1]. Ein n-dimensionaler Merkmalsraum  $W_m$  wird dabei über das gesamte Bild aufgespannt. Dieser Merkmalsraum enthält mehrere n-dimensionale Merkmalsvektoren (feature vectors)  $\vec{m} \in W_m$ , deren Elemente wiederum die verschiedenen Merkmale (features)  $m_i$  darstellen. Diese Merkmale werden, z. B. anhand von unterschiedlichen Ähnlichkeitsmaßen, in verschiedene Klassen  $\omega \in \Omega = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n\}$  eingeordnet; damit genügt der Klassifikationsprozess mathematisch einer Entscheidungsregel  $W_m \rightarrow \Omega$  [2].

#### 2.2.1 kNN-Klassifikator

Der kNN-Klassifikator nach [7] benötigt demnach für jede vorgegebene Klasse einen Lerndatensatz (*Trainings Set*)  $S$  (mit  $\vec{m}_i \in S$ ), um unbekannte Objekte anhand eines Abstands- bzw. Ähnlichkeitsmaßes (*similarity measure*) klassenspezifisch zu labeln. Für jeden Merkmalsvektor wird der Abstand zu den Merkmalsvektoren in den Lerndatensätzen, die als Referenzvektoren dienen, berechnet.

#### 2.2.2 kMeans-Clustering

Bei allen Clusteringverfahren handelt es sich um unüberwachtes Lernen (*unsupervised learning*), d. h., im Gegensatz zur Bildklassifikation ist keine Lernstichprobe nötig,



um das Eingangsbild in entsprechende Cluster einzuteilen. Jedes Pixel, repräsentiert durch einen Merkmalsvektor  $\vec{m}$ , wird in  $k$  Cluster  $C_1, C_2, C_3, \dots, C_k$  unterteilt. Das allgemeine Fehlerquadratkriterium ist das Gütekriterium (Varianzkriterium) zur Bewertung einer Partition. Für jedes Clusterzentrum  $\vec{c}(\vec{m}_k)$  gilt daher folgendes Minimierungsproblem zu lösen:

$$\vec{c}(\vec{m}_k) = \arg \min [d(\vec{m})] = \arg \min [\sum_i |v\vec{m}_i - \vec{c}(\vec{m}_i)v|] \quad \text{Gl. 1}$$

### 2.3 Saatpunktverfahren

Dabei wird durch den Anwender des Verfahrens ein Objekt (*object of interest*), das aus dem übrigen Bild segmentiert werden soll, ausgewählt. Über eine manuelle Eingabe (z. B. per Mausklick) wird ein Saatpunkt im Objekt gesetzt, der als Startpunkt des Fortpflanzungsverfahrens im diskreten  $R^2$ -Raum fungiert. Die zu segmentierende Region wird über ein Homogenitätskriterium (z. B. Intensität, Gradient) zu den umliegenden Pixeln definiert.

### 2.4 Multischwellenwertmethode

Die Multischwellenwertmethode ist ein schwellenwertbasiertes Segmentierungsverfahren, welches auf dem Bildhistogramm ausgeführt wird. Die Multischwellenwertmethode liefert im Gegensatz zur Multilevel thresholding method nach Otsu [8] bzw. in der Weiterentwicklung nach [9] bessere Ergebnisse (siehe Abbildung 2).

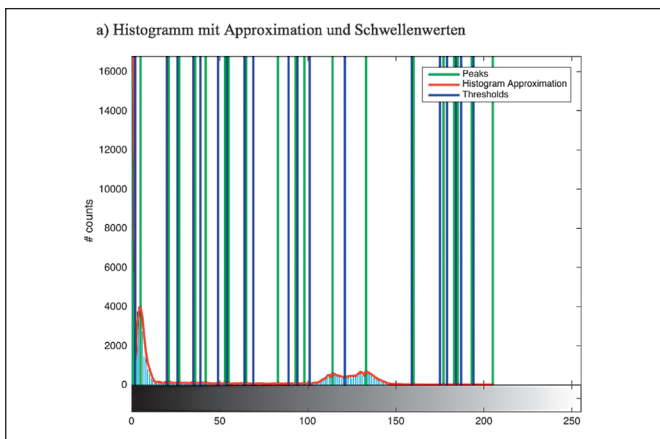
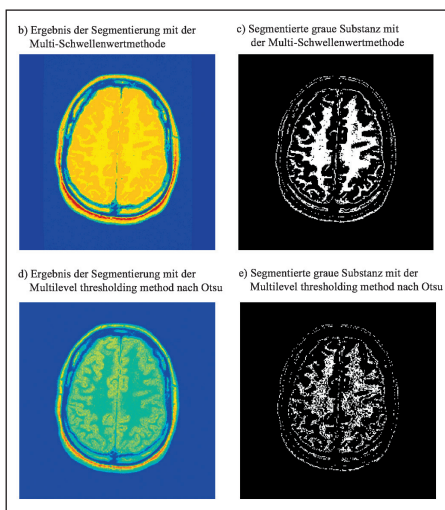


Abbildung 2: a) Histogramm des Eingangsbildes mit dem approximierten Polynom, den detektierten Peaks und den berechneten Schwellenwerten. b) und c) Ergebnis der Segmentierung mit der Multi-Schwellenwertmethode. d) und e) Ergebnis der Segmentierung mit der Multilevel thresholding method nach Otsu.



### 2.5 Level-Set-Methode

Ein Level-Set ist eine Funktion  $\Phi(\vec{x}, t) = \text{const.}$  der Pixelkoordinaten  $\vec{x} = (x, y)^T$  und der diskreten Iterationszeit  $t$ . Die Level-Set-Funktion ist für folgende Bereiche bzw. Abschnitte definiert:

$$\Phi(\vec{x}, t) = \begin{cases} 0 & \text{falls } x \in \vec{K}(t) \\ d(\vec{x}, \vec{K}(t)) & \text{falls } x \notin \vec{R}(t) \\ -d(\vec{x}, \vec{K}(t)) & \text{falls } x \in \vec{R}(t) \end{cases} \quad \text{Gl. 2}$$

Dabei ist  $\vec{K}(t)$  die Kontur als Zero-Level-Set ( $\Phi(\vec{x}, t) = 0$ ) gegeben.  $\vec{R}(t)$  ist die von der Kurve  $\vec{K}(t)$  umschlossene Bildregion. Der Benutzer gibt dabei die initiale Level-Set-Funktion  $\Phi(\vec{x}, t_0 = 0) = \text{const.}$  vor. Anschließend wird das Optimierungsproblem über einen iterativen Anpassungsprozess, der über die Differenzialgleichung

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = V |\nabla \Phi| = 0 \quad \text{Gl. 3}$$

mit der Speed-Funktion  $V$  beschrieben wird, gelöst.

### 2.6 Vorstellung der Testbilder

Die in den letzten Kapiteln vorgestellten Segmentierungsverfahren werden an folgenden drei medizinischen Testdatensätzen evaluiert:

- Testbild 1: CT-Thoraxaufnahme, aus der beide Lungenflügel segmentiert werden sollen.
- Testbild 2: CT-Thoraxaufnahme, aus der pathologisch verändertes Gewebe segmentiert werden soll.
- Testbild 3: Protonendichtegewichtetes MRT-Schnittbild des Gehirns, aus dem die weiße Substanz segmentiert werden soll.

Die Testbilder sollen in erster Linie reale Segmentierungsfälle nachbilden. Die weiße Substanz in Testbild 3 lässt sich z. B. hinsichtlich des Bildkontrastes nur begrenzt von der angrenzenden weißen Substanz unterscheiden. Zudem ist die Geometrie der anatomischen Struktur sehr komplex ausgeprägt. Neben der Lungensegmentierung, bei der die Geometrie des Organs weniger komplex ausgeprägt ist, wird mit der Abgrenzung einer pathologischen Struktur in Testbild 2 ein kreisförmiges bzw. elliptisches Objekt segmentiert, dessen Intensitätsprofil eine hohe Spannweite (ca. 70 Pixel) bzw. Standardabweichung aufweist; die Intensität der Pixel nimmt zum Objekttrand hin stark ab. In Testbild 1 sollen die hellen Regionen im Zielobjekt (Lungenflügel) nicht mitsegmentiert werden. Letztendlich waren folgende Bild- bzw. Objektcharakteristika für die Auswahl der Testbilder ausschlaggebend: Kontrast des Objektes zu den Nachbarregionen und die Objektgeometrie. Alle Segmentierungsmethoden werden zehnmal auf jedes der drei Testbilder angewendet. Zudem werden die Bilder mit additiven weißen gaußschem Rauschen (MATLAB-Funktion `imnoise(I_in, 'gaussian', mean, variance)`) überlagert, um

den Bildkontrast noch weiter zu reduzieren. Dabei wird der Wert des *variance*-Parameters schrittweise (0,0005 Schritte) im Intervall von [0,0005-0,0025] erhöht. Der Rauschkern in Form einer Gaußkurve wird also zunehmend breiter. Die Segmentierungsergebnisse der Algorithmen werden mit einem Goldstandard (siehe Abbildung 3), der einer manuellen Segmentierung entspricht, verglichen.

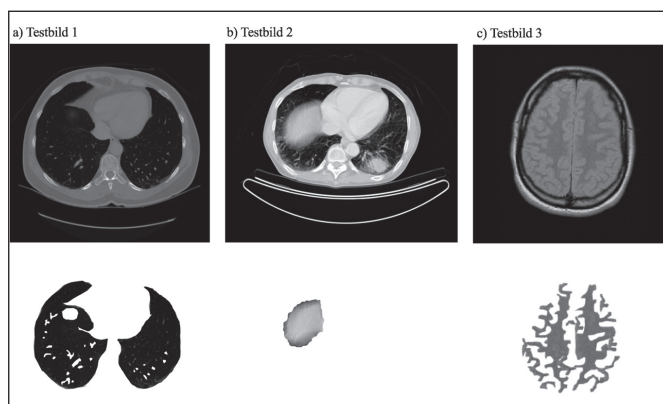


Abbildung 3: Darstellung der drei Testbilder mit Goldstandard der segmentierten Objekte.

### 3 Ergebnisse der Testbilder

In Bezug zum Goldstandard werden beim Testbild 1 mit dem Saatpunktverfahren und der Level-Set-Methode rein quantitativ die besten Segmentierungsergebnisse erzielt. Auch bei breiten Rauschkernen (hohen Varianzen) und damit kleinerem SNR- und CNR-Werten bleibt das Segmentierungsergebnis nahezu konstant. Der Korrelationskoeffizient aus der Korrelation der SNR- bzw. CNR-Werte mit Ergebnis der Segmentierung nimmt nur sehr kleine Werte an, d. h., es zeigt sich kein positiver bzw. negativer Zusammenhang. Des Weiteren ist es mit der Level-Set-Methode möglich, helle Regionen im Lungengewebe nicht mitzusegmentieren. Wird dem Bild jedoch Rauschen hinzugefügt, werden diese Regionen mit dem Lungengewebe extrahiert. Mit dem Saatpunktverfahren wird das gesamte Lungengewebe mit allen enthaltenen hellen Regionen segmentiert; das Verfahren erlaubt lediglich, randnahe helle Pixel nicht mitzusegmentieren – helle Pixel, die in ihrer Nachbarschaft vollständig von Pixeln des Lungengewebes umgeben sind, können nicht extrahiert werden. Mit dem k-Means Clustering und dem Multischwellenwertverfahren werden ebenfalls gute Segmentierungsergebnisse, besonders bei nicht bzw. wenig verrauschten Bildern, erzielt.

Die Ergebnisse der Segmentierungsverfahren für die Testbilder 2 und 3 ähneln sich qualitativ sehr stark. Mit folgenden Verfahren werden akzeptable Ergebnisse erzielt: Multischwellenwertmethode, kNN-Klassifikator, k-Means Clustering und Wasserscheidenverfahren. Im direkten Vergleich ist die Multischwellenwertmethode zu bevorzugen, da diese auch im stark verrauschten Zustand

eine geringe Fehlsegmentierung aufweist (siehe Abbildung 4). Dennoch werden mit dem kNN-Klassifikator, k-Means Clustering und der Multischwellenwertmethode wie schon bei Testbild 2, zu viele Pixel aus dem Randbereich des Schädels mitextrahiert. Die Vordergrund- und Hintergrundmarker lassen sich für eine optimierte Wasserscheidentransformation jedoch einfacher, wie bei dem Testbild 1, über die Bildmorphologie bestimmen. Das Saatpunktverfahren liefert dagegen nur im unverrauschten Zustand ein gutes Segmentierungsergebnis; wird das Rauschen erhöht, nehmen die CNR-Werte stark ab und das Homogenitätskriterium kann auch nach einer Optimierung nicht mehr zwischen grauer und weißer Substanz unterscheiden. Die Zielregion wird letztendlich zu groß segmentiert. Um akzeptable Ergebnisse zu erhalten, kann nur der Wert des *MaxDist*-Parameters der Funktion *regionGrowing* reduziert werden. Dabei sind allerdings viele Saatpunkte zur Segmentierung nötig, was keine zulässige Lösung des Problems ist, da sich das Verfahren damit für den Benutzer zu aufwendig gestaltet. Die Level-Set-Methode erfasst zu wenig Pixel, da die Initialisierungsfunktion nicht auf die kleinen Regionen anwendbar ist. Allgemein zeigt sich bei keinem Verfahren ein starker Zusammenhang zwischen der Fehlsegmentierung und dem Bildrauschen.

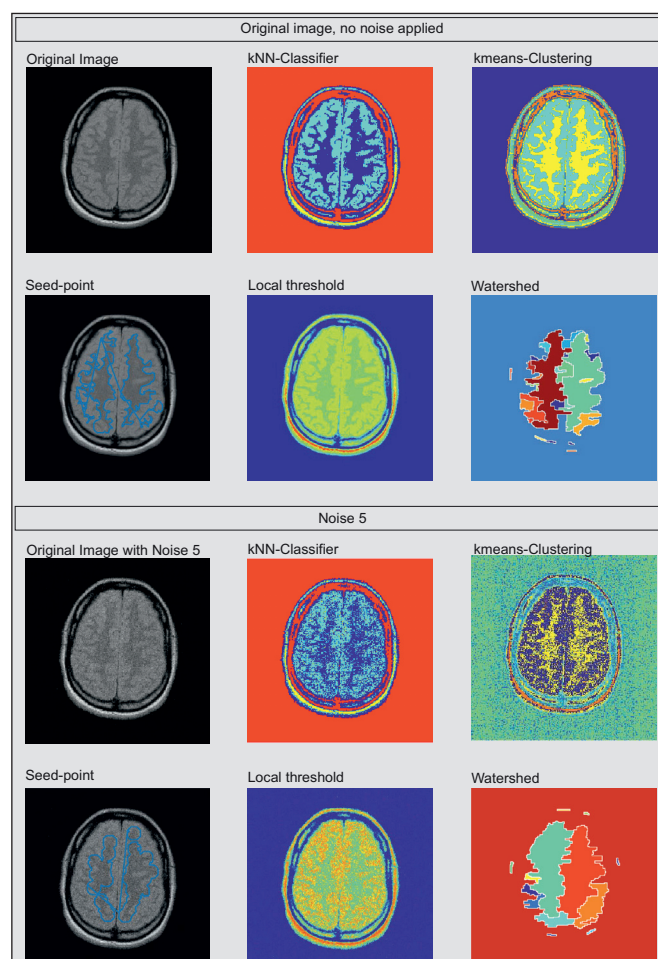


Abbildung 4: Darstellung der Segmentierungsergebnisse für unverrauschten und maximal verrauschten Zustand.

## 4 Diskussion der Ergebnisse

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Objektgeometrie und der Bildkontrast bzw. der CNR-Wert des Bildes in die Auswahl des Segmentierungsverfahrens einbezogen werden muss. Komplexe, nicht zusammenhängende anatomische Strukturen (vgl. Testbild 3) können nur schwer mit Level-Set-Ansätzen segmentiert werden, da auf jeder Region eine initiale Level-Set-Funktion in Form einer Startkontur (z. B. Rechteck) positioniert werden muss. Dies kann sich, wie bei der weißen Substanz, die aus vielen einzelnen, nicht zusammenhängenden Regionen besteht, aufwendig gestalten. Zudem benötigt die Startkontur eine Mindestanzahl an Pixeln, um eine Region zu segmentieren. Befinden sich in der Objekttopologie Löcher oder Ähnliches (Testbild 1), können diese nicht mit allen Verfahren (z. B. Saatpunktmethode) aus der Region extrahiert werden. Der Kontrast zwischen der Zielregion und den angrenzenden Nachbarregionen hat abhängig vom Segmentierungsverfahren ebenfalls einen starken Einfluss auf das Ergebnis. Beim Saatpunktverfahren beispielsweise ist das Ergebnis stark von der Wahl des Homogenitätskriteriums abhängig. Dieses muss so gewählt sein, dass angrenzende Nachbarregionen nicht mit der Zielregion extrahiert werden. Je geringer der Kontrastunterschied zwischen diesen beiden Regionen ist, desto aufwendiger ist die Optimierung des Homogenitätskriteriums. Diese Situation wird mit zunehmendem Bildrauschen und damit mit abnehmenden CNR-Werten verschlechtert. Ist die Pixelintensität in der Zielregion nicht homogen (Testbild 2), bedarf es ebenfalls einer aufwendigen Anpassung des Homogenitätskriteriums, um nicht zu wenige Pixel des Zielobjekts, aber auch nicht zu viele Pixel der Nachbarobjekte zu segmentieren. Die Adaption der Level-Set-Methode gestaltet sich, durch das Anpassen des  $\alpha$ -Gewichts der Kantenindikator-Funktion, weniger schwierig. Das Verfahren lieferte im Vergleich zum Saatpunktverfahren auch bessere Ergebnisse. Die Multischwellenwertmethode erkennt bei zu großen Intensitätsabweichungen in der Zielregion nicht nur einen Peak im Histogramm, sondern mehrere, und ordnet die Pixel einer Region mehreren Klassen zu (vgl. Testbild 2). Die fehlende Information über die Lage der Pixel ist nicht nur ein Problem der nichtkontextbasierten Segmentierungstechniken, sondern auch bei Klassifikations- und Clustering Verfahren, die nur den Grauwert als Merkmal

heranziehen. Dabei können beispielsweise Pixel mit ähnlicher Intensität aus anderen Regionen mitsegmentiert werden.

Die Untersuchung des Zusammenhangs der Fehlsegmentierung mit dem Bildrauschen führt zu der Aussage, dass im Allgemeinen keine negative Korrelation zwischen der Abnahme des SNR- bzw. CNR-Wertes und der Zunahme der Fehlsegmentierung vorliegt. Dennoch zeigt sich bei einigen Verfahren, unter der Voraussetzung, dass diese akzeptable Ergebnisse liefern, ein starker negativer Zusammenhang (beispielsweise: k-Means Clustering (Testbild 1), Multischwellenwertmethode (Testbild 1), Level-Set-Methode (Testbild 2)).

## 5 Projektierung

Wie bereits in der Diskussion dargelegt, werden bei den merkmalsbasierten Verfahren ebenfalls Pixel segmentiert, die nicht zum Zielobjekt gehören, da nur die Pixelintensität als Merkmal gewählt wurde. Dieses Ergebnis kann verbessert werden, wenn ein multidimensionaler Merkmalsvektor herangezogen wird. Beispielsweise ist es möglich, neben der Intensität den Grauwertgradienten (Betrag und Winkel) in Klassifikation bzw. Clustering miteinzubeziehen. Damit ist das Verfahren nicht mehr unabhängig von der Position, sondern beinhaltet ein Kantenkriterium. Des Weiteren kann die Änderung des Gradienten als zusätzliches Merkmal hinzugefügt werden. Damit kann bei Testbild 2 der Gradient bzw. die Gradientenänderung in den Randbereichen der Zielregion in die Auswertung aufgenommen werden und somit alle Randnahen Pixel mitsegmentiert werden.

In weiterführenden Arbeiten zu diesem Thema könnte der Bereich des maschinellen Lernens weiter analysiert werden, um neben dem kNN-Klassifikator und dem k-Means Clustering weitere Verfahren mit den gleichen klinischen Bilddaten zu evaluieren. Aus dem Bereich des maschinellen Lernens haben sich besonders zwei Verfahren in den Vordergrund gestellt: Support Vector Machines und Neuronale Netze. Beide Methoden werden in der medizinischen Bildgebung nicht nur in der Segmentierung, sondern auch in der computergestützten Diagnose (CAD, *computer-aided diagnosis*), beispielsweise bei der Mammografie, in der Aufnahmen bewertet werden, eingesetzt.

---

### Referenzen:

- [1] Geoff Dougherty. Digital image processing for medical applications. Cambridge University Press, Cambridge, UK; New York, 2009.
- [2] M. A. Balafar, A. R. Ramli, M. I. Saripan, and S. Mashohor. Review of brain mri image segmentation methods. *Artificial Intelligence Review*, 33(3):261–274, 2010.
- [3] H. Handels. Medizinische Bildverarbeitung: Bildanalyse, Mustererkennung und Visualisierung für die computergestützte ärztliche Diagnostik und Therapie. Leitfäden der Informatik. Vieweg+Teubner Verlag, 2009.

- [4] J. Vogt and S. Seemann. Optimierte Kollimation zur Bestimmung des Schilddrüsenuptake bei 2d-Messverfahren. Bachelorarbeit. Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, 2015.
- [5] M. Lindner. 3d-Spect mit Alginaten – Eine Alternative zum Jaszack-Phantom zur Detektion von Läsionen und in der Qualitätssicherung?! Bachelorarbeit, Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, 2016.
- [6] Xin Zhou. Wasserscheidentransformation. Universität Koblenz, 2015.
- [7] M. Goldstein. kn-nearest neighbor classification. IEEE Transactions on Information Theory, 18(5):627–630, Sep 1972.
- [8] Nobuyuki Otsu. A threshold selection method from gray-level histograms. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 9(1):62–66, Jan. 1979.
- [9] Deng-Yuan Huang and Chia-Hung Wang. Optimal multi-level thresholding using a two-stage otsu optimization approach. Pattern Recognition Letters, 30(3):275 – 284, 2009.

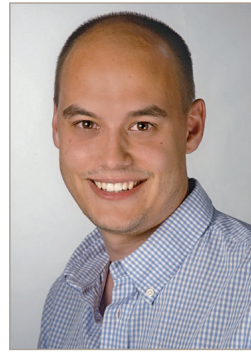
**Kontakt:**



**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



**Manuel Stich, M. Sc.**

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

m.stich@oth-aw.de



**Jeannine Vogt, B. Eng.**

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

j.vogt@oth-aw.de



**Michaela Lindner, B. Eng.**

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

## Zusammenfassung

Die Konnektivität aktueller Fahrzeugreihen jeder Marke steigt so kontinuierlich, wie die Meldungen verschiedenster Sicherheitsforscher über neue Schwachstellen und Sicherheitslücken im Fahrzeugbau. In diesem Aufsatz wird das Kommunikationsnetzwerk eines modernen Fahrzeugs dargestellt und auf die unterschiedlichen Schwachstellen eingegangen. Die Ergebnisse münden in einem Bedrohungsmodell, das als Basis dient, um neue und zukunftsgerichtete Sicherheitsmechanismen für die Fahrzeugindustrie zu evaluieren. Zusammen mit den fundamentalen Wissensbereichen der Fahrzeugkommunikation kann anschließend der Einsatz unterschiedlicher kryptografischer bzw. allgemeiner sicherheitsrelevanter Algorithmen und Methoden zur Verbesserung der Sicherheit informationsverarbeitender eingebetteter Systeme im Fahrzeugbau diskutiert werden.

## Abstract

The increasing number of connected cars interacting with each other and the environment has revealed a variety of vulnerabilities. These vulnerabilities made it possible to hack car internal communication networks and protocols. This paper gives an overview of common car communication and provides certain attack scenarios of automotive systems related IT security incidents. These findings are gathered in a level zero threat model. This model covers the attack surface of a modern car and serves as a base to evaluate new and future-oriented security features. Combined with basic car network and protocol knowledge, this paper tries to address the demand of lightweight cryptographic primitives and common IT security mechanisms to improve the protection of automotive related embedded communication against external threats.

## Einleitung

*We basically had complete control of the car except the steering.* <sup>[1]</sup>

In einem modernen Fahrzeug sind unzählige Sensoren, Aktoren, Assistenzsysteme und Mikrocontroller im Einsatz, um ein bestmögliches Fahrerlebnis zu erzielen. So unterstützen Abstandssensoren den Fahrer bei der Abschätzung von Distanzen, Stabilisierungsassistenten überwachen die unterschiedlichen physikalischen Kräfte, die auf das Fahrzeug einwirken und Scheibenwischer, gekoppelt mit einem Regensensor, ermöglichen freie Sicht bei nahezu jeder Wetterlage. Nach „Industrie 4.0“ hat auch das moderne Fahrzeug einen Zugang zum Internet

erhalten. Da möglichst viele Komponenten vom „Internet of Things“-Trend profitieren sollen, müssen die einzelnen Steuergeräte und Informationsquellen effizient und ausfallsicher kommunizieren können. Häufig wird dabei auf bewährte Technologien wie den CAN (Controller Area Network)-Bus, FlexRay oder MOST (Media Oriented Systems Transport) gesetzt. Während diese Kommunikationsnetzwerke und -protokolle auf höchstem Niveau gegen einen Ausfall durch technische oder umweltbedingte Störfaktoren abgesichert sind, berücksichtigte bei deren Entwicklung und Standardisierung der zum Teil aus den 1980er-Jahren stammenden Technologie, niemand den Schutz gegen eine vorsätzliche Manipulation durch den Menschen.

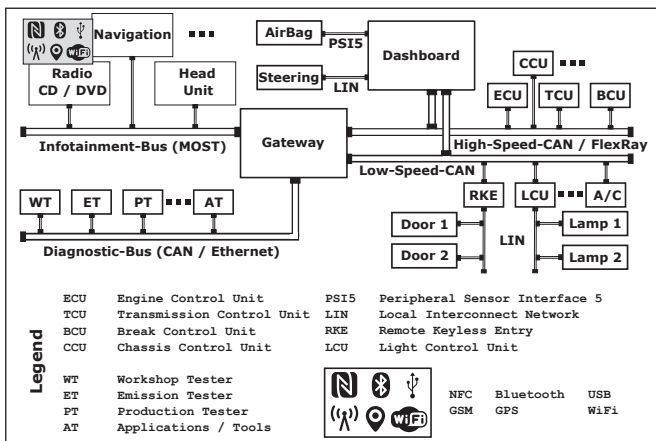


Abbildung 1: Kommunikationsnetzwerke in einem Fahrzeug nach [2]

Das Resultat dieser Entwicklung vom informationstechnisch autarken Fahrzeug hin zum „Connected Car“, bei dem Fahrzeuge ihre durch Sensoren gewonnene Einschätzung der Verkehrs- und Umweltlage teilen, kann heute in den aktuellen Trends der Forschungsvorhaben aller Fahrzeughersteller beobachtet werden. Neben all den Meldungen über neue Funktionalitäten häufen sich auch Verlautbarungen diverser Hacker und Sicherheitsforscher über die unterschiedlichsten Sicherheitslücken dieser Evolution. Bereits 2010 konnte ein Team aus Sicherheitsforschern um den Hacker Karl Koscher der University of California, San Diego und der University of Washington erfolgreich in das CAN-Bus-System eines General Motors 2009 Chevy Impala eindringen. General Motors konnte die Schwachstelle erst nach fünf Jahren schließen. Grund genug, gängige fahrzeuginterne Kommunikationsmittel zu analysieren und gleichzeitig die aktuelle Bedrohungslage für moderne Fahrzeuge aufzuzeigen. In dieser Arbeit wird, nach Aufbau des Grundwissens in die technologischen Hilfsmittel innerhalb des Fahrzeugbaus, auf bereits entdeckte Schwachstellen hingewiesen und abschließend die Gesamtsituation bewertet. Auch erste Ansätze für Gegenmaßnahmen sind Teil dieses Artikels. [1]

### Fahrzeuginterne Kommunikation

Um ein vollumfängliches Verständnis der aktuellen Sicherheitslage fahrzeuginterner Kommunikationsnetze (siehe Abbildung 1) zu erhalten, ist ein grundsätzliches Know-how der verbreitetsten Technologien notwendig. Dieser Abschnitt soll dieses Wissen vermitteln und gleichzeitig bekannte Schwachstellen benennen und mit aktuellen Hacks deren aktive Ausnutzung beweisen.

### Der Powertrain

Die Kommunikation aller Komponenten des Triebstrangs (engl. Powertrain, siehe Abbildung 2) wird in nahezu allen Fahrzeugen über ein Controller Area Network abgewickelt. Dieser Bereich des Informationsaustausches aller Steuergeräte, die den Fahrzeugtriebstrang bedienen, gilt als besonders schützenswert, da hier für die funktionale

Sicherheit des Fahrbetriebes wichtige Nachrichten versendet werden. Auf diesem Bus-System können Mitteilungen über den allgemeinen Zustand des Triebstrangs, wie Messwerte verschiedenster Motorüberwachungssensorik oder spezielle Anweisungen an sicherheitskritische Komponenten, wie die Bremsanlage, an alle Teilnehmer des Busses verschickt werden. Neben Signalen, die der Benutzer auslöst, z. B. das Einleiten eines Beschleunigungsvorganges, setzen in diesem Informationsnetzwerk auch „Advanced Driver Assistant Systems“ (ADAS) die jeweiligen Kommandos ab. So kann jeder Steuerungsversuch einer automatischen Einparkhilfe in diesem Bus-System mitgelesen werden. [2]

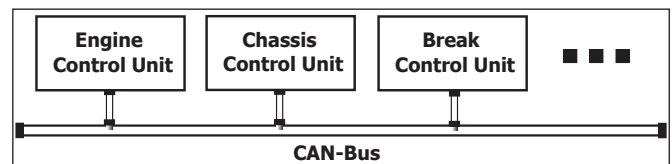


Abbildung 2: Triebstrangnetzwerk alias Powertrain

Ein Eindringen in diesen durch einen Gateway (siehe Abbildung 1) geschützten Bereich ist im Allgemeinen vergleichbar mit dem Erlangen von administrativen Rechten eines herkömmlichen Computersystems. Nahezu jedes Ausnutzen von Schwachstellen eines modernen Fahrzeugs dient langfristig dazu, in das Kommunikationsnetz einzugreifen, mindestens jedoch mitzulesen. Der Aufbau dieses Bus-Systems und die Vielzahl der Eigenschaften, die diesen Bus besonders anfällig gegenüber nicht authentifiziertem Nachrichtenverkehr machen, wird im nächsten Abschnitt genauer betrachtet. [3]

### Das Controller Area Network

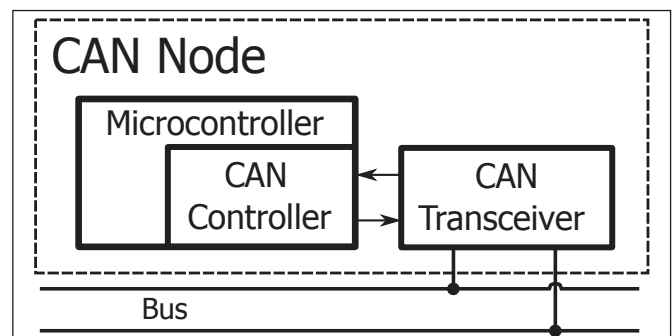


Abbildung 3: CAN-Knoten im Bus-System nach [4]

Das Controller Area Network bildet in nahezu jedem Kraftfahrzeug (z. B. im Auto, LKW, Motorrad, Flugzeug, u. v. m.) und in vielen industriellen Anlagen (z. B. in der Robotik oder als Sensor-Aktor-Bus) die grundlegende Kommunikationstechnologie. Der simple und dadurch günstige Aufbau eines, CAN-Node genannten, Bus-Teilnehmers (siehe Abbildung 3), die Echtzeitfähigkeit sowie die hohe Ausfallsicherheit begründen die heute starke Verbreitung des bereits in der zweiten Hälfte der 1980er-Jahre entwickelten Bus-Systems. [2]

Das CAN-System ist ein Bitstrom-orientierter Linien-Bus. Bei einer maximalen Bitrate von 1 MBit/s verwendet CAN ein CSMA/CR-Buszugriffsverfahren (Carrier Sense Multiple Access/Collision Resolution) sowie eine Fehlererkennung, die die Reaktion aller Steuergeräte innerhalb einer Bitzeit erfordert. Gerade in der Fahrzeugtechnik sind die beiden Variationen Low-Speed-CAN sowie High-Speed-CAN oft vertreten. Durch kurze Bus-Leitungen kann im High-Speed-CAN eine deutlich höhere Bitrate (üblicherweise 250 kbit/s bis 500 kbit/s) erreicht werden. Vor allem im Powertrain wird durchgehend auf den High-Speed-CAN-Bus gesetzt, da hier hohe Bus-Raten einen enormen Vorteil für die Steuerung der zeitkritischen Triebstrangkomponenten bieten. Der Low-Speed-CAN-Bus hingegen wird in der Karosserieelektronik verwendet, da durch niedrigere Bus-Raten eine höhere Distanz zwischen den Bus-Teilnehmern überbrückt werden kann. An dieser Stelle sei die erste triviale Schwachstelle des CAN-Bus-Systems zu erwähnen: Durch den einfachen Bus-Aufbau (siehe Abbildung 3) ist es einem Angreifer mit physischem Zugriff ein Leichtes, mit einem Abzweigverbinder (auch Kabel- bzw. Stromdieb genannt) einen neuen CAN-Node in das Bus-System einzuschleusen. Besonders der Aufbau des CAN Data Link Layers begünstigt vielfältigste Angriffsszenarien. [2]

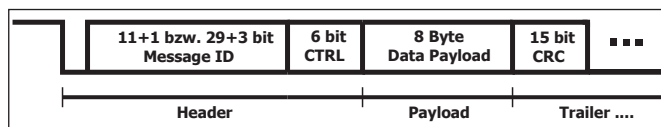


Abbildung 4: Aufbau einer CAN-Botschaft (stark vereinfacht, ohne Stuffing-Bits) nach [2]

Der Aufbau einer CAN-Botschaft, wie er im Data Link Layer von Bosch und Intel festgelegt wurde, ermöglicht eine Reihe einfacher Angriffe auf die Kommunikation. Die schwerwiegendste Schwachstelle entsteht allein durch den Aufbau des Protokolls. Weder beim Verbindungsaufbau (bzw. beim Anmelden eines neuen Teilnehmers) noch bei der Datenübertragung noch beim Verbindungsabbau wird die Identität des Bus-Teilnehmers verifiziert. Betrachtet man die Struktur einer CAN-Botschaft (siehe Abbildung 4), fällt auf, dass kein Datenfeld für eine Authentifizierung der Quelle vorgesehen ist. Zusätzlich ist CAN ein Broadcast-Bus-System. Das bedeutet, dass alle auf dem Kanal anliegenden Nachrichten von jedem Teilnehmer gelesen werden können. Für einen Angreifer, der z. B. mit einem Abzweigverbinder bzw. auf einem anderen Weg, Zugriff auf den Bus erhält, ist es keine große Hürde, selbst erzeugte Nachrichten in die Kommunikation der Teilnehmer einzuschleusen. [2]

Sicherheitsforscher haben kürzlich entdeckt, dass es Hersteller gibt, die Schlüsselinformationen, die auf dem Bus ausgetauscht werden, auf die Breite des Datenfeldes reduzieren, um die Buslast zu reduzieren. Es kommt vor, dass kryptografische Schlüssel eine Länge von 8 Byte (64 bit) aufweisen. Nach aktuellem Stand (2016) werden

Schlüssellängen von mindestens 128 bit empfohlen. Dieser Umstand stellt eine enorme Schwachstelle dar, die zwar durch die Hersteller behoben werden kann und nicht zwingend auf das CAN-Protokoll zurückzuführen ist, in der Praxis aber immer noch viel zu häufig auftritt. [3][5]

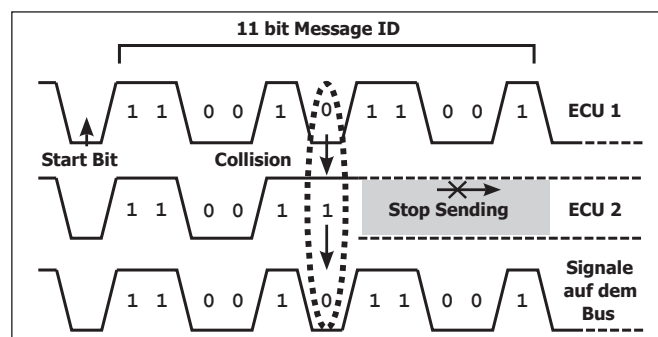


Abbildung 5: Arbitrierung bei einer Kollision nach [2]

Eine weitere Schwachstelle verbirgt sich im Verfahren zur Nachrichtenpriorisierung einzelner Teilnehmer im CAN-Standard. Das Identifikationsfeld mit der Identifikationsnummer (ID) eines Senders bildet zugleich das Prioritätensystem des CAN-Protokolls ab. Dabei gilt, je niedriger die ID, desto höher die Priorisierung. Die ID 0 hat die höchste Priorität. Die vorrangige Bearbeitung hochpriorer Nachrichten geschieht hier nicht auf Softwareebene, sondern wird vom CAN Transceiver in Hardware gelöst. Im CAN-Protokoll ist die physikalische Darstellung des Wertes 0<sub>2</sub> dominant gegenüber der rezessiven 1<sub>2</sub>. Dies bedeutet, dass jeder Bus-Teilnehmer jede auf dem Bus anliegende 1<sub>2</sub> mit einer dominanten 0<sub>2</sub> überschreiben kann. Ein Sender liest dabei nach jedem Schreibvorgang den aktuellen Buspegel und überprüft so, ob der gesendete Wert auch auf dem Bus anliegt. Erkennt ein Teilnehmer, dass sein Sendevorgang mit dem einer höher priorisierten Nachricht kollidiert, unterbricht der Sender den Schreibvorgang und wartet, bis der Bus frei ist (siehe Abbildung 5). Hieraus resultiert für jeden CAN-Node die Möglichkeit, Nachrichten aller anderen Teilnehmer zu überschreiben, bis der Bus maximal ausgelastet ist – ein klassischer „Denial of Service“ (DOS). [6]

*The less the driver is involved, the more potential for failure when bad people are tampering with it. [7]*

Nicht nur eine DOS-Attacke ist im CAN-Bus sehr einfach umzusetzen. Der CAN-Standard ist nicht wie Ethernet verbindungs-, sondern nachrichtenorientiert. In einem nachrichtenorientierten Kommunikationsmodell entscheiden Sender und Empfänger selbst, welche Nachrichtenarten, die alle Teilnehmer gleichermaßen senden bzw. empfangen können, für sie von Bedeutung sind. Verbindungsorientierte Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass vor einer Datenübertragung zuerst ein Verbindungsaufbau zwischen den Kommunikationspartnern stattfindet. Dabei sind diese Verbindungen gültig, bis ein Teilnehmer sie abbaut. Der CAN-Standard bietet somit eine große Angriffsfläche gegenüber Nachrichten, die ein Angreifer

erzeugt und in das Bus-System einschleust. Berechtigte Teilnehmer der Kommunikation können nicht unterscheiden, ob eine Nachricht mit einer bestimmten ID (und Priorität) auch von einem berechtigten Sender stammt. [2][8]

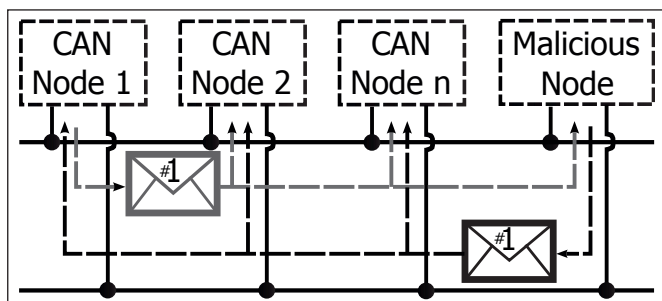


Abbildung 6: Aktiver Angriff auf den Nachrichtenaustausch

Da alle Nachrichten an jeden Teilnehmer gesendet werden (siehe Abbildung 6) und häufig nicht verschlüsselt sind, kann ein Angreifer, der physischen Zugriff auf das Medium hat, alle Nachrichten mitlesen und auswerten. Dass diese Daten einen hohen Informationsgehalt haben, zeigt eine wissenschaftliche Arbeit von Forschern der University of Washington und University of California, San Diego. In der Arbeit „Automobile Driver Fingerprinting“ untersuchen die Autoren, ob mit den Sensor- und Aktuatordaten des Powertrains bzw. des Low-Speed-CANs ein Fahrzeugführer eindeutig identifiziert werden kann. Dazu schickten sie mehrere Fahrer desselben Fahrzeugs auf eine bestimmte Teststrecke und speicherten bei dieser Testfahrt alle Nachrichten, die auf den Bus-Netzwerken entstanden. Die gesammelten Daten wurden aggregiert und mit Mustererkennungsalgorithmen analysiert. [9]

Sensor(s)	Parking Lot	Drive Part1	Drive Part2	All Data
Brake Pedal	50.00	87.33	100	100
Steer Angle	31.33	64.67	83.33	86.67
Accel. Pedal	15.33	18.00	30.00	31.33
Max Torque	75.33	60.67	100	91.33
Lat. Accel.	25.33	62.00	91.3	72.67
Top 3 Sensors	80.06	92.67	100	100
Top 5 Sensors	84.67	99.33	100	100
All Sensors	91.33	100	100	100

Abbildung 7: Identifizierungswahrscheinlichkeit (in %) verschiedener Sensor- und Fahrkombinationen nach [5]

Eine Auflistung (siehe Abbildung 7) mit den entscheidenden Sensoren zeigt, wie viele Fahrten nötig sind, um einen Fahrer anhand seines einzigartigen Fahrverhaltens zu identifizieren. Bemerkenswert, dass Sensordaten der Bremspedalinteraktionen des Benutzers reichen, um nach der zweiten Fahrt den Fahrer mit einer Wahrscheinlichkeit von 87,33 Prozent zu identifizieren bzw. zu unterscheiden. Teilweise kann bereits im noch stehenden Fahrzeug, z. B. am Parkplatz, eine hohe Unterscheidbarkeit erreicht werden. Jeder weitere Sensor erhöht die Differenzierbarkeit deutlich. Die Arbeit zeigt, dass die Verkehrsdaten des

Powertrains bzw. anderer Busse von größtem Interesse sein können. Um diese Daten abzugreifen, ist ein physischer Zugriff auf das Bus-System oft gar nicht nötig. Infotainment-Systeme und der Diagnostik-Bus nehmen einem Angreifer diesen Aufwand ab. [9]

### Das Infotainment-System

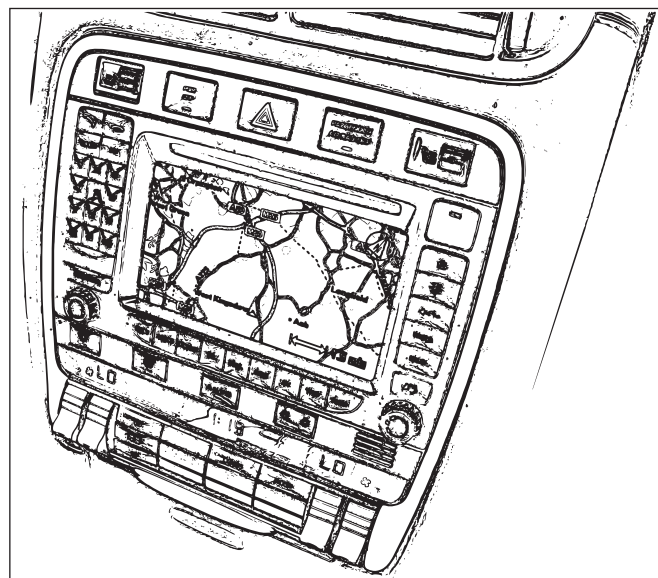


Abbildung 8: Infotainment-System eines 200 Porsche Cayenne 4.5 Turbo S (vgl. [10])

Jedes moderne Fahrzeug hat im Zentrum der Fahrgastzelle ein sog. Infotainment-System verbaut (siehe Abbildung 8). Diesem System sind eine Vielzahl Aufgaben zugedacht. Es steuert alle für den Fahrkomfort notwendigen elektro-mechanischen Module wie die Klimaanlage, Sitzbelüftung oder Lautstärkeregelung. Daneben gibt das Display Auskunft über jeden erdenklichen Sensor, Aktuator oder Assistenten, der im Fahrzeug verbaut ist. Nicht nur Fahrgeschwindigkeit oder Füllstände der Betriebsmittel sind für den Fahrer interessant, sondern auch die eigene Position in Relation zur vorgeschlagenen Fahrstrecke des Navigationssystems. Der Wetterbericht und aktuelle Staumeldungen runden das Informationspaket ab.

Zur Unterhaltung kann das als In-Vehicle Infotainment (IVI) bekannte System das UKW-Radio aktivieren oder einen Live-Stream aus dem Internet abspielen. Dank Bluetooth-Verbindung zum Handy können auch Anrufe und Kurznachrichten über das Onscreen-Display angenommen bzw. gelesen werden. Sollte das eigens für die Aktualität der Daten verbaute Mobilfunk-Modul keine Long-Term Evolution(LTE)-Verbindung zu einem Carrier aufbauen können, so kann sich das WiFi-Modul in vorhandene Hotspots einwählen. Das rechenstarke Infotainment-System kann parallel zum Abspielen eines Filmes auf dem Hauptbildschirm alle Daten des Powertrains mitlesen, speichern, aggregieren, versenden oder im besten Fall dem Fahrer anzeigen. Die weite Verbreitung und hohe Bandbreite aktueller Mobilfunkstandards ermöglicht es einem Fahrzeug, jederzeit online zu sein, Informationen



abzurufen oder zu senden, Befehle von einer Handy-App oder vom Hersteller zu erhalten oder andere Fahrzeuge über die eigene Umweltwahrnehmung (z. B. Verkehrsunfall) zu unterrichten.<sup>[11]</sup>

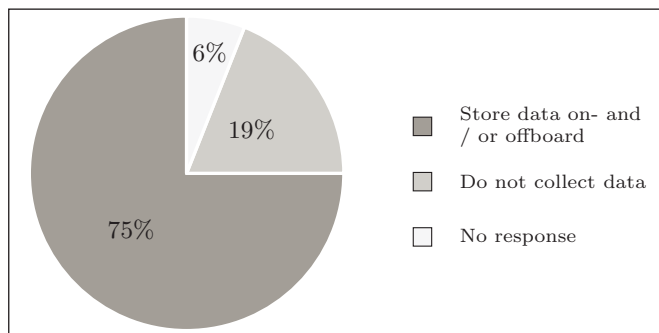


Abbildung 9: Umfrageergebnisse zur Datenspeicherung/-verwertung nach [12]

Im Februar 2015 veröffentlichten die Mitarbeiter des US Senators Ed Markey eine Studie mit dem Titel „Tracking & Hacking: Security & Privacy Gaps Put American Drivers at Risk“. In dieser Arbeit werden die anonymisierten Antworten auf einen offenen Brief an 19 der weltweit führenden Fahrzeughersteller publiziert. Darunter war die Frage, ob Daten erhoben, gespeichert und evtl. an den Hersteller oder Dritte versendet werden. Über 75 Prozent der Befragten gaben an, Daten on- bzw. offboard zu speichern. Das bedeutet, dass drei Viertel der Fahrzeughersteller mindestens Daten im Fahrzeug speichern, wovon ein Großteil (ca. 50 Prozent) die Daten sammelt oder an Dritte weiterreicht (siehe Abbildung 9). Diese Daten, die natürlich der Steigerung des Fahrerlebnisses dienen, sind auch für einen Angreifer interessant.<sup>[12]</sup>

Aufgrund der verschiedenen Aufgaben, die ein IVI bewältigen muss, ist die Entwicklungskomplexität der Betriebssoftware enorm. Die hohe Anzahl unterschiedlicher Kommunikationshardware, wie Mobilfunk-, WiFi-, Bluetooth-Module oder CAN-Transceiver und MOST-Verbindungen, machen das Softwarepaket anfällig für Design- und Programmierfehler. So gelang es den Forschern Valasek und Miller 2015 einen unveränderten 2014 Jeep Cherokee über das Infotainment-System zu hacken. Die Hacker erhielten dabei Zugriff auf den Powertrain und konnten im Anschluss das Fahrzeug im Notlauf steuern (Bremsmechanik und Lenkimpulse). Bereits im August 2016 konnten diese beiden Forscher den Hack ausweiten und das Fahrzeug ebenso ohne Notlauf beeinflussen. Das Absetzen der notwendigen Befehle erfolgte über die Mobilfunkverbindung des IVIs. Zwar musste die Firmware des Gateways (siehe Abbildung 1) verändert werden, dies war nach Reverse Engineering des ECU-Update-Prozesses jedoch kein Problem.<sup>[11][13]</sup>

Hinzuzufügen ist an dieser Stelle, dass ein Angreifer ausschließlich an den Daten des Infotainment-Systems interessiert sein kann. In diesem Fall ist der Zugriff auf das IVI ausreichend. Die Hürde, das IVI zu infiltrieren, ist bei

Weitem niedriger als zusätzlich den CAN-Bus zu übernehmen. Ende Juli 2015 teilte der Hacker Samy Kamkar über seinen Twitter- und Youtube-Account mit, dass eine als geschlossen markierte Lücke im OnStar RemoteLink, Teil des IVIs von General Motors, wie zuvor genutzt werden kann, um in das Infotainment-System einzudringen. Kamkars Forschungen zeigen, dass wie in der Home-Automation eine Kopplung des Smartphones an das Fahrzeug eine weitere Quelle für zahlreiche Schwachstellen sein kann.<sup>[14]</sup>

Die oftmals direkte Anbindung des IVIs an die unterschiedlichen internen Bus-Systeme des Fahrzeugs und die voranschreitende Aufgabenzentrierung führen zu einem unübersichtlichen Funktionsumfang und zu einer schwachen Kohäsion der einzelnen Baugruppen. Hieraus können unzählige Angriffsvektoren durch bereits übliche Technologien geerbt (z. B. Angriffe auf den Bluetooth-Stack) oder neue Angriffsvektoren durch ungünstige Anwendung von Technologien und Standards erzeugt werden. Eine solche Kombination nutzten Miller und Valasek im obigen Beispiel aus, um über eine manipulierte Medien-Datei Zugriff auf das Infotainment-System zu erhalten. Diese Schwachstelle verwendeten die beiden Sicherheitsforscher, um Nachrichten auf dem CAN-Bus abzusetzen. Das mangelnde Design eines vorsätzlichen Single-Point-of-Failure lässt diesen kausalen Hack zu.<sup>[13][15]</sup>



Abbildung 10: Typisches OBD USB KKL Diagnoseinterface [16]

### Der Diagnostik-Bus

Um die Emissionswerte neuer Fahrzeuggenerationen einfacher und regelmäßiger kontrollieren zu können, schreiben die USA und Europa seit den späten 1980er-Jahren die Präsenz eines OBD(On-Board-Diagnose)-Ports vor. Es sollte damit sichergestellt werden, dass Emissionswerte nicht nur zum Zeitpunkt der Zulassung, sondern

über den gesamten Lebenszyklus des Fahrzeuges hinweg innerhalb des Toleranzbereichs bleiben.<sup>[2]</sup>

Aus Sicht eines Angreifers bietet der OBD-II-Port eine mächtige Schnittstelle, um Daten in das fahrzeuginterne Kommunikationsnetz zu senden oder verschiedenste Informationen aus den einzelnen Steuergeräten zu erhalten. Diese Schnittstelle stellt für das Sicherheitskonzept eines jeden Fahrzeugs eine große Bedrohung dar, da ein direkter Zugang aus der nicht vertrauenswürdigen Fahrgastzelle in den sensiblen High-Speed- bzw. Low-Speed-CAN-Bus ermöglicht wird. Oftmals ist der OBD-II-Port leicht zu erreichen. Er befindet sich häufig in der Nähe der Fahrzeugsteuerung bzw. unter einer Abdeckung im Armaturenbrett. Es ist für einen Angreifer ein Leichtes, an diesem Port mit der entsprechenden Konnektivität (siehe Abbildung 10) schadhafte Soft- oder Hardware in das Fahrzeug einzuschleusen.<sup>[17]</sup>

Description	Domain
Engine Load	0 ... 100 %
Engine Coolant Temperature	-40 ... 215 °C
Suction Pipe Pressure	0 ... 255 kPa
Speed	0 ... 255 km/h
Accelerator Pedal Position	0 ... 100 %
Operating Time	0 ... 65535 min
⋮	⋮

Abbildung 11: Auswahl verschiedener OBD-Messwerte nach [2]

Im November 2015 gelang es einer Gruppe von Hackern, eine unveränderte 2013 Corvette mithilfe eines OBD-II-Dongles zu infiltrieren und die Kontrolle über nahezu jede Funktion des Fahrzeuges zu erhalten. Dazu reichte der OBD-II-Dongle sowie eine von den Sicherheitsforschern versendete SMS, um die mangelhaften Schutzmechanismen zu überwinden. Der ab Baujahr 2000 in fast jedem Fahrzeug verbaute OBD-II-Port führt zu einer neuen Bedrohung durch präparierte Hardware. Gerade im Güter- oder Personentransport werden für das Flottenmanagement sog. TCUs (Telematic Control Units) eingesetzt. Das sind kleine konnektive Geräte, die meist über Mobilfunktechnologien eine Brücke zwischen der fahrzeuginternen Diagnose (z. B. dem OBD-II-Port) und dem Management-System des Fahrzeugeigners herstellen. Somit ist es für den Eigentümer möglich, Daten (siehe Abbildung 11) wie Position, Geschwindigkeit, Route und vieles mehr live aus dem Fahrzeug zu erhalten, um damit z. B. eine höhere Auslastung oder niedrigere Versicherungsbeiträge der Transportflotte zu erzielen.<sup>[18]</sup>

Um effizient das World Wide Web nach internetfähigen Geräten abzusuchen, existieren Suchmaschinen wie „Shodan“. Dieser Crawler sucht das Internet nach aktiven Geräten ab und kartografiert deren erreichbare Dienste. Es lässt sich z. B. für einen Web-Server auflisten, welche Ports geöffnet sind und mit welchem „Welcome-Text“ der

Server auf Anfragen reagiert. Da jeder Dienst einen individuellen Header zur Begrüßung neuer Clients versendet, kann der Crawler zwischen der unterschiedlichen Software, die den Dienst zur Verfügung stellt, differenzieren. Diesen für Sicherheitsforscher extrem nützlichen Dienst nutzte der Programmierer Jose Carlos Norte, um eine Liste ganz bestimmter TCUs des Herstellers C4Max zu erhalten. Dabei suchte er gezielt nach der Header-Response, die das Gerät bei einem Einwahlversuch auf dem am Port 23 lauschenden Telnet-Servers ausliefert. Norte stellte dabei in einer ersten Suche fest, dass er über 733 dieser Einheiten direkt aufdecken konnte. Natürlich liegt das unter anderem an der Natur eines Nutzfahrzeugs, nicht zu jeder Zeit verwendet zu werden, und dementsprechend sind TCUs nur während der Betriebszeiten im Internet erreichbar. Das Problem mit diesen Gateways ist, dass sie ab Werk kein Passwort verwenden, um administrativen Zugriff auf den Dongle zu erhalten. Nun kann jeder, der eines dieser Systeme entdeckt, ohne Passwort eine Reihe Informationen abgreifen oder einschleusen. Es ist möglich, neben der Position des Fahrzeugs auch CAN-Bus-Nachrichten über den Dongle in den Powertrain zu senden. Wie im ersten Abschnitt beschrieben, ist diese Rechteeskalation mit einem administrativen Vollzugriff auf ein reguläres Computersystem vergleichbar.<sup>[19][20]</sup>

Auch das FBI (Federal Bureau of Investigation) hat bereits, zusammen mit dem Department of Transportation und der National Highway Traffic Safety Administration, auf die Gefahr sog. Car Gadgets reagiert. In einem Public Service Announcement warnen die Behörden ausdrücklich davor, ungeprüfte Car Gadgets in das eigene Fahrzeug einzubringen bzw. ganze Fahrzeugflotten mit diesen Dongles auszurüsten. Weitere Schutzmechanismen werden im nächsten Abschnitt vorgestellt.<sup>[21]</sup>

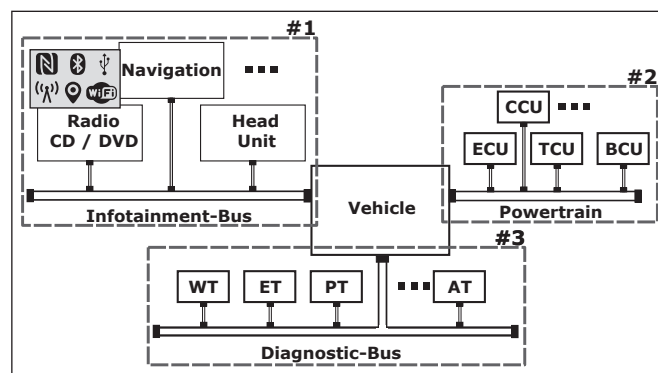


Abbildung 12: Level 0 Threat-Model

## Schutzmechanismen – IT Security und Kryptografie

Aus den vorangegangenen Abschnitten kann ein sog. Bedrohungsmodell (engl. threat model, siehe Abbildung 12) aufgestellt werden. Um die Übersicht zu erhöhen und um die Komplexität zu reduzieren, beschränkt sich das Bedrohungsmodell auf die in den letzten Abschnitten angesprochenen Netzwerke und Komponenten. Die drei informationsverarbeitenden Systeme Diagnostik, Power-

train und Infotainment sind in der Abbildung 12 nummeriert dargestellt. Im Folgenden soll auf die drei Teilsysteme eingegangen und bereits existierende bzw. notwendige Strategien zur Verbesserung der IT-Security vorgestellt bzw. vorgeschlagen werden.

### Infotainment-System (# 1)

Die hohe Konzentration verschiedenster Zuständigkeiten erhöht die Komplexität der Betriebssoftware eines Infotainment-Systems enorm. Mit jedem weiteren Feature steigt die innere Komplexität, jede Funktion zu beherrschen. Softwareentwickler müssen bei der Umsetzung all dieser Anforderungen darauf achten, bei jeder Schicht des Systems kein Fehlverhalten zuzulassen bzw. Fehlerzustände kontrolliert abzuhandeln. Abbildung 13 zeigt einen grundlegenden Application Stack (ohne Anspruch auf Vollständigkeit). Es ist leicht zu erkennen, dass viele unterschiedliche Softwarepakete kombiniert werden müssen, um das gesamte Funktionsspektrum abzudecken. Verständlicherweise steigt mit jedem zusätzlichen Feature der Aufwand, die unterschiedlichen Abhängigkeiten und Versionen zu verbinden und zu verwalten.

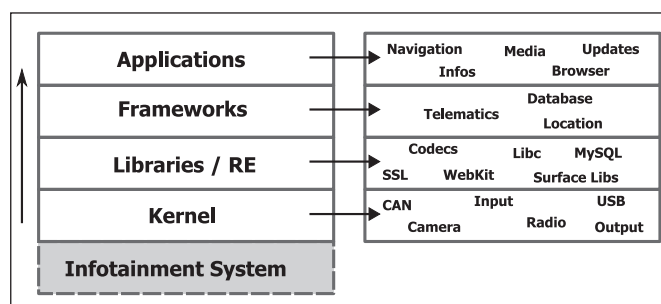


Abbildung 13: Vereinfachter Application Stack

Um die Angriffsfläche zu verringern, muss das Infotainment-System aus Sicht eines Angreifers betrachtet werden. Ein durchschnittliches IVI bietet unzählige Eingabemöglichkeiten, die im Application Stack unterschiedlich verarbeitet werden. Der Angreifer hat eine sehr große Auswahl an Eingabemöglichkeiten, die jede für sich Fehleingaben oder gezieltes Ausnutzen bekannter Schwachstellen ermöglicht. Mit jedem neuen Feature gewinnt ein Angreifer so eine neue Möglichkeit hinzu, in das System einzudringen. Durch die enge Verzahnung des Infotainment-Systems mit den kritischen Infrastrukturen wie dem High- bzw. Low-Speed-CAN ist es nach Eindringen in das IVI nur eine Frage der Zeit und des Aufwandes, bis ein Angreifer erfolgreich auf den Triebstrang oder andere sensible Systeme und Assistenten einwirken kann. Nur eine strikte Trennung der Zuständigkeiten (hohe Kohäsion) und eine lose Kopplung der einzelnen Komponenten kann hier für mehr Sicherheit sorgen. Es soll nicht möglich bzw. sehr schwierig sein, dass ein Angreifer eine Schwachstelle, z. B. im Media Framework, ausnutzt und zugleich Zugriff auf sicherheitskritische Netzwerkkomponenten erhält. Es darf nicht nur an einem gemeinschaftlich einheitliches Betriebssystem inklusive Applikation-Stack

(wie z. B. AUTOSAR) entwickelt werden, sondern es muss zeitgleich die Netzwerk- und Komponentenstruktur überdacht werden. Klassische und bewährte Sicherheitskonzepte aus der Netzwerktechnik, wie z. B. eine DMZ (Demilitarized Zone), könnten einfach umgesetzt werden. Bereits diese grundlegenden Schutzmechanismen würden das Fahrzeug deutlich besser gegen das Ausnutzen etwaiger Rechteskalationen auf dem Infotainment-System schützen.

### Powertrain(# 2)

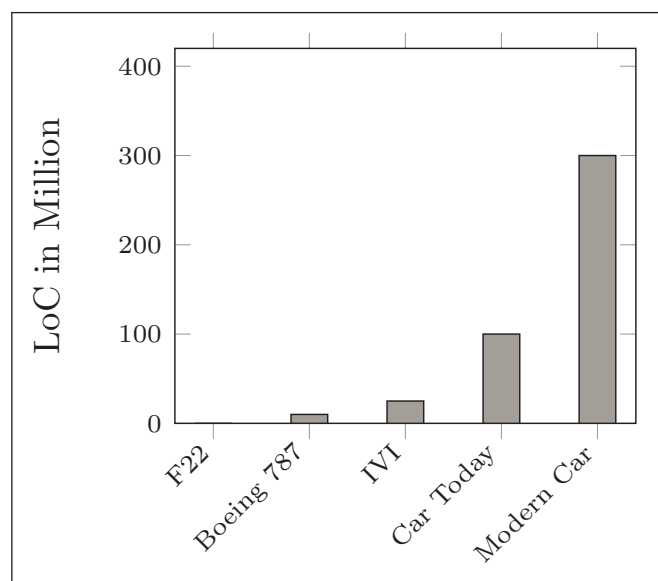


Abbildung 14: Codezeilen (engl. Lines of Code, LoC) in Fahrzeug-ECUs nach [22]

Ist ein Angreifer in diesen Bereich der internen Fahrzeugkommunikation eingedrungen, ist es wegen der im Abschnitt „Der Powertrain“ beschriebenen Schwachstellen, schwierig, weitere Angriffe auf das Fahrzeug zu verhindern. Damit ein Dritter nicht einfach Nachrichten mit einer bestimmten Identität absetzen kann, müssen kryptografische Primitive den Informationsaustausch absichern. Dies kann durch Verschlüsselung der Nachrichten geschehen. Die Verschlüsselung einer Nachricht bedeutet einen zusätzlichen mitunter beträchtlichen Berechnungs- und Verwaltungsaufwand für die einzelnen ECUs und andere Komponenten, deren Softwarekomplexität stetig ansteigt. In einem BMW der 7er-Serie können z. B. über 90 Steuergeräte (Maximalausstattung, Baujahr 2009) verbaut sein, die zum Betrieb über 100 Mio. Zeilen Code abarbeiten müssen, was sogar den Codeumfang einer Boeing 787 übersteigt (siehe Abbildung 14). Je nach Fahrzeug unterscheiden sich diese Steuergeräte in der technischen Spezifikation sowie genereller Aufgabe. Hinzu kommen unzählige Sensoren und Aktuatoren, die die Zahl der Kombinationsfehler, die potenziell auftreten können, noch weiter steigern. Kryptografische Primitive, die im Design schlank genug sind, um möglichst viele dieser unterschiedlichen Hardware-Spezifikationen zu unterstützen, könnten die Vertraulichkeit und Authentizität des gesamten Systems merklich verbessern. Authenti-

fizierte Nachrichten schützen durch Nachrichtensignaturen die Kommunikation vor selbst erzeugten Botschaften durch einen Angreifer. Viele der bereits vorgestellten Angriffsszenarios könnten so verhindert, mindestens erschwert werden. [23]

Gerade eingebettete Steuerungen, die meist auf eine Aufgabe reduziert und hardwaretechnisch stark eingeschränkt sind, können den Mehraufwand an Rechenzeit, um kryptografische Berechnungen oder Security-Mechanismen auszuführen, nicht leisten. Sind leistungsstarke ECUs hinreichend abgesichert, kann ein Angreifer den Umweg über eine schwächere Steuerung eines Sensors oder Aktuators wählen. Es ist wirtschaftlich nicht sinnvoll, alle Steuergeräte im Fahrzeug auf ein Leistungsniveau umzurüsten, das die Mindestanforderungen kryptografischer Primitive erfüllt. Der Abschnitt „Der Powertrain“ zeigt, welche grundlegenden Schwachstellen in vielen Angriffen die Basis für den Erfolg des Angreifers bilden.

- Keine Authentizität / Vertraulichkeit – CAN-Botschaften enthalten keinerlei Information über den Sender noch sind Schutzmechanismen vorhanden, die eine Rechtmäßigkeit der Nachricht bezeugen. Jeder Teilnehmer kann jede Botschaft erzeugen.
- Abstreitbare Botschaften – Fehlende Identifikatoren, z. B. durch eine Signatur, geben keine Information über die Quelle einer Nachricht. Es ist für einen Bus-Teilnehmer schwer bis unmöglich, festzustellen, welcher anderer Teilnehmer falsche bzw. schadhafte Nachrichten sendet.

Eine durch Forscher der University of Michigan vorgeschlagene Alternative, das sog. CIDS (Clock-based Instruction Detection System), überwacht die Kommunikation aller Bus-Teilnehmer und analysieren die Metadaten jeder CAN-Botschaft. Dabei werden bei periodisch versendeten Nachrichten (die die Masse der Botschaften ausmachen) zeitspezifische Eigenschaften des Senders protokolliert, sog. Zeitvarianzen. Diese entstehen z. B. durch nicht synchronisierte Hardware-Uhren der einzelnen Steuergeräte. Da eine Synchronisation der Uhren eine zu große Auslastung auf dem Bus erzeugen würde, wird meist darauf verzichtet. So können aus jeder Botschaft, sender-spezifisch, Zeitcharakteristiken extrahiert werden. Diese Charakteristiken dienen als Fingerabdruck, der jeder Nachricht anhaftet und den Sender eindeutig identifizieren kann. Nach der Anlernphase des CIDS sucht das System nach Nachrichten, die von den vorher analysierten Zeitvarianzen abweichen. Erkennt das Gerät eine solche Botschaft, können verschiedenste Gegenmaßnahmen getroffen werden. Der Motor könnte in den Notlauf versetzt oder der Fahrer über die Unstimmigkeit informiert werden. Einzig aperiodische Nachrichten, die in einer ereignisgesteuerten Kommunikation auftreten, können durch das System nur schwer bis unmöglich detektiert werden. Viele Kommunikationsmodelle verzichten jedoch

auf aperiodische Nachrichten, da ein Ausfall einer Steuer-einheit durch periodisch auftretende Botschaften besser erkannt werden kann – bleibt eine Nachricht aus, so wird davon ausgegangen, dass sich die verantwortliche ECU in einem Fehlerzustand befindet. [24]

### Diagnostik-Bus und OBD-II (# 3)

Der Diagnostik-Bus ist unter Verwendung des OBD-II-Protokolls nicht nur ein beliebtes Angriffsziel für Sicherheitsforscher. Bereits gewöhnliche Autodiebe verwenden Technologien, um über die Diagnoseschnittstelle die Alarmanlage und die Wegfahrsperre moderner Fahrzeuge abzuschalten. Das Wall Street Journal berichtete im Juli 2016, dass Autodiebe mithilfe eines Notebooks einen 2010 Jeep Wrangler stahlen. Die naheliegendsten Erklärungen gehen davon aus, dass die Diebe über die Diagnoseschnittstelle neues Schlüsselmaterial in das Fahrzeug einbrachten, um die Diebstahlsicherungen zu umgehen. [25]

Ein einfacher Weg, unerlaubten Zugriff auf den Diagnose-Port zu verhindern, wäre der Einsatz eines Hardware-Schalters im Innenraum des Fahrzeuges, der die Diagnoseschnittstelle bei Bedarf physikalisch von der Fahrzeugkommunikation trennt. Da in Zukunft nur noch schlüssel- bzw. kontaktlose Entriegelungen des Fahrzeugs im Einsatz sein werden, muss für einen solchen Schalter ein geeigneter Ort im Fahrzeug gefunden werden, für den ein echter Schlüssel unnötig ist. Ist der Port physikalisch deaktiviert, ist es für einen Angreifer nicht mehr so trivial, Hardware an dem Diagnostik-Bus zu betreiben. Auch schadhafte Dongles, die in ein unbeaufsichtigtes, offen stehendes Fahrzeug eingebracht werden könnten, können nicht direkt auf den Bus einwirken. Ein Angreifer muss einen deutlich größeren Aufwand betreiben, was die Angriffsfläche des Diagnostik-Busses folglich verkleinert. [6]



Abbildung 15: Kleiner Daten-Logger mit einer USB-Schnittstelle [26]

Auch Miller und Valasek haben einen OBD-Dongle vorgeschlagen, der im OBD-II-Port des Fahrzeugs angeschlossen wird (siehe Abbildung 15). Als eher klassisches

IDS (Intrusion Detection System) erzeugt der Dongle ein Profil der Botschaften auf dem Bus-System. Viele Diagnose-Nachrichten sind, z. B. während der Fahrt, äußerst untypisch, werden aber von Angreifern sehr oft verwendet, um auf den Powertrain einzuwirken. Erkennt der Dongle eine dieser Nachrichten, so kann der Fahrer informiert oder das Fahrzeug kontrolliert angehalten werden. Ist ein Angreifer über den Einsatz eines IDS informiert, kann er Nachrichten dennoch so absetzen, dass ein IDS unberechtigte Botschaften nicht erkennen kann. Ähnlich wie Virens Scanner würde ein solches System ein falsches Sicherheitsgefühl erzeugen. Es kann jedoch eine ausgezeichnete Ergänzung und weitere Hürde in einem schlüssigen Sicherheitskonzept sein.<sup>[6]</sup>

### Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde aufgezeigt, dass aktuelle Fahrzeugreihen mehr denn je von Angriffen auf die Kommunikation und Datenverarbeitung betroffen sind. Außerdem wurden erste grundlegende Vorschläge benannt, um Maßnahmen zur Steigerung der IT-Sicherheit im Auto zu ergreifen. Jedoch betrachten viele Hersteller das moderne Fahrzeug als ein Fortbewegungsmittel, das durch aktuelle Technologie verbessert werden soll. Geht es um funktionale Sicherheit, sind diese Fahrzeuge auf allerhöchstem

Niveau. Dies zeigt die Auswertung des Statistischen Bundesamtes aller Verkehrsunfälle in Deutschland 2014. So sind in diesem Jahr in nur 3624 Fällen technische Mängel Ursache für einen Unfall. Das sind nicht mehr als 0,15 Prozent der 2.406.685 polizeilich erfassten Verkehrsunfälle. Die kontinuierliche Verbesserung aller Systeme, die für die funktionale Sicherheit zuständig sind, führt jährlich zu einem Rückgang der Unfälle mit Personenschaden. In der Realität ähneln Kraftfahrzeuge eher einem fahrbaren Computer. Im Gegensatz zur Unfallstatistik steigen die Zahlen der Cyber-Angriffe auf Fahrzeuge. Aus diesem Grund ist es für die zukünftige Sicherheit auf den Straßen notwendig, dass die IT-Sicherheit in den fahrenden Computern Gegenstand aktueller Forschung bleibt und stärker ausgebaut wird. Vor allem kryptografische Primitive und Protokolle haben sich in der herkömmlichen IT bewährt und sollten auf ihre Tauglichkeit für Fahrzeugkommunikation hin untersucht werden. Auch hochmoderne leichtgewichtige kryptografische Verfahren versprechen effizient die Kommunikation absichern zu können. Hierzu müssen weitere Untersuchungen durchgeführt und Testumgebungen geschaffen werden. Ob diese oder andere Verfahren alle oder wenigstens einige der sicherheitstechnischen Probleme in der Fahrzeugkommunikation lösen können, wird die Zukunft zeigen.<sup>[27]</sup>

---

## Referenzen:

- [1] Andy Greenberg. Gm took 5 years to fix a full-takeover hack in millions of onstar cars. <https://www.wired.com/2015/09/gm-took-5-years-fix-full-takeover-hack-millions-onstar-cars/>. Abgerufen: 08.08.2016.
- [2] Werner Zimmermann und Ralf Schmidgall. Bussysteme in der Fahrzeugtechnik, 5., aktualisierte und erweiterte Auflage. Springer Vieweg, 2014.
- [3] Craig Smith and Eric Evenchick. Car hacking tools. <http://livestream.com/internetsociety2/hopeconf/videos/130605456>. Abgerufen: 16.08.2016.
- [4] EE JRW. Can bus node. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia-/commons/c/c0/CAN Node.png>. Abgerufen: 31.08.2016 Lizenz: CC BY-SA 4.0 Modifiziert durch: b.weigl@oth-aw.de.
- [5] Nigel Smart. ECRYPT II Yearly Report on Algorithms and Keysizes. European Network of Excellence in Cryptology II, 2011.
- [6] Charlie Miller and Chris Valasek. Adventures in Automotive Networks and Control Units. [www.ioactive.com](http://www.ioactive.com), 2013.
- [7] Andy Greenberg. Hackers reveal nasty new car attacks – with me behind the wheel. <http://www.forbes.com/sites/andygreenberg/2013/07/24/hackers-reveal-nasty-new-car-attacks-with-me-behind-the-wheel-video>. Abgerufen: 03.08.2016.
- [8] Marcus Börger. Gegenüberstellung bestehender Echtzeit-Netzwerk-Konzepte. Marcus Börger, 1998.
- [9] Miro Enev, Alex Takakuwa, Karl Koscher, and Tadayoshi Kohno. Automobile Driver Fingerprinting. Proceedings on Privacy Enhancing Technologies, 2016.
- [10] The Car Spy. 2006 porsche cayenne 4.5 turbo s. <http://flickr.com/photos/25632349@N04/4722323724>, 2010. Abgerufen: 23.08.2016 Lizenz: CC BY-2.0 Modifiziert durch: b.weigl@oth-aw.de.
- [11] Charlie Miller and Chris Valasek. Remote Exploitation of an Unaltered Passenger Vehicle. [www.illmatics.com](http://www.illmatics.com), 2015.
- [12] Staff of Senator Edward J. Markey. Tracking & Hacking: Security & Privacy Gaps Put American Drivers at Risk. Ed Markey – United States Senator of Massachusetts, 2015.
- [13] Andy Greenberg. The jeep hackers are back to prove car hacking can get much worse. <https://www.wired.com/2016/08/jeep-hackers-return-high-speed-steering-acceleration-hacks/>. Abgerufen: 23.08.2016.
- [14] Samy Kamkar. Ownstar – hacking cars with onstar to locate, unlock and remote start vehicles. <https://www.youtube.com/watch?v=3oIXUbS-prU&feature=youtu.be>. Abgerufen: 23.08.2016.
- [15] Tommi Mäkilä, Jukka Taimisto, and Miia Vuontisjärvi. Fuzzing Bluetooth Crash-testing bluetooth-enabled devices. Frontline Test Equipment [www.fte.com](http://www.fte.com), 2011.
- [16] Florian Schäffer. Typisches obd usb kkl diagnoseinterface. [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/79/Obd\\_usb-kkl\\_interface.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/79/Obd_usb-kkl_interface.jpg), 2012. Abgerufen: 25.08.2016 Lizenz: CC BY-SA 3.0 Modifiziert durch: b.weigl@oth-aw.de.
- [17] Craig Smith. The Car Hacker’s Handbook – A Guide for the Penetration Tester. No Starch Press, 2016.
- [18] Andy Greenberg. Hackers cut a corvette’s brakes via a common car gadget. <https://www.wired.com/2015/08/hackers-cut-corvettes-brakes-via-common-car-gadget/>. Abgerufen: 30.08.2016.
- [19] Shodan. <https://www.shodan.io/>. Abgerufen: 31.08.2016.
- [20] Jose Carlos Norte. Hacking industrial vehicles from the internet. <http://jcarlosnorte.com/security/2016/03/06/hacking-tachographs-from-the-internets.html>. Abgerufen: 31.08.2016.
- [21] Federal Bureau of Investigation (FBI), Department of Transportation, and National Highway Traffic Safety Administration. Motor vehicles increasingly vulnerable to remote exploits. <https://www.ic3.gov/media/2016/160317.aspx>. Abgerufen: 23.08.2016.
- [22] Andrew Patterson. Automotive infotainment systems: Open source drives innovation. <http://embedded-computing.com/articles/automotive-source-drives-innovation/>. Abgerufen: 06.09.2016.
- [23] Harald Richter. Elektronik und Datenkommunikation im Automobil. Institut für Informatik, Technische Universität Clausthal, 2009.
- [24] Kyong-Tak Cho and Kang G. Shin. Fingerprinting electronic control units for vehicle intrusion detection. In 25th USENIX Security Symposium (USENIX Security 16), pages 911–927, Austin, TX, August 2016. USENIX Association.
- [25] Jeff Bennett. Thieves go high-tech to steal cars. <http://www.wsj.com/articles/thieves-go-high-tech-to-steal-cars-1467744606>. Abgerufen: 07.09.2016.
- [26] Florian Schäffer. Texa obd log. small data logger with a usb interface for transferring logs. [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/aa/Texa\\_obd-log.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/aa/Texa_obd-log.png). Abgerufen: 07.09.2016 Lizenz: CC BY-SA 3.0 Modifiziert durch: b.weigl@oth-aw.de.
- [27] Statistisches Bundesamt. Verkehr – Verkehrsunfälle – 2014. Statistisches Bundesamt, 2014.

---

**Fördergeber:**

Die Autoren danken der Bayerischen Forschungsstiftung (BayFor) und dem Forschungsverbund FORMUS<sup>3</sup>IC „Multi-Core safe and software-intensive Systems Improvement Community“ für die finanzielle Unterstützung.  
Förderkennziffer AZ-1165-15.

**Kontakt:****Benjamin Weigl**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien  
und Informatik  
Laboratory for Safe and Secure Systems (LaS<sup>3</sup>)  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

[b.weigl@oth-aw.de](mailto:b.weigl@oth-aw.de)

**Prof. Dr. Andreas Aßmuth**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Elektrotechnik, Medien  
und Informatik  
Laboratory for Safe and Secure Systems (LaS<sup>3</sup>)  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

[a.assmuth@oth-aw.de](mailto:a.assmuth@oth-aw.de)

# UNlcert® für die Ausbildung im Bereich Herkunftssprachen am Beispiel Russisch

Akad. Oberrätin PaedDr. Ladislava Holubová

## Zusammenfassung

Herkunftssprecher sind in Deutschland eine soziale und politische Realität. Deshalb werden die Herkunftssprachen in vielen Bundesländern im Bereich der schulischen Ausbildung bereits gefördert. Auch in der Sprachausbildung der Hochschulen spielen Herkunftssprachen eine zunehmend wichtige Rolle. Viele Einrichtungen entwickeln daher Programme in Sprachen wie Russisch, Polnisch oder Türkisch, um Herkunftssprechern die Möglichkeit zu geben, ihre biografisch bedingten Kompetenzen so auszubauen, dass sie in akademischen und beruflichen Situationen bestehen können. Nicht wenige Herkunftssprecher können sich fließend in alltäglichen Situationen verständigen, weisen allerdings Defizite in den schriftlichen Kompetenzen ihrer Herkunftssprache auf.

Seit 2014 gibt es Empfehlungen der UNlcert®-Kommission für die Einführung der Zertifizierung von speziell auf Herkunftssprecher zugeschnittenen Kursen. Die Initiatorin war Frau Dr. Astrid Reich von der Universität Bochum.

Das Zentrum für Sprachen, Mittel- und Osteuropa der OTH Amberg-Weiden beschäftigt sich auch mit dem Thema „Herkunftssprachen“ – und hat deshalb im Herbst 2014 das Projekt „UNlcert® III Herkunftssprache Russisch“ eingeführt. In diesem Projekt geht es darum, die Defizite russischer Muttersprachler im schriftlichen Ausdruck abzubauen und an einer korrekten akademischen Schriftsprache zu feilen.

## Abstract

Heritage speakers are a social and political reality in Germany. The heritage languages are therefore promoted in the area of education in many federal states of Germany. Heritage languages are also playing a increasingly important role in language studies at universities. Many centers of languages are therefore developing programs heritage speaker in Russian, Polish or Turkish, aiming to give the heritage speakers the opportunity to improve their biographical competences so that they are able to succeed in academic and professional situations. Many heritage speakers are able to communicate fluently in every-day situations but have deficits concerning the writing competences in their heritage language.

The UNlcert®-Committee has been publishing recommendations for the introduction of the certification of courses especially tailored to heritage speakers since 2014. The initiator of these recommendations was Dr. Astrid Reich of the University Bochum.

The language center of the OTH Amberg-Weiden is also working on the topic heritage languages. Therefore it introduced the project “UNlcert® III Russian for heritage speakers” in autumn 2014. The project’s aim is to reduce the deficits of Russian heritage speakers in their writing competences and to improve their level of academic written language.



## 1 Einleitung

Die Arbeitsstelle UNlcert® an der Universität Bochum initiierte im Jahre 2014 das Projekt „UNlcert® für Ausbildungsgänge im Bereich Herkunftssprachen“. Federführend standen in dieser bundesweiten Umfrage Frau Tanja Butschek und Frau Dr. Astrid Reich.

Die Analyse der Umfrageergebnisse zeigte, dass 83 Prozent der befragten Lehrkräfte Herkunftssprecher in ihren Kursen haben. Genannt wurden folgende Sprachen: Russisch, Türkisch, Polnisch und Arabisch, und zwar auf allen Niveaus des GERs (Gemeinsamer Europäischer Referenzrahmen). Viele Einrichtungen entwickeln daher Programme und an einigen Hochschulen sind schon diese speziellen Angebote vorhanden, vornehmlich in Russisch, Türkisch und Polnisch. Im Russischen werden die speziellen Kurse auf den Niveaus von A2 bis C2, im Türkischen von B2 bis C1 angeboten. 45 Prozent der befragten Instituts-/Bereichsleiter planen solche Angebote einzuführen, vorzugsweise in den Sprachen Russisch, Türkisch und Polnisch. Dies zeigt, dass ein Bedarf nach speziellen Angeboten besteht.

## 2 Fremdsprachenunterricht an der OTH Amberg-Weiden

### 2.1 Zentrum für Sprachen, Mittel- und Osteuropa

Das Zentrum für Sprachen, Mittel- und Osteuropa (ZSMOE) entstand im Jahre 2012 als zentrale Einrichtung der Hochschule. Als Hauptaufgabenbereiche hat das ZSMOE die Koordination des hochschulübergreifenden Sprachangebots einerseits und die Netzwerkfunktion in Hinblick auf den Austausch mit Partnern in Mittel- und Osteuropa andererseits. Weiterhin bietet das Zentrum auch fakultätsübergreifend ein breit gefächertes und qualitativ hochwertiges kostenfreies Zusatzangebot in den Sprachen an, das unterschiedliche Niveaustufen berücksichtigt und für alle Studierenden offen ist. Dadurch werden die Studierenden u. a. auf ein Studium oder ein Praktikum im Ausland vorbereitet und ihre Chancen auf dem regionalen sowie internationalen Arbeitsmarkt durch ein UNlcert®-Zertifikat zusätzlich erhöht.

Im ZSMOE werden aktuell folgende Fremdsprachen unterrichtet: Deutsch als Fremdsprache, Englisch, Französisch, Italienisch, Russisch, Spanisch und Tschechisch.

### 2.2 Der Studiengang „Internationales Technologiemanagement“ (TM)

#### 2.2.1 Charakteristik des Studiengangs

Dieser Bachelor-Studiengang bietet eine interdisziplinäre Ausbildung, die zu etwa je einem Drittel aus Wirtschafts-

fächern, Technikdisziplinen und Sprachkompetenzen besteht. Zu Letzteren zählen interkulturelle Aspekte und insbesondere fundierte Sprachkenntnisse in mindestens einer mittelosteuropäischen Sprache (Russisch, Tschechisch) oder Chinesisch sowie in Business und Technical English. Das Studium umfasst eine Regelstudienzeit von sieben Semestern und ist in drei Studienabschnitte mit sechs theoretischen Studiensemestern und einem Praxissemester eingeteilt. Das Praxissemester in einem Unternehmen sollte in dem Land absolviert werden, dessen Sprache als Schwerpunktsprache gewählt wurde. Im siebten Semester ist die Anfertigung der Bachelorarbeit vorgesehen. Das Studium endet mit dem Abschluss Bachelor of Arts. Die Absolventen werden besonders für einen flexiblen Einsatz im internationalen Management technologieorientierter Unternehmen qualifiziert.

#### 2.2.2 Sprachenwahl

Im Studiengang Internationales Technologiemanagement ist im ersten Semester eine der angebotenen Sprachen Mittel-/Osteuropa (Russisch, Tschechisch) oder Chinesisch zu wählen. Die gewählte Sprache darf nicht die Muttersprache der Studierenden sein, da dieser Studiengang für die Studierenden bestimmt ist, die nicht über die muttersprachlichen Vorkenntnisse verfügen bzw. keinen muttersprachlichen Hintergrund haben. Diese Studierenden wählen dann eine andere angebotene Sprache. Die gewählte Sprache muss 6 (=alle theoretischen) Semester studiert werden.

Falls die Studierenden über muttersprachliche Vorkenntnisse verfügen bzw. einen muttersprachlichen Hintergrund haben und diese Sprache vervollkommen möchten, haben sie die Möglichkeit, die Zusatzangebote des ZSMOE zu nutzen.

Im Rahmen des Studiums in TM können die Studierenden in den Sprachen Russisch und Tschechisch das UNlcert®-Zertifikat auf den Stufen Basis, I, II erwerben. Die studiumbegleitende Ausbildung für das Zertifikat auf der Stufe III wird vom ZSMOE angeboten.

## 3 UNlcert® Fremdsprachenprogramm

### 3.1 Charakteristik des UNlcert®-Fremdsprachenprogramms

Das UNlcert®-Programm ist ein überregional anerkanntes, praxisorientiertes und anspruchsvolles Ausbildungs- und Prüfungssystem, das sprach- und institutionsübergreifend gültig ist. Die regelmäßige und unabhängige Qualitätskontrolle aller akkreditierten Institutionen durch den wissenschaftlichen UNlcert®-Beirat entspricht den offiziellen Standards modernen Qualitätsmanagements. Die Ausbildung ist auf die hochschulrelevanten und berufsbezogenen Bedürfnisse der Studierenden und der jeweiligen Hochschulen ausgerichtet.

### 3.2 Angebotene Sprachkurse

Die Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden bietet UNICert®-Zertifikatskurse in den Sprachen Englisch, Tschechisch und Russisch an. Sie bestätigen den Studierenden nach dem erfolgreichen Besuch des entsprechenden Kurses und dem Ablegen der Prüfungen, ein bestimmtes Sprachniveau (Basis-Stufe/Niveau A2, Stufe I/Niveau B1, Stufe II/Niveau B2, Stufe III/Niveau C1 des GERs) erreicht zu haben.

In den Kursen steht die Fähigkeit zur praktischen Anwendung der sprachlichen Kenntnisse immer im Vordergrund. Daher werden die vier Grundfertigkeiten der Sprachbeherrschung – Lesen, Schreiben, Sprechen und Hören – möglichst ausgewogen gefördert. Aktuell können an der OTH Amberg-Weiden UNICert®-Zertifikate in folgenden Sprachen erworben werden:

UNICert® Basis	UNICert® I	UNICert® II	UNICert® III
Tschechisch	Tschechisch	Tschechisch	Tschechisch als Berufs- und Hochschulspezifische Sprache
Russisch	Russisch	Russisch	Russisch als Berufs- und Hochschulspezifische Sprache
		English for Engineers	English for Business

Die Kurse in Tschechisch und in Russisch auf den Stufen Basis, I, II sind allgemeinsprachlich, auf der Stufe III fachorientiert. Wie es von der Tabelle ersichtlich ist, werden die UNICert® III-Kurse in den Sprachen Tschechisch, Russisch und Englisch angeboten. Die Ausbildung auf der Stufe UNICert® III richtet sich an Lernende, die bereits gute Kenntnisse in der Zielsprache besitzen, vorausgesetzt wird der erfolgreiche Abschluss der vorhergehenden Stufe II bzw. eines gleichwertigen Eingangstests oder -gesprächs. Ziel ist eine Sprachkompetenz, die einen sicheren, adäquaten und variablen Einsatz der sprachlichen Mittel in verschiedensten hochschulspezifischen und praxisbezogenen Kommunikationssituationen gewährleistet.

### 3.3 UNICert® im Bereich Herkunftssprachen

#### 3.3.1 Herkunftssprecher

Herkunftssprecher sind entweder in dem Herkunftsland oder auch in Deutschland geboren und bringen biografisch bedingte Vorkenntnisse in einer Sprache mit, ohne – das ist der häufigste Fall – diese jedoch in ihrer Gänze zu beherrschen. Sie weisen i. d. R. ein unausgewogenes Profil in dieser Sprache auf, bei dem die mündli-

chen Kompetenzen den schriftlichen weit überlegen sind. Nicht wenige Herkunftssprecher können sich z. B. fließend vorwiegend mündlich in alltäglichen Situationen verständigen, weisen allerdings große Lücken in der schriftlichen Kompetenz und im hochschulspezifischen Gebrauch sowohl mündlich als auch schriftlich (akademisches Vokabular, Register etc.) ihrer Herkunftssprache auf.

Den Herkunftssprechern soll die Möglichkeit gegeben werden, ihre biografisch bedingten Kompetenzen so auszubauen, dass sie in akademischen und beruflichen Situationen bestehen können. Daher möchte UNICert® die Entwicklung solcher Programme unterstützen und akkreditierbar machen.

#### 3.3.2 Pilotprojekt: UNICert® III Herkunftssprache Russisch



Das ZSMOE schloss sich der Initiative und Empfehlung vom UNICert®-Kommission an und entwickelte den UNICert®-Kurs „Russisch für Herkunftssprecher“. Diesen Kurs besuchen Studierende aller Studiengänge sowohl aus Weiden als auch aus Amberg. Den größten Teil bilden die Studierenden des Studiengangs TM. Wie oben erwähnt, dürfen sie als „Muttersprachler“ nicht Russisch für ihr Studium wählen, so nutzen sie die Möglichkeit, ihre Herkunftssprache zu vervollkommen.

Dieser Kurs besteht aus verschiedenen Modulen, die den jeweiligen Kompetenzen gewidmet sind. Die Studierenden besuchen die Module, die ihnen helfen, ihre sprachlichen Defizite abzubauen.

Es handelt sich um folgende Module:

- Lesen und Schreiben
- Gramota
- Wissenschaftliches Schreiben, Essays
- Mündliche Reproduktion
- Konversation

Wie von der UNICert®-Kommission vorgegeben, müssen die Studierenden im UNICert® III-Kurs die Ausbildung über 8 SWS absolvieren. Um Übersicht über das erfolgreiche Bestehen der jeweiligen Module der Studierenden zu gewährleisten, führen die Dozenten folgendes Portfolio bei jedem Studierenden:

**Portfolio UNICert® III Russisch**

Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden

Name: \_\_\_\_\_

Matrikel-Nr.: \_\_\_\_\_

Kursbezeichnung	SWS/erfüllt am	Unterschrift der Lehrkraft
Lesen und Schreiben (1SWS)		
Gramota (1SWS)		
Konversation 1 (2SWS)		
Konversation 2 (2 SWS)		
Konversation 3 (2 SWS)		
Wissenschaftliches Schreiben/Essays (1 SWS)		
Mündliche Reproduktion (1 SWS)		
<b>Anzahl der SWS gesamt</b>		

Abbildung 1: Portfolio für den Kurs UNICert® III für Herkunftssprecher

Nach dem erfolgreichen Absolvieren aller Module dieses speziellen Kurses sind die Studierenden fähig, die Prüfung UNICert® III (= C1) in allen vier sprachlichen Kompetenzen zu bestehen.

### 3.3.3 UNICert® III Russisch – Zusammenfassung

Der Kurs UNICert® III Russisch wird in zwei Gruppen aufgeteilt: für Herkunftssprecher und für „Nichtmuttersprachler“ (vornehmlich für die Studierenden und Absolventen der Studiengänge „Internationales Technologiemanagement“ und „Interkulturelles Unternehmens- und Technologiemanagement“). „Nichtmuttersprachler“ erhalten ein zusätzliches Coaching in Russisch, vorwiegend in Konversation, und die Herkunftssprecher werden gezielt gefördert. Beide Gruppen treffen sich in dem letzten Modul und legen die gleiche Abschlussprüfung in allen 4 sprachlichen Kompetenzen ab.

Das System wird in der Grafik dargestellt:

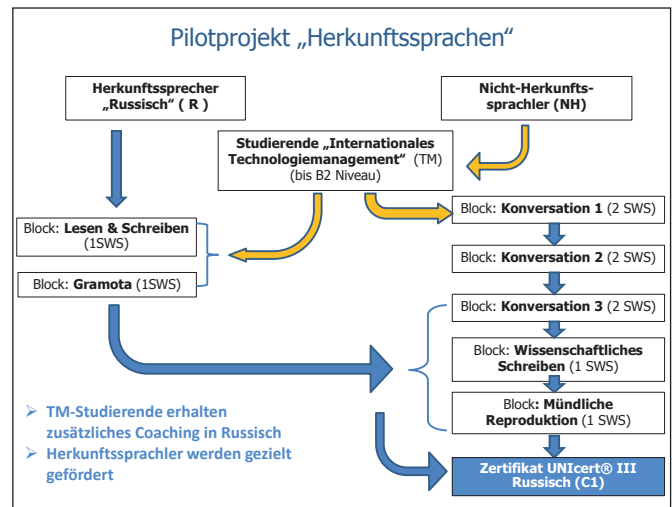


Abbildung 2: System des Kurses UNICert® III Russisch

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ausbildung, das Testen und Bewerten im Bereich Herkunftssprachen ist heutzutage ein aktuelles Thema für Sprachwissenschaftler und Didaktiker an den Universitäten und Hochschulen, es werden Tagungen und Workshops dazu veranstaltet und die Hochschulen entwickeln spezielle Kurse.

An der OTH Amberg-Weiden besteht ein großes Interesse an diesen Kursen, und zwar nicht nur unter den Studierenden und Absolventen, sondern auch unter den Schülern der Partnerschulen und in der Öffentlichkeit. Mit dem Erwerb von diesem UNICert®-Zertifikat gewinnen die Teilnehmer die Zusatzqualifikation für ihr künftiges Berufsleben und vervollständigen ihre biografisch mitgebrachte Sprachkompetenz.

## **Referenzen:**

Tanja Butschek, Astrid Reich, Umfrage-Ergebnisse zum Projekt: „UNICert® für Ausbildungsgänge im Bereich Herkunftssprachen“, UNICert® Interner Workshop (IWS) Goslar, 25.05.2014

Tanja Butschek, Einführung von UNICert® für Herkunftssprachen, die UNICert®-Kommission, Oktober 2014

Astrid Reich, Arbeitstreffen ‚Herkunftssprachen‘, Impulsvortrag Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden Zentrum für Sprachen, Mittel- und Osteuropa, 25. April 2015

Kombinierte Ausbildungs- und Prüfungsordnung für die studienbegleitende Ausbildung zum Erwerb des Fremdsprachenzertifikats UNICert® an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden

Ministerstvo školství mládeže a tělovýchovy, Společný evropský referenční rámec pro jazyky (Tschechisches Ministerium für Bildung, Jugend und Sport; Gemeinsamer europäischer Referenzrahmen für Sprachen (GER)), <http://www.msmt.cz/mezinardni-vztahy/spolecny-evropsky-referencni-ramec-pro-jazyky>, abgerufen: 24.02.2016

Ministerstvo školství mládeže a tělovýchovy, mezinárodní vztahy, referenční úrovně pro češtinu jako cizí jazyk (Tschechisches Ministerium für Bildung, Jugend und Sport, Abt. Internationale Beziehungen, Referenzniveau für Tschechisch als Fremdsprache), <http://www.msmt.cz/mezinardni-vztahy/referencni-urovne-pro-cestinu-jako-cizi-jazyk>, abgerufen: 24.02.2016

Ministerstvo školství mládeže a tělovýchovy, mezinárodní vztahy, Evropské jazykové portfolio (Tschechisches Ministerium für Bildung, Jugend und Sport, Europäisches Sprachportfolio), <http://www.msmt.cz/mezinardni-vztahy/evropske-jazykove-portfolio>, abgerufen: 24.02.2016

UNICert®-Rahmenordnung, <http://www.unicert-online.org/de/dokumente/unicert%C2%AE-rahmenordnung>, abgerufen: 09.09.2016

UNICert® Infoblatt „Einführung von UNICert® für Herkunftssprachen“, [http://www.unicert-online.org/sites/unicert-online.org/files/infoblatt\\_unicert\\_fuer\\_herkunftssprachen.pdf](http://www.unicert-online.org/sites/unicert-online.org/files/infoblatt_unicert_fuer_herkunftssprachen.pdf), abgerufen: 09.09.2016

Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, UNICert® – Das hochschulspezifische Fremdsprachenzertifikat, [http://www.oth-aw.de/einrichtungen/zentrum\\_fuer\\_sprachen\\_mittel\\_und\\_osteuropa/unicert\\_sprachausbildung/](http://www.oth-aw.de/einrichtungen/zentrum_fuer_sprachen_mittel_und_osteuropa/unicert_sprachausbildung/), abgerufen: 07.09.2016

Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, Informationen Bachelor-Studiengang „Internationales Technologiemanagement“, [http://www.oth-aw.de/studium/bachelorstudiengaenge/internationales\\_technologiemanagement/](http://www.oth-aw.de/studium/bachelorstudiengaenge/internationales_technologiemanagement/), abgerufen: 07.09.2016

## **Kontakt:**



### **Akad. Oberrätin PaedDr. Ladislava Holubová**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen und  
Zentrum für Sprachen, Mittel- und Osteuropa  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

[l.holubova@oth-aw.de](mailto:l.holubova@oth-aw.de)

## Fachkräftebedarf, Weiterbildungs- interesse und Verzahnung von beruflicher und akademischer Weiterbildung in der nördlichen Oberpfalz.

Empirische Untersuchungen und  
Konsequenzen für die Ent-  
wicklung von Bildungs-  
angeboten für technische  
Fachkräfte

### Zusammenfassung

Im Projekt *OTH mind* entwickeln die beiden Ostbayerischen Technischen Hochschulen Amberg-Weiden und Regensburg ein über die Region angelegtes Maßnahmenkonzept für lebenslanges Lernen in modularen Strukturen mit verschiedenen Partnern in Behörden, Verbänden und Unternehmen. *OTH mind* zielt auf eine Verzahnung von beruflicher und akademischer Bildung in der Region Ostbayern ab. Ein Teil des Projekts ist die Eröffnung von Anschlüssen an hochschulische und berufliche Bildungsmöglichkeiten auf allen Ebenen der beruflichen Bildung. Die Durchlässigkeit wird hierdurch auf verschiedenen Bildungsebenen generiert und neuen Zielgruppen werden alternative Bildungsmöglichkeiten eröffnet.

### Abstract

*OTH mind* – a project of the two universities of applied sciences Amberg-Weiden and Regensburg – aims at developing a lifelong learning concept for different target groups in the region in cooperation with public and private partners such as local authorities, (economic) associations and small and medium enterprises (SME). Main purpose of this project is to interlink academic and vocational education in order to open access for new target groups, especially for professionals without common university entrance qualification.

## 1 Ausgangslage

Mit der Novellierung des Bayerischen Hochschulgesetzes von 2009 wurde der Hochschulzugang für beruflich Qualifizierte ohne klassische Zugangsberechtigung geöffnet. Darüber hinaus fördern Bund und Länder mit verschiedenen Programmen die Durchlässigkeit zwischen beruflicher und akademischer Bildung. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanzierten Programmes „Aufstieg durch Bildung: Offene Hochschulen“ führt die Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden in Kooperation mit der OTH Regensburg das Forschungs- und Entwicklungsprojekt *OTH mind* durch. Dieses hat zum Ziel regionale Weiterbildungsbedarfe in technischen Berufsfeldern zu ermitteln sowie die Lücken zwischen beruflicher und akademischer Weiterbildung aufzudecken und im Anschluss in Zusammenarbeit mit Partnern der Wirtschaft, der Behörden und der Kammern möglichst zu schließen.

Das Projekt lässt sich grob in zwei Hauptphasen gliedern: In der ersten Phase zwischen Ende 2014 und Mitte 2016 wurden mit sozialwissenschaftlichen Methoden die Fachkräftestruktur, das Weiterbildungsinteresse von technischen Fachkräften und der Weiterbildungsbedarf aus Sicht der kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) in der Region erforscht. Des Weiteren wurden die strukturellen Voraussetzungen für Übergangsmöglichkeiten zwischen dem beruflichen und dem akademischen Bildungssystem für verschiedene Personengruppen analysiert. Die zweite Projektphase zwischen Mitte 2016 und Anfang 2018 widmet sich der Entwicklung empirisch basierter und passgenauer Bildungsangebote für die durch das Projekt adressierten Zielgruppen.

Dieser Bericht konzentriert sich auf die Erhebungsphase von *OTH mind* und insbesondere auf Fragestellungen im Zusammenhang mit dem aktuellen regionalen Fachkräftebedarf in technischen Feldern, dem individuellen Weiterbildungsinteresse sowie dem Bedarf an studienvorbereitenden Angeboten für beruflich Qualifizierte.

## 2 Fragestellungen und methodische Zugänge

Die öffentliche Diskussion über den Fachkräftemangel in Deutschland (und anderen OECD-Ländern) wird in den letzten Jahren zunehmend von der Debatte begleitet, ob die Unternehmen künftig mehr oder weniger Akademiker brauchen werden. Diese Frage stellt sich insbesondere für ingenieurwissenschaftliche und technische Arbeitsfelder und an diesem Punkt versucht *OTH mind* mit seinen Fragestellungen und Zielsetzungen anzuknüpfen: Zu den durch das Projekt angesprochenen Zielgruppen zählen sowohl technische Fachkräfte als auch Ingenieurinnen und Ingenieure mit Interesse an akademischer Weiterbildung. Konkret wird mittels persönlicher Interviews und Fragebogen analysiert, wie der Zugang zur Hochschule für beruflich Qualifizierte gestaltet werden kann, um ihren Studienerfolg nachhaltig zu erhöhen. Die Triangulation qualitativer und quantitativer Erhebungsmethoden erlaubt es, verschiedene Perspektiven für die Beantwortung dieser Frage zu integrieren und das speziell für die Situation in der Oberpfalz wenig erforschte Thema sinnvoll zu strukturieren.

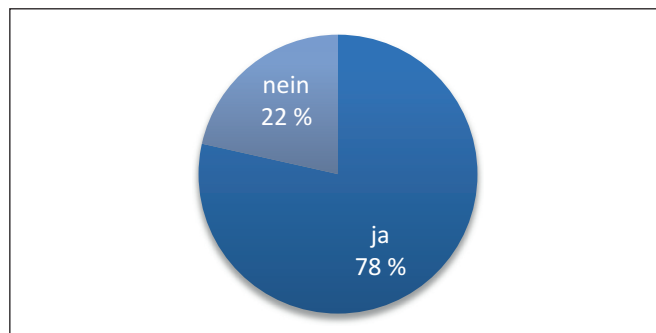
Aber nicht nur der Zugang zur grundständigen Hochschulbildung steht im Fokus des Interesses, sondern auch die akademische Weiterbildung: Wie kann beispielsweise ein besseres Matching von Bildungsangebot der Hochschulen und der Bildungsnachfrage in den Unternehmen der Region (Schwerpunkt Produzierendes Gewerbe in Industrie und Handwerk, kleine und mittlere Unternehmen) hergestellt werden? Und wie können die beiden Hochschulen zusammen mit den in der Region ansässigen KMU eine bessere Weiterbildungsstrategie für Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer entwickeln? Zu solchen und ähnlichen Fragen wurden Fragebögen entwickelt und an Personalverantwortliche in den Unternehmen versandt. Außerdem wurden Berufstätige zu deren Weiterbildungsinteresse und konkreten Absichten, sich weiterzubilden, befragt. Die Ergebnisse dieser empirischen Erhebungen sollen die Basis bilden für die Entwicklung passgenauer Bildungsangebote für die verschiedenen Zielgruppen.

## 3 Ergebnisse der Befragungen

Die Befragung der Fachkräfte hat ergeben, dass die Zielgruppe für die Entwicklung von Weiterbildungsangeboten überwiegend männlich (70 Prozent Anteil), im Durchschnitt zwischen 20 und 24 Jahre alt ist und über die mittlere Reife als höchsten Bildungsabschluss verfügt. Insgesamt wurden etwa 5000 Fachkräfte befragt, der Rücklauf liegt bei 553 Fragebögen.

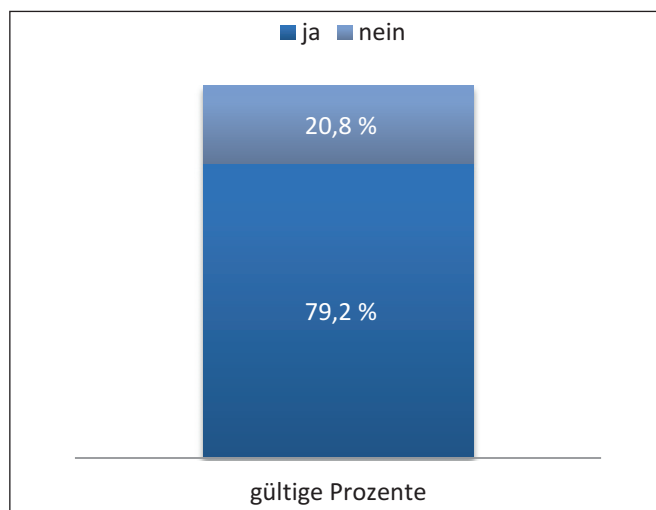
Bezüglich des Studiums zeigt sich, dass der überwiegenden Mehrheit der Befragten (78 Prozent) bekannt ist, dass in Bayern die Möglichkeit besteht, auch ohne Abitur ein Hochschulstudium aufzunehmen.

Ist Ihnen bekannt, dass auch ohne Abitur ein Studium an Hochschulen möglich ist? n = 405

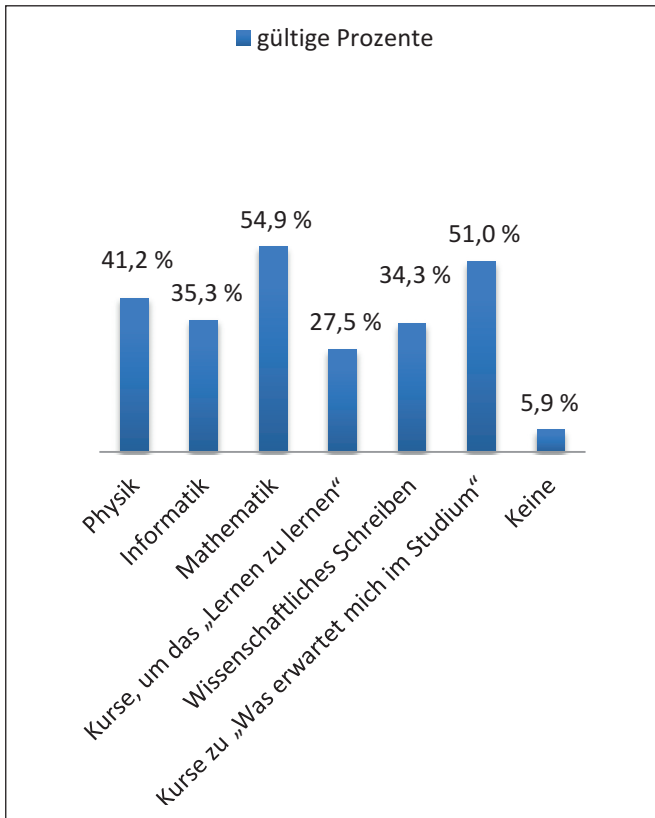


Wer Interesse an der Aufnahme eines Studiums hat, beabsichtigt die Aufnahme in der Regel in den kommenden maximal drei Jahren (45 Prozent). Um den Übergang von der beruflichen in die akademische Bildung so durchlässig wie möglich zu gestalten, ist es ein Ziel des Projekts *OTH mind*, beruflich Qualifizierten sowohl in fachlicher als auch in sozialwissenschaftlicher Sicht, Studienkompetenzen betreffend, Vorbereitung zu ermöglichen. Das Interesse an einem Vorbereitungsangebot ist bei den Befragten mit 79,2 Prozent sehr hoch. Eine Abfrage der inhaltlichen Aspekte zeigte, dass Mathematik mit 54,9 Prozent besonderer Vorbereitung bedarf, gefolgt von Physik mit 41,2 Prozent. Bezüglich fachübergreifender Kompetenzen ist besonders ein Kurs zu „Was erwartet mich im Studium?“ mit 51 Prozent gewünscht.

Würden Sie ein studienvorbereitendes Angebot wahrnehmen? n = 101

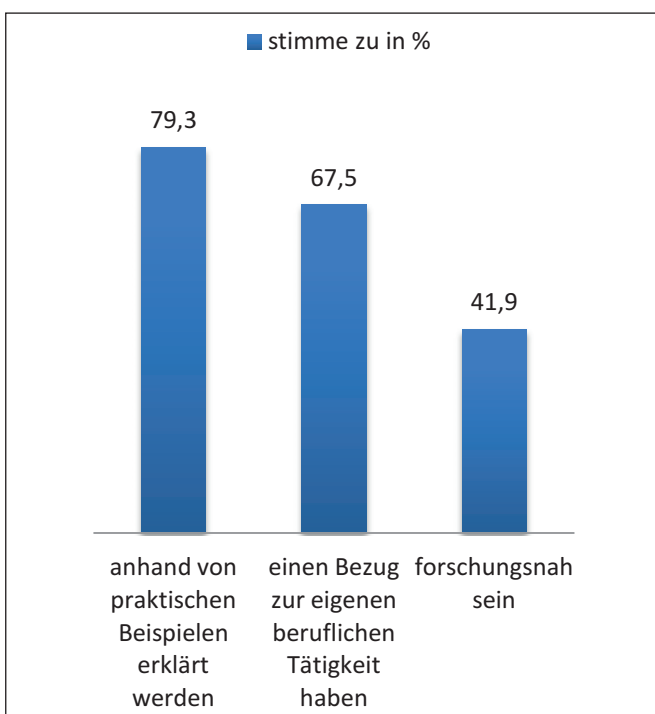


Welche Inhalte wären für Sie in einem studienvorbereitenden Angebot von Interesse? Mehrfachantwort, n=102

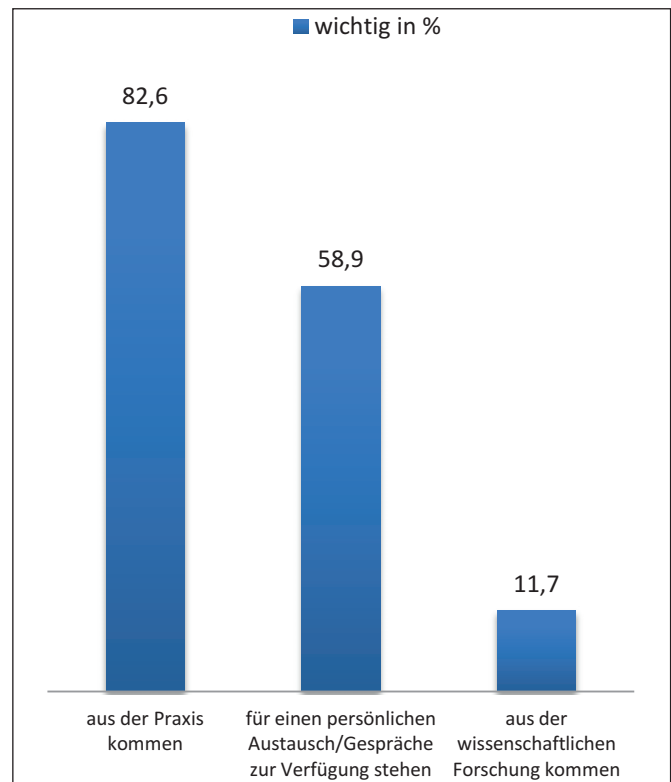


Gefragt nach der Ausgestaltung von Weiterbildungsmodulen ist den befragten Fachkräften ein enger Praxisbezug besonders wichtig. Dies spiegelt sich auch bei den gewünschten Dozierenden wider. Laut Meinung der Befragten sollten diese überwiegend aus der Praxis kommen (76 Prozent Zustimmung) und weniger aus der Wissenschaft (12 Prozent Zustimmung).

Die Inhalte und Themen sollten ... (n=169)



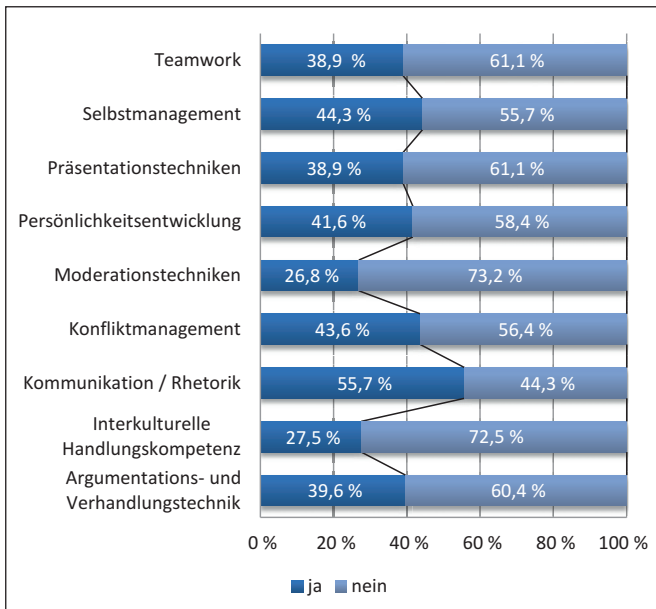
Die Dozent(inn)en sollten ... (n=169)



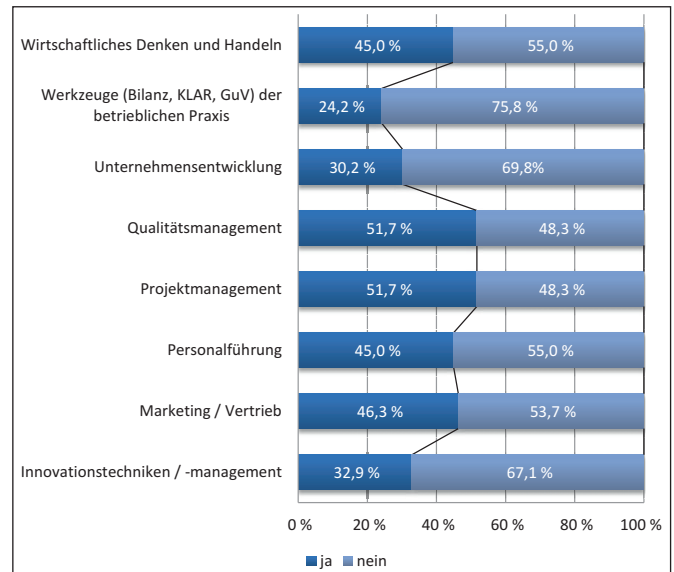
Zu den primären Motivationsgründen für Weiterbildung gehören die persönliche Entwicklung, der Erwerb von Fachkenntnissen und das Erzielen eines höheren Einkommens. Erwartungshaltungen vonseiten der Arbeitgeber oder Arbeitsplatzwechsel spielen für die Entscheidung, eine Weiterbildung aufzunehmen, eine untergeordnete Rolle, womit deutlich wird, dass die Befragten in erster Linie intrinsisch motiviert sind.

Aus Sicht der regionalen Unternehmen mit weniger als 500 Mitarbeitenden besteht in Bezug auf die Soft-Skills technischer Fachkräfte besonders in den Themenfeldern Kommunikation und Rhetorik (56 Prozent Zustimmung), Selbstmanagement und Konfliktmanagement (jeweils 44 Prozent Zustimmung) Weiterbildungsbedarf; in Bezug auf Fachkompetenzen gehören Informatik (32 Prozent), Elektro- und Informationstechnik (30 Prozent) und Maschinenbau (26 Prozent) zu den Spitzenreitern. Bezüglich betriebswirtschaftlicher Themenfelder sehen die Personalverantwortlichen der befragten KMU mit jeweils 52 Prozent Ja-Antworten Projekt- und Qualitätsmanagement als größeren Weiterbildungsbedarf ihrer technischen Fachkräfte als in den klassischen ingenieurwissenschaftlichen Fächern.

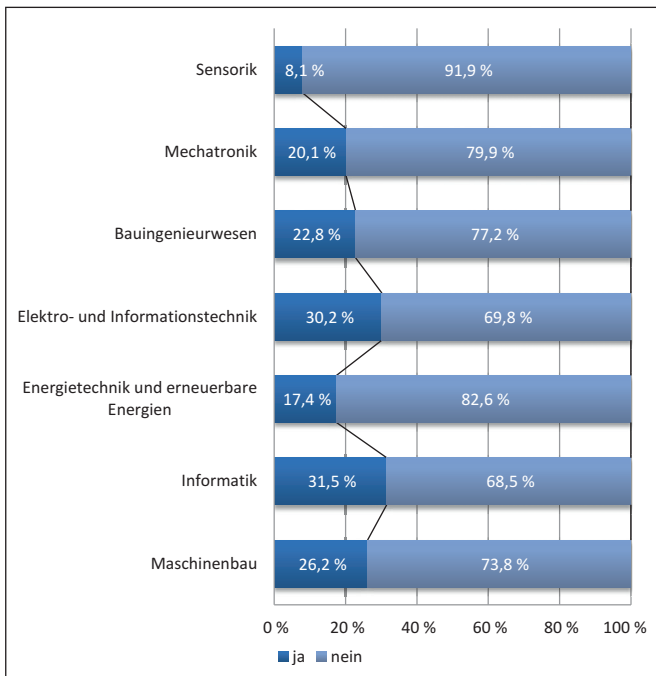
Sozialwissenschaftliche Themenfelder n= 149



Betriebswirtschaftliche Themenfelder n= 149



Technisches Fachwissen für beruflich Qualifizierte n= 149



Was die Weiterbildungsformate und Verankerung der Dozierenden betrifft, stimmen die Unternehmensvertreter/-innen in ihrer Meinung mit den Fachkräften weitgehend überein: Weiterbildung an Hochschulen sollte einen stark ausgeprägten Praxis- beziehungsweise Arbeitsplatzbezug haben und von Dozierenden aus der beruflichen Praxis durchgeführt werden.

#### 4 Fazit

Die Verschränkung von Theorie und Praxis spielt in der Bildungslandschaft eine immer größere Rolle. Inhalte vonseiten der Theorie zu betrachten, Abläufe in ihrem Kern zu durchblicken, um sie dann zielorientiert in die Praxis überführen zu können, gilt als effektives Wissen. Der Auftrag des lebenslangen Lernens wird innerhalb des *OTH-mind*-Projekts zwischen Hochschule und betrieblichem Kontext nicht separat, sondern verschränkt verstanden. Das Zusammenspiel beider Seiten bildet ein Synergiepotenzial, das es erlaubt, Bildung so durchlässig und nachhaltig wie möglich zu gestalten. Mittels der Bedarfsanalyse gelingt es dem Projekt *OTH mind*, dem großen aufgezeigten Interesse an akademischer Bildung gerecht zu werden und den Zielgruppen die individuelle Weiterbildung zu ermöglichen, die sie auf ihrem beruflichen Werdegang höchsteffektiv einbringen können.



---

**Fördergeber:**



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

**Kontakt:**



**Susanne Herdegen, M. A.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
OTH mind – Stellvertretende Projektleitung  
und wissenschaftliche Mitarbeiterin  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden



**Raphael Cabrera, B. A.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
OTH mind – Referent für Qualitätsmanagement  
und Nachhaltigkeit  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

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

# Auswirkungen des Einbezugs von hochschulinternen Stakeholdern für die Berichterstattung zur nachhaltigen Entwicklung

Alexander Herzner, M. Sc.  
Katharina Stucken, M. A.  
Prof. Dr. Bernhard Bleyer



Institut für  
Nachhaltigkeit in  
Technik und Wirtschaft

## Zusammenfassung

Derzeit berichten nur wenige Hochschulen über ihre sozialen und ökologischen Aktivitäten. Die Berichterstattung ist komplex und aufwendig. Dieser Forschungsbeitrag zeigt einen Ansatz, bei dem die Studierenden aktiv in den Prozess der Berichterstattung eingebunden wurden. So wurden operative Teilprozesse an die Studierenden übergeben. Dadurch wurden die Studierenden neben einer fachlichen Kompetenzentwicklung vor allem für das Thema „nachhaltige Entwicklung“ sensibilisiert. Um die Auswirkungen der Teilhabe zu analysieren, wurden Interviews mit den Studierenden durchgeführt und ausgewertet.

## Abstract

Sustainability Reporting at Higher Education Institutions is still at an early stage of development, due to a complex and work-intensive process. In this approach students were included into the reporting process. With the outsourcing of some workload the students have developed practical competencies and also received awareness for sustainable development. This paper examines the effects of the students' involvement with an interview analysis.

## Ausgangssituation

Bei der Analyse einzelner Umsetzungsprozesse einer nachhaltigen Entwicklung an deutschen Hochschulen trifft man nach wie vor auf sehr heterogene Strategien, Konzepte und Projekte. Forderte die Hochschulrektorenkonferenz zusammen mit der Deutschen UNESCO-Kommission bereits im Jahr 2010 von den Hochschulen, sich am Leitbild nachhaltiger Entwicklung zu orientieren, wird dies durch das von der UNESCO für die Jahre 2015 bis 2019 ausgerufene Weltaktionsprogramm „Bildung für Nachhaltige Entwicklung“ (WAP für BNE) [UNESCO (2014); UNESCO (2015)] thematisch fortgeführt und im Unterziel 4.7 („Bis 2030 sicherstellen, dass alle Lernenden die notwendigen Kenntnisse und Qualifikationen zur Förderung nachhaltiger Entwicklung erwerben“) der Sustainable Development Goals (SDGs) der Vereinten Nationen [Martens, Obenland (2015)] verstärkt.

Das Weltaktionsprogramm formuliert einen Handlungsbedarf für Hochschulen in fünf Dimensionen: Lerninhalt, Pädagogik und Lernumgebungen, Lernergebnisse und gesellschaftliche Transformation [UNESCO (2014)].

Im hiesigen Forschungsprojekt wird der Fokus auf die Nachhaltigkeitsberichterstattung von Hochschulen gelegt. Dabei wird versucht, den Lerninhalt „Berichterstattung“ zu vermitteln und dabei neben den fachlichen Kompetenzen vor allem die notwendigen Kenntnisse für eine nachhaltige Entwicklung näherzubringen. Damit fußt das Projekt auf zwei Bausteinen – einem pädagogischen und einem organisatorischen. Bisherige Studien belegen gerade zum letzteren Punkt ein geringes Interesse der Hochschulen an dem Thema Berichterstattung [Sassen, Dienes, Beth (2014); Lopatta, Jaeschke (2014)]. Die Hauptursachen liegen an dem ressourcen- und zeitaufwendigen Berichtsprozess [Sassen, Dienes, Beth (2014); Lopatta, Jaeschke (2014)]: Angefangen mit Vision und Zwecksetzung des Berichts sowie der Klärung von Rahmenbedingungen und Stakeholderinteressen über die Datensammlung und Auswertung bis hin zur Genehmigung und Veröffentlichung des Berichts umfasst der Prozess sehr viele Arbeitsschritte [respACT (2013); BDI, ecosense (2014)]. Da derzeit noch kein eigener Berichtsstandard für Hochschulen existiert, wird bisweilen auf den Deutschen Nachhaltigkeitskodex oder die Kriterien der Global Reporting Initiative (GRI-G4) zurückgegriffen. Eine

Version des Deutschen Nachhaltigkeitskodex für Universitäten wird derzeit entwickelt [Rat für nachhaltige Entwicklung 2016].

Das Forschungsprojekt integriert neben dem Stand der Forschung, internationalen Kodizes und dem Vergleich mit Berichterstattungsstandards für Unternehmen auch, aufgrund der Mitgliedschaft der OTH Amberg-Weiden bei den „Principles für Responsible Management Education (UNPRME)“, die Anforderungen der UNPRME „Policy on Sharing Information on Progress“. Im Teilprojekt „Berichterstattung für nachhaltige Entwicklung“ werden verschiedene Forschungsfragen untersucht, um darauf aufbauend ein Reifegradmodell zu erarbeiten. Ziel des groß angelegten Forschungsprojektes ist es, ein eigenständiges Modell „Bewertung der nachhaltigen Entwicklung an Hochschulen“ zu erarbeiten. In diesem Beitrag wird aber ausschließlich die Frage nach dem Effekt einer Anspruchsgruppeneinbeziehung in das Berichtswesen diskutiert.

### Methodische Vorgehensweise

Seit der Grunddefinition nachhaltiger Entwicklung nach dem Brundtland-Bericht (1987) gehört die Sicherstellung der Partizipation betroffener Gruppen zu den Kernkriterien des Grundgedankens der Nachhaltigkeit. Auch das internationale Rahmenwerk zur Berichterstattung, der Global Reporting Initiative G-4 (2013), fordert einen aktiven Einbezug von relevanten Anspruchsgruppen. Auf die Organisation einer Hochschule angewandt bedeutet dies, dass eine dementsprechende Berichterstattung die primäre Stakeholdergruppe der Studierenden in den Prozess einbeziehen muss. Dies kann sie jedoch nur, wenn die Studierenden vorher geeignete Kompetenzen zu diesem Themenfeld erwerben können. Daher wurden die Studierenden aus dem Seminar „Unternehmensethik“ des Studiengangs Betriebswirtschaft für das Forschungsprojekt ausgewählt. Die Berichterstattung ist Teil der Lerninhalte. Den Studierenden wurden neben den theoretischen Grundlagen die notwendigen Instrumente für die Berichterstattung vermittelt, um das Gelernte beispielhaft an der OTH Amberg-Weiden anzuwenden.

In dem Teilprojekt „Berichterstattung“ lassen sich die nachfolgenden Forschungsfragen ableiten, die anhand einer qualitativen Studie mittels Leitfrageninterview beantwortet wurden. Das Experteninterview in Form eines Leitfadens eignet sich besonders, da in dieser offenen Gestaltung der Interviews – im Gegensatz zu standardisierten Interviews oder Fragebögen – die vielfältigen Sichtweisen besser herausgestellt werden können [Flick, Kardorff, Steinke (2012)]. Die Leitfragen lassen eine freie Interviewführung zu, sodass im Anschluss eine Exploration der Sachverhalte und die Ermittlung von Bedeutungssystemen der Befragten möglich wurde [Lamnek (2005)]. Dafür wurden alle Interviews transkribiert und dienen als Grundlage für die qualitative Inhaltsanalyse.

Die Tabelle 1 zeigt die Forschungsfragen sowie die Technik für die Inhaltsanalyse überblicksartig.

Tabelle 1: Forschungsfragen und angewendete Technik (Quelle: eigene Darstellung)

Hauptfrage	Teilfragen	Technik
Welchen Effekt hat die Mitwirkung am Bericht auf die Studierenden?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensibilität gegenüber Nachhaltigkeit</li> <li>• Verständnis für die Hochschule/ Auswirkung auf die Identifikation</li> </ul>	Deduktive Kategorienbildung <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erfahrungsbericht/ Expertise</li> <li>• Identifikation</li> <li>• Sensibilisierung</li> <li>• Lerneffekt</li> </ul>
Welche Erfahrungen haben die Studierenden gesammelt?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erfahrungen im Allgemeinen</li> <li>• Gewinnung an Expertise</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Induktive Kategorienbildung</li> <li>• Erfahrungsbericht/ Expertise</li> <li>• Identifikation</li> <li>• Sensibilisierung</li> <li>• Lerneffekt</li> </ul>

Die Interviews wurden mit den Studierenden des Moduls „Unternehmensethik“ durchgeführt und für die Auswertung anonymisiert. Die Transkription erfolgte im Wortlaut und wurde zum besseren Verständnis in diesem Beitrag aus dialektischen Gründen umgeschrieben [Kuckartz et.al 2007]. Von den insgesamt 14 Teilnehmer(inne)n des Moduls waren sechs für ein Interview bereit, davon waren zwei weiblich und vier männlich. In diesem Beitrag wird lediglich die Auswertung der Forschungsfrage 1, die Effekte der Mitwirkung bei der Berichterstattung, vorgestellt.

### Ergebnisse

Die erste Forschungsfrage zielte auf die Sensibilisierung für das Thema Nachhaltigkeit ab. Von Interesse ist, ob diese durch die Mitwirkung und die aktive Einbeziehung gestärkt worden ist. Die Antworten zeigen, dass die aktive Teilhabe an dem Thema und die intensive Beschäftigung während der Projektphase für eine stärkere Sensibilisierung gesorgt haben.

Dies wird anhand folgender Zitate deutlich:

„(...) irgendwie habe ich schon gemerkt, dass es eigentlich schon ein wichtiges Thema ist und dass es mich auch so ein bisschen interessiert, also ... ja ich lese jetzt irgendwie auch öfters Berichte darüber, wo halt steht, was Firmen auch für die Mitarbeiter tun (...)“ (Student 5)

Ein(e) weitere(r) Student(in) erkannte das Thema nun auch in anderen Bereichen:

„(...), eh in allen Bereichen ist mir Nachhaltigkeit aufgefallen, dass in jedem Kurs und auch in Gesprächen, ich fand das eigentlich immer ganz cool, weil ich es überall anwenden konnte.“ (Student 4)

Die Bedeutung einer Bildung für Nachhaltigkeit, um das Thema bekannt zu machen, wurde durch diese Sensibilisierung ersichtlich:

*„Also ich war (...) sehr positiv überrascht eigentlich und ich fand es ein sehr interessantes Thema, weil viele Aspekte eben (...) man erfährt eben viele Aspekte, wo man sonst nicht erfahren würde, und später auch erst realisiert, wie wichtig das eigentlich ist, dass man solche Aspekte beleuchtet und herausfindet.“ (Student 3)*

Die Sensibilisierung fällt gerade im Bereich „Ökologie“ auf, was durch das Beispiel der Hochschule nochmals verstärkt wurde. Einen direkten Bezug konnte bei mehreren Studierenden hergestellt werden. Neben dem Energieverbrauch fällt auch der Wasserverbrauch der Hochschule auf. Zwar sind automatisch abschaltende Wasserhähne verbaut, die aber dennoch lange laufen (Student 2). Derartige Faktoren sind den Studierenden nicht nur an der Hochschule aufgefallen, sondern werden auch auf das eigene Verhalten hin reflektiert:

*„Man schaut halt selbst ja, wie oft lass ich meinen Fernseher auf Stand-by oder der Fernseher läuft ständig auf Stand-by. Wieso schalte ich ihn mal nicht ganz aus oder der PC: Schalte ich ihn jetzt nur auf Energiesparmodus oder ich brauche ihn heute überhaupt nicht mehr. Wieso schalte ich ihn nicht einfach aus. Solche Kleinigkeiten halt. Darauf achte ich viel mehr.“ (Student 3)*

Die Frage einer stärkeren Sensibilisierung kann somit positiv beantwortet werden. Die aktive Teilhabe an dem Thema und die intensive Beschäftigung während der Projektphase haben für eine stärkere Sensibilisierung gegenüber dem Thema „nachhaltige Entwicklung“ gesorgt.

Die zweite Frage zielte auf die Rolle der Hochschule ab. Inwiefern konnten die Studierenden durch die Sensibilisierung als Multiplikatoren für das Thema gewonnen werden?

Die Studierenden erwähnten, dass sie das Thema nun auch im Alltag und in beruflichen Situationen vorbringen können. Ein(e) Befragte(r) hat das Thema bei einem Bewerbungsgespräch (Student 1) eingebracht, ein(e) andere(r) diskutiert die Inhalte in Alltagsgesprächen seiner Mitmenschen:

*„Definitiv. Also ich schaue im Alltag jetzt auch mehr drauf. (...) Ja man hält manchmal ein paar Predigten und sein Wissen teilt man dann und wahrscheinlich, wenn man das und das Wasser trinkt, wo das herkommt oder so, das definitiv.“ (Student 2)*

Oder:

*„Mm, ja einfach jemandem zu vermitteln, was eigentlich dahintersteckt (...) auf (...) auch wo das Essen herkommt und was andere dafür in Kauf nehmen und wie schlecht es denen eigentlich geht, wenn wir unseren Wohlstand eigentlich (...) die alle ausbeuten.“ (Student 2)*

Aus diesen Zitaten lässt sich ableiten, dass besonders der eigene Alltag der Studierenden, ihre Verhaltensweisen und die Verhaltensweisen der Mitmenschen einer eigenständigen kritischen Reflexion unterworfen werden, die, indem sie dies tun, größtenteils bereits Alternativvorschläge mitbedenkt. Auch die Aufgabe der Hochschule, Studenten als Multiplikatoren auszubilden, kann bestätigt werden, denn durch die Sensibilisierung wird das Thema auch außerhalb der Hochschule transportiert.

Ein weiterer Aspekt ist, dass die studentische Beteiligung an einer Hochschulberichterstattung das Verständnis für die Hochschule veränderte. Deutlich wurde das in den Interviews durch folgende Stellen:

*„Jetzt nach dem Nachhaltigkeitsbericht auch durch das Kennenlernen noch mehrerer Leute und auch das Herausfinden, was alles dahintersteckt, und auch was alles nötig ist, dass die FH auch so funktioniert, und was alles geboten wird, finde ich schon, dass ich jetzt enger an der FH hänge wie vorher.“ (Student 4)*

*„Ja, (...) die Verbundenheit ist auf alle Fälle etwas gestiegen, weil man sich halt mit den Teilbereichen beschäftigt hat und man halt einen weiteren Einblick in die Hochschule erhalten hat, wo man sich vorher nicht damit beschäftigt hat. Und man ist auf alle Fälle mehr verbunden als vorher, definitiv (...) mit den Mitarbeitern, ja. Und ja, man kommt zu Informationen und sieht eben auch, wie das alles so abläuft. (...) ja keine Ahnung, das tut schon die Beziehung stärken, sag ich jetzt mal, wenn man mehr über die OTH erfährt, als wie wenn man jetzt jeden Tag reingeht und die Vorlesung besucht und wieder abhaut. Also da bekommt man im Kurs schon den Bezug dazu und ja, man bekommt natürlich dann auch einiges mit, durch das ökologische Thema jetzt; für sich selber auch und durch die OTH eben und das ist ja, find ich schon ganz gut eigentlich.“ (Student 3)*

## Diskussion

Die Ergebnisse der ersten Frage nach der Sensibilität zum Thema Nachhaltigkeit lässt den Schluss zu, dass sich eine Nachhaltigkeitsberichterstattung und eine Bildung für nachhaltige Entwicklung nicht ausschließen. Im Gegenteil ermöglicht die Berichterstattung mit Einbeziehung von Studierenden doch die Möglichkeit, das Thema der Berichterstattung praktisch zu vermitteln. So werden Lerninhalte wie zum Beispiel internationale Standards und Indikatoren der Nachhaltigkeit gelernt und das erlernte Wissen durch die Transferleistung bei der Prüfung der Relevanz der einzelnen Indikatoren für Hochschulen vertieft.

Durch die aktive Teilhabe gewinnen die Studierenden nicht nur Einblick in die vielfältige Thematik der Nachhaltigkeit, sondern werden aktiv an der Bildung beteiligt. Dies sorgt für eine höhere Sensibilisierung gegenüber der Thematik und fördert die Reflexion der vermittelten Inhalte. Daher stellen Hochschulen einen wichtigen Baustein für eine nachhaltige Entwicklung dar. Die Studierenden sind mit dieser Lernmethode in der Lage, Gelerntes praktisch anzuwenden und aktiv mitzugestalten.

Neben Forschung und Lehre wird in Zukunft auch das Thema Nachhaltigkeit (im Rahmen der sog. Third Mission) zum Auftrag der Hochschulen gehören. Hinzu kommt, mit Blick auf die gestiegene Wettbewerbssituation der Hochschulen, dass Studierende eine Hochschule mit starkem Engagement im Bereich Nachhaltigkeit als attraktiv empfinden. Dies fördert auch das Verbundenheitsgefühl der Studenten mit der Hochschule. Zeitgleich schreiben die Studierenden der Hochschule eine moralische Verantwortung zu, da sie maßgeblich bei der Ausbildung zukünftiger Führungskräfte beiträgt. Das bedeutet, dass Studierende sich der Hochschule gegenüber verbundener fühlen, wenn diese ihrer Verantwortung gerecht wird. Zudem steht die Hochschule als Vorbild für die Gesellschaft im Allgemeinen und die Studierenden im Besonderen. Damit können Hochschulen in mehreren

Punkten einen aktiven Beitrag für eine nachhaltige Entwicklung leisten.

Der aktive Einbezug der Studierenden wird auch dem Stakeholderansatz gerecht, der Verbesserungspotenziale durch andere Sichtweisen nennt [Freeman, McVea (2001)]. Zudem konnten die bereits von Sassen et al. (2014) und Lopatta, Jaeschke (2014) genannten Hürden der Berichterstattung bestätigt werden. Die Berichterstattung ist an Hochschulen durch deren Struktur sehr aufwendig und die Verfügbarkeit bzw. Transparenz berichtsrelevanter Informationen ist nicht im notwendigen Umfang gegeben. Mit geeigneten Managementmethoden und Instrumenten kann dem aber entgegengewirkt werden.

Für den hier beschriebenen Ansatz der Berichterstattung lässt sich daher zusammenfassend Folgendes festhalten:

Die praktische Vermittlung des Lernstoffes zur Nachhaltigkeitsberichterstattung sorgte bei den Studierenden zu einer stärkeren Sensibilisierung gegenüber dem Thema Nachhaltigkeit. Zudem stieg die Attraktivität der Hochschule sowie die Verbundenheit ihr gegenüber an. Organisatorisch wurde das Projektteam bei der Sammlung relevanter Informationen entlastet, sodass hochschulinterne Ressourcen eingespart werden konnte.

## Referenzen:

- BDI/ecosense (2014): In 7 Schritten zum Nachhaltigkeitsbericht, BDI, ecosense.
- Flick, U./Kardorff, E. V./Steinke, I. (2012): Qualitative Forschung, 9. Aufl., rowohlt's enzyklopädie, Hamburg.
- Freeman, R. E./McVea, J. (2001): A Stakeholder Approach to Strategic Management, in: Handbook of Strategic Management, (Hrsg:) Hitt, M., Blackwell Publishing, Oxford, S. 189–207.
- GRI-G4 (2013): G4 Leitlinien zur Nachhaltigkeitsberichterstattung, Global Reporting Initiative, Amsterdam.
- Hochschulrektorenkonferenz (2010): Erklärung der Hochschulrektorenkonferenz (HRK) und der Deutschen UNESCO-Kommission (DUK) zur Hochschulbildung für nachhaltige Entwicklung.
- Kuckartz, U./Dresing, Th./Rädiker, S./Stefer, C. (2007): Qualitative Evaluation – Der Einstieg in die Praxis, VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden.
- Lamnek, S. (2005): Qualitative Sozialforschung, 4. Aufl., Beltz Verlag, Weinheim, Basel.
- Lopatta, K./Jaeschke, R. (2014): Sustainability reporting at German and Austrian universities, in: International Journal of Education and Development. Jg. 5(1), S. 66–90.
- Martens, J./Obenland, W. (2015): Die 2030-Agenda, Globale Zukunftsziele für nachhaltige Entwicklung, Global Policy Forum/terre des hommes, Bonn, Osnabrück.
- Rat für nachhaltige Entwicklung (2016): Der hochschulspezifische Kodex, 2. Entwurf, Berlin.
- respACT (2013): In 6 Schritten zum Nachhaltigkeitsbericht, respAct, Wien.
- Sassen, R./Dienes, D./Beth, C. (2014): Nachhaltigkeitsberichterstattung deutscher Hochschulen, in: Zeitschrift für Umweltpolitik & Umweltrecht. Jg. 37, S. 258–77.
- UNESCO (2014): Roadmap for Implementing the global Action Programme on Education for Sustainable Development, UNESCO, Paris.
- UNESCO (2015): Auftakt des Weltaktionsprogramms BNE in Deutschland, Berlin.

## Kontakt:



**Alexander Herzner, M. Sc.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Institut für Nachhaltigkeit in  
Technik und Wirtschaft  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

a.herzner@oth-aw.de



**Katharina Stucken, M. A.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Cluster Ethik, Technologiefolgen-  
forschung und Nachhaltige  
Unternehmensführung  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

k.stucken@oth-aw.de



**Prof. Dr. Bernhard Bleyer**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Leiter Institut für Nachhaltigkeit in  
Technik und Wirtschaft  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

b.bleyer@oth-aw.de

# What can Biology tell us about Transaction Balances?

## Abstract

The total cash issuance of a central bank consists of domestic transaction and hoarding balances as well as foreign demand. The different shares are not known exactly. The introduction of the new Europa series of banknotes in the euro area offers the opportunity to calculate transaction balances with the help of a biometric method. Our results indicate that transaction balances are very low.

## Zusammenfassung

Der Bargeldumlauf wird durch die inländische Transaktionsnachfrage, die Hortungsbestände und die Auslandsnachfrage determiniert. Während die Gesamtemission bekannt ist, fehlen exakte Informationen über die Aufteilung. Die Einführung der neuen Europaserie an Euro-Banknoten ermöglicht es, mithilfe einer biometrischen Methode die Transaktionskasse in bar zu bestimmen. Wir finden heraus, dass der Teil des Bargelds, der für Transaktionszwecke gehalten wird, äußerst gering ist.

## 1 Introduction

The total cash issuance by a central bank consists of domestic transaction and hoarding balances as well as amounts hoarded and used for transactions abroad. The different shares are not known exactly. Within the euro area, the environment is still more complicated as issues of one country may migrate to other euro area countries in which they are perfect substitutes. Transaction balances usually are made up of small denominations. The introduction of the new Europa series of euro banknotes (ES 2) since 2013 offers the opportunity to calculate transaction balances at home and abroad. We apply one method to the already circulating €10 and €5 banknotes.

[1] derive that the share of domestic transaction balances in the total volume of circulation of these two smallest euro denomination notes is only about 20 %. Their calculations are based on return flows of banknotes to the central bank and simple accounting. Usually, these domestic transaction balances are the main focus of interest of papers trying to estimate and to analyse the share of cash used for payment purposes (see [2], [3]). However, the euro is also heavily used abroad [4], [5], [6]. Therefore, it is interesting to know the euro amounts used for transaction purposes outside the euro area. This is the

aim of the present paper. To our knowledge, this has never been done before.

## 2 Banknotes held for transaction purposes outside the euro area

The Eurosystem has been putting the new ES2 €5 and €10 banknotes into circulation since May 2013 and September 2014, respectively. After a few months, the share of the new notes has stood at over 95 %. ES1 banknotes that flow back to the central banks are filtered out during processing and destroyed. The biometric method is one way to make use of the introduction of the ES2 series to calculate transaction balances.

### 2.1 The biometric method

The early 1990s saw the launch of a new series of US dollar banknotes featuring a security thread. Back then, Richard Porter and Ruth Judson, two economists at the Federal Reserve Board, took advantage of this opportunity to estimate the volume of \$50 and \$100 notes held abroad using, inter alia, a biometric method originally devised by the Danish biologist Carl Petersen [7]. The introduction of the ES2 notes in combination with official shipments of banknotes can

similarly be used to gauge the volume of €5 and €10 banknotes outside the euro area.

Biologists are often confronted with the problem of not knowing the size of the total population  $N$  (eg the number of fish in a lake). By marking newly added fish of population size  $M$  and taking a random sample from the lake some time later it is, however, possible to produce a ratio estimator. This allows a conclusion to be drawn concerning the size of the population  $N$ . Measuring the volume of cash in circulation presents a similar problem in as much as the volumes circulating at home and abroad are not known.

In trying to estimate the volume of banknotes held for transaction purposes outside the euro area, we make the intrinsic assumption that these notes are in free and random circulation. Therefore, we can only capture the volume in circulation of notes held for transaction purposes – these are actually in circulation in non-euro-area countries – and not those being hoarded in this locations. The term “hoarded banknotes” refers to notes that return to a central bank at a much slower pace than notes in circulation in the narrower sense. If the notes are circulating in an unhindered and random fashion, the share of marked banknotes in the random sample matches the share of marked banknotes among the population as a whole.

$$\frac{M}{N} = \frac{m}{n} \quad (1)$$

$M$  denotes the collective value of all marked notes (ES2 banknotes);  $n$  represents the value of all notes belonging to the random sample while  $m$  denotes the value of all marked notes included in that sample. Solving (1) for  $N$ , the value of all €5 and €10 notes held in non-euro-area countries for transaction purposes, we get

$$N = \frac{n}{m} M \quad (2)$$

Variables  $n$ ,  $m$  and  $M$  on the right-hand side of (2) are derived from official “shipments”. This term refers to all banknotes paid in to branches of the Deutsche Bundesbank in the context of official deliveries of banknotes to countries outside the euro area. The shipments are processed by wholesale banks active in the international wholesale banknote market. The inpayments stemming from these shipments correspond to the random sample of fish from a lake mentioned above. The random samples  $n$  and  $m$  are only taken from branches handling shipments (branch category 1). The implicit assumption we make is that banknotes in these random samples (forming part of shipments) were brought into circulation by the Bundesbank and not by other Eurosystem central banks. This assumption can be justified by the fact that the vast majority of shipments occurring within the Eurosystem are handled by the Bundesbank (see figure 1). Moreover, since the beginning of 2013, more than 100 % of all €10

and €5 notes issued by the Eurosystem have emanated from the Bundesbank. Branch category 1 thus comprises branches that strive to satisfy not just the demand coming from within Germany itself but also from other euro-area countries and non-euro-area countries alike. In order of importance, these are first and foremost the Bundesbank’s branches in Frankfurt and Mainz, followed by its branches in Freiburg and Villingen-Schwenningen, with Berlin and Munich in third place. Since Germany is a member of the euro area, the term “abroad” refers to two categories of country: other euro-area countries and non-euro-area countries. In this context, the biometric method therefore takes a different approach to that deployed by Porter and Judson for the United States.

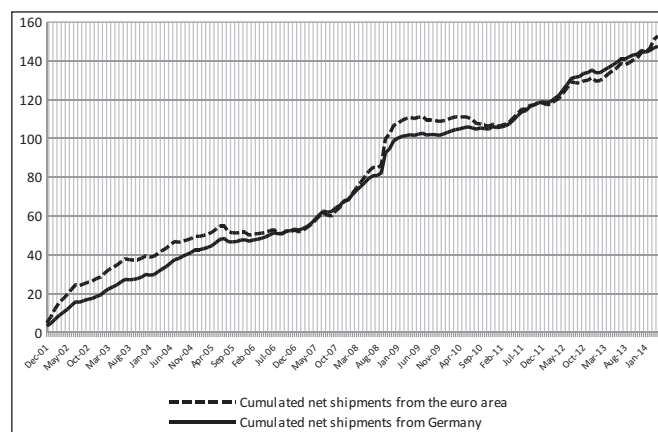


Figure 1: Cumulated net shipments of euro banknotes from Germany and the euro area (€billion)  
Source: Deutsche Bundesbank and ECB.

Variable  $n$  denotes the value of all notes (ES1 and ES2) paid in to the above branches at a specific month  $t^*$  after their introduction from countries outside the euro area. Variable  $m$  stands for the value of all ES2 notes included in this volume. Drawing of the random sample was held off a few months (until  $t^*$ ) in order to give the notes from the old and new series enough time to achieve a good mix. For the €10 note, for example,  $t^*$  is May 2015. Inpayment flows at the Bundesbank have been used to assess the level of market penetration of the new series. Apart from via shipments, “German” euro notes are mainly transported abroad to non-euro-area countries either as a result of travel or as remittances. These channels are captured only partly by the biometric method. The inpayments at the Bundesbank arising from shipments also include notes which were originally exported from Germany to non-euro-area countries through travel or remittances.

## 2.2 Results

To exemplify the calculations, we refer to the €10 banknote. In this case,  $M$ , the volume of ES2 notes brought into circulation by category 1 branches until May 2015 and destined for non-euro-area countries equals €363 million. The sum total  $n$  comprising all notes (ES1



and ES2) paid in to category 1 branches in May 2015 as shipments from non-euro-area countries amounts to €29 million. And m, the volume of ES2 notes included in n, totals just over €19 million. Therefore, N, the volume of “German” notes held for transaction purposes outside the euro area, has an estimated value of just over €540 million at the end of May 2015 (about 9 % of shipments). As mentioned above, this estimate represents a lower limit for the volumes of euro cash held for transaction purposes in these countries. Viewed in relation to the total volume of “German” €10 banknotes in circulation, which amounted to €24.5 billion at the end of 2014, the estimated cash balance held for transaction purposes outside the euro area accounts for not more than just over 2 % of the whole. At first glance this would appear to be a very low figure. But this result was to be expected for a number of reasons. First, a large share of “German” €10 banknotes is to be found in other euro-area countries (see Figure 1). Second, euro banknotes kept outside the euro area are primarily being hoarded ([8], section 3.4). The cumulative value of net shipments of “German” €10 banknotes (in countries outside the euro area) as at the end of 2014 was estimated to have reached a level of €6.2 billion, equivalent to one-quarter of the volume of this denomination in circulation. An estimated share of around 9 % of these cumulated net shipments (worth €540 million) relate to transactions. The remaining and bigger share, worth €5.7 billion, is hoarded. Extrapolating the estimate of the volume of “German” €10 notes held outside the euro area in [4] to the end of 2014 yields €8.5 billion. This means that the difference is brought abroad via other channels than official shipments.

In the case of the €5 note, transaction balances outside the euro area (N) amount to €240 million, constituting around 45 % of official shipments. However, the share of cumulated net shipments in total circulation is much higher for the €10 notes and mainly consists of hoardings. These differences show that, in contrast to the €10 note, the €5 note is not a typical “foreign demand banknote”.

### 3 Summary and conclusions

A biometric method is used to calculate the amounts of euros used for transaction purposes outside the euro area. The method is applied to the two smallest denominations (€5 and €10) for which a new banknote series has been issued. [3] present estimates of about 50 % of Germany’s net issues of banknotes being held outside the euro area. Our results reveal that only between 2 and 3 % of the total volume of these denominations are held as transaction balances in these countries. [1] as well as [4] and [6] find that domestic transaction balances in Germany amount to about 20 %. The rest is hoarded within or outside the euro area or used for transactions in other euro area countries.

After the remaining ES2 denominations of €20 (already introduced at the end of 2015) and above have been brought into circulation and have stirred with the ES1 series, the volume of “German” banknotes held for transaction purposes in non-euro-area countries can also be calculated for these denominations using the method presented here.

---

## References:

- [1] Bartzsch, N & F Seitz (2016), Transaction Balances: From accounting and economics to biology, ROME Working Paper 2016-01, January.
- [2] Aksoy, Y & T Piskorski (2006), U.S. Domestic Money, Inflation and Output, *Journal of Monetary Economics*, 53, 183–197.
- [3] Seitz, F (2007), A Simple Way to Capture Transaction Balances, *Economics Letters*, 95, 230–233.
- [4] Bartzsch, N, G Rösl & F Seitz (2013a), Currency Movements Within and Outside a Currency Union: The case of Germany and the euro area, *Quarterly Review of Economics and Finance*, 53, 393–401.
- [5] Bartzsch, N, G Rösl & F Seitz (2013b), Estimating the Foreign Circulation of Banknotes, *Economics Letters*, 119, 165–167.
- [6] European Central Bank (2015), The International Role of the Euro, July.
- [7] Porter, R D & R Judson (1996), The location of U.S. currency: How much is abroad?, *Federal Reserve Bulletin*, 82 (10), 889–903.
- [8] Bartzsch, N, G Rösl & F Seitz (2011), Foreign demand for euro banknotes issued in Germany: estimation using direct approaches, *Deutsche Bundesbank Discussion Paper, Series 1*, 20/2011.
- [9] Bartzsch, N, G Rösl & F Seitz (2012), A Simple Way to Capture Currency Abroad, *Applied Economics Letters*, 19, 1511–1514.

## Kontakt:



**Prof. Dr. Franz Seitz**

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

f.seitz@oth-aw.de



**Nikolaus Bartzsch**

Deutsche Bundesbank  
Zentralbereich Bargeld  
Wilhelm-Epstein-Straße 14  
60431 Frankfurt am Main

nikolaus.bartzsch@bundesbank.de

# Decreased functional brain connectivity during itch compared to pain

Erschienen in 154.22/N40. 2015 Neuroscience Meeting Planner. Chicago, IL: Society for Neuroscience, 2015. Online.  
R. RINGLER<sup>1</sup>, M. RANK<sup>2</sup>, K. DETMAR<sup>3</sup>, R. LOOSE<sup>3</sup>, C. FORSTER<sup>2</sup>;  
<sup>1</sup> Univ. of Appl. Sci. Amberg-Weiden, Weiden, Germany; <sup>2</sup> Inst. of Physiol. 1, Univ. of Erlangen, Erlangen, Germany;  
<sup>3</sup> Radiology, Clin. Ctr. of Nuremberg, Nuremberg, Germany

## Introduction

Histamine topical applied is well known as the prototypical itch mediator. If a smaller number of primary afferent fibers is activated e.g. by histamine the sensation is described as itch whereas activation of a larger population of afferent fibers activates the pain system. The aim of this study was to identify the cerebral networks which is involved in the processing of these stimuli with the help of functional imaging (fMRI). In this work we further studied these changes regarding the functional connectivity between the brain areas which process itch or pain. Since we expected a quite similar network during itch and pain functional connectivity's within these networks were explored and compared. Regarding our hypothesis that the functional connectivity decreases during itch compared to pain.

Keyword(s): connectivity, FMRI, PAIN, ITCH, IONTOPHORESIS

## Einleitung

Histamin, lokal appliziert, eignet sich hervorragend, um experimentell einen Juckreiz auszulösen. Wenn beispielsweise eine kleinere Anzahl von primär afferenten Fasern durch Histamin aktiviert wird, wird dies vom Probanden als Juckreiz beschrieben, während die Aktivierung einer größeren Population von Afferenzen das Schmerzsystem aktiviert. Das Ziel dieser Studie war es, die zerebralen Netzwerke mithilfe von funktioneller Bildgebung (fMRI) zu identifizieren, die bei der Verarbeitung dieser Reize beteiligt sind. In dieser Arbeit wird weiterhin untersucht, wie sich Änderungen der funktionellen Konnektivität zwischen den betroffenen Hirnarealen durch die Verarbeitung Juck- bzw. Schmerzreizen niederschlagen. Da wir ein ganz ähnliches Netzwerk für die Verarbeitung von Juck- und Schmerzreize erwarten, ist eine Differenzierung der funktionellen Konnektivität Ziel der Untersuchungen. Unsere Hypothese ist dabei, dass funktionelle Konnektivität während des Juckreizes im Vergleich zum Schmerz verringert.

## Materials and methods

In this study 17 healthy subjects with 8 males and 9 females participated. They participated on in two separated psychophysical pre-examination (training sessions were separated by at least two weeks) where pain or itch rating were recorded. Itch was applied by iontophoresis of histamine into the skin of the volar

forearm. This leads to a flare and wheal after the iontophoresis (figure 1 right). The recording started when the itch intensity passes 30 % of the visual analogue scale (VAS). The VAS was scaled by, 0 %: no itch; 30 %: desire to scratch; 100 %: maximal conceivable itch. For pain the skin of the forearm was pretreated by topical application of capsaicin (0,05 % for 30 minutes). Then two heat stimuli each 3 min with 5 minute break in between were

applied to this site (figure 1 left). This led to a thermal hyperalgesia and heat pain could be induced by temperatures of less than 50 degree Celsius (~120 °F). The individual intensity was 1 degree above the pain threshold. Recording started when the pain passes 30 % of the VAS.

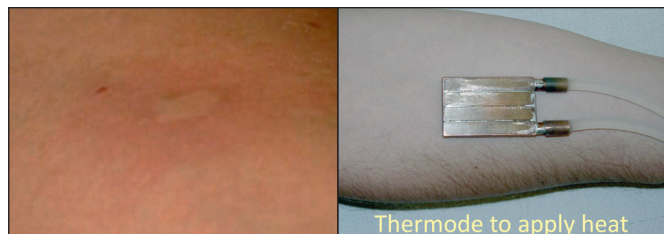


Figure 1: left: Flare and wheal after histamine iontophoresis. Right: Thermal application of heat pain.

In two fMRI sessions itch and pain was assessed in the same scheme as the training sessions using a classical connectivity fMRI-design with EPI sequences on a 1.5 T Siemens Espree.

Three fMRI sequences were recorded:

- 1) No stimulation to determine the default mode network
- 2) Stimulation itch or heat pain without rating
- 3) Stimulation itch or heat pain with rating on a VAS

The fMRI sequence 2) and 3) was started when the sensation of itch or pain reached 30 % of the VAS rating. The itching or painful sensation lasted during the whole fMRI. No earlier than 2 weeks the fMRI experiment was repeated with the other stimulus.

For functional MRI standard echo-planar-imaging (EPI) sequences with prospective motion correction were used. The fMRI data were analyzed with the standard software package BrainVoyager QX<sup>®</sup> applying the preprocessing slice scan time correction, 3D motion correction, linear de-trending and temporal high pass filtering to the MR-data. EPI-data were then co-registered to the subjects individual 3D-MPRAGE data set which was transformed by a rigid body transformation into the Tailarach space.

Predefined anatomical regions (ROI) were used and the mean MRI time courses in these regions were extracted for each subject. These signals were z-transformed and Pearson's correlation coefficients ( $r$ ) were calculated between the ROI for the periods baseline (B), itch (I) or pain (P) respectively. The aim of the work was a network of functional connectivity between cortical areas. Therefore the analysis of functional connectivity was performed by two types of connectivity analysis:

- a) ROI-based: Correlations from defined seed regions to other ROIs. The time courses used were the mean time course of all voxels within a ROI.
- b) Contrast analysis: The voxels mean time course of one ROI (seed) was used as seed and contrasts between

itch and pain were calculated to identify brain areas with different connectivity regarding itch and pain.

## Results

The pain rating (figure 2) acquired during the 3<sup>rd</sup> fMRI run shows an increase during the 5 minutes of measurement. Itch had its peak during the first two minutes after application of histamine (figure 3). Females gave higher pain and itch rating as males.

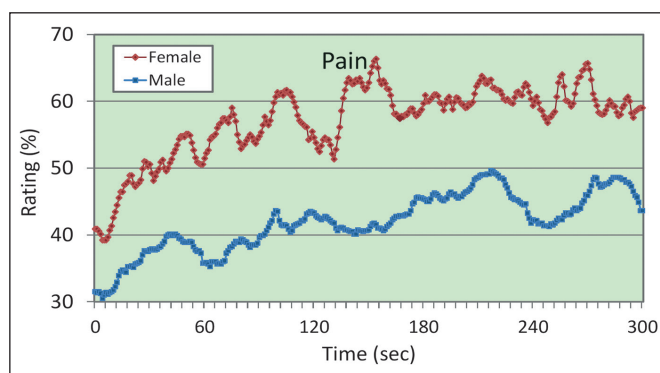


Figure 2: Pain rating increases during the five minutes, whereas the rating of females was higher compared to males.

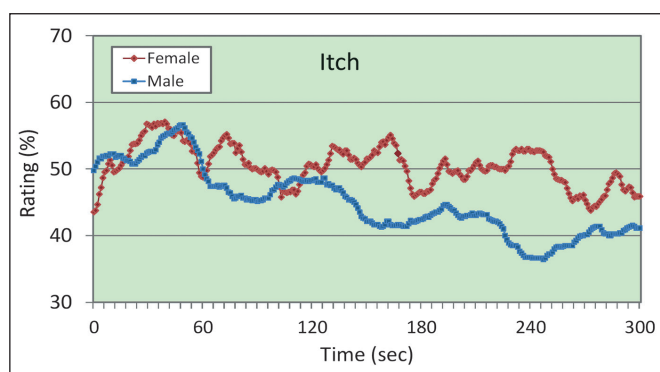


Figure 3: Itch rating increases during the first two minutes and decreases slowly till the end of the experiment. The rating of females after two minutes decreases slower compared to males.

Figure 4 shows to BOLD-fMRI signals as specimen. The correlation coefficient  $r$  from the insular cortex (red line) and left S1 cortex (blue line) the time course was calculated for each itch or pain by females or males.

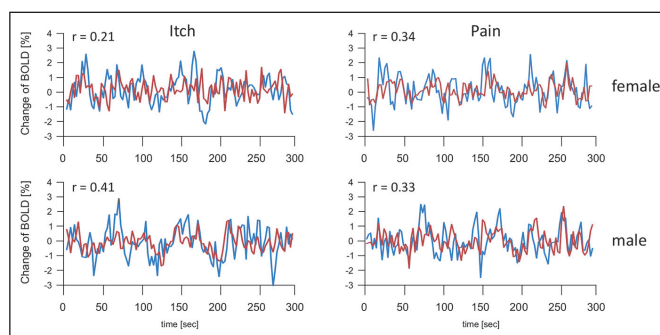


Figure 4: Examples of mean BOLD time course with corresponding correlation coefficient  $r$  between S1 (blue) and insular cortex (red)

The thalamus as seed region displays in figure 5 the correlation to the medial system (insular cortex, ACC and BA 9) which is slightly increased during pain compared to itch within males.

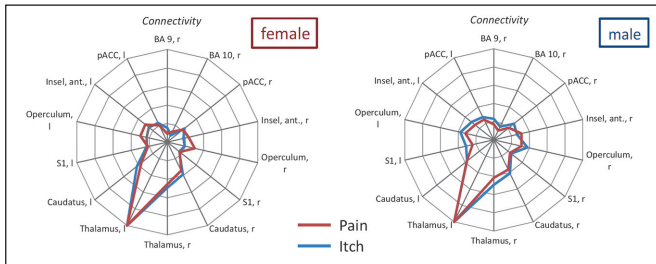


Figure 5: Connectivity between thalamus und the medial system

There were also high connectivity values ( $r > 0.8$ ) between the areas of the medial system especially the contralateral pACC (pACC, r) using the left posterior ACC as seed point. These areas are known to be involved in processing of the affective components of pain (figure 6).

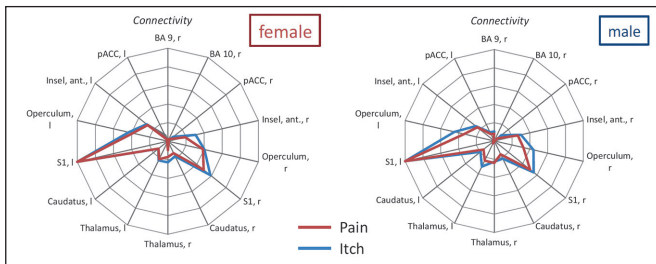


Figure 6: Connectivity within the medial system is increased during pain.

Strong correlation within the lateral system using S1 as seed point can be found to the operculum (S2) which slightly increases during pain for females (figure 7).

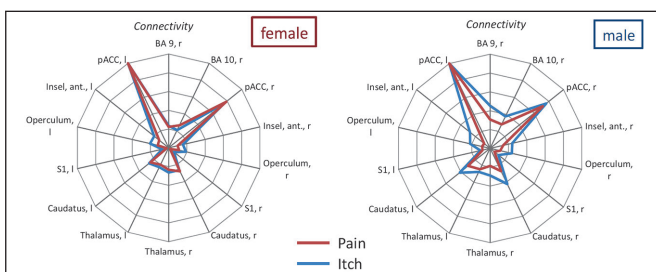


Figure 7: Connectivity is increased in females during pain within the lateral system S1 compared to S2 (operculum).

The differences in connectivity during itch and pain are displayed for the PAG (periaqueductal gray) in figure 8 and the left perigenual ACC (pACC, left) in figure 9 and the left insular cortex (IC, left) in figure 10.

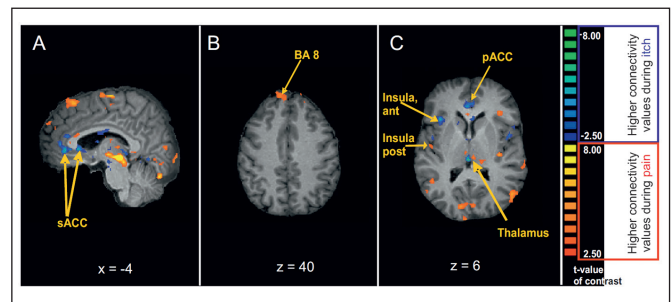


Figure 8: Brain regions showing significant differences in correlations with the PAG comparing itch and pain. During itch there is stronger connectivity to sACC and IC while during pain higher correlations to areas in the brain stem.

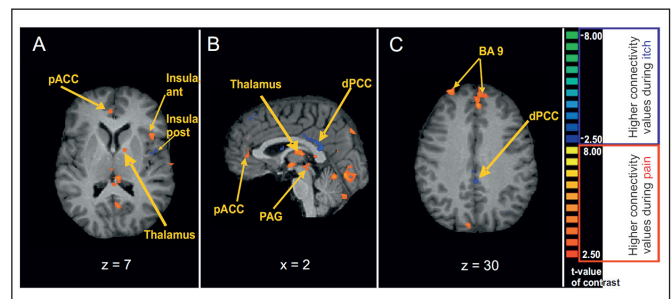


Figure 9: The pACC seems to be involved in the pain modulation which includes frontal areas and the PAG also the thalamic regions with probably sensory (nociceptive) input.

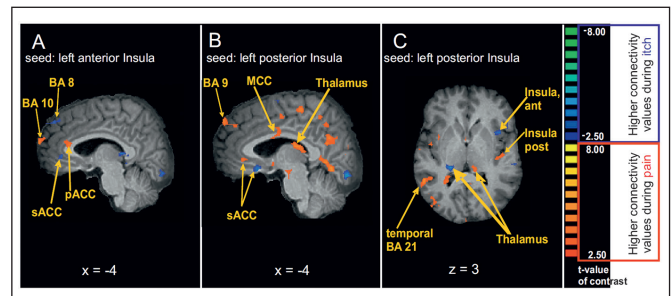


Figure 10: The network of itch and pain differs in connectivity between left IC and regions within the ACC (itch: IC to sACC, pain: IC to pACC).

## Conclusion

The study proved that the functional brain connectivity decreases during itch compared to pain. The results of connectivity for pain or itch are close together but are processed in different cortical networks. The patterns of functional connectivity during the process of itch or pain are quantitatively different. Some pairs of regions changed their functional connectivity fundamentally between pain and itch. The connectivity is stronger and more widespread in the brain regions during the tonic pain input, which could be the result of multiple and stronger input from peripheral receptors.

---

**Projektpartner:**

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

**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  
Universitätsstraße 17  
91054 Erlangen

[forster@physiologie1.uni-erlangen.de](mailto:forster@physiologie1.uni-erlangen.de)

Dr. rer. nat. Sebastian Buhl  
Sabine Hentschel, M. Sc.  
Nicole Eschenbecher, B. Eng.  
Carina Werner, B. Eng.  
Laura Walberer, B. Eng.  
Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

# Hygiene und Medizintechnik – Untersuchungen zur Erhöhung der Patientensicherheit durch technische Maßnahmen

## Zusammenfassung

Die Gefährdung des Patienten aufgrund unzureichender Hygiene stellt ein wachsendes Problem für Kliniken weltweit dar. Beispielsweise stehen postoperative Wundinfektionen bei chirurgischen Eingriffen seit langer Zeit im Fokus wissenschaftlicher Untersuchungen. In Deutschland liegt die Zahl für solche Komplikationen bei 225.000 Patienten pro Jahr.<sup>[1]</sup>

Die Ansatzpunkte zur Verbesserung der Hygienemaßnahmen im patientennahen Umfeld sind vielfältig. Die sachgemäße Durchführung von Reinigung und Desinfektion (R&D) ist für die Kliniken seit jeher der Schlüssel für die Aufrechterhaltung eines guten Hygienestandards. Jedoch ist die Verringerung der Keimbelastung nicht nur auf Reinigungs- und Desinfektionsmaßnahmen beschränkt. Die Wahl der Raumluftechnischen Anlage im Operationsaal oder auch die Beschaffenheit der Bekleidung des Personals während des Eingriffs stellen wichtige Faktoren der Patientensicherheit dar. Ebenso sind neuartige und effektive antimikrobielle Beschichtungen für patientennahe medizintechnische Produkte ein weiterer Baustein zur Reduktion potenzieller Infektionsquellen.

Die Arbeitsgruppe Hygiene und Medizintechnik der OTH Amberg-Weiden arbeitet mit einer Vielzahl an Kooperationspartnern an neuartigen und innovativen Konzepten zur Verbesserung der derzeitigen Hygienestandards. Mittels mikrobiologischer Analysemethoden und Partikelmessungen werden neue oder bereits etablierte Technologien und Standards überprüft und potenziell effektivere und effizientere Lösungsansätze entwickelt.

## Abstract

The risk to the patient due to insufficient infection control is a growing problem for hospitals worldwide. Surgical site infections e.g. are in the focus of scientific investigations for a long time. The amount of such complications is estimated to be approx. 225,000 patients per year in Germany.<sup>[1]</sup>

There are several potential approaches for improvement of infection control measures in the immediate patient environment. Proper implementation of cleaning and disinfection for the clinics has always been the key to maintaining a high standard of infection control. However, the reduction of bioburden is not just limited to cleaning and disinfection measures. The selection of proper ventilation system in the operating room or the quality of OR-Staff clothing are other important factors impacting patient safety. Likewise novel and effective antimicrobial surface technologies for medical products and other equipment used close to the patient are another critical factor for the reduction of infection risks.

The research group hygiene and medical engineering at OTH Amberg-Weiden works with a variety of partners on new and innovative concepts for improving the current standards of infection control. Using microbiological analysis and particle measurements new or already established technologies and standards are studied, reviewed and potentially more effective and more efficient solutions are developed.

## Einleitung

Die Möglichkeit einer Infektion mit pathogenen Erregern über kontaminierte Oberflächen im klinischen Umfeld wurde bereits durch mehrere Studien beschrieben.<sup>[2-4]</sup> Die Gefahren nosokomialer Infektionen haben im Allgemeinen große Bedeutung bezüglich des postoperativen Genesungsverlaufs und der Krankenhaushygiene. Veröffentlichungen des Robert Koch Instituts (RKI) zufolge erkrankten in Deutschland im Jahr 2008 ca. 225.000 Patienten an postoperativen Wundinfektionen.<sup>[1]</sup> Die bakterielle und virale Besiedlung von Oberflächen unterschiedlichster Art stellt hier eine potenzielle Infektionsquelle dar.<sup>[5]</sup> Moderne Hybrid-OPs stellen dabei aufgrund der hohen Anzahl medizintechnischer Geräte ein besonderes Gefährdungspotenzial dar.

Der „Goldstandard“ zur Etablierung und Aufrechterhaltung einer guten Hygiene im Krankenhaus ist eine funktionierende und effiziente Reinigung und Desinfektion (R&D) von Klinikräumen und medizintechnischen Geräten. Jedoch zeigt sich bei genauerer Betrachtung, dass derzeit gängige R&D-Konzepte oftmals Verbesserungspotenzial beinhalten. Vor allem durch die steigende Zahl medizintechnischer Produkte im Operationssaal (Hybrid-OP) müssen die Reinigungs- und Desinfektionsmaßnahmen angepasst und auf die erhöhten Anforderungen adaptiert werden.

Ebenso wie die Reinigung und Desinfektion ist auch die Reduzierung der Keimlast mittels Raumluftechnischer Anlagen ein wichtiger Bestandteil der Krankenhaushygiene. Die Grundfrage, welches Lüftungssystem den effektivsten Nutzen bezüglich der Infektionsprävention bietet, wird jedoch von der KRINKO als ungelöstes Problem thematisiert. Ebenso zeigt sich, dass die Wahl der OP-Bekleidung einen messbaren Einfluss auf die Keimbelastung der Raumlufthaben kann.

Eine neuartige Hygienemaßnahme stellt die Beschichtung medizintechnischer Produkte mit antimikrobiellen Oberflächen dar. Diese verbessern die Effektivität der Reinigung und Desinfektion der Geräte, da diese per se bereits eine stark verringerte Keimbelastung aufweisen. Es stellt sich jedoch die Frage, inwieweit diese Beschichtungen im klinischen Alltag aufgrund der hohen Belastung durch verschiedenste Desinfektionsmittel beständig und wirksam sind.

Obwohl bereits weltweit in den Hygienekonzepten vieler Kliniken etabliert, zeigt sich bei oben genannten Ansätzen noch eine Vielzahl ungeklärter Fragen. Mittels mikrobiologischer Untersuchungsmethoden versucht die Arbeitsgruppe diese Punkte zu bearbeiten und effektivere und effizientere Lösungsansätze zu entwickeln.

## Untersuchungen zur Effektivität der Reinigungsprozesse im OP

Um eine erste Einschätzung der Reinigungs- und Desinfektionspläne verschiedener Kliniken zu erhalten, wurde an das OP-Personal im Hybrid-OP (OP-Pfleger, OTA, MFA, Kardiotechniker, MTRA) ein Fragebogen zur Bewertung des dort genutzten R&D-Protokolls ausgegeben. Hierbei wurden Ausrüstung und Qualifikation des Personals sowie die Durchführung der Reinigungs- und Desinfektionsmaßnahmen abgefragt. In einem zweiten Schritt wurde die Effektivität der derzeitigen R&D-Protokolle mikrobiologisch untersucht. Dafür wurden an jeweils identischen Stellen (C-Bogen, Monitore, Bedienelemente) Abklatschproben genommen und diese für 72 Stunden bei 35 °C inkubiert (Abbildung 1). Das Keimwachstum wurde anschließend dokumentiert und quantitativ ausgewertet. Zusätzlich wurde stichprobenartig bei einigen Keimen eine genauere Differenzierung mittels Vitek2 System durchgeführt, um eine Einschätzung über das Erregerpotenzial (Keim und Resistenzmuster) geben zu können. Dies wurde anschließend nach Durchführung eines angepassten R&D-Protokolls wiederholt, um die Effektivität der Verbesserungen zu evaluieren.

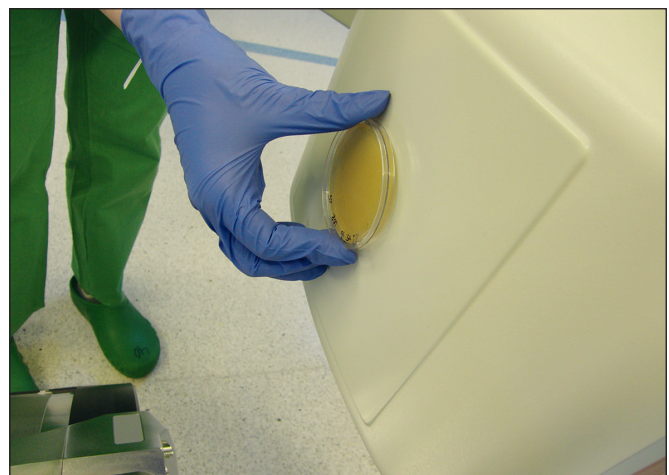


Abbildung 1: Probennahme an medizintechnischen Geräten mittels Abklatschverfahren

Die Auswertung der Fragebögen ergab große Unterschiede in den Reinigungs- und Desinfektionsvorgängen der einzelnen Kliniken. So variieren der Gebrauch von persönlicher Schutzausrüstung (z. B. Kittel, siehe Abbildung 2) sowie die Pläne für die gesonderte Arbeitsanweisung (AA) für die Reinigung im Hybrid-OP bei den mitwirkenden Kliniken (siehe Abbildung 3).



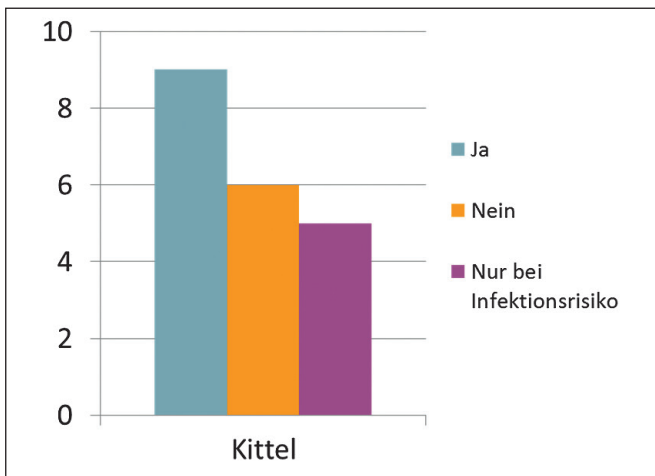


Abbildung 2: Nutzung von Kitteln bei R&D-Vorgängen.

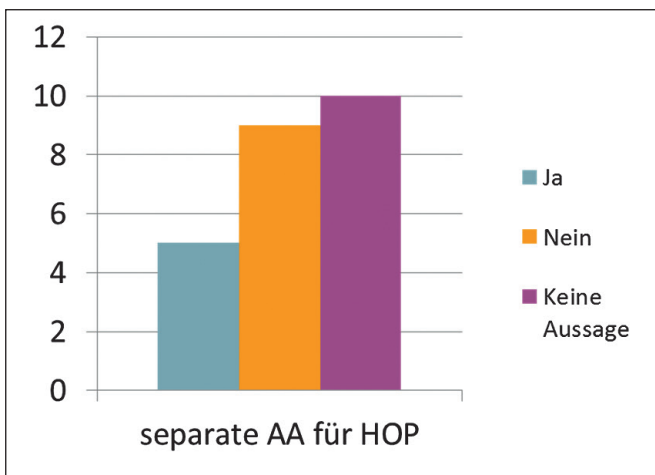


Abbildung 3: Separate Arbeitsanweisung (AA) für die Reinigung im Hybrid-OP

Die Überprüfung der mikrobiologischen Kontamination zeigte anschließend ebenfalls große Unterschiede bei den getesteten Kliniken auf. Teilweise konnte nach Durchführung der R&D-Maßnahmen noch 86 Prozent (96 KBE ges.) der vor der Reinigung gemessenen Keimlast nachgewiesen werden (111 KBE ges.). Nach Anwendung des verbesserten R&D-Protokolls lag der Wert nur noch bei 11 Prozent (282 KBE ges. vor R&D zu 30 KBE ges. nach R&D).

Das Keimspektrum der getesteten Erreger zeigte überwiegend grampositive Bakterien. Größtenteils handelte es sich hierbei um Haut- und Umweltkeime. In einigen wenigen Fällen konnten jedoch auch potenziell pathogene gramnegative Erreger isoliert werden.

Dies zeigt, dass die Verbesserung der Reinigungs- und Desinfektionsabläufe, im Hybrid-OP einen wichtigen Faktor bei der Bekämpfung postoperativer Infektionen darstellt. Weitere Untersuchungen im Bereich mikrobiologischer Belastungsreduktion mittels geeigneter R&D-Maßnahmen sollten durchgeführt werden, um das Thema weiter untersuchen und noch bessere Konzepte erarbeiten zu können.

## Einflussfaktoren mikrobiologischer Luftbelastung in Operationsräumen

Raumlufttechnische Anlagen sind wichtige Bestandteile der Krankenhaushygiene, die aus dem heutigen Operationsalltag nicht mehr wegzudenken sind. Die Grundfrage, welches Lüftungssystem letztendlich am effektivsten zur Reduktion der Keimbelastung in der Raumluft beiträgt wird jedoch kontrovers diskutiert. Während in Räumen der Klasse Ia Lüftungssysteme mit turbulenzarmer Verdrängungsströmung (TAV) (großes Deckenfeld) installiert werden, wird in Ib-Räumen der Patientenschutz über eine eingeschränkte Verdrängungsströmung (kleines Deckenfeld) sichergestellt. Zudem ist mit dem temperaturgesteuerten laminaren Luftströmungssystem (TAF) ein drittes alternatives Lüftungssystem denkbar (Tabelle 1).

Tabelle 1: Einteilung der Raumklassen nach DIN 1946-4

Raumklassifizierung	Konzepte	Beispiele für Operationen
OP-Räume Ia	Turbulenzarme Verdrängungsströmung (TAV)	Neurochirurgische Eingriffe, Tumoroperationen, Transplantationen usw.
	Temperaturgesteuerte laminare Luftströmung (TAF)	
OP-Räume Ib	Turbulente Mischlüftung (TML) oder eingeschränkte Verdrängungsströmung	Endoskopische Untersuchungen, invasive Angiografie, Einsetzen kleiner Stent usw.

Ziel dieser Untersuchung ist in erster Linie die Überprüfung der Effektivität dieser Lüftungstechniken anhand der gemessenen Anzahl an koloniebildenden Einheiten KBE/m<sup>3</sup> in der Luft. Dabei sollen die Ergebnisse der unterschiedlichen Lüftungssysteme miteinander verglichen und Empfehlungen herausgearbeitet werden. Das Potenzial der Keimreduktion durch das Lüftungssystem wurde durch Luftkeimmessungen nach dem schwedischen Versuchsstandard (SIS-TS 39:2012) überprüft. Es wurde eine aktive Luftkeimsammlung mit einem Schlitzsammler (Klotz FH6) als Messmethode verwendet, wobei eine normierte Luftmenge von 1 m<sup>3</sup> bei einer Durchsatzgeschwindigkeit von 100 ml/min gemessen wurde. Zur Auswertung und Beurteilung der luftgetragenen Mikroorganismen wurde eine Keimauszählung durchgeführt und die koloniebildenden Einheiten (Colony Forming Units) pro Kubikmeter Raumluft bestimmt (CFU/m<sup>3</sup>).

Bei Betrachtung der verschiedenen Lüftungssysteme lassen sich anhand der Ergebnisse deutliche Unterschiede bezüglich der mikrobiologischen Luftbelastung verzeichnen (Abbildung 4).

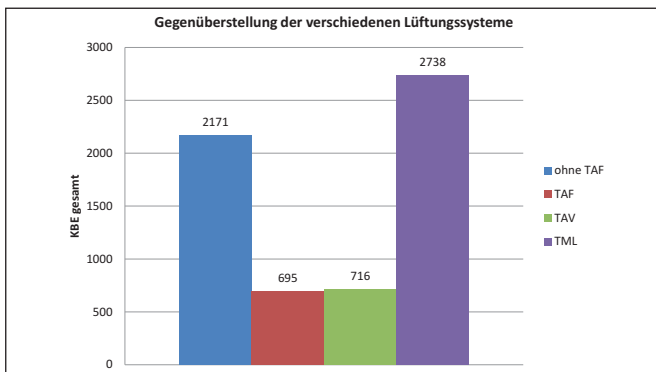


Abbildung 4: Gegenüberstellung der aktiv gemessenen Keime bei unterschiedlichen Lüftungssystemen

Die ausgeschaltete TAF-Lüftung zeigt eine knapp 3-fach höhere Keimbelastung als bei eingeschalteter temperaturgesteuerter Lüftung und turbulenzarmer Verdrängungsströmung. Somit kann durch effektiven Einsatz eines Lüftungssystems das KBE-Niveau eindeutig verringert werden. Dennoch wird bei eingeschränkter TAV-Lüftung mit kleiner Lüftungsdecke im Gegensatz zur ausgeschalteten Lüftung ein Anstieg an koloniebildenden Einheiten um 567 registriert. Der Vergleich zwischen den Lüftungstechniken TAF und TAV macht keinen erheblichen Unterschied. Insgesamt schneidet die kleine TAV-Decken-Lüftungstechnik in Bezug auf die mikrobiologische Luftbelastung und deren Effektivität am schlechtesten ab.

Neben der Frage nach dem effektivsten Lüftungssystem steht die Frage nach der richtigen OP-Bereichskleidung ebenfalls seit einiger Zeit im Blickfeld der Öffentlichkeit. In dieser Arbeit rücken zwei Bekleidungsvarianten in den Fokus der Untersuchung. Während eine dieser OP-Textilien in deutschen Krankenhäusern eingesetzt wird, entspricht die andere Variante dem schwedischen Standard. Es wurde geprüft, ob und inwieweit die Art und Beschaffenheit der OP-Bekleidung als möglicher Risikofaktor Einfluss auf die mikrobiologische Luftbelastung nimmt. Im Vergleich dazu sollten weitere Versuchsdurchführungen Aufschluss geben, wie sich das KBE-Niveau verändert, wenn zusätzlich zu der OP-Bekleidung sterile OP-Kittel zum Einsatz kommen (Abbildung 5).



Abbildung 5: Getestete OP-Bekleidungsvarianten

Insgesamt weist die schwedische Einmal-OP-Kleidung im Vergleich zur deutschen OP-Bekleidung bessere Ergebnisse auf. Die Gesamtgegenüberstellung beider Bekleidungsvarianten lässt einen großen Unterschied erkennen (Abbildung 6).

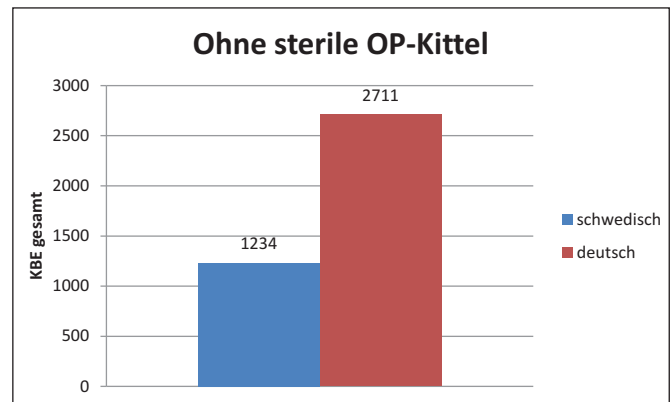


Abbildung 6: Gegenüberstellung der aktiv gesammelten Keime unter Verwendung von deutscher und schwedischer OP-Bekleidung ohne sterile OP-Kittel

Ähnliche Ergebnisse stellen auch die Versuche unter Einsatz von sterilen OP-Kitteln dar. Auch hier weist die aus Schweden kommende OP-Bekleidung wesentlich bessere Werte auf. Mittels dieser Hygienemaßnahme reduziert sich die Gesamtkeimanzahl um 714 KBE/m<sup>3</sup>. Das entspricht einer Erregerverminderung um etwa die Hälfte. Auch mit der in deutschen Kliniken zum Einsatz kommenden OP-Bekleidung lässt sich eine Keimreduzierung verzeichnen. Dabei zeigt sich eine Abnahme um 856 KBE/m<sup>3</sup> (Abbildung 7).

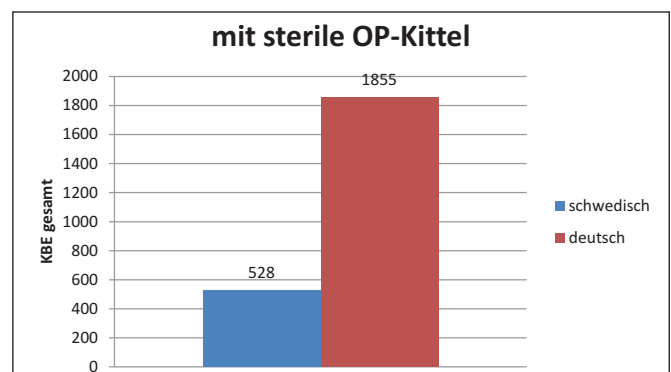


Abbildung 7: Gegenüberstellung der aktiv gesammelten Keime unter Verwendung von deutscher und schwedischer OP-Bekleidung mit sterilen OP-Kitteln

Anhand dieser dargestellten Ergebnisse lässt sich eine deutliche Tendenz erkennen. Die Einweg-OP-Kleidung aus Schweden liefert sowohl mit als auch ohne sterile OP-Kittel effizientere Ergebnisse. Dabei bietet diese Variante im Vergleich zur deutschen Mehrwegbekleidung eine bessere Schutzbarriere für Patient und Personal. Durch die vorhandenen Arm- und Beinbündchen wird die Partikelfreisetzung stärker unterbunden und der Keimgehalt in der Luft verringert. Die wirtschaftlichen Auswirkungen solcher Maßnahmen werden aktuell untersucht.

## Untersuchungen zur Desinfektionsbeständigkeit antimikrobieller Beschichtungen

Im Rahmen unserer Versuchsreihen wurden die antimikrobielle Aktivität sowie die Effizienz antimikrobieller Beschichtungen mittels Wirksamkeitsstudien untersucht. Die Analyse der antimikrobiellen Aktivität erfolgte in Anlehnung an die JIS Z 2801, der gängigen Norm für solche Prüfungen. Hierbei werden Testmuster mit einer bestimmten Konzentration an Bakterien kontaminiert und nach 24 Stunden die verbliebenen Keime auf der Oberfläche (CFU) bestimmt. Durch den Vergleich mit einer antimikrobiell unwirksamen Oberfläche lässt sich somit die Effektivität berechnen (siehe Abbildung 8).

Die antimikrobielle Wirksamkeit wird berechnet nach der Formel: **Wirksamkeit =  $\log(A/B)$**   
 A = Mittelwert der KBE/ml der Platten ohne antimikrobielle Beschichtung  
 B = Mittelwert der KBE/ml der Platten mit antimikrobieller Beschichtung

antibakterielle Aktivität	Keimreduktion (log KBE)
keine	< 0,5
leicht	≥ 0,5 bis 1
signifikant	≥ 1 bis < 3
stark	≥ 3

Abbildung 8: Berechnungsgrundlage zur Bewertung der antimikrobiellen Aktivität

Medizintechnische Produkte sind im klinischen Alltag einer starken Beanspruchung durch wiederholte Reinigung und Desinfektion ausgesetzt. Aus diesem Grund sollte mittels Wirksamkeitstest überprüft werden, ob unterschiedliche Desinfektionsmittel bzw. Sterilisationsmethoden einen negativen Einfluss auf die Haltbarkeit und die Wirksamkeit der antimikrobiellen Beschichtung dieser Produkte haben. Für unsere Untersuchungen wurde die Desinfektion der beschichteten Testmuster mit 70 Prozent Ethanol bzw. mit 0,5 Prozent Incidin sowie die Autoklavierung und die Bestrahlung mit UV-Licht als Methoden ausgewählt. Die Testkörper wurden anschließend zusammen mit einer unbeschichteten Negativkontrolle sowie einer unbehandelten Positivkontrolle im JIS-Test untersucht und die antimikrobielle Wirksamkeit verglichen (Abbildung 9).

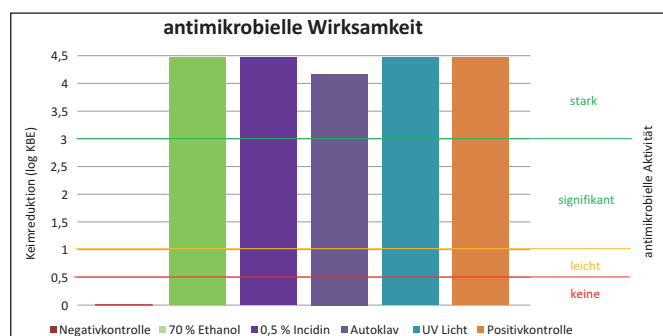


Abbildung 9: Vergleich der antimikrobiellen Wirksamkeit der Testmuster nach unterschiedlichen Desinfektionsmethoden

Unsere Ergebnisse zur antimikrobiellen Wirksamkeit zeigen keinen negativen Einfluss unterschiedlicher Desinfektionsmethoden auf die Beschichtungen. Während die Negativkontrolle wie erwartet keine antimikrobielle Aktivität aufweist, liegen die beschichteten Testmuster alle im Bereich der starken Wirksamkeit (log KBE 4,2 – log KBE 4,5) der unbeschichteten Positivkontrolle (log KBE 4,5). Länger andauernde Belastungstest, sollten jedoch durchgeführt werden, um eine realistische Beanspruchung der medizintechnischen Geräte in der klinischen Verwendung simulieren zu können. Dies wird Fokus weiterer Arbeiten sein.

## Fazit

Im Rahmen unserer Untersuchungen konnten große Unterschiede im Konzept und in der Umsetzung der Reinigungs- und Desinfektionsprotokolle für die OP-Säle der kooperierenden Kliniken festgestellt werden. Auch bei der mikrobiologischen Überprüfung der Effektivität dieser Maßnahmen zeigte sich eine starke Divergenz. Insgesamt war durch Anpassung und Verbesserung der Reinigungs- und Desinfektionskonzepte die Effizienz bezüglich mikrobiologischer Restkontamination bei allen beteiligten Kliniken erhöht.

Trotz weiterer notwendiger Testreihen ist anzunehmen, dass sowohl die Art der OP-Bekleidung als auch die unterschiedlichen Lüftungssysteme einen potenziellen Einfluss auf die mikrobiologische Luftbelastung in Operationsräumen haben und vermutlich in Hinblick auf das Risiko, an einer postoperativen Wundinfektionen zu erkranken, eine große Rolle spielen.

Ein negativer Einfluss unterschiedlicher Desinfektionsmittel und Sterilisationsmethoden auf die Wirksamkeit antimikrobieller Beschichtungen konnte nicht gezeigt werden. Dies ist ein erster Hinweis, dass solche Beschichtungen durchaus im klinischen Alltag Verwendung finden können.

Dies alles sind vielversprechende Ansätze zur Reduzierung der mikrobiologischen Belastung und damit zur Verbesserung der Patientensicherheit durch medizintechnische Maßnahmen. Weitere Forschungsprojekte zum Thema sollten durchgeführt werden, um weitere innovative Konzepte zu entwickeln.

## Referenzen:

- [1] Gastmeier P.; Geffers C.: Nosokomiale Infektionen in Deutschland: Wie viele gibt es wirklich? Dtsch med Wochenschr: 133: 1111–1115 Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2008
- [2] Bures S, Fishbain JT, Uyehara CF, Parker JM, Berg BW. Computer keyboards and faucet handles as reservoirs of nosocomial pathogens in the intensive care unit. Am J Infect Control 2000;28:465–471. [PubMed: 11114617]
- [3] Noskin GA, Bednarz P, Suriano T, Reiner S, Peterson LR. Persistent contamination of fabric-covered furniture by vancomycin-resistant enterococci: implications for upholstery selection in hospitals. Am J Infect Control 2000;28:311–313. [PubMed: 10926709]
- [4] Zachary KC, Bayne PS, Morrison VJ, Ford DS, Silver LC, Hooper DC. Contamination of gowns, gloves, and stethoscopes with vancomycin-resistant enterococci. Infect Control Hosp Epidemiol 2001;22:560–564. [PubMed: 11732785]
- [5] Kramer A, Schwebke I, Kampf G. How long do nosocomial pathogens persist on inanimate surfaces? A systematic review. BMC Infect Dis. 2006;6:130. [PMID: 16914034]

## Kontakt:



**Dr. rer. nat. Sebastian Buhl**

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

se.buhl@oth-aw.de



**Sabine Hentschel, M. Sc.**

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



**Nicole Eschenbecher, B. Eng.**

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



**Carina Werner, B. Eng.**

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



**Laura Walberer, B. Eng.**

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



**Prof. Dr. med. Clemens Bulitta**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen  
Studiengangsleiter und Studienfachberater  
im Studiengang Medizintechnik  
Leitung Institut für Medizintechnik (IfMZ)  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

c.bulitta@oth-aw.de

# Wie genau sind additive Verfahren?

## Ein Qualitätsprüfteil zur Beurteilung der Form- und Lageabweichungen von „3D-Druckern“

### Einleitung

Die Druckqualität verschiedener additiver Verfahren zu vergleichen, fällt aufgrund der unterschiedlich zugrunde liegenden physikalischen Prinzipien und vieler auf dem Markt verfügbarer Geräte schwer. Bevor das volle Potenzial des 3D-Drucks erkannt und umgesetzt werden kann, stellt sich oftmals die Frage nach einem Qualitätsvergleich bei Standardgeometrien. Zu diesem Zwecke wurde im Projekt „Additive Fertigung“ in Zusammenarbeit mit der Siemens AG in Amberg an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden ein universelles Prüfteil entwickelt, dessen Qualitätsauswertung dem Anwender eine Übersicht zu den Potenzialen eines additiven Fertigungsverfahrens aufzeigt. Die wesentlichen Anforderungen dieses Teiles waren sowohl das Kriterium der Kompaktheit (50,5 mm Kantenlänge und 60 cm<sup>3</sup> Volumen) als auch die Möglichkeit der einfachen Beurteilung von optischen und maßlichen Merkmalen. Des Weiteren sollte das Qualitätsprüfteil eine Ablesung von thermischen Verzug und Schwindung ermöglichen. Neben einer einfachen Zugänglichkeit der zu beurteilenden Geometrien wurden 12 Qualitätsmerkmale designt, um typische druckerspezifische Schwierigkeiten transparent zu machen. Siehe dazu auch Abbildung 1.

### Introduction

Due to different underlying physical principles and many on the market available devices it's difficult to compare the print quality of different additive methods. In order to identify and implement the full potential of 3D printing the user is often confronted with the question of a quality index of standard geometries. For this purpose a universal quality test device was developed as a part of the project „Additive Manufacturing“ in cooperation with Siemens AG at the Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden. The quality evaluation gives the user an overview of the potential of an additive manufacturing process. The essential requirements of this part were both the criterion of compactness (50,5 mm square and 60 cm<sup>3</sup> volume) and the possibility of easy assessment of optical and dimensional characteristics. Furthermore the quality test device should allow evaluate the thermal warpage and shrinkage. In addition to easy accessibility of the assessed geometries 12 quality features have been designed to make typical printer-specific problems transparent. See also Figure 1.

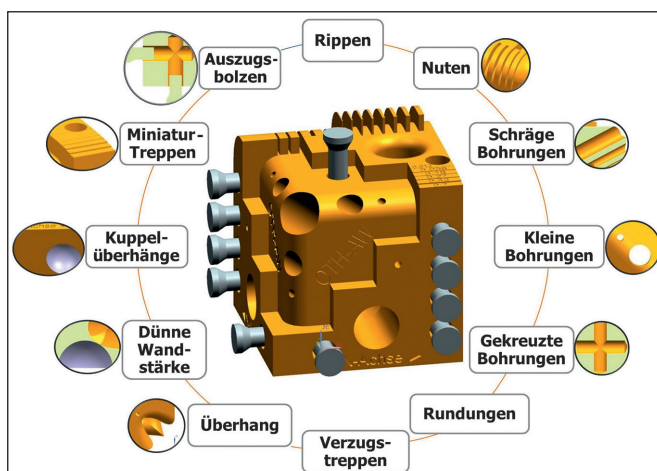


Abbildung 1: Qualitätsprüfteil der OTH Amberg-Weiden mit 12 Merkmalen zur Überprüfung von additiven Verfahren

## Merkmale des Qualitätsprüfteiles

Aus diesem Grund enthält das Qualitätsprüfteil Überhänge und Bohrungen, die in bestimmten additiven Verfahren nur mit Stützstrukturen hergestellt werden können. An der Qualität dieser Merkmale zeigt sich, wie die Überhänge von einer Slicer-Software unterstützt werden, aber auch orientierungs- und materialabhängige Verformungen werden sichtbar. Als Hauptmerkmal enthält das Qualitätsprüfteil Treppenstufen, die pro Raumachse doppelt ausgeführt sind. Die maßlichen Abweichungen der Stufenhöhe und -breite geben Aufschluss über den Verzug des Bauteils. Sind die Abweichungen der doppelt ausgeführten Stufen in einer Richtung identisch, so ist eine „Kalibrierung“ des Bauteils oder des Druckers vor dem Druck möglich. Neben den großen Treppen enthält das Qualitätsprüfteil Miniaturtreppen. Diese geben eine wichtige Auskunft über die Schichtauflösung des jeweiligen generativen Verfahrens und wie die Software diese umsetzt. Die Abstufungen wurden so gewählt, dass diese zwischen den Standard-Schichtauflösungen gängiger 3D-Drucker liegen. Sind eine oder mehrere Miniaturstufen nicht am gedruckten Qualitätsprüfteil zu finden, so wurden diese von der Software nicht erkannt oder liegen außerhalb der möglichen Auflösung der Drucker. Die Nuten und Lamellen an der Oberseite des Qualitätsprüfteils geben eine Übersicht der minimalen Strukturbreiten des additiven Verfahrens. Neben der Schichtauflösung in Z-Richtung geben die Nuten und Lamellen an der Oberseite des Qualitätsprüfteils eine Übersicht der minimal erreichbaren Strukturen in XY-Richtung des additiven Verfahrens. In den Ausprägungen der Lamellen zeigt sich, welche Wandstärken möglich sind, während die Nuten Auskunft über Materialverklebungen in engen Kanälen geben. Im unteren Bereich des Qualitätsprüfteils ist die Oberfläche eines Kuppelüberhangs 6 µm von der Oberfläche einer Bohrung entfernt. Durch diese fast punktförmige Berührung beider Oberflächen ergibt sich je nach additiven Verfahren eine einzelne dünne Schicht des Baumaterials. Dadurch ist die Porosität des Materials optisch prüfbar, was insbesondere bei pulverbasierenden Verfahren einen Zusatznutzen darstellt.

Mittels additiver Fertigungsverfahren können auch bewegliche Baugruppen in einem Herstellungsprozess realisiert werden. Dies ist beispielsweise interessant für Bauteile, die über integrierte Funktion wie Scharniere oder Linearführungen verfügen. Dazu enthält das Qualitätsprüfteil Auszugsbolzen, mit deren Hilfe druckerabhängig herausgefunden werden kann, welche Spaltmaße noch zu einer beweglichen Baugruppe führen können. Wenn sich die Bolzen über eine Auszugsvorrichtung noch bewegen lassen, dann ist das gegebene Spaltmaß ein Richtwert für die Gestaltung von beweglichen Teilen. In Summe enthält das Qualitätsprüfteil 12 verschiedene Merkmale, die optisch und taktil erfasst werden können.

## Messtechnik

Für die Vergleichbarkeit der additiven Verfahren wird eine messtechnische Auswertung der Qualitätsprüfteile notwendig. Diese geschieht im Messraum der OTH Amberg-Weiden. Ein Multisensorkoordinatenmessgerät der Firma Werth Messtechnik stellt durch optische und taktile Messungen die Qualität der Bauteile fest. Über einen schwenkbaren Tastkopf werden die Merkmale auf Form- und Lageabweichungen in den 6 Ebenen des Qualitätsprüfteils geprüft. Siehe Abbildung 2. Eine besondere Herausforderung spielt dabei die Zugänglichkeit aller Geometrien in einer Aufspannung. Diese muss sowohl den Antastkräften widerstehen als auch eine Wiederholgenauigkeit für eine Serienmessung bieten. Geometrische Merkmale, die in Z-Richtung zugänglich oder die für eine taktile Antastung zu filigran sind, werden von einem optischen Messsystem erfasst.

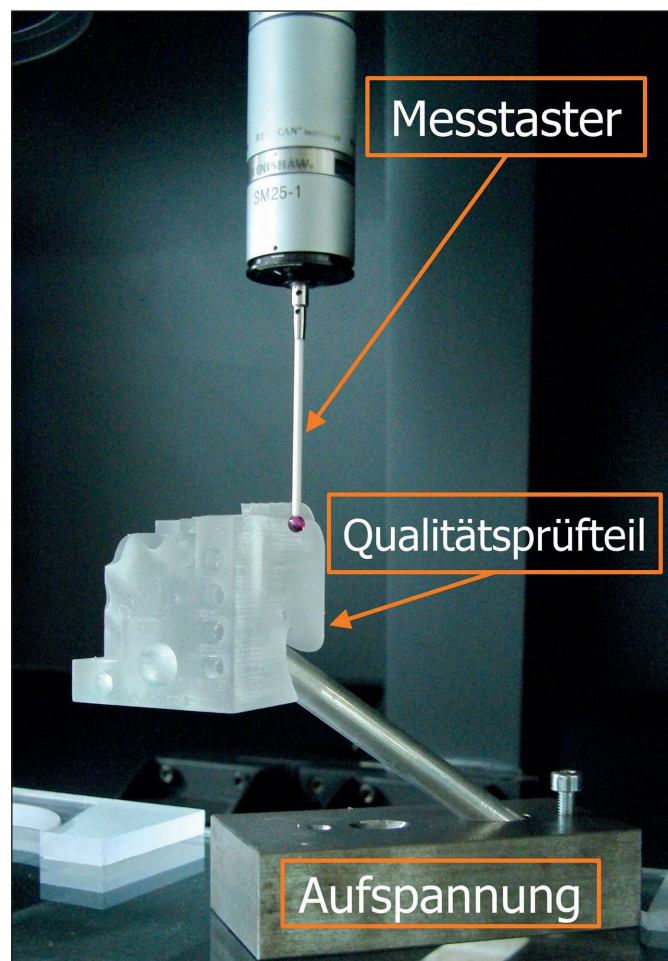


Abbildung 2: Die Merkmale des Qualitätsprüfteils werden auf dem Koordinatenmessgerät taktil und optisch erfasst

Neben der Überprüfung des Qualitätsprüfteils mit dem Koordinatenmessgerät findet noch eine flächige Messung des Bauteils mit einem Laserliniensensor statt. Dieser hat gegenüber dem Koordinatenmessgerät den Vorteil, viele Messpunkte innerhalb einer kurzen Zeit aufzunehmen. Dabei wird ein Laserliniensensor der Fa. Perceptron verwendet, der auf einem Infinite Gelenkarm der Fa. Romer sitzt. Mit einer maximalen Scan Rate von

458.400 Punkten/s können schnell von außen optisch zugängliche Punkte aufgenommen werden. Anschließend findet ein Soll-Ist-Vergleich mit dem CAD-Modell in Polyworks statt. Dadurch ergibt sich ein flächiger Eindruck über die Abweichungen des Qualitätsprüfteiles und Materialeinfallstellen werden sichtbar. Siehe dazu auch Abbildung 3.

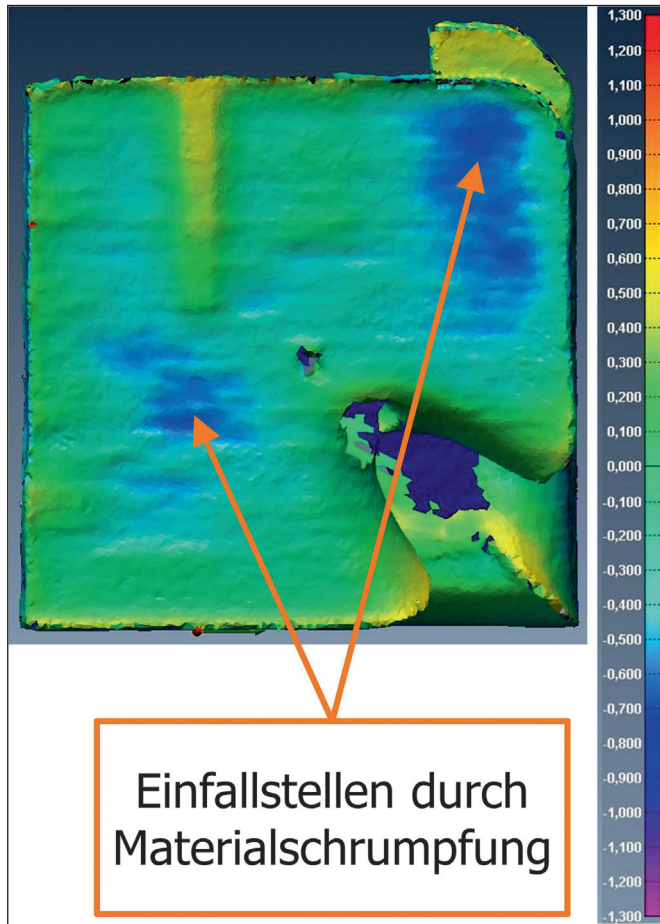


Abbildung 3: Der Soll-Ist Vergleich mit einem Laserscanner bringt eine schnelle Übersicht der flächigen Abweichungen

### Datenbank

Um einen schnellen Überblick der erreichbaren Abweichungen zu bekommen, werden alle Messwerte in eine übersichtliche Form gebracht und in eine Datenbank eingepflegt. Ergänzt mit bestehenden Materialkennwerten, verschafft dies Anwendern und Konstrukteuren eine Entscheidungshilfe bei der Auswahl geeigneter additiven Verfahren für ihr jeweiliges Produkt. Die Datenbank soll aufgebaut und im Spätherbst für interessierte Anwender in Form eines Abonnements freigeschaltet werden.

### Technologietransfer

Im Jahr 2014 wurde an der OTH-AW in Amberg ein regionales Innovationsnetzwerk Additive Manufacturing auf Initiative von Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Blöchl gegründet, das aktuell 12 Mitgliedsfirmen, die in unterschiedlichen Branchen aktiv sind, die Möglichkeit gibt, sich zu Innovationen und Fragen rund um die neue Technologie auszutauschen.

### Fazit

Die mithilfe des an der OTH-AW in Amberg entwickelten Qualitätsprüfteils messbaren Abweichungen und Unzulänglichkeiten unterschiedlicher additiver Fertigungsverfahren und am Markt befindlicher Geräte geben einen guten Überblick für interessierte Anwender, um den Stand der Technik einschätzen zu können. Dabei soll das Augenmerk nicht nur auf die erzielten Maßabweichungen gelegt werden, sondern vielmehr auch auf Wiederholgenauigkeit und Prozesssicherheit der Geräte. Regelmäßige Maßabweichungen lassen sich durch entsprechende Skalierungen des 3D-Modells vor dem Druck korrigieren oder aber der 3D-Drucker kann durch einen Eingriff in die Maschinendaten auf Basis der Messergebnisse „kalibriert“ werden. Dazu muss aber das Verhalten der unterschiedlichen generativen Verfahren bekannt sein. Die dokumentierten Ergebnisse werden in der im Aufbau befindlichen Datenbank abgelegt und geben interessierten Anwendern eine Orientierung, welches additive Verfahren und welches Gerät sich für eine konkrete Aufgabenstellung eignen.

---

**Projektpartner:**

Siemens AG, Amberg

**Fördergeber:**

**SIEMENS**  
*Ingenuity for life*

**Kontakt:**



**Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Blöchl**

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

w.bloechl@oth-aw.de



**Dipl.-Ing. (FH) Daniel Weiß**

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

da.weiss@oth-aw.de



## 1 Zusammenfassung

Im Rahmen der Studie wurde das Potenzial zur Gewichtsreduzierung bei gleicher Steifigkeit und der Steifigkeitserhöhung bei gleichem Gewicht eines C-Bogens für Röntgensysteme untersucht. Durch den Einsatz von Metall-Matrix-Verbundwerkstoffen oder einer Hybridkonstruktion aus Kohlefaserverbundwerkstoffen konnte die Zielsetzung der Studie erreicht werden.

## Abstract

Within the scope of a study the potential of a reduction of weight at a constant stiffness and an increase of stiffness at a constant weight of a C-Arm for X-Ray systems had been examined. By the use of metal-matrix-composites or a hybrid construction of carbon fiber compounds the goal of the study could be achieved.

## 2 Einleitung

„Leichtbau“, ein etablierter Begriff und Trend zugleich, ist eine interdisziplinäre Ingenieurwissenschaft aus unterschiedlichen Disziplinen, wie z. B. der Strukturmechanik, der Werkstoffwissenschaft, der Simulations- und Produktionstechnik. Um das Bauteilgewicht zukünftig weiterhin signifikant zu senken, wird es erforderlich sein, neue Wege beim Werkstoffeinsatz und in der Konstruktion zu gehen. Ökonomische Kriterien und technologische Randbedingungen setzen hierbei jedoch Grenzen. Ein erheblicher Mehraufwand in der Entwicklung und Strukturauslegung müssen den Kosten-Nutzen-Faktor rechtfertigen. Nur solche Ideen, die sich rentabel umsetzen lassen und finanzielle Vorteile ermöglichen, werden sich im marktwirtschaftlichen Wettbewerb durchsetzen. Hinter jeder Erneuerung oder Investition muss ein klares Ziel stehen, das über die Produktverbesserung hinausgeht. Die Aufwendungen müssen amortisiert und die Investitionsmittel für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten müssen gesichert sein, damit sich der Kreislauf von Verbesserung, Erneuerung und Absatz dauerhaft weiterentwickeln kann. Zielführend kann hierbei nur eine ganzheitliche Sichtweise sein. Auf der Suche nach dem idealen Werkstoff spielt nicht zuletzt der technologische Reifegrad die entscheidende Rolle. Mehrere Gesichtspunkte sollte man beim Einsatz neuer Konstruktionsprinzipien und Werkstoffe nicht vergessen:

- Qualitätssicherung während der Einsatzlebensdauer
- Einhaltung der Sicherheitsstandards
- Beibehaltung der zulässigen Verformung
- Ermittlung von optimierten Spannungsverläufen

Eine verbesserte Simulationstechnik gilt als unerlässlich bei der Klärung dieser Fragestellungen, führt aber wiederum zu neuen Herausforderungen in den Bereichen der

- Ermüdungsfestigkeit
- Rissphänomene
- Strukturzuverlässigkeit

Leichtbauingenieure sehen sich mit der Herausforderung konfrontiert, vielfältige Lösungen zu finden, wobei sich immer neue technische Fragestellungen ergeben. Zusätzlich dringen die Recyclinganforderungen in den Fokus der Erneuerungsbestrebungen.

Herstell- und Bearbeitungsprozess, Maßhaltigkeit, Oberflächenbeschaffenheit, verträgliche Wärmeausdehnungen sowie Konformität für den Einsatz in der Medizintechnik sind weitere nennenswerte Faktoren, über die sich der Entwickler Gedanken machen muss. Innovative Denkansätze sind außerdem vonnöten, wenn neuartige und verbesserte Werkstoffe gefügt werden sollen. Die Fügeverfahren fordern dementsprechend die Flexibilität und Kreativität des Entwicklers. Es dürfen z. B. neuartige

Verbindungstechnologien keine neuartigen Schwachstellen generieren. Als Verbindungstechnologien kommen dominierend Schweißen, Kleben, Löten, Schrauben, Nieten, Stanzen und Clinchen zum Einsatz.

Vom Speziellen bis zum Allgemeinen kann gesagt werden, dass der Leichtbauentwickler die Funktionalität, die Strukturmechanik, das Stabilitäts- und Schwingungsverhalten vom Einzelteil bis zur Gesamtkonstruktion kennen muss, um effektiv tätig werden zu können. Eine beanspruchungsgerechte Auslegung ist nur möglich, wenn entsprechende Detailkenntnisse vorhanden sind und mit der Fähigkeit gepaart werden, sie in eine holistische Sichtweise, von der Idee bis zum Gesamtsystem, zu integrieren.

### Potenziale im Leichtbau

#### Werkstoffleichtbau

Im Werkstoffleichtbau geht es darum, das geringere Gewicht eines Bauteils durch den Einsatz von anderen Werkstoffen zu erzielen. Dies kann durch Einsatz von Leichtmetallen, wie Aluminium, Titan und Magnesium und dessen Legierungen, realisiert werden; aber auch durch den Einsatz von aramid-, glas- und kohlefaserverstärkten Kunststoffen oder durch die Verwendung der Metal-Matrix-Composites (MMC). Je nach Anwendung und Belastung der Bauteile sind spezifische Gütekennzahlen der Werkstoffe für deren Auswahl von großer Bedeutung.

#### Formleichtbau

Durch die konstruktiven Geometrieänderungen wird der Formleichtbau umgesetzt. Dabei wird an den wenig belasteten oder gar unbelasteten Stellen Material eingespart bzw. komplett weggelassen. An den belasteten Stellen hingegen werden geometrische Versteifungen oder zusätzliches Material angebracht. Dies ist allerdings nur möglich, wenn genügend Freiheitsgrade bei der Gestaltung der Geometrie vorhanden sind. Oft sind Form- und Werkstoffleichtbau miteinander verbunden und können nur im Zusammenspiel angewendet werden.

#### Fertigungsleichtbau

Neben dem Form- und Werkstoffleichtbau gewinnt auch der Fertigungsleichtbau bei der Reduzierung des Baugewichts zunehmend an Bedeutung. Die Hauptaufgabe des Fertigungsleichtbaus ist es, durch geeignete Fertigungs-, Herstellungs- und Montageprozesse Gewichtseinsparungen an wenig beanspruchten Bereichen und Steifigkeitserhöhungen in den hoch beanspruchten Bereichen zu realisieren. Diese Leichtbaustrategie wird aber selten einzeln betrachtet, vielmehr assoziiert es im Zusammenspiel mit Form- und Werkstoffleichtbau.

#### Differenzialbauweise

Die Differenzialbauweise besteht aus mehreren Einzelteilen, die punktuell miteinander verbunden sind. Zum Beispiel werden Blechprofile durch Nieten, Bolzen, Klebeflächen oder Schweißnähte zusammengehalten.

Die Differenzialbauweise ist die klassische Verbindungsmethode im Blechleichtbau, die durch ein Überlappen der Einzelteile die Fügestellen schafft. Die Überlappungen bringen allerdings unnötiges Gewicht mit sich und sind daher nicht im eigentlichen Sinne des Leichtbaus. Die Kerbwirkung der Verbindungslöcher und deren Korrosionsanfälligkeit sind weitere Schwierigkeiten dieser Bauweise. Die Überlappungen sind aber auch reparaturfreundlich und von Vorteil für eine Materialtrennung beim späteren Recycling. Außerdem weisen sie gute Fail-Save-Qualitäten auf, da Nietlöcher oder Verbindungsstellen als Rissstopper wirken. Höhere Montagekosten der Fertigung stehen der Option gegenüber, unterschiedliche Werkstoffe miteinander verbinden zu können.

#### Integralbauweise

Mit der Integralbauweise wird das Prinzip der Minimierung von Einzelteilen angestrebt. Diese ist eine Kompaktbauweise mit der Zielsetzung, „alles aus einem Stück“ herzustellen. Die Bauteile sind komplex und werden funktionsübergreifend gefertigt, ohne unnötige Fügestellen aufzuweisen. Diese Methode ist ideal, um ein Maximum an Gewicht einzusparen.

#### Verbund- und Hybridbauweise

Verbundbauweise bedeutet, dass unterschiedliche Materialien fest miteinander verbunden sind und wie ein einziger Werkstoff weiterverarbeitet werden. Faserverbunde, wie GFK oder CFK, sind typische Verbundbauweisen. Zudem kommen Verbindungen aus Aluminium oder Stahl, gepaart mit Faserverbundwerkstoffen, die sich zusehends etablieren.

#### Bionik

Bei der Struktur- und Konstruktionsbionik werden nützliche Strukturen und Mechanismen aus der Natur in den technischen Bereich übernommen. Ein typisches, weit verbreitetes Beispiel einer Kopie aus der Natur ist in vielen Sandwichstrukturen (Honigwabenstruktur) zu finden. Sandwichstrukturen bestehen in der Technik aus einer strukturierten weniger dichten Mittelschicht und einer dichten Außenschicht. Eine weit verbreitete Art biologischen Leichtbaus ist der menschliche Knochen, bestehend aus einer schwammartigen inneren Knochenstruktur, umgeben von einer dichten und kompakten äußeren Schale.

## 3 Ausgangssituation

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde das Potenzial zur Gewichtsreduzierung bei gleicher Steifigkeit des C-Bogenprofils untersucht.

Zusätzlich soll eine Steifigkeitserhöhung bei gleichem bzw. leicht erhöhtem Gewicht des C-Bogens untersucht werden sowie die Übertragung der theoretischen und praktischen Möglichkeiten des Leichtbaus unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Leichtbaustrategien.

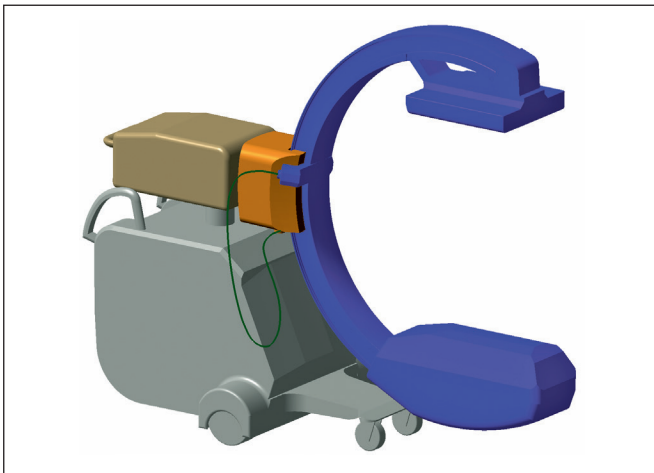


Abbildung 1: C-Bogenprofil (violett)

#### 4 Untersuchung des C-Bogenprofils von Röntgensystemen

Bei der Änderung der Geometrie dürfen bestimmte Parameter nicht verändert werden.

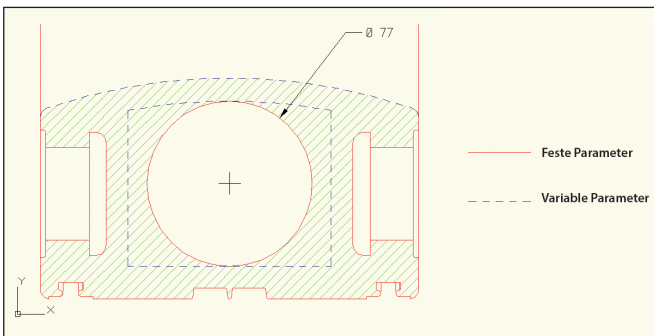


Abbildung 2: Profil zur Leichtbauoptimierung

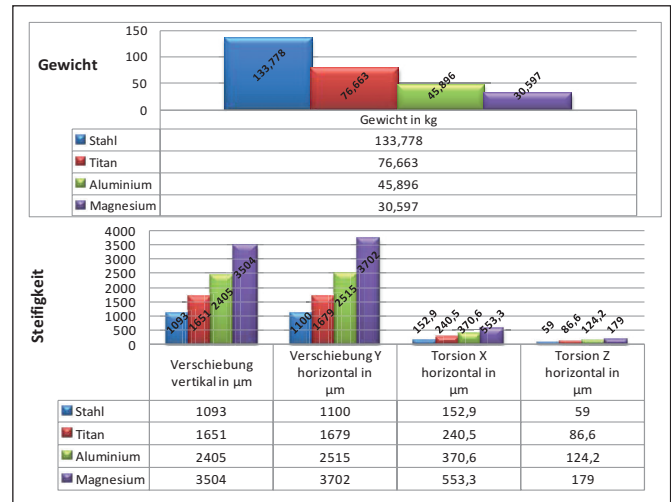
Im Inneren des Profils muss immer ein Durchbruch von einem Mindestdurchmesser 77 mm für weitere Bauelemente vorhanden sein. Die Geometrie der in Abbildung 2 rot dargestellten Außenkonturen darf nicht verändert werden. Diese erfüllen wichtige Funktionen in der Gesamtbaugruppe. Die Konturen, die als blau gestrichelte Linien abgebildet sind, dürfen überschritten und beliebig verändert werden.

#### Werkstoffsubstitution

Das primäre Ziel hierbei liegt darin, das Verhalten der gängigsten metallischen Leichtbauwerkstoffe bei absolut gleicher Geometrie und gleichem Volumen des Profils zu demonstrieren.

Nachfolgend sind die Finite Elemente Ergebnisse für unterschiedliche Werkstoffe dargestellt.

Tabelle 1: Gegenüberstellung des Gewichts und der Steifigkeit durch den Einsatz unterschiedlicher Werkstoffe



#### Konstruktive Modifikation

Das Ziel des konstruktiven Leichtbaus ist die Erhöhung des Flächenträgheitsmomentes bzw. des Widerstandsmomentes durch konstruktive Maßnahmen.

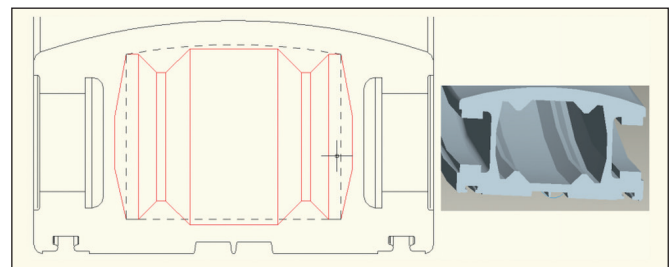
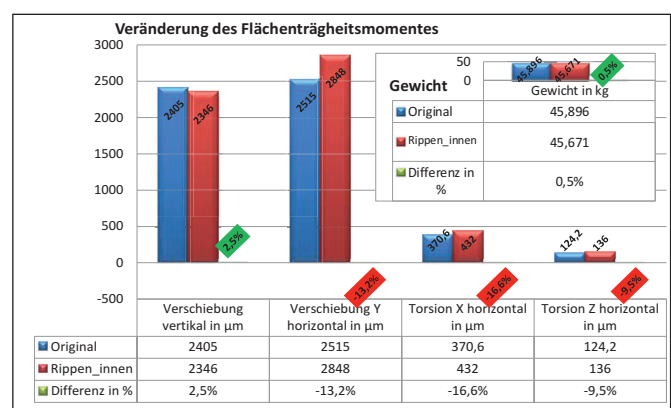


Abbildung 3: Querschnittsänderung mit der Integration von Rippenstrukturen

Tabelle 2: Vergleich der Originalausführung mit dem modifizierten Profil



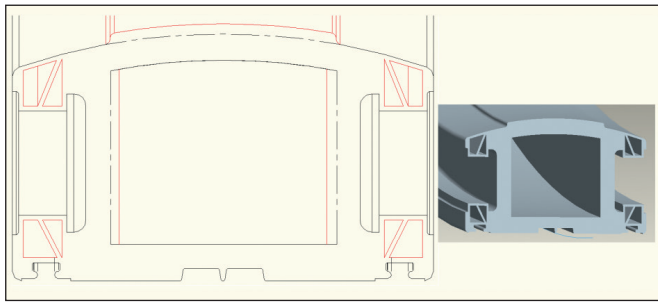
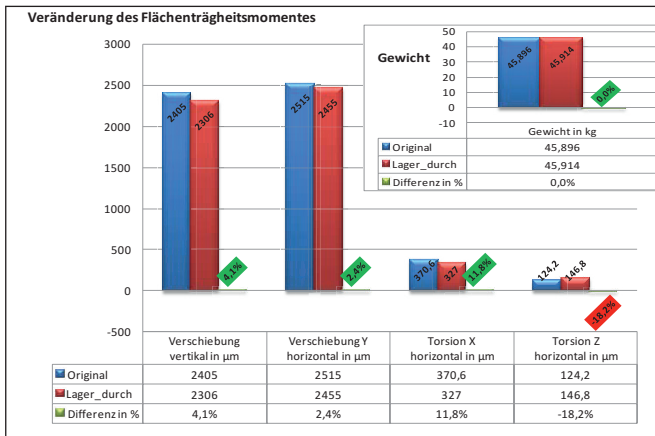


Abbildung 4: Modifizierung der Führungsbereiche

Tabelle 3: Vergleich der Originalausführung mit dem modifizierten Profil



## 5 Empfehlungen

Das Ziel der Steifigkeitserhöhung bei gleichem Gewicht bzw. Gewichtsreduzierung bei gleicher Steifigkeit lässt sich durch die einfache Werkstoffsubstitution nicht erreichen.

Durch die komplexen Belastungen, resultierend aus der senkrechten und waagerechten Stellung des Profils, lassen sich durch Änderungen am Flächenträgheitsmoment des gesamten Querschnitts nur sehr kleine Verbesserungen erreichen.

Die Kohlenstofffasern sind stark anisotrop. Das Profil wird sowohl in der senkrechten als auch in der waagerechten Stellung belastet und erfährt somit auch Torsionskräfte. Dadurch kann das unidirektional verlegte CFK nur als Verstärkung eines anderen Materials und nicht als Hauptkörper eingesetzt werden. Durch den Einsatz eines multidirektional verlegten Fasergeleges ist es möglich, das Profil fast ausschließlich aus CFK zu bauen.

## 6 Zusammenfassung

Das größte Potenzial weist ein stranggepresstes Profil aus einem Metall-Matrix-Verbundwerkstoff auf.

Das interessanteste Potenzial infolge der Verfügbarkeit weisen sprühkompaktierte Aluminiumlegierungen mit einer Dichte  $\rho \leq 2,7 \text{ kg/dm}^3$  und einem E-Modul bis 110 GPa auf.

Das drittgrößte Potenzial weist ein Profil auf, das dominierend aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff hergestellt wird und lokal mit Stahlstreifen verstärkt wird.

### Hybridausführung

In dem Nachfolgenden wird überwiegend das Potenzial einer Hybridbauweise aus verschiedenen Werkstoffen untersucht.

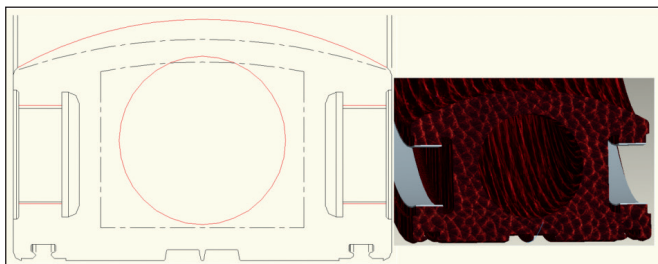
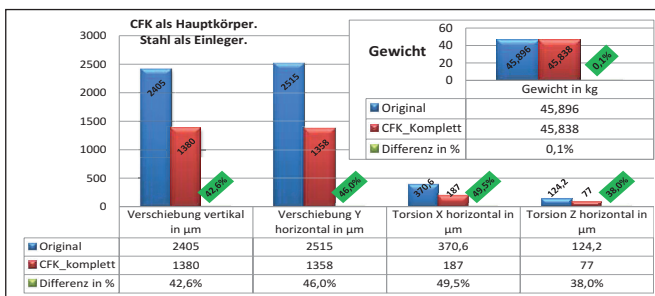


Abbildung 5: Einsatz von CFK mit Stahleinleger

Tabelle 4: Vergleich der Ergebnisse der Hybridausführung mit dem Originalprofil



**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)

## Zusammenfassung

Verladebrücken sind mechatronische Systeme, die sich aus einer mechanischen Grundkonstruktion, elektrischen Komponenten sowie Informationsverarbeitung zusammensetzen. Im Labor „Messtechnik“ der Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik wurde im Rahmen von Projektarbeiten durch Studenten das Modell einer Verladebrücke aufgebaut sowie eine CANopen-basierte Automatisierungsstruktur mittels Motoren, Leistungselektronik und Mikrocontrollern entwickelt. Eine wesentliche Problemstellung beim Verfahren des Greifers bildet die starke Schwingneigung des Systems. Daher erfolgte einerseits der Aufbau einer kostengünstigen Sensorik zur Erfassung des Pendelwinkels. Des Weiteren wurde ein neuartiges Regelverfahren zur Schwingungsdämpfung entwickelt, das unabhängig von der Greifermasse ist und ein zügiges schwingungsfreies Verfahren des Greifers ermöglicht.

## Abstract

Container bridges are mechatronic systems which are composed of a basic mechanical construction, electrical components and information processing. In the laboratory “measurement engineering” of the faculty mechanical/environmental engineering the model of a container bridge as well as a CANopen-based automation structure including electrical drives, power electronics and microcontrollers have been set up by students as project work. A fundamental problem during movement is the considerable oscillation of the system. Thus a cost efficient sensor system was developed to measure the pendulum angle. Furthermore a novel control approach for vibration damping was designed. It is independent from the gripper mass and enables the user to move the system without oscillation.

## 1 Verladebrücke als mechatronisches System

Mechatronische Produkte entstehen durch die synergetische Integration mechanischer, elektrischer Systeme und Informationsverarbeitung. Die Lösung der Entwurfsaufgabe erfolgt dabei sowohl auf mechanischem als auch digital-elektronischem Wege, wobei die Wechselbeziehungen bei der Konstruktion eine wichtige Rolle spielen. Verladebrücken sind typische mechatronische Systeme, wie sie beispielsweise an Häfen zum Be- und Entladen von Containerschiffen eingesetzt werden. Die manuelle Positionierung des Greifers kann durchaus zur Herausforderung werden, da es sich um ein schwach gedämpftes, schwingungsfähiges System handelt, das durch die Bewegung der Laufkatze angeregt wird.

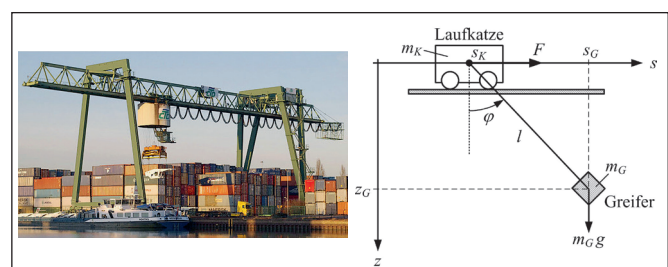


Abbildung 1: Verladebrücke bestehend aus Laufkatze und Greifer

Im Rahmen von Projekt- und Abschlussarbeiten wurde im Labor Messtechnik der Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik das Modell einer Verladebrücke entwickelt und praktisch aufgebaut. Es entstand dabei u. a. eine neuartige Regelstruktur zur Schwingungsdämpfung. Die technischen Inhalte sollen im Folgenden näher erläutert werden.

## 2 Mechanische Grundkonstruktion

Den Ausgangspunkt des Projekts bildete ein Synchron-Linearmotor, der von der Firma Siemens Healthineers zur Verfügung gestellt wurde. Es handelt sich dabei um eine Ausführung, die sich aus einem beweglichen Primärteil mit Drehstromwicklung und feststehenden Permanentmagneten als Sekundärteile zusammensetzt. Der Motor verfügt über eine maximale Kraft von 510 N und eine maximale Geschwindigkeit von ca. 3,3 m/s, die in der vorliegenden Anwendung nicht voll ausgenutzt werden.

Das Modell der Verladebrücke wurde von Maschinenbaustudenten konstruiert und in Zusammenarbeit mit der Zentralwerkstatt der Hochschule praktisch aufgebaut.

In Anlehnung an den Aufbau aus Abbildung 1 erfolgte zunächst die Konstruktion eines Trägergestells aus Vierkantprofilen. Der eingangs beschriebene Linearantrieb wurde als horizontale Antriebseinheit in den Aufbau integriert. Die zugehörigen Permanentmagnete (Sekundärteile) sind feststehend am Metallrahmen angebracht, während das Primärteil als Laufkatze fungiert. Die Hauptschwierigkeit bei der Konstruktion und dem praktischen Aufbau bildete das enge Toleranzband des Luftspalts von +0,3 mm und -0,45 mm. Die zulässige Traglast der Laufkatze wurde mit 50 kg veranschlagt.

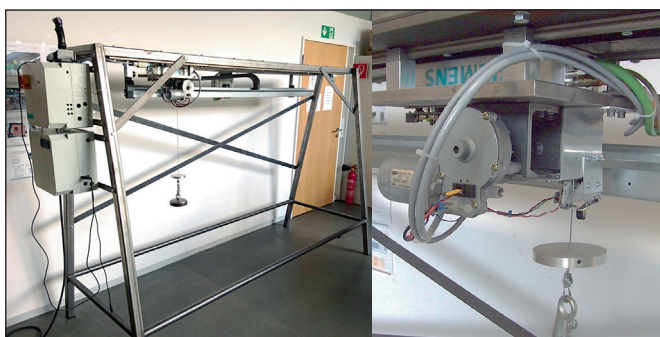


Abbildung 2: Aufbau der Verladebrücke: a) Gesamtaufbau; b) Laufkatze mit Hubwerk

Die Dimensionierung der Bauteile des Trägergestells geschah auf Basis von FEM-Analysen, in denen aus Sicherheitsgründen mit einem mittig angebrachten Gewicht von 100 kg, also dem doppelten Gewicht der Vorgabe, gerechnet wurde. Es zeigte sich dabei, dass Vierkantprofile mit den Maßen 50 x 50 mm bei einer Wandstärke von 3 mm benötigt werden. Zur Bereitstellung eines Verfahrbereichs von 2000 mm wurde im Gestell eine Gesamtlänge von 2500 mm realisiert.

Um den engen Anforderungen hinsichtlich der Toleranzen des Luftspalts sowie der Parallelität der Linearführungen Rechnung zu tragen, wurde zwischen Gestell und Laufkatze eine Gestellplatte montiert. Diese ist als einzelne 10 mm starke Stahlplatte ausgeführt. Die günstigere Variante aus mehreren miteinander verbundenen kleineren Platten musste aus Toleranzgründen verworfen

werden. An der Platte sind die feststehenden Permanentmagnete des Linearmotors sowie die Linearführungen verbaut.

Mithilfe der Linearführungen werden der exakte Lauf des Motors sowie ein möglichst konstanter Luftspalt zwischen Primär- und Sekundärteilen sichergestellt. Die Wahl fiel auf zwei Lineargleitlager der Firma Igus vom Typ DryLin W, die von der Firma als kostenlose Muster zur Verfügung gestellt wurden. Diese sind als schmierfreie Gleitlager mit Kunststoffbuchsen ausgeführt und stehen mit dem Schlitten über je zwei Fest- und Los-Lager in Verbindung.

Das in der Laufkatze zum Heben und Senken von Lasten montierte Hubwerk ist als Seilwinde auf Basis eines Stahlzylinders aufgebaut. Angetrieben wird die Einheit von einem permanenterregten Gleichstrommotor, der über ein Getriebe (Übersetzungsfaktor  $i = 74$ ) mit dem Zylinder verbunden ist (vgl. Abbildung 2 b).

## 3 Elektronik

Die elektronische Seite des Aufbaus umfasst einerseits Leistungselektronik zur Ansteuerung der beiden Motoren. Des Weiteren wird auch Mikroelektronik zur Signalverarbeitung sowie Messwerterfassung benötigt.

Für die Regelung des Synchron-Linearmotors kommt ein Umrichter der Baureihe CDE von der Firma LTI zum Einsatz. Die Absolutposition des Primärteils wird mithilfe eines Magnetbands erfasst. Dies geschieht auf Basis eines magnetisch codierten Kunststoffbands, das mit einem Stahlband als Träger verbunden und auf der Stahlplatte aufgeklebt ist. Für das Magnetband existiert eine Auswerteelektronik, die mithilfe einer separaten Sensoreinheit die im Band enthaltenen Lageinformationen erfasst. Die Auswerteelektronik überträgt einerseits via SSI-Schnittstelle die ermittelte Absolutposition an den Umrichter. Darüber hinaus findet auch eine Übermittlung analoger Sinus/Cosinus-Signale statt, die zur Berechnung der Geschwindigkeit dienen. Der Antrieb wird geschwindigkeitsgeregelt betrieben und verfügt über programmierbare Endpositionen, bei deren Über- bzw. Unterschreitung der Umrichter die Achse anhält. Aus Sicherheitsgründen sind zusätzlich noch zwei Hardware-Endschalter vorgesehen.

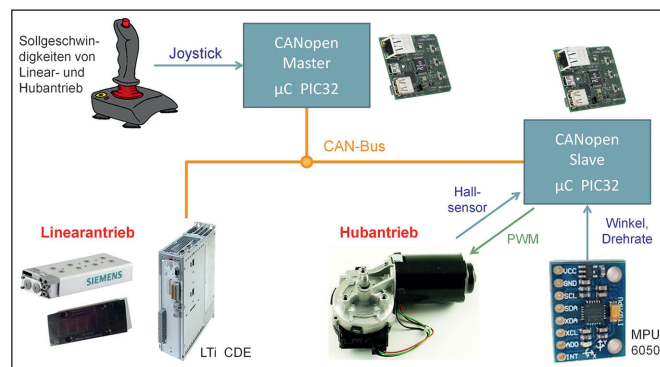


Abbildung 3: Automatisierungsstruktur der Verladebrücke

Neben dem beschriebenen LTI-Umrichter sind innerhalb des CAN-Netzwerks mit dem CANopen Master und dem CANopen Slave noch zwei Mikrocontroller vom Typ PIC32 enthalten.

Die CANopen Slave Platine ist auf der Laufkatze verbaut und erledigt die folgenden beiden Aufgaben: Auf der einen Seite erfolgt die Ansteuerung des Hubantriebs mittels PWM, wofür eine geeignete Vollbrücke auf der Leiterplatte integriert wurde. Darüber hinaus werden der Winkel sowie die Drehrate des Pendels mithilfe des mikromechanischen Sensors MPU6050 erfasst. Der Chip kombiniert einen Drei-Achsen-Beschleunigungssensor und einen Drei-Achsen-Drehratensensor mit einem integrierten Motion-Prozessor. Die Kommunikation zum Mikrocontroller erfolgt hierbei mittels I<sup>2</sup>C-Bus. Der Sensor steht mechanisch über ein Scharnier mit dem Seil des Pendels in Verbindung und erfährt dadurch die gleiche Winkellage bzw. Drehrate (vgl. Abbildung 2 b). Es handelt sich hierbei um eine sehr kostengünstige Lösung, die in der Literatur bislang noch nicht vorgeschlagen wurde. Bisher bekannte Varianten basieren auf dem Einsatz von hochauflösenden Drehgebern, die mit Kosten von mehreren Hundert Euro zu Buche schlagen. Dagegen ist z. B. das MPU6050 Evaluationboard bereits für unter 4 Euro erhältlich und somit erheblich preiswerter.

Zur Bestimmung der Pendellänge werden die Umdrehungen des Hubmotors mittels Hallsensor ermittelt. Da diese Methode nur eine inkrementelle Bestimmung der Position gestattet, wird nach dem Einschalten der Anlage eine Referenzierung der vertikalen Achse auf Basis des oberen Endlagenschalters durchgeführt.

Der Mikrocontroller des CANopen Masters bildet die zentrale Steuereinheit des Netzwerks, in dem alle wichtigen Informationen des Systems zusammenlaufen. So übernimmt der Controller zum einen die Auswertung des analogen Joysticks, über den sich Geschwindigkeiten für die horizontale und die vertikale Achse vorgeben lassen. Andererseits erfolgt die Ansteuerung des LTI-Umrichters sowie des CANopen Slaves.

## 4 Informationsverarbeitung

### 4.1 CANopen Stack

Die Umsetzung der Feldbus-Kommunikation mithilfe des CAN-Busses ist bei Mikrocontrollern eine häufig gewählte Variante, da CAN-Schnittstellen normalerweise zum Standardumfang der Mikrocontroller-Peripherie gehören. Bei CANopen wird der CAN-Bus um ein standardisiertes Protokoll auf der Anwendungsschicht ergänzt, das die Übertragung von Echtzeit- und Parameterdaten regelt. Zur Umsetzung des damit verbundenen Funktionsumfangs im Mikrocontroller ist auf Softwareebene ein CANopen Stack notwendig. Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurde auf den Open Source Stack „CANopenNode“ zurückgegriffen<sup>[1]</sup>.

Der Stack lässt sich vergleichsweise flexibel konfigurieren und bietet unter anderem auch die Funktionalität eines CANopen Masters. Dieser übernimmt im Netzwerk die Aufgabe des Busmasters und versetzt nach dem Hochlauf die übrigen CANopen-Teilnehmer in den Zustand „operational“. Der Busmaster ist so konfiguriert, dass alle 10 ms ein SYNC-Signal generiert wird. Innerhalb dieser Intervalle erfolgt u. a. die Übertragung des Geschwindigkeitsollwerts an den LTI-Umrichter sowie die Meldung des zugehörigen Geschwindigkeitsistwerts der Linearachse. Der CANopen Slave teilt dem Master den aktuellen Pendelwinkel sowie die Pendellänge mit. Die Übertragung der genannten Informationen geschieht in CANopen mithilfe sogenannter PDO-Telegramme (Prozessdatenobjekte).

### 4.2 Modellbildung und Regelstruktur

Das Ziel der Reglerauslegung besteht darin, die Laufkatze so anzusteuern, dass ein Verfahren des Greifers ohne größere Pendelbewegungen (Schwingungen) erfolgt. Als Regelgröße dient die Greifergeschwindigkeit, deren Sollwert mittels Joystick vorgegeben wird.

Den Ausgangspunkt des Reglerentwurfs bildet die Modellbildung der Strecke. Da es sich um ein schwach gedämpftes System handelt, kann hierbei die auftretende Reibung mit guter Näherung vernachlässigt werden. Durch Aufstellung der Kräftegleichgewichtsbedingungen und nach Linearisierung um die statische Ruhelage  $\varphi_0 = 0$  lässt sich das folgende Zustandsraummodell herleiten<sup>[2]</sup>:

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_K \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\dot{\varphi}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{m_G \cdot g}{m_K} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{m_K + m_G}{m_K} \cdot \frac{g}{l} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_K \\ \varphi \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{m_K} \\ 0 \\ -\frac{1}{m_K \cdot l} \end{bmatrix} \cdot F$$

$$y = v_G = [1 \quad 0 \quad l] \cdot \begin{bmatrix} v_K \\ \varphi \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix}$$

Dabei bildet die vom Motor erzeugte Antriebskraft  $F$  die Eingangsgröße des Systems, während die Geschwindigkeit des Greifers  $v_G$  die Ausgangsgröße darstellt. Die Bedeutung der einzelnen Formelzeichen verdeutlicht die Skizze in Abbildung 1.

Als Zustandsgrößen der Systembeschreibung lassen sich die Geschwindigkeit der Laufkatze  $v_K$  sowie der Winkel und die Winkelgeschwindigkeit  $\varphi$  bzw.  $\dot{\varphi}$  des Pendels auffassen. Diese werden von den zur Verfügung stehenden Sensoren erfasst und sind somit bekannt. Durch Einsatz und Entwurf eines geeigneten linearen Zustandsreglers ließe sich das Regelungsproblem somit lösen<sup>[3]</sup>.

Beim vorliegenden Aufbau kann diese Vorgehensweise jedoch nicht herangezogen werden, da der eingesetzte



LTi-Umrichter die Betriebsart „Profile Torque Mode“ im CANopen-Antriebsprofil DS402 nicht unterstützt und somit keine Kraftvorgabe via CAN-Bus möglich ist [4].

Stattdessen wurde ein anderer Ansatz gewählt, der auf der Vorgabe der Geschwindigkeit der Laufkatze  $v_K$  beruht. Den Ausgangspunkt der Überlegungen bildet die Übertragungsfunktion

$$G_S(s) = \frac{\varphi(s)}{v_{Kw}(s)} = \frac{-\frac{1}{g} s}{\frac{l}{g} s^2 + 1} \cdot e^{-sT_i},$$

die das Übertragungsverhalten zwischen der Sollgeschwindigkeit der Laufkatze  $v_{Kw}$  sowie dem resultierenden Pendelwinkel  $\varphi$  beschreibt und sich aus den Gleichungen der Zustandsraumbeschreibung durch Elimination der Geschwindigkeit  $v_G$  herleiten lässt. Angesichts der deutlich höheren Dynamik des Geschwindigkeitsregelkreises im Umrichter kann das Übertragungsverhalten zwischen dem Sollwert  $v_{Kw}$  und der tatsächlich realisierten Geschwindigkeit  $v_K$  der Laufkatze durch ein einfaches Totzeitglied (Totzeit  $T_i$ ) berücksichtigt werden. Zu beachten ist ferner, dass die Übertragungsfunktion keine Abhängigkeit mehr von der normalerweise unbekanntem Greifermasse  $m_G$  aufweist.

Die betrachtete Übertragungsfunktion verfügt über differenzierendes Verhalten, sodass im Winkel  $\varphi$  bei konstanter Geschwindigkeit der Laufkatze  $v_K$  kein stationärer Anteil zurückbleibt. Da sich entsprechend der Zustandsraumdarstellung die Greifergeschwindigkeit  $v_G$  als Linearkombination aus der Geschwindigkeit  $v_K$  und der Drehrate  $\dot{\varphi}$  ergibt, legt die Dynamik des Winkels zugleich das Einschwingverhalten der Greifergeschwindigkeit fest. Demzufolge ist der Entwurf der Regelung auf Basis der angegebenen Übertragungsfunktion möglich.

Darauf aufbauend ergibt sich die folgende Regelstruktur:

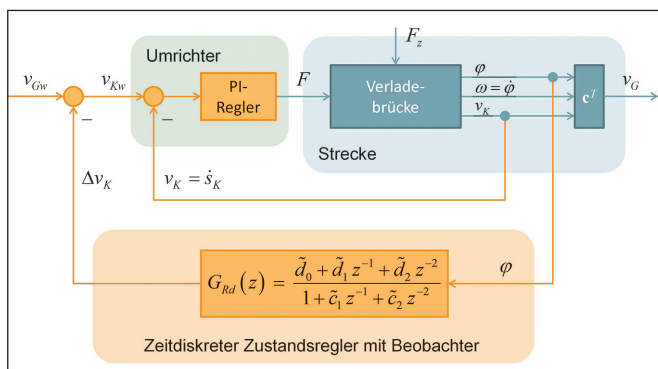


Abbildung 4: Struktur zur Regelung der Greifergeschwindigkeit

Hier erfolgt zunächst die Vorgabe des Sollwerts der Greifergeschwindigkeit  $v_{Gw}$  durch den Anlagenbediener. Aus dem Pendelwinkel wird durch den zeitdiskreten Zustandsregler der Korrekturwert  $\Delta v_K$  berechnet, der vom Sollwert subtrahiert wird. Angesichts der vergleichsweise

langsamen Dynamik der mechanischen Strecke hat sich für die Berechnung eine Abtastperiode von 100 Hz als vollkommen ausreichend erwiesen. Es ergibt sich so die Sollgeschwindigkeit für die Laufkatze  $v_{Kw}$ , die an den Umrichter gesendet wird. Der unterlagerte Geschwindigkeitsregelkreis ist im Umrichter als PI-Regler umgesetzt und wird mit einer Abtastzeit von unter 1 ms gerechnet. Dadurch lässt sich die Geschwindigkeit der Laufkatze sehr schnell einregeln und der unterlagerte Regelkreis kann im übergeordneten, langsameren Teil der Geschwindigkeitsregelung als Totzeitglied interpretiert werden.

Obwohl die Winkelgeschwindigkeit messtechnisch zur Verfügung steht, wird zur Berechnung des Korrekturwerts  $\Delta v_K$  nur der Pendelwinkel herangezogen. Dies liegt daran, dass der Messwert durch die übergeordnete Bewegung der Laufkatze verfälscht wird. Im Zustandsregler erfolgt daher eine Nachbildung der Winkelgeschwindigkeit mittels Beobachter.

### 4.3 Entwurf des Zustandsreglers

Angesichts der im Vergleich zur Streckendynamik schnellen Abtastung mit 100 Hz ist ein quasistationärer Entwurf des Zustandsreglers zulässig. Es soll im Folgenden ein Ansatz zur Reglerauslegung im Frequenzbereich vorgestellt werden, der nur auf Basis der bereits angegebenen Streckenübertragungsfunktion  $G_S(s)$  erfolgt und ohne Zustandsraummodell auskommt. Ein Vorteil des Ansatzes besteht zudem in der Möglichkeit der Berücksichtigung von Stellgrößenbeschränkungen, was im vorliegenden Fall jedoch nicht genutzt wird [5].

Da Totzeiten beim Zustandsreglerentwurf nicht berücksichtigt werden können, wird im vorliegenden Fall das Totzeitglied mittels Padé-Approximation 1. Ordnung angenähert:

$$G_S(s) = \frac{-\frac{1}{g} s}{\frac{l}{g} s^2 + 1} \cdot \frac{1 - \frac{T_i}{2} s}{1 + \frac{T_i}{2} s} = \frac{b_2 s^2 + b_1 s}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} = \frac{Z_S(s)}{N_S(s)}$$

Es liegt also eine Strecke mit  $n = 3$ . Ordnung vor. Daraus ergibt sich die Ordnung des Reglers

$$n_R = n - 1 = 2,$$

sodass der kontinuierliche Zustandsregler die Form

$$G_R(s) = \frac{d_2 s^2 + d_1 s + d_0}{s^2 + c_1 s + c_0} = \frac{Z_R(s)}{N_R(s)}$$

besitzt. Die Pole des geschlossenen Regelkreises sind durch die charakteristische Gleichung

$$Z_R(s) \cdot Z_S(s) + N_R(s) \cdot N_S(s) = \tilde{N}(s) \cdot \Delta(s)$$

bestimmt, wobei die Polynome  $\tilde{N}(s)$  und  $\Delta(s)$  die Dynamik der geregelten Strecke (3. Ordnung) bzw. des Beobachters (2. Ordnung) beschreiben. Insgesamt bildet der geschlossene Regelkreis somit ein System 5. Ordnung, dessen Pole

beliebig vorgegeben werden können. Mittels Koeffizientenvergleich von linker und rechter Seite der Entwurfsgleichung lassen sich daraus die unbekannt Reglerparameter ermitteln <sup>[5, 6]</sup>.

Hinsichtlich der Dynamik des geschlossenen Regelkreises inklusive Beobachter wird aperiodisches Einschwingverhalten ohne Überschwingen angestrebt. Ein einfacher Ansatz besteht darin, die Vorgabe entsprechend der Gauß-Charakteristik zu wählen, bei der ein einzelner reeller Mehrfachpol vorliegt.

$$\tilde{N}(s) \cdot \Delta(s) = T^5 s^5 + 5T^4 s^4 + 10T^3 s^3 + 10T^2 s^2 + 5T s + 1$$

Über die Zeitkonstante  $T$  ist eine Beeinflussung der Dynamik der Regelung möglich, wobei mit dem Wert  $T = 0,15$  s die besten Erfahrungen gemacht wurden. Vergleichbare Ergebnisse lassen sich auch durch Anwendung der Bessel-Charakteristik erzielen, bei der die Pole auf einem Halbkreis mit Zentrum in der rechten s-Halbebene liegen <sup>[6]</sup>.

Durch Koeffizientenvergleich ergibt sich ein lineares Gleichungssystem mit den fünf Reglerkoeffizienten als Unbekannten, das sich mittels Gauß-Eliminationsverfahren lösen lässt <sup>[7]</sup>. Der so erhaltene kontinuierliche Zustandsregler muss nun noch zeitdiskret approximiert werden. Dies geschieht mithilfe der bilinearen Transformation, wodurch sich die z-Übertragungsfunktion

$$G_{Rd}(z) = \frac{\tilde{d}_0 + \tilde{d}_1 z^{-1} + \tilde{d}_2 z^{-2}}{1 + \tilde{c}_1 z^{-1} + \tilde{c}_2 z^{-2}}$$

ergibt <sup>[3, 6]</sup>. Durch Rücktransformation in den Zeitbereich erhält man die zugehörige Differenzgleichung, deren Auswertung zyklisch im Mikrocontroller erfolgt.

Die Reglerparameter sind nur von der Pendellänge  $l$  abhängig und müssen somit nach dem Verfahren der

Hubachse neu berechnet werden. Eine Abhängigkeit von den Reibverhältnissen in der Linearachse sowie der Greifermasse liegt dagegen nicht vor. Die Reibung beeinflusst jedoch die Regeleigenschaften des PI-Reglers im Umrichter des Linearantriebs. Im vorliegenden Fall wurde eine Einstellung für gutes Führungsverhalten auf Grundlage des Betragsoptimums gewählt, die sich in den Versuchen als robust gegenüber Änderungen der Greifermasse erwies.

## 5 Messergebnisse

An der Verfahrbrücke wurden Versuche durchgeführt und Messdaten aufgezeichnet. Exemplarisch sind in Abbildung 5 typische Verläufe dargestellt. Hier befindet sich die Laufkatze zunächst im Stillstand und der Greifer vollführt eine Pendelschwingung von ca.  $\pm 5^\circ$ . Zum Zeitpunkt von ca. 2 s wird die Regelung eingeschaltet und es erfolgt unverzüglich eine aperiodische Ausregelung der Schwingung. Anschließend wird ein Sollverlauf für die Greifergeschwindigkeit vorgegeben. Die Regelung sorgt dafür, dass sich der Winkel aperiodisch einstellt und auch während des Verfahrvorgangs auf kleine Auslenkungen eingeregelt wird.

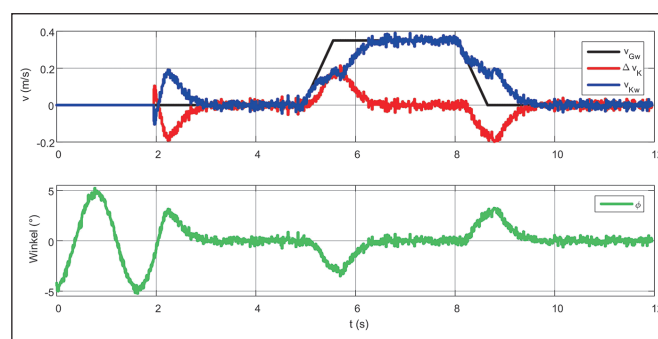


Abbildung 5: Verläufe der Geschwindigkeiten und des Pendelwinkels

---

## Referenzen:

- [1] Paternoster, J., CANopenNode, CANopen based stack for communication in embedded control systems, <https://sourceforge.net/projects/canopennode/>
- [2] Lunze, J., 2012, Regelungstechnik 1 – Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen, 9. Auflage, Springer Verlag, Berlin
- [3] Lunze, J., 2013, Regelungstechnik 2 – Mehrgrößensysteme, Digitale Regelung, 7. Auflage, Springer Verlag, Berlin
- [4] CiA 402, 2002, CANopen, Device Profile Drives and Motion Control, Version 2.0, CAN in Automation e. V., <http://www.can-cia.org>
- [5] Hippe, P., 2006, Windup in Control, Its Effects and Their Prevention, Springer Verlag, London
- [6] Schulz, G. und K. Graf, 2013, Regelungstechnik 2 – Mehrgrößenregelung, Digitale Regelungstechnik, Fuzzy Regelung, 3. Auflage, Oldenbourg Verlag, München
- [7] Sedgewick, R., 1990, Algorithms in C, Addison-Wesley Publishing Company

## 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)

# Tribologie von mikrostrukturierten polymeren Oberflächen für die Medizintechnik

Dominik Will, B. Eng.  
Prof. Dr.-Ing. Tim Jüntgen

## Zusammenfassung

Medizinprodukte müssen von der ersten Anwendung an einwandfrei funktionieren. Manche Produkte, wie Notfallpens, werden tatsächlich nur einmal verwendet. Bei anderen Produkten, wie Stechhilfen, soll die Kraft eines Stiches nicht über die Benutzungsdauer schwanken. Damit ist ein Einlaufverhalten des Produktes, das ein Gleitadditiv freisetzen oder auch einen Schmierfilm optimal verteilen könnte, als kritisch anzusehen. In der vorliegenden Arbeit wird die Auswirkung einer Mikrostrukturierung auf Kunststoffbauteile in Hinsicht auf das dadurch entstehende Reibverhalten untersucht. Die Untersuchung gilt dabei einer Trockenreibung ohne zusätzlichen Einsatz von Schmier- und Gleitmitteln. Um die Machbarkeit der Herstellung kosteneffizienter Bauteile zu analysieren, werden die Kunststoffproben nicht direkt strukturiert. Die Strukturen werden zunächst in den Einsatz eines Kunststoffspritzgießwerkzeugs gebracht, um sie in einem zweiten Schritt im Spritzgießverfahren auf das Kunststoffbauteil zu übertragen. Die Erstellung der Mikrostrukturen erfolgt mit UltrakurzpulsLasern mit einer Pulsdauer im Pikosekundenbereich. Um das Ergebnis der Strukturierung bewerten zu können, werden die Reibkoeffizienten der strukturierten Probekörper ermittelt und in Relation zu unstrukturierten Probekörpern gestellt. Mit den strukturierten Kunststoffproben konnte dabei ein wesentlich geringerer Reibkoeffizient im Vergleich zu den Referenzproben erzielt werden. Eine der strukturierten Kunststoffproben verringerte den Reibkoeffizienten zu Beginn einer zyklischen Messung um ca. 62,5 Prozent im Vergleich zu einer Probe, welche an einer hochglanzpolierten Werkzeugoberfläche abgeformt wurde. Auch das Einlaufverhalten und die Reibkoeffizienten während einer zyklischen Messung einer Kunststoff-Kunststoff-Reibpaarung verändern sich durch eine mikrostrukturierte Oberfläche positiv.

## Abstract

Medical devices must operate properly from the first time of use. Some products, such as emergency pens, are used only once. For other products, such as lancing devices, the force of a stitch should not vary over the period of use. A run-in behaviour of the product, which releases a sliding agent or distribute a lubricating film, is regarded critically. In the course of this study the effect of microstructured polymer components for the resulting friction is examined. The investigation is about dry friction without the additional use of lubricants and sliding agents. The polymer samples are not structured directly. The structures are first brought into an injection moulding tool, in order to transfer them onto the polymer component in an injection moulding process in a second step. This enables to analyse the feasibility of producing cost-effective components. The creation of the microstructures is carried out with ultrashort-pulsed lasers with pulse durations in the range of picoseconds. In order to evaluate the result of the structuring, the friction coefficients of the structured samples are identified and compared to unstructured test samples. With the structured plastics samples, a substantially lower coefficient of friction could be achieved compared to the reference samples. One of the moulded samples reduced the coefficient of friction in the beginning of a cyclical measurement by approximately 62.5 percent compared to a sample that reflects the negative of a highly polished tool surface. Further, the run-in behaviour and the coefficient of friction during a cyclical measurement of a plastics-plastics friction pairing change positively in case of using a microstructured surface.

## 1 Einleitung und Problemdefinition

Da in Medizintechnikprodukten aus Kunststoff der Einsatz von gleitmodifizierenden Additiven und Schmierstoffen unerwünscht oder teilweise verboten ist, werden in folgender Studie die Auswirkungen einer reinen Oberflächenstrukturierung auf die Reibeigenschaften untersucht. Der Einsatz von Zusatzstoffen bedeutet immer einen Mehrkostenanteil, den es zu vermeiden gilt. Zudem entstehen durch gleitmodifizierende Zusatzstoffe Ablagerungen im Spritzgießprozess, welche im laufenden Prozess auf den Kavitätsoberflächen anhaften können. Dadurch ist eine häufige Reinigung nötig, welche in der Regel eine Produktionsunterbrechung und damit zusätzliche Kosten verursacht. Durch eine fehlende Homogenisierung der Kunststoffmasse kann es dazu kommen, dass die Zusatzstoffe im Material nicht gleichmäßig verteilt sind. Dadurch entstehen nicht reproduzierbare Reibeigenschaften. Ein unregelmäßiger Einlaufeffekt zu Beginn der Reibung bei mechanischen Bauteilen aus Kunststoff kann eine der Auswirkungen einer unzureichenden Homogenisierung sein. Des Weiteren unterliegen Materialien in der Medizintechnikherstellung immer strengen Zulassungsanforderungen. Ein Materialwechsel während der Serienproduktion ist damit immer mit hohem Zulassungs-, Zeit- und Kostenaufwand verbunden. Die Implementierung einer Mikrostruktur in einen bereits in Serie gefertigten Artikel ist vergleichsweise einfach, kostengünstig und schnell zu realisieren. Da der Materialwechsel eine Änderung des Produktes auf chemischer Basis bedeutet, zieht er eine aufwändige Requalifizierung des Produktes von Prozessabnahmen bis klinischen Versuchen nach sich. Dahingegen stellt die Einführung einer Mikrostruktur eine rein geometrische Änderung mit weniger aufwendigen Requalifizierungsmaßnahmen dar.

## 2 Versuchsbeschreibung

### 2.1 Laserstrukturierung von Kunststoffformenstählen

Zur Untersuchung der Auswirkungen von verschiedenen Strukturgeometrien und Strukturdimensionen auf den Reibkoeffizienten werden drei unterschiedliche linienförmige Geometrien erstellt. Die Variation der Strukturdimension findet im Bereich von  $1\ \mu\text{m}$  bis  $100\ \mu\text{m}$  statt. Es werden sowohl unidirektionale, periodische Linienstrukturen als auch periodische Näpfchenstrukturen erstellt. In Abbildung 1 sind exemplarisch eine Linienstruktur und eine Näpfchenstruktur dargestellt. Die Analyse der Strukturen erfolgt mit dem Laserscanningmikroskop VK-X200 der Firma Keyence Deutschland GmbH, Neulisenburg.

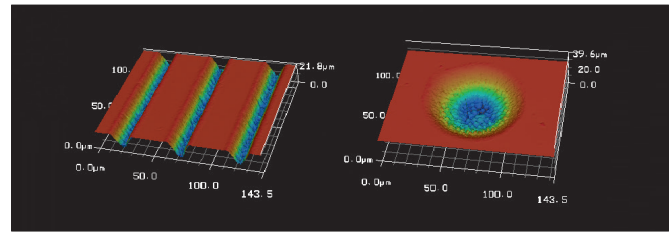


Abbildung 1: Vergleich der Strukturgeometrie in 3-D-Darstellung, aufgenommen in 50-facher Vergrößerung mit einem konfokalen Laserscanningmikroskop<sup>[1]</sup>

Die Strukturen werden mithilfe eines Lumera Hyper Rapid 50 Lasersystems der Firma Coherent (Deutschland) GmbH, Dieburg, erzeugt. Dies ist ein Ultrakurzpulslaser, welcher mit Pulsdauern von unter 15 Pikosekunden arbeitet. Da für eine Bearbeitung von Stahl eine Wellenlänge des Laserstrahls im Infrarotbereich ideal geeignet ist, wird der Laser mit einer Wellenlänge von  $1064\ \text{nm}$  betrieben. Die Laserversuche wurden durchgeführt im Labor der Firma ARGES GmbH, Wackersdorf.

### Ultrakurzpulslaser

Ultrakurze Laserpulse haben Pulsdauern im Piko- oder Femtosekundenbereich. Laserimpulse im Nanosekundenbereich werden als Kurzpulse deklariert<sup>[2]</sup>. Der entscheidende Vorteil von Ultrakurzpulslasern gegenüber Nano-, Mikro- oder Millisekundenlasern ist der sogenannte „kalte“ Abtrag.

Bei einer Pulsdauer unterhalb von wenigen Pikosekunden findet der Abtragsprozess so schnell statt, dass im Material nahezu keine Wärmeleitung möglich ist. Dies liegt daran, dass bei der Absorption der Laserstrahlung zunächst die Elektronen im Material angeregt werden. So angeregte Atome verdampfen schlagartig in einem Plasma, ohne ihre Energie via Wärmeleitung an umliegende Atome abzugeben. Dadurch werden die Randschichten der Laserstruktur kaum beschädigt beziehungsweise deren Gefüge nicht verändert. Auch Schmelzrückstände können dadurch nahezu komplett vermieden werden<sup>[3]</sup>. Jedoch gelingt dies nur mit einer Energiedichte des Lasers, welche knapp oberhalb der Abtragschwelle des Materials liegt. Bei höheren Energiedichten bleiben auch bei ultrakurzen Laserpulsen Schmelzrückstände zurück. Dies hat zur Folge, dass nur geringe Abtragsraten erzielt werden können<sup>[3]</sup>. Ein weiterer Vorteil des Ultrakurzpulslasers ist dessen hohe Präzision, welche als Folge der niedrigen Abtragsrate resultiert.

### 2.2 Abformverhalten der Mikrostrukturen im Spritzgießprozess

Für erste Versuche zum Abformverhalten der Mikrostrukturen werden zunächst Werkzeugeinsätze in Plattenform strukturiert und anschließend in die Kavität eines Universalprüfplatten-Spritzgießwerkzeugs eingesetzt. Abbildung 2 zeigt das im Versuch verwendete Spritzgießwerkzeug.



Abbildung 2: Im Versuch verwendetes Spritzgießwerkzeug ohne eingelegten Werkzeugeinsatz

Auf den Einsatz von besonderer Prozesstechnik, wie sie in den meisten Anwendungsfällen im Mikrospritzgießen eingesetzt wird, wird in der ersten Versuchsreihe verzichtet. Damit werden eventuelle Probleme, welche bei der Abformung von Mikrostrukturen entstehen können, aufgezeigt und im Nachgang analysiert. Um eine Beeinflussung der Reibeigenschaften durch Additive im Kunststoff zu vermeiden, wird ein POM-Typ ohne gleitmodifizierende Additive verwendet. Für die Versuche steht die vollelektrische Spritzgießmaschine ALLROUNDER 370 E 600 E-Drive der Firma ARBURG GmbH & Co. KG, Loßburg, im Kunststofflabor der OTH Amberg-Weiden zur Verfügung.

### 2.3 Tribometeruntersuchung

Die Untersuchung der Reibeigenschaften findet mit einem Kugel-Scheibe-Tribometer statt. Getestet werden acht Strukturen, welche jeweils mit zwei verschiedenen Normalkraftbelastungen beaufschlagt werden. Die Reibprüfung findet im Werkstofflabor der OTH Amberg-Weiden mit dem Verschleißprüfstand ELUB 663/1 statt. Dieser stammt aus der Elektronikwerkstatt der Universität Bayreuth. Getestet wird eine linear oszillierende Bewegung einer Kunststoffkugel aus POM desselben Materialtyps auf einer plattenförmigen Probe. Dabei werden je Probe 100 Reibzyklen geprüft. Die Verfahrsstrecke beträgt 15 mm und liegt somit innerhalb der strukturierten Fläche.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Laserstrukturieren

Die Erstellung der geforderten Strukturdimensionen gelingt mit dem verwendeten Lasersystem problemlos. Das Einrichten ist ein iterativer Prozess, welcher den Großteil der Zeit für die Strukturerstellung benötigt. So muss die Programmierung für die Laserverfahren nach Erstellung erst an einem Probekörper getestet und evaluiert werden, um sich so schrittweise an die ge-

wünschten Strukturdimensionen und Oberflächengüten heranzutasten. Die anschließende Laserstrukturierung einer 20 mm x 20 mm großen Fläche gelingt, je nach Strukturdimension, in wenigen Minuten. Die Herstellungszeiten für die hier erstellten Strukturen liegen somit zwischen 5 min und 30 min. Damit ein schmelzfreier Materialabtrag gelingt, wird der verwendete Laser auf eine Leistung von 10 Prozent gedrosselt. Die Leistung liegt damit bei ca. 1 W. Damit ergibt sich die Pulsenergie, ausgehend von einer Pulsdauer von 15 ps, zu 1,275 µJ. Bei der im Versuch angewendeten Repetitionsrate von 800 kHz entspricht dies einer Spitzenleistung von 85 kW. Mit den genannten Parametern gelingt es, Mikrostrukturen mit einer hohen Oberflächengüte in den gewünschten Dimensionen zu erstellen.

### 3.2 Anforderungen an den Spritzgießprozess

Das Hauptaugenmerk während der Studie liegt in der Abformbarkeit der erstellten Mikrostrukturen. Wie bereits erwähnt, werden die Versuche ohne besondere Prozesstechnik, wie variotherme Werkzeugtemperierung, Spritzprägen oder einer Evakuierung der Kavität, durchgeführt. Die so abgeformten Strukturen entsprechen in keinem Fall dem Negativ im Werkzeugeinsatz. Lediglich diejenigen Strukturen, welche Dimensionen im hohen zweistelligen Mikrometerbereich besitzen, zeigen den Ansatz einer Abformbarkeit. So ist in Abbildung 3 der Vergleich einer Negativstruktur im Werkzeugeinsatz mit dem Positiv im Kunststoff in Profilsicht gegenübergestellt.

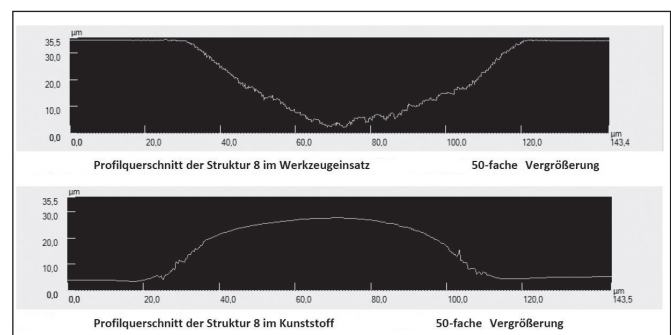


Abbildung 3: Gegenüberstellung der Profilschnitte einer Struktur im Werkzeugeinsatz und im Kunststoffprobekörper [1].

Wie der Abbildung 3 zu entnehmen ist, kann die Struktur 8 im Versuch nur zu etwa 70 Prozent gefüllt werden. Strukturen mit Dimensionen unterhalb von 20 µm lassen sich mit diesem Versuchsaufbau nicht abformen. Ein Unterschied ist auch zwischen den Näpfchenstrukturen und den Linienstrukturen zu beobachten. Linienstrukturen lassen sich im Allgemeinen besser abformen als Näpfchenstrukturen. Dies liegt daran, dass die Näpfchenstrukturen während des Einspritzvorgangs von der Schmelzefront überspült werden. Dahingegen kann die Kunststoffschmelze in die Linienstrukturen besser einfließen, da ein längerer Einlaufweg in die Struktur gegeben ist. So können selbst Näpfchenstrukturen mit 80 µm Grunddurchmesser nicht abgeformt werden.

### 3.3 Untersuchung des Reibverhaltens

Bei der Untersuchung des Reibverhaltens der strukturierten Kunststoffproben sind große Veränderungen des Reibkoeffizienten im Vergleich zu den Referenzproben festzustellen. Es ergibt sich durch eine linienförmige Strukturierung, bei einer Reibprüfung senkrecht zu den Linien, ein entgegengesetztes Einlaufverhalten als bei der Referenzprobe. Der Reibkoeffizient einer sehr glatten Kunststoffprobe ( $R_a = 0,04 \mu\text{m}$ ) nimmt während einer zyklischen Reibprüfung ab, während der Reibkoeffizient einer strukturierten Kunststoffoberfläche zunimmt. Dies liegt bei den glatten Probekörpern an der Ausbildung eines Schmierfilms, welcher durch den Kunststoffabrieb entsteht. Bei den strukturierten Proben wird die Zunahme des Reibkoeffizienten mit der Zerstörung der Strukturen erklärt. Der Reibkoeffizient einer linienförmig strukturierten Probe liegt, je nach Strukturdimension und Strukturform, immer unterhalb des Reibkoeffizienten der Referenzproben. Während einige der Strukturen nur eine geringfügige Reduzierung des Reibkoeffizienten bewirken, zeigen andere zu Beginn einer zyklischen Messung eine Verringerung des Reibkoeffizienten um bis zu 62,5 Prozent. Eine Übersicht über die Reibkoeffizienten während der zyklischen Reibprüfung ist in Abbildung 4 dargestellt.

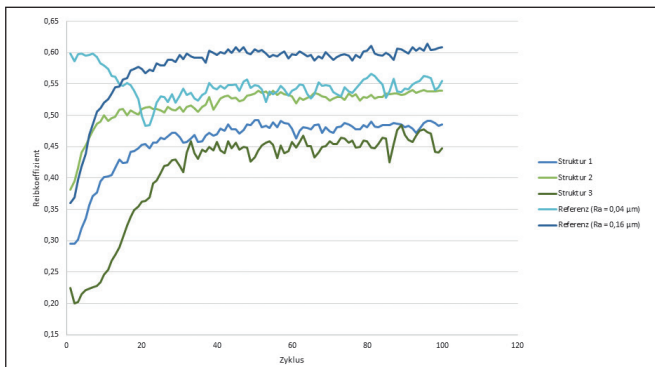


Abbildung 4: Diagramm der Reibkoeffizienten aufgetragen über den Reibzyklus einiger ausgewählter Strukturen

In Abbildung 4 ist die Reibprüfung für eine geringe Normalkraftbelastung gezeigt. Hier werden die Strukturen nach etwa 30 Reibzyklen zerstört und der Reibkoeffizient pendelt sich auf einen nahezu konstanten Wert ein. Je nach Normalkraftbelastung werden die Strukturen auf den Kunststoffproben jedoch mehr oder minder schnell zerstört. Bei der fünffachen Normalkraftbelastung verringert sich so die Lebensdauer einer Struktur um etwa die Hälfte. Auch nach völliger Zerstörung der Strukturen liegt der Reibkoeffizient immer unterhalb der Referenz  $R_a = 0,04 \mu\text{m}$ .

### 4 Ausblick

Im Weiteren wird durch eine verbesserte Prozesstechnik im Spritzgießverfahren untersucht, wie sich das Abformverhalten der Strukturen verhält. Als Optimierungen sind eine variotherme Temperierung und das Spritzprägeverfahren angedacht. Durch variotherme Temperierung des Spritzgießwerkzeugs erstarrt die Randschicht der Schmelze nach Eintritt in die Kavität nicht sofort, da die Kavitätsoberflächen während des Einspritzvorgangs auf einen Temperaturwert nahe der Schmelzetemperatur des Kunststoffs gebracht werden. Dadurch ist eine bessere Oberflächenabformung gegeben. Auch ein Prägehub während des Spritzgießzyklus kann eine bessere Abformung von Mikrostrukturen gewährleisten, da hier die Kunststoffmasse mit einem über die Kavitätsoberfläche gleichmäßigen Druck in die Struktur gedrückt wird. Bezüglich der Reibung und des Verschleißes gilt es, zu untersuchen, wie sich die Strukturen bei Reibung unter Flächenbelastung verhalten. Um den Bezug zwischen einer statistisch rauhen Fläche und einer Struktur gleicher Rauheit zu untersuchen, werden noch weitere Versuche mit Erodierstrukturen nach VDI 3400 ref. als Vergleichsproben durchgeführt. In Hinblick auf die Lasertechnik gilt es zu erforschen, ob vergleichbar gute Ergebnisse auch mit Lasern längerer Pulszeiten erreicht werden können, bzw. ob eine Verbesserung der Strukturqualität durch Laser mit kürzeren Pulszeiten eintritt. Die Versuche zur Laserbearbeitung sind dabei auf konventionelle Formbaustähle bezogen. Im Weiteren muss die Auswirkung der Strukturierung auf die Oberflächenenergie und damit auf die adhäsive Reibkraft untersucht werden. Dies kann Aufschlüsse über eine ideale Strukturierung zur maximalen Reibminderung geben.

---

### **Referenzen:**

- [1] Will D. 2016. Herstellung reiboptimierter Kunststoffbauteile im Spritzgussprozess mithilfe von UKP-laserstrukturierten Werkzeugeinsätzen [Bachelorthesis]. Amberg: Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden.
- [2] Ruf A. 2004. Modellierung des Perkussionsbohrens von Metallen mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern [Dissertation]. Stuttgart: Universität Stuttgart
- [3] Weikert M. 2005. Oberflächenstrukturierung mit ultrakurzen Laserpulsen [Dissertation]. Stuttgart: Universität Stuttgart

### **Projektpartner:**

Gerresheimer Regensburg GmbH, Wackersdorf  
ARGES GmbH, Wackersdorf

### **Fördergeber:**



### **Kontakt:**



**Dominik Will, B. Eng.**

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

do.will@oth-aw.de



**Prof. Dr.-Ing. Tim Jüntgen**

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

t.juentgen@oth-aw.de



# Test and On-Line Monitoring of Real-Time Ethernet with Mixed Physical Layer for Industry 4.0

## Abstract

In Industry 4.0 nodes are becoming interconnected and part of the growing Industrial Internet of Things. The use of a reduced physical layer and emerging real-time Ethernet standards, enables such nodes to be implemented cost-efficiently. Technologies and standards, which focus on cost-efficient Ethernet technologies for the use in vehicles, are quite promising for industrial applications. The integration of such new technologies and nodes in existing installations will lead to mixed systems consisting of conventional Industrial Ethernet equipment and new technologies. For such a migration scenario we present a test system to validate physical layers and transceivers with respect to timing and synchronizing.

## Zusammenfassung

Ein wesentlicher Bestandteil von Industrie 4.0 ist die Verbindung von Netzknoten des wachsenden Industrial Internet der Dinge. Reduzierte Physical Layer und neu aufkommende Real-Zeit Ethernet Standards ermöglichen eine kosteneffiziente Implementierung solcher Knoten. Technologien und Standards, die sich auf kosteneffizientes Ethernet in Fahrzeugen fokussieren, haben gute Aussicht für einen Nutzen in industriellen Applikationen. Die Integration solcher Technologien und Knoten in existierende Installationen wird zu gemischten Systemen führen. Für solch ein Migrationsszenario präsentieren wir ein Testsystem für die Validierung von PHYs und Transceivern unter Berücksichtigung von Timings und Synchronisation.

## 1 Introduction

In an Industry 4.0 environment where virtually each and every component connects, the need for cost-effective real-time Ethernet interfaces and cabling is becoming greater than ever before. In many cases, the cost of conventional Ethernet interfaces is much higher than the cost of nodes and sensors that are to be integrated into a real-time Industry 4.0 network. A suitable interface is required to allow these nodes to work in homogenous Ethernet networks<sup>[1]</sup> without the need for gateways.

The overall effort for a communication interface can be divided in two categories. The one is the communication software and the other is the transceiver and the cabling<sup>[2][3]</sup>. The emerging standard Time Sensitive Networking (TSN)<sup>[4]</sup>, addresses the first category and comprises a collection of real-time Ethernet for hard and soft real-time communication. Other emerging standards deal with transceiver and the cabling reduced physical layer technology for 100 Mbit/s Ethernet<sup>[5]</sup> and 1Gbit/s Ethernet<sup>[6]</sup>.

Given the forecast, that an exponential rise of the number of Ethernet ports in vehicles<sup>[7]</sup> is to be expected, the integration of TSN into standard Ethernet controllers is almost obvious. Applying such standard Ethernet controllers together with a reduced physical layer is becoming a viable option in automation if the required Quality of Standard for real-time Ethernet communication can be met. Especially in Industry 4.0 networks, where reconfiguration of networks and integration of devices in running systems is becoming more and more important<sup>[8]</sup>.

## 2 Investigated real-time requirements

A highly required mechanism is the synchronization of the device-clocks in the network. Real-time Ethernet standards like TSN<sup>[6]</sup> and PROFINET IRT<sup>[9]</sup> rely on data transfer with a fixed latency and require accurate synchronization of the device clocks. Furthermore, they mandate accurate measurement of packet delay between two ports in the network.

The second issue that is considered here is Ethernet interfaces and the required cabling used to integrate the nodes into networks. In automation industry most Ethernet cabling is based on the 100Base-TX<sup>[10]</sup> physical layer, which requires shielded cables with two twisted pairs. However, there are emerging technologies<sup>[11]</sup> which may be adapted for use in automation industry. The reduced physical layer “100Base-T1”<sup>[5]</sup> uses an unshielded twisted pair cable to link devices, while still providing full duplex and bandwidth as the established 100Base-TX physical layer. The major drawback is the reduced electromagnetic compatibility (EMC) which leads to a maximum cable length of ten meters for a 100Base-T1 link segment<sup>[5]</sup>.

Despite being ten times shorter than the maximum length capacity for established physical layers, the needs of many of the applications are met. A length of 10 meters is sufficient for many nodes. Nodes placed further apart have to be interconnected via 100Base-TX physical layer and for even longer cable runs an optical link is needed. Therefore, networks may include a reduced physical layer as well as standard copper and optical links. Those networks can be seen as step-wise integration of nodes with reduced physical layer as well as a migration scenario.

## 2.1 Synchronization of Devices

Real-time Ethernet systems like PROFINET IRT and TSN use a very similar process to synchronize the clocks in the network devices. The first part of this process is the measurement of the path delay. The path delay is the time a frame needs to be transferred from one port to its neighbor port. In the second step the clocks on the devices are synchronized to a master clock. The path delay measurement and the synchronization have to be repeated in fixed intervals which are shorter or longer depending on the required accuracy. The measurements are repeated at different frequencies ranging from a few times per second to once every second. The synchronization accuracy and the path delay time can be used to classify the actual working state of a real-time Ethernet system<sup>[11][12]</sup>.

## 2.2 Frame Transfer Latency

There are two types of requirements for real-time data transfer systems, a fixed latency and a maximum guaranteed latency. In a system with fixed latency a time slot mechanism has to be used. There are reserved time slots in which only high priority traffic can be transferred and no other data can be transferred. Every device in a communication channel has to know when the reserved time slots start, how long they are and which data has to be transferred in. A fixed frame transfer latency can be guaranteed with this mechanism. Best effort traffic or traffic in other priority classes does not influence this latency.<sup>[13]</sup>

The second mechanism guarantees a maximum transfer latency, frames may be received earlier than the maximum latency but they are not delayed longer than the maximum latency. For this type of transfer different mechanisms can be used, e.g. the prioritization of marked frames to guarantee a maximum delay in a transfer path.

In PROFINET this two mechanisms are used, to separate three traffic classes. The three classes are Isochronous Real-Time data which is transferred with a fixed latency, Real-Time data which is transferred with a maximum guaranteed latency through packet prioritization via Vlan-Tag and best-effort data (like acyclic read/write services) which is transferred without any guaranteed Quality of Service. RT and best-effort data may only be transferred in the free time slots. If these data is transferred within the IRT timeslots, the device will send an alarm and go into error mode.<sup>[14]</sup>

The frame transfer latency is also a sign of the system stability. Especially switches and management components in the network have to guarantee a forwarding of frames in the specified manner. Through reconfiguration of systems and introduction of devices in running systems the requirements of the switches may change during the runtime of the system. The frame transfer latency is a second stability indicator which shall be monitored in a running system to notice before a system becomes faulty because of this.

## 3 Test system with mixed physical layer networks

To measure this indicators in systems with different set-ups and physical layers and to identify the influences of physical layers and transceivers we have developed a test platform and an Ethernet Physical Layer Adapter. With this hardware we can examine physical layers for real-time Ethernet systems in a uniform manner. While the system is running, the influences reconfiguring a network or participant can be recorded, with the provision of the signal indicators for synchronization accuracy and frame transfer latency. The physical layer for the Ethernet interface is coupled to the test platform as an add-on, which is readily interchangeable. The schema in Figure 1 shows the test platform interfaces and connections.

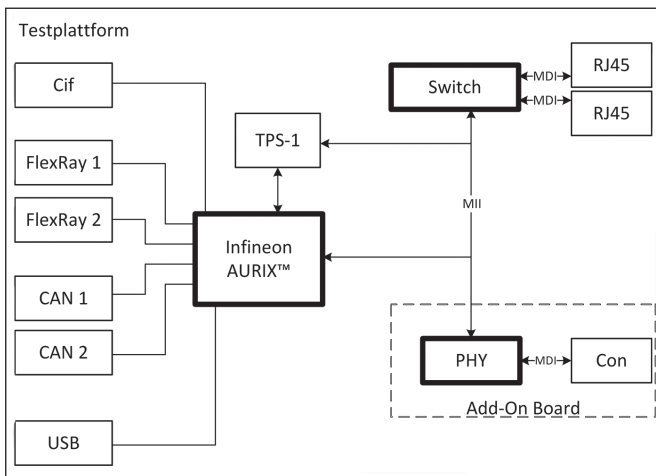


Figure 1: Test platform scheme

The test platform facilitates the use of real-time Ethernet systems, namely PROFINET, Ethernet AVB and Ethernet POWERLINK for data transfer. For PROFINET communication the dedicated communication ASIC is applied to the test platform. The physical layers which can be used are only restricted by the type of Media Independent Interface (MII) they require. The test platform provides a MII for 100Mbit/s Ethernet which has to be adapted by the add-on board to a Media Dependent Interface (MDI) <sup>[15]</sup>. Link quality and Ethernet link stability measurements can be performed through direct connection of the physical layer transceiver to the microcontroller on the test platform. This adapter has to be designed so that it does not influence the communication between the devices. The adapters can also be used for other purposes including to extend the length of an Ethernet link if required.

The adapter consists of two physical layer transceivers (PHY) which are connected directly over the MII. Through this setup the smallest delay within the adapter can be realized. Additionally the MII is accessible by extern

devices to monitor the traffic. An integrated microcontroller configures both PHYs and provides an USB interface to monitor the link quality and the error counters of the PHYs. The schema of the Ethernet-PLA can be seen in Figure 2.

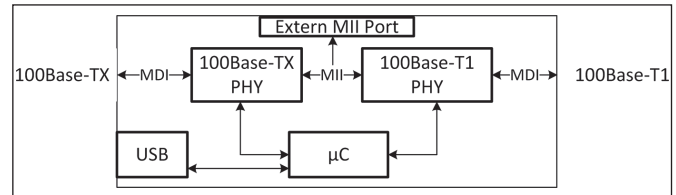


Figure 2: Ethernet Physical Layer Adapter board schema

#### 4 Conclusion and outlook

Effects of different physical layers on timing and synchronization can be shown for a basic Ethernet real time network. Measurement results are provided while the system is running. With first detailed measurements we are able to show that the test system may assess system stability of networks and their limits to be identified. These topics get more and more important when looking for Industry 4.0 and the Internet of Things which leads to many more components connected to the networks and resulting in more complex networks with different physical layers. We assess some crucial features for real-time data transfer. As a first finding, we see that networks with different physical layers can be used for real-time Ethernet data transfer with regard to timing and synchronization.

We plan to extend the test platform to provide also a 1 Gbit/s Ethernet interface to introduce the reduced physical layer for gigabit data transfer. Additionally other real time features and TSN features will be implemented to see the differences in data transfer and network usage.

---

## Referenzen:

- [1] McKinsey Digital; Industry 4.0 – How to navigate digitization of the manufacturing sector; [Online] Available: [https://www.mckinsey.de/sites/mck\\_files/files/mck\\_industry\\_40\\_report.pdf](https://www.mckinsey.de/sites/mck_files/files/mck_industry_40_report.pdf); 2015
- [2] P. Hank, S. Mülle, O Vermesan. Van Den Keybus; Automotive Ethernet: In-vehicle networking and smart mobility; Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE); 2013
- [3] Yoshifumi K.; Highly reliable network technology that is necessary for achieving future E/E architecture aimed at the age of „Automated Driving“; IEEE-SA 2015 Ethernet & IP @ Automotive Technology Day; October 2015
- [4] Time-Sensitive Networking Task Group; [Online] Available: <http://www.ieee802.org/1/pages/tsn.html>
- [5] 802.3bw-2015 – IEEE Standard for Ethernet Amendment 1: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 100 Mb/s Operation over a Single Balanced Twisted Pair Cable (100BASE-T1)
- [6] 1000BASE-T1 PHY P802.3bp Task Force; Draft D3.3 released; [Online] Available: <http://www.ieee802.org/3/bp/>
- [7] Gartner; OPEN Alliance Ethernet Study 2014 Forecast Data; [Online] Available: <http://www.opensig.org/about/market-forecast-gartner/>; 2014
- [8] Vogel-Heuser B., Weber J, Folmer J; Evaluating reconfiguration abilities of automated production systems in Industrie 4.0 with metrics; ETFA 2015
- [9] PROFIBUS & PROFINET International, “Profinet”, Karlsruhe, Germany. Available: <http://www.profibus.com/technology/profinet>
- [10] IEEE 802.3-2012 – IEEE Standard for Ethernet; Clause 24
- [11] Hao Liu, Jingcheng Liu, Tianshu Bi, Jinsong Li, Wei Yang, Daonong Zhang, Performance analysis of time synchronization precision of PTP in smart substations, 2015 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control, and Communication (ISPCS)
- [12] H. Flatt, S. Schriegel, and J. Jasperneite, Reliable Synchronization Accuracy in IEEE 1588 Networks Using Device Qualification with Standard Test Patterns, 2013 International IEEE Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement Control and Communication (ISPCS)
- [13] D. Thiele, R. Ernst, Formal worst-case timing analysis of Ethernet TSN’s burst-limiting shaper, 2016 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition
- [14] Manfred Popp, Industrielle Kommunikation mit PROFINET, 2014, PROFIBUS Nutzerorganisation e. V.
- [15] S. Fuchs, H.-P. Schmidt, Real Time Ethernet and Synchronizing with Inhomogeneous Physical Layers: CAT5 and Unshielded Twisted Single Pair Cabling; SAE Technical Paper 2015-01-0199, 2015, doi:10.4271/2015-01-0199.

## Projektpartner:

inIT – Institut für industrielle Informationstechnik, Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Langenbruch 6, 32657 Lemgo

## Fördergeber:



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

**Kontakt:**



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

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

[hp.schmidt@oth-aw.de](mailto:hp.schmidt@oth-aw.de)



**Stefan Fuchs, M. Eng.**

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



**Alexander Gercikow, M. Eng.**

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

[al.gercikow@oth-aw.de](mailto:al.gercikow@oth-aw.de)



**Prof. Dr.-Ing. Stefan Witte**

inIT – Institut für industrielle  
Informationstechnik  
Hochschule Ostwestfalen-Lippe  
Langenbruch 6  
32657 Lemgo

[stefan.witte@hs-owl.de](mailto:stefan.witte@hs-owl.de)

## Zusammenfassung

Die zeitlich und örtlich hochaufgelöste Magnetfelddiagnostik für Schaltgeräte der nächsten Generation wird im Rahmen des Forschungsvorhabens RaMagNostic untersucht. Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung finanzierte Vorhaben wird gemeinsam mit der Technischen Universität Ilmenau, dem Fraunhofer-Institut IIS Erlangen und der Siemens AG Amberg sowie dem An-Institut der OTH Amberg-Weiden, aia automations Institut GmbH, durchgeführt. Erste Ergebnisse, die im Rahmen des kooperativen Promotionsvorhabens erzielt wurden, werden vorgestellt. Im Labor Anlagen- und Simulationstechnik wurde ein Versuchsaufbau erstellt und damit wurden erste Messungen durchgeführt. Parallel hierzu wurden Feldberechnungen mittels FEM (Finite Elemente Methode) durchgeführt. Mit diesen Ergebnissen wurde die prinzipielle Machbarkeit nachgewiesen und die Grundlage für die Entwicklung einer Magnetfeld-Kamera gelegt.

## Abstract

Measurements of time and space resolved magnetic fields are used to diagnose the current switching behavior of low voltage switchgear. Such switchgear plays an important role in the energy distribution of the smart factory. The project, which is funded by the Federal Ministry of Education and Research, is carried out in cooperation with the TU (Technical University) Ilmenau, Fraunhofer Institute IIS Erlangen, Siemens AG Amberg and the OTH Amberg-Weiden affiliated institute aia automations institute.

A test stand has been built in the laboratory that enables measurements of magnetic fields at realistic switching conditions. With this setup it is demonstrated that real world switching equipment may be diagnosed with magnetic fields. First results from FEA (finite element analysis) simulation and measurements are given.

---

## 1 Einleitung

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsprojekts „Rapid Magnetic Diagnostic“ soll eine Magnetfeldkamera zur Lichtbogendiagnostik von Niederspannungsschaltgeräten entwickelt werden. Bei der Diagnose von Schaltgeräten ist der tatsächliche Bewegungsablauf von Schaltstück und Lichtbogen von zentraler Bedeutung. Anders als bei einer optischen Erfassung, welche stark modifizierte Labormuster voraussetzt, wird in diesem Projekt ein magnetischer Ansatz verfolgt werden, wodurch die Diagnose von nicht modifizierten Schaltgeräten erstmals möglich wird<sup>[1]</sup>. Zu diesem Zweck muss sowohl eine hohe zeitliche als auch eine hohe örtliche Auflösung in einer Magnetfeld-Kamera vereint werden, um ausgehend vom gemessenen Magnetfeld auf die transienten Strompfade rückzurechnen<sup>[2]</sup>.

## 2 Anforderungsanalyse mittels Simulation und Versuch

Im ersten Schritt werden die Detailanforderungen an die Magnetfeld-Kamera geklärt, indem zum einen die Feldverteilungen mittels FEM-Berechnungen simuliert werden und zum anderen Versuche für die Sensorik durchgeführt werden. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen werden dazu verwendet, die Modellierung so weit zu führen, dass selbst für die hier vorliegenden komplexen Zusammenhänge eine aussagekräftige Vorhersage der zeitlichen und örtlichen Variation der Magnetfelder möglich wird. Andererseits dienen die experimentellen Ergebnisse der Klärung der Detailanforderungen an die Sensorik.

## 2.1 Versuchsaufbau

Im Labor Anlagentechnik wurde eine Versuchsanlage aufgebaut, mit der Schaltvorgänge von ausgewählten Schaltgeräten realitätsnah durchgeführt werden können. Das Kernstück stellt ein LC-Schwingkreis dar, bei dem eine Kondensator-Entladung mit einigen Tausend Ampere über eine Induktivität synchron zum gesteuerten Auslösen des Schaltgerätes durchgeführt wird. Eine vereinfachte Darstellung des Ersatzschaltbildes ist in der Abbildung 1 dargestellt.

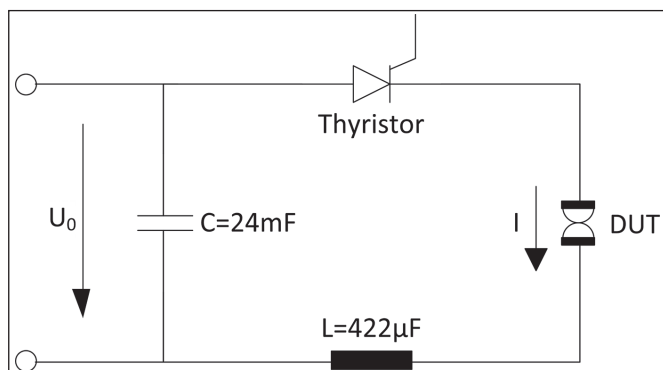


Abbildung 1: Vereinfachtes Ersatzschaltbild des Schwingkreises

Für die technische Realisierung wurde eine Kondensatorbank aufgebaut und die Induktivitäten als Drossel ohne Eisenkern ausgeführt. In Abbildung 2 ist die technische Umsetzung zu sehen.

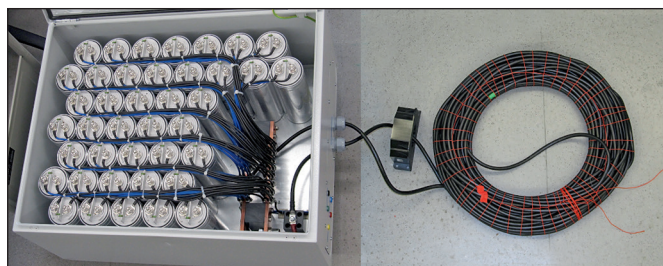


Abbildung 2: Technische Realisierung des LC-Schwingkreises

Mit diesem Aufbau können gezielt Abschaltungen mit realitätsnahen Stromverläufen im Labor nachgebildet werden. In Abbildung 3 ist die Messung eines typischen Strom- und Spannungsverlaufes dargestellt.

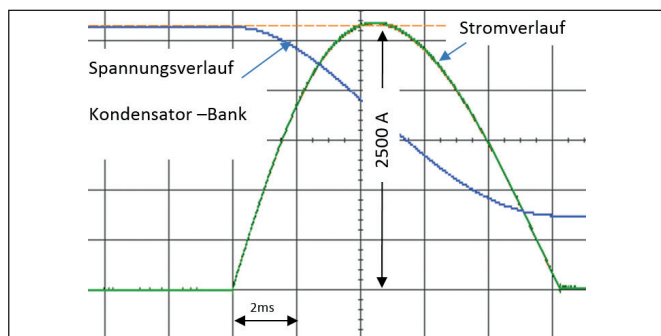


Abbildung 3: Gemessene Verläufe von Strom und Spannung des LC Schwingkreises

## 2.2 FEM(Finite Elemente Methode)-Simulationen

In einem ersten Schritt werden für eine vereinfachte Schaltergeometrie die Magnetfelder aller drei Raumrichtungen berechnet. Verwendet wird dazu eine auf elektromagnetische FEM-Berechnungen spezialisierte Simulationssoftware (Vectorfields/Opera 3D). Ergebnisse dieser Feldberechnungen sind in Abbildung 4 dargestellt, wobei die Geometrie des Leistungsschalters so vereinfacht wurde, dass die wesentlichen Einflussgrößen sichtbar werden. Im Laufe des Projektfortschritts wird die verwendete Geometrie sukzessive der Komplexität des realen Musterschalters angenähert, was z. B. das Einbeziehen weiterer sogenannter Löschbleche und ferromagnetischer Materialien beinhaltet.

Die Ergebnisse dieser Simulationen dienen schließlich in einem zweiten Schritt als Referenzdatensätze zur Erarbeitung von Rekonstruktions-Algorithmen [3][4]. Die Simulationen werden außerdem genutzt, um die Anforderungen an die Kamera-Hardware genauer zu spezifizieren.

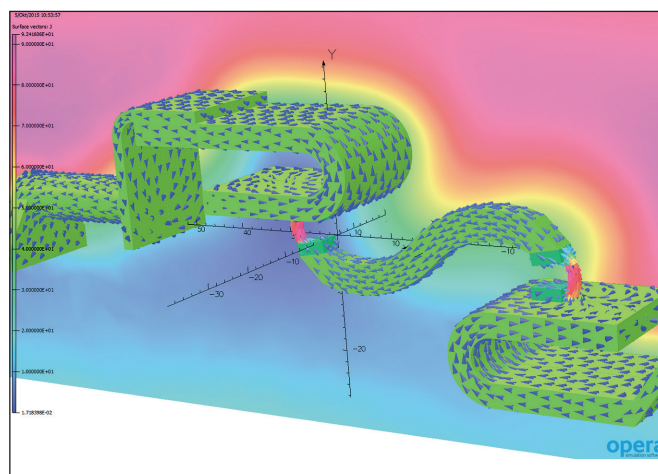


Abbildung 4: „Z“-Komponenten der magnetischen Fluss- und Stromdichteverteilung

## 3 Detektion des Magnetfelds bei einer Abschaltung

Ausgehend von den FEM-Berechnungen, die einen Anhaltswert für die Magnetfeldverteilung liefern, wurden an den Versuchsaufbau diskrete Sensoren platziert. Mit diesen Sensoren wurden die Magnetfeldstärken an einzelnen Punkten gemessen. Mit diesen Messergebnissen werden die Anforderungen an die zeitliche Auflösung des Messsystems weiter detailliert. In Abbildung 5 sind die Messwerte des Spannungsverlaufes über den Schalter sowie die Magnetfeldkomponente für eine typische Abschaltung dargestellt.

Wie aus der Abbildung 5 ersichtlich ist, korrelieren die Verläufe der Spannung am Schalter (violett) und die aufgezeichneten Magnetfeldstärke relativ gut, wenn man berücksichtigt, dass die Amplitude des Magnetfeldes direkt von der Stromstärke abhängig ist.

Da die Spannung am Schalter bei der Abschaltung direkt vom Strompfad abhängt, ist damit ein erster Zusammenhang zwischen dem Strompfad und der Messung des Magnetfeldes gezeigt.

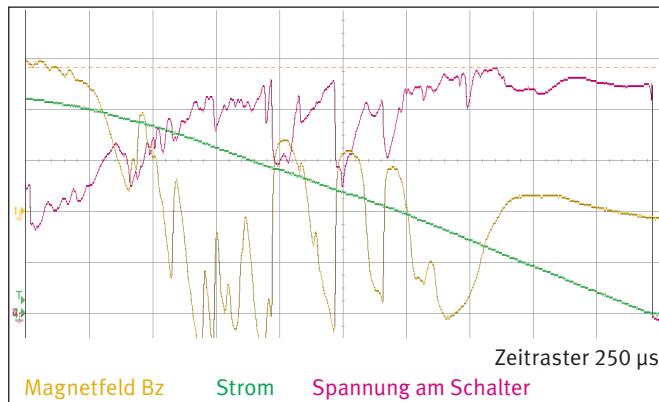


Abbildung 5: Zeitlicher Verlauf der Magnetfeldkomponente, des Stromes und der Spannung über die Schaltstücke bei einer Abschaltung

#### 4 Ergebnis und Ausblick

Mit den vorliegenden Berechnungsergebnissen und Messungen können die Anforderungen an das zu entwickelnde Magnetfeldkameranäsystem weitestgehend bestimmt werden. Aufgrund der guten Korrelation des zeitlichen Verlaufs der Spannung und des gemessenen Magnetfeldes konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, Informationen über den geometrischen Stromverlauf bei der Abschaltung für ein nicht modifiziertes Schaltgerät zu ermitteln.

Diese ersten Ergebnisse können für die Weiterarbeit verwendet werden, bei der das Magnetfeld an einer Vielzahl von Orten parallel und simultan aufgezeichnet wird, sodass ein örtlich und zeitlich aufgelöster Verlauf gemessen werden kann.

Wie in einer Voruntersuchung gezeigt wurde<sup>[5]</sup>, lässt sich dann zusammen mit a priori Informationen auf die örtliche und zeitliche Stromverteilung zurückrechnen.

#### Referenzen:

- [1] A. Laurent, F. Gary, D. Cajal, G. Velleaud, M. Mercier, A magnetic camera for studying the electric breaking-arc, Blaise Pascal University, Clermont Ferrand, 1993
- [2] C. Brdys, J.-P. Toumazet, A. Laurent, J. L. Ponthenier, Optical and magnetic diagnostics of the electric arc dynamics in low voltage circuit breaker, 2002
- [3] B. Roth, N. G. Sepulveda, J. P. Wikswo, Using a magnetometer to image a two-dimensional current distribution, 1988
- [4] C. Sumi, K. Hayakawa, and N. Koike, Reconstruction of 3-dimensional distribution of tangential current density components from magnetic vector measurement, 2007
- [5] H.-P. Schmidt, S. Kosse, A. Anheuser, Simulation assisted diagnostics of switching arcs, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics Vol 35, Electromagnetic Nondestructive Evaluation XIV, IOS Press, 2011



### **Projektpartner:**

Technische Universität Ilmenau, Ilmenau  
Fraunhofer-Institut IIS, Erlangen  
Siemens AG, Amberg  
aia automations institut GmbH, Amberg

### **Fördergeber:**



### **Kontakt:**



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

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

[hp.schmidt@oth-aw.de](mailto:hp.schmidt@oth-aw.de)



**Christian Reil, M. Eng.**

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

[ch.reil@oth-aw.de](mailto:ch.reil@oth-aw.de)

# Gammakamera vs. Sonden-Messplatz – Bestimmung des Schilddrüsen-Uptakes mittels zweier Messsysteme

Karina Schuller, M. Sc.  
Prof. Dr. Ralf Ringler

## Zusammenfassung

Nach der Leitlinie zum Radioiodtest stehen dem Anwender zwei Messmodalitäten, die Gammakamera sowie der Sonden-Messplatz, für die Uptakebestimmung zur Auswahl<sup>[1]</sup>, wobei in der Praxis vorzugsweise der Sonden-Messplatz eingesetzt wird. Daraus ergibt sich die Frage, ob und in welchem Ausmaß sich die beiden Messsysteme hinsichtlich der Uptakeberechnung unterscheiden.

Aus strahlenschutztechnischen Gründen wurden lediglich Messungen mit Phantomen durchgeführt und miteinander verglichen. Dabei erfolgten Messungen an beiden Messsystemen. Um die alleinige Bedeutung der ROI-Größe (region of interest) zu untersuchen, wurde der Sonden-Messplatz an der Gammakamera mittels definierter ROI-Größe (analog zur effektiven Halbwertsbreite HWB des Sonden-Messplatzes) simuliert. Um die Simulation durchführen zu können, wurde zunächst die HWB messtechnisch erfasst ( $d = 25$  cm) und für weitere Abstände  $d$  abgeschätzt. Als Einfluss- und somit auch Einstellparameter für die folgenden Messungen wurden die Tiefenlage  $t$  (Aktivitätstiefe im Phantom) sowie der Abstand  $d$  (Abstand zwischen Phantom und Detektor) festgelegt. Die Ausprägung der Tiefenlage  $t$  und des Abstandes  $d$  ist an dem derzeitig eingesetzten Hals-Phantom sowie der Leitlinie angelehnt.

Die Uptakeberechnungen am Sonden-Messplatz zeigen stets größere Abweichungen zum realen Uptake als die der Gammakamera. Die Uptakewerte am Sonden-Messplatz bei Variation des Abstandes ergaben Abweichungen bis zu 38 Prozent. Es konnte nachgewiesen werden, dass aufgrund des fehlenden Kollimators, analog zur Gammakamera, das Abstandsquadratgesetz zum Tragen kommt. Aufgrund dieser Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Gammakamera in jeder Betrachtungsweise dem Sonden-Messplatz vorzuziehen ist.

## Abstract

According to the guideline for radioiodine test, the user can choose between two measurement modalities, the gamma camera and the probe tester, for the determination of uptake<sup>[1]</sup>. In practice primarily the probe tester is used. That implies the question whether and in which extent the two measuring systems differ in determination of the uptake.

For reasons of radiation protection the measurements were carried out with phantoms and compared. Measurements were performed with both measuring systems. To investigate the sole importance of the ROI size (region of interest), the probe tester was simulated by using defined ROI size on the gamma camera (analogous to the effective half width HWB of the probe tester). To run the simulation, first the HWB was detected in a measurement ( $d = 25$  cm) and estimated for other distances  $d$ . The characteristics of the depth  $t$  and the distance  $d$  are based on the currently used neck phantom and guideline.

The uptake calculations on probe tester always show larger deviations from the real uptake than that of the gamma camera. The uptakes of the probe tester after varying the distance  $d$  showed deviations up to 38 percent. It could be proved that, due to the missing collimator, the inverse square law is achieved, similar to the gamma camera case.

As a result this study shows, that the gamma camera has to be favored to the probe tester in every sense.

## 1 Einleitung

Zur Bestimmung des Iod-Uptakes einer Patientenschilddrüse stehen gemäß der Leitlinie „Verfahrensanweisung zum Radioiodtest (Version 3)“ dem medizinischen Personal zwei Gerätetypen, der Sonden-Messplatz und die Gammakamera, zur Auswahl<sup>[1]</sup>. Die Gammakamera verfügt über mehrere Photomultiplier, die die Rekonstruktion des Untersuchungsareals in Form einer 2-D-Darstellung ermöglichen. Die Auswertung der Messdaten erfolgt mithilfe der ROI-Technik (region of interest). Diese lässt eine differenzierte Uptake-Berechnung der relevanten Schilddrüsenareale zu und bietet die Möglichkeit, Streu- und Hintergrundstrahlung außerhalb der betrachteten Areale in der Auswertung zu berücksichtigen. Der Sonden-Messplatz stellt im Gegenzug zur Gammakamera eine deutlich einfachere Messapparatur dar. Anstelle einer zweidimensionalen Untersuchungsaufnahme mit individueller Betrachtung interessanter Areale, impliziert der Sonden-Messplatz ein Zählsystem, das die Aktivität im statischen Sichtfeld des Messsystems als Wertangabe ausgibt. Das Sichtfeld FOV (field of view) des Sonden-Messplatzes ist bestimmt durch dessen Kollimator und den Abstand  $d$  zwischen Patient und Messgerät.

Der Iod-Uptake der Patientenschilddrüse wird mittels einer Referenzmessung der verabreichten Kapselaktivität in einem Phantom (Hals- oder Schilddrüsen-Phantom) berechnet. Um eine möglichst genaue Bestimmung des Iod-Uptakes zu erhalten, müssen die Tiefe  $t$  der Patientenschilddrüse im Hals sowie der Abstand  $d$  zwischen Hals- bzw. Phantomoberfläche und Detektor bekannt sein bzw. genau eingestellt werden.

In der Optionalität der Messsysteme zur Bestimmung des Uptakes ist die Fragestellung begründet, ob mit einer Gammakamera suffizient ein Iod-Uptake über der Schilddrüse bestimmt werden kann. Weiterhin werden mögliche Unterschiede bei der Uptake-Berechnung zwischen der Gammakamera und dem Sonden-Messplatz ausgearbeitet. Wichtige Faktoren für die Untersuchung der Differenzen beider Messsysteme sind sowohl die Tiefenlage  $t$  der Aktivitätsanreicherungen im Gewebe als auch der Abstand  $d$  zwischen Halskontur und Messsystem. Des Weiteren wird das effektive Sichtfeld des Sonden-Messplatzes bestimmt.

## 2 Messsysteme und Versuchsparameter

### 2.1 Gammakamera und Sonden-Messplatz

Als Messsysteme kamen die Gammakameras E-Cam (Siemens AG) und Prism 1000 (Inter Medical GmbH) sowie der Sonden-Messplatz ISOMED 2162 2“ (Nuklear-Medizintechnik Dresden GmbH) zum Einsatz (Abb. 1 und 2). Die zusammengehörigen Soft- und Hardwarekomponenten der Gammakamera regenerieren aus den registrierten Gammaquanten ein 2-D-Planarbild. Beide Gammakameras

verfügen über einen Detektor. Der Unterschied zum Sonden-Messplatz ist, dass die Kollimatoren der Gammakameras über sehr viele und klein dimensionierte Septen verfügen. Diese Kollimatoren fungieren als Filter und lassen lediglich nahezu parallel zu den Septen verlaufende Gammaquanten zur Bildrekonstruktion zu.

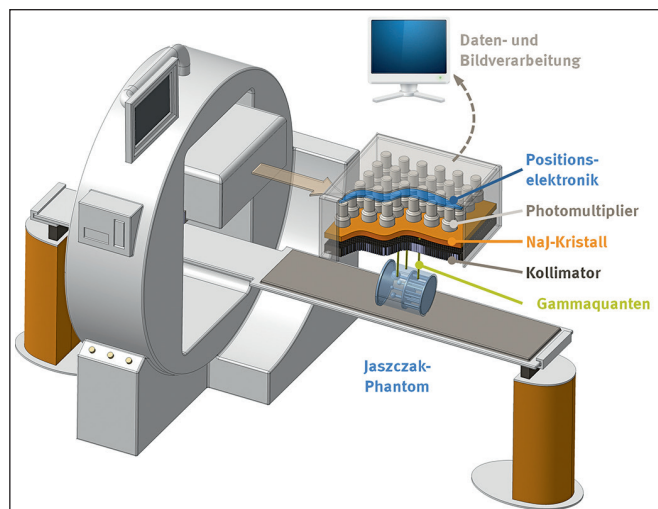


Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer Gammakamera am Beispiel der Prism 1000

Der Sonden-Messplatz, auch Schilddrüsen-Messplatz genannt, ist eine vereinfachte Form der Gammakamera. Diese Art von Messsystem wird speziell bei Messungen der Schilddrüse während einer Radioiodtherapie auf einer eigens eingerichteten Station angewendet. Der Kollimator bildet sich als zylindrisches Rohrstück ab, welches keine Parallelisierung der Gammaquanten zulässt. Folglich werden sämtliche, auch antiparallele Gammaquanten detektiert und in die Uptake-Berechnung mit einbezogen. Der Einsatzort des Sonden-Messplatzes umfasst die Therapieplanung sowie -kontrolle.

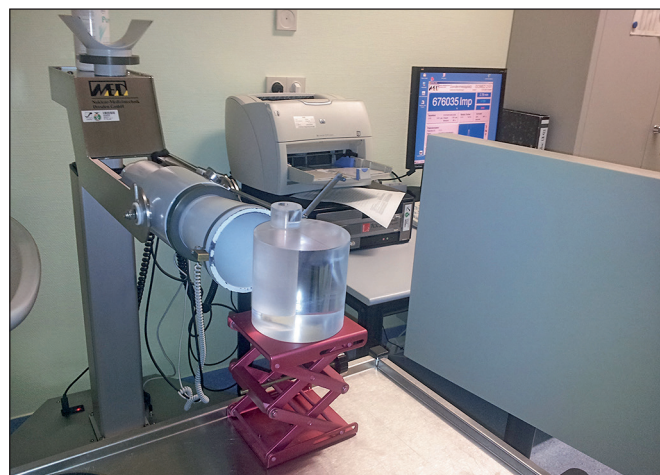


Abbildung 2: ISOMED 2162 mit Workstation

### 2.2 Phantome und Radionuklide

Zur Nachbildung der Patientenschilddrüse kamen zwei Phantome unterschiedlichen Aufbaus zum Einsatz. Das Schilddrüsen-Phantom, das mit radioaktiver Flüssigkeit

gefüllt wird, ist durch seine realitätsnahe Volumennachbildung der Schilddrüse mit Simulation heißer und kalter Knoten bestimmt (Abbildung 3). Im Gegensatz zum Hals-Phantom ist das Schilddrüsenvolumen kaum von Streumaterial umgeben. Die Tiefenlage  $t$  wird bei diesem Phantom durch weitere Phantomplatten nachgebildet. Der Abstand  $d$  berechnet sich stets zwischen Phantomoberfläche und Detektor.

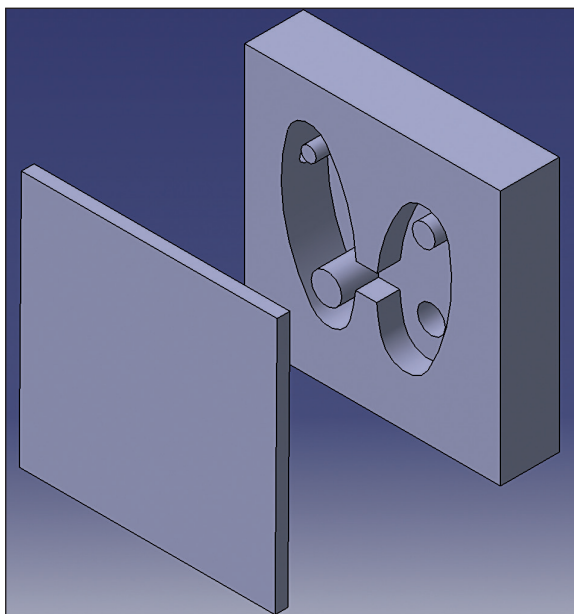


Abbildung 3: Schilddrüsen-Phantom mit Einlage

Das Hals-Phantom bietet die Möglichkeit, Punktquellen in eine Halsnachbildung mit unterschiedlicher Tiefenlage  $t$  einzubringen. Vor allem für feste Aktivitätsquellen ist das Hals-Phantom gut geeignet. Für die Nachbildung menschlichen Gewebes im Hinblick auf Wechselwirkungen von Photonen mit Materie wurde der Werkstoff Polyethylen ausgewählt.

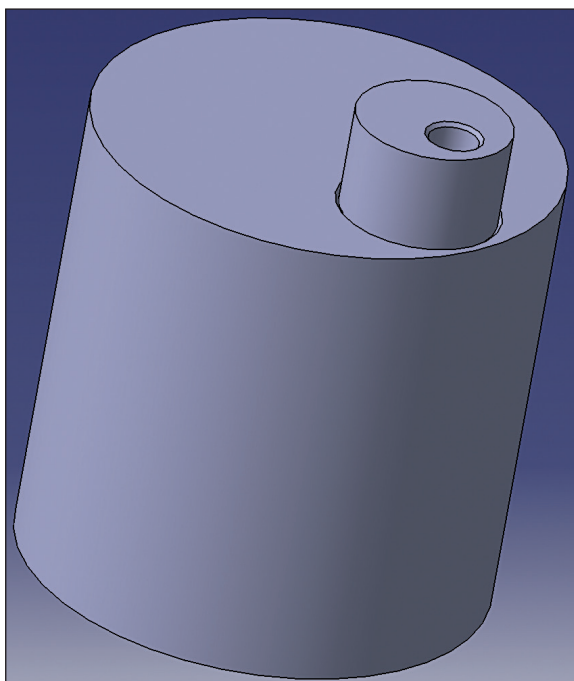


Abbildung 4: Hals-Phantom

Aufgrund der Verfügbarkeit und Handhabbarkeit wurde nicht nur Iod 131 ( $I-131$ ), sondern auch Technetium 99m ( $Tc-99m$ ) verwendet. Als fester Stoff wurde das  $I-131$  lediglich im Hals-Phantom eingebracht. Wohingegen jedoch das  $Tc-99m$  in Form einer Flüssigkeit in beiden Phantomern zur Anwendung kam.

### 2.3 Relevante Parameter

Der Messaufbau und die Einstellparameter richten sich im Allgemeinen nach der Leitlinie „Verfahrensanweisung zum Radioiodtest (Version 3)“. Dabei beträgt der ideale Abstand zwischen Halskontur des Patienten und dem jeweiligen Messsystem mindestens 25 cm.<sup>[1]</sup>

Um den Uptake einer Patientenschilddrüse berechnen zu können, muss eine Vergleichsmessung mit einem Phantom (oder frei Luft mit entsprechendem Korrekturfaktor) möglichst gleicher Einstellparameter (Tiefenlage der Schilddrüse im umliegenden Gewebe, Abstand zur Kamera) erfasst werden. Die Tiefenlage  $t$  der Aktivitätsanreicherungen bzw. der Schilddrüse wird am Patienten mithilfe medizintechnischer Bildgebungsverfahren bestimmt. Als individuelle Einstellparameter des Versuchs sind der Abstand  $d$  und die Tiefenlage  $t$  anzusehen.

Der Uptake berechnet sich unter Verwendung einer Referenzmessung (Aufnahme der applizierten Aktivität im Phantom) zusammen mit der eigentlichen Patientenmessung folgendermaßen:

$$Uptake [\%] = \frac{\text{Nettozählrate über Patientenschilddrüse}^*}{\text{Nettozählrate über Phantom}^{**}} * 100\%$$

- \* Phantommessung als Ersatz für Patientenmessung
- \*\* Phantommessung als Referenzmessung

Um die Gammakamera mit dem Sonden-Messplatz direkt vergleichen zu können, wurden Messungen mit  $I-131$ -Kapseln im Hals-Phantom an beiden Systemen durchgeführt. Messungen mit  $Tc-99m$  erfolgten lediglich an der Gammakamera mit sowohl dem Hals- als auch dem Schilddrüsen-Phantom. Der Uptake des Sonden-Messplatzes wurde in diesen Fällen stets mittels abstandsabhängiger ROI am Ergebnisbild der Gammakamera theoretisch ermittelt. Der effektive Durchmesser des Sichtfeldes des Sonden-Messplatzes entspricht der effektiven Halbwertsbreite des SONDENSICHTFELDES (FOV), die zunächst mithilfe der geometrischen Maße des Sondenkollimators und des Abstandes zwischen Sichtfeldebene und Sondenkristall theoretisch anhand der Maße des Kollimators sowie des Kristalls berechnet und im späteren Verlauf praktisch nachgewiesen wurde (Tabelle 1). Die effektive Halbwertsbreite ist mit dem Durchmesser des FOV am Sondenmessplatz gleichzusetzen.

Tabelle 1: Theoretisch ermittelter Durchmesser des FOV am Sonden-Messplatz

Abstand d zw. Kristall und Herdaktivität [cm]	HWB (Durchmesser FOV) [cm]
20	11,7
25	14,0
30	16,3
35	18,6
40	20,9
45	23,2
50	25,4

### 2.4 Effektive Halbwertsbreite HWB des Sonden-Messplatzes ISOMED 2101

Um die effektive Halbwertsbreite des Sonden-Messplatzes bestimmen zu können, wurden Messungen mit I-131 in einem Abstand von  $d = 25$  cm sowie unterschiedlichen Radien  $r$  zur Mittelachse der Sonde aufgenommen. Die Aktivität wurde sukzessiv von der Mittelachse entfernt. Analog zur vorangegangenen Überlegung besteht die These, dass die gemessene Herdaktivität bei einem Radius von ca.  $r \approx 7$  cm um die Hälfte gegenüber der Referenzmessung (Aktivität auf der Mittelachse) abnimmt.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Effektive Halbwertsbreite HWB des Sonden-Messplatzes ISOMED 2101

Die nachstehende Grafik (Abbildung 5) stellt die gemessenen Bruttoimpulse des Versuchs am Sonden-Messplatz mit I-131 normiert auf die Bruttoimpulse der Aufnahme im Radius  $r = 0$  cm dar. Für den effektiven Halbwertsbreitenradius HWBr lässt sich der Radius von  $r \approx 7,6$  cm bei einem Impulsabfall um 50 Prozent ablesen. Die Bereiche zwischen den Messpunkten sind linear interpoliert. Bis zu einem Radius von  $r \approx 4$  cm werden nahezu 100 Prozent der maximal möglich erfassbaren Impulse detektiert.

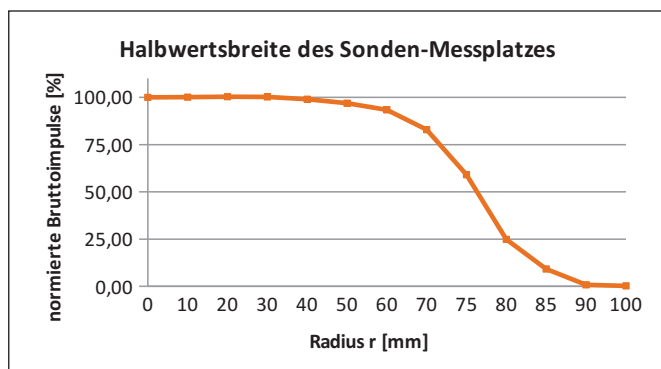


Abbildung 5: Normierte Bruttoimpulskurve bei Messungen an dem Sonden-Messplatz im Abstand  $d = 25$  cm und variablen Radius  $r$  zur Mittelachse des Kollimators bzw. Kristalls (I-131)

Für sämtliche Betrachtungen hinsichtlich der Simulation des Sonden-Messplatzes an der Gammakamera wird die effektive Halbwertsbreite von  $HWB = 15,2$  cm als Durchmesser der FOV angenommen. Die Durchmesser der FOV in Analogie zum Sonden-Messplatz bei Abständen von  $d = 30$  cm und  $35$  cm werden über den Strahlensatz berechnet.

### 3.2 Einfluss des Abstandes d auf die Uptake-Berechnung

Werden Aufnahmen mit unterschiedlichen Abständen  $d$  zwischen Phantomoberfläche und Kollimator bzw. Sondenkristall miteinander verglichen (vgl. Messung bei  $d = 30$  cm mit  $25$  cm bzw.  $35$  cm), zeigt sich, dass die Gammakamera bei der Uptake-Berechnung stets unempfindlicher gegenüber der Abstandsvariation ist (Abbildung 6). Simuliert man hingegen das FOV des Sonden-Messplatzes an der Gammakamera und vergleicht den Uptake mit der eigentlichen ROI, weicht der Uptake der Simulation gering, aber dennoch mehr von dem zu erwartenden Wert gegenüber der ROI, ab (Abbildung 7). Die Abweichungen sind trotz zusätzlicher Hintergrundaktivität um ein Vielfaches geringer als im direkten Vergleich der beiden Messmethoden/-geräte.

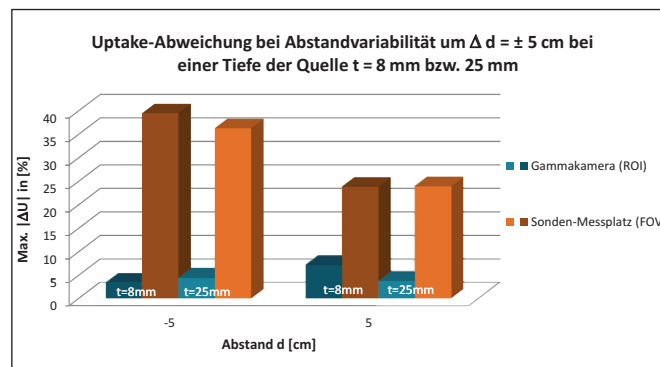


Abbildung 6: Vergleich des Uptakes zwischen Gammakamera und Sonden-Messplatz ohne Hintergrundaktivität (I-131)

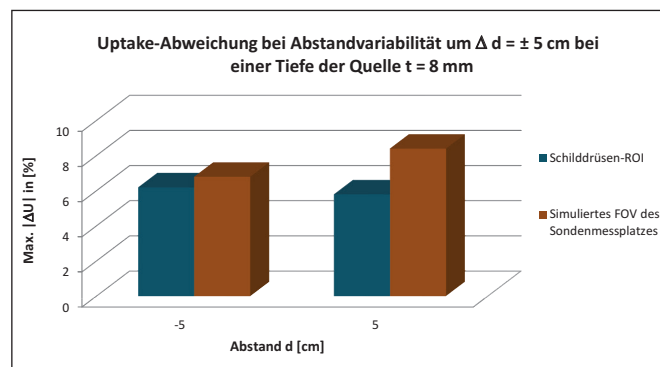


Abbildung 7: Vergleich des Uptakes zwischen Schilddrüsen-ROI und simuliertem FOV des Sonden-Messplatzes an der Gammakamera mit Hintergrundaktivität (Tc-99m)

### 3.3 Einfluss der Tiefenlage $t$ auf die Uptake-Berechnung

Verändert man nun die Tiefenlage  $t$  der Herdaktivität zwischen Phantom- und Referenzmessung, ändert sich ebenso der daraus ermittelte Uptake. Es werden Tiefenlagen von  $t = 8$  mm (Referenz-) und  $t = 25$  mm (Phantommessung) untersucht. Im Idealfall ist die Tiefenlage der Herdaktivität zwischen Phantom- und Referenzmessung gleich, sodass sich ein theoretischer Uptake von 100 Prozent ergibt. Nimmt die Tiefenlage in der Phantommessung gegenüber der Referenzmessung zu, fällt oder steigt der Uptakewert. Die Änderung des Uptakes durch Zunahme der Tiefenlage  $t$  ist bei dem Sonden-Messplatz stärker ausgeprägt als bei der Gammakamera (Abbildung 8).

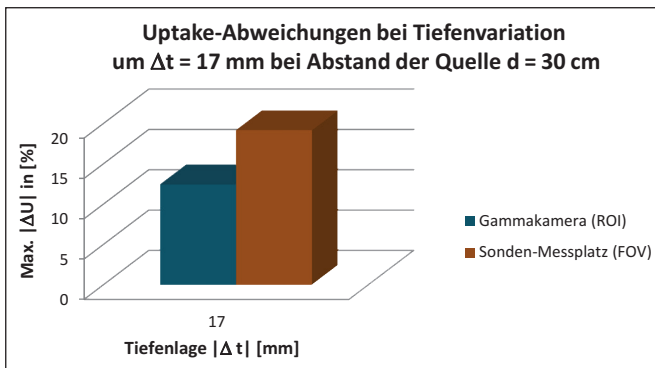


Abbildung 8: Vergleich des Uptakes zwischen Gammakamera und Sonden-Messplatz bei Tiefenvariation ohne Hintergrundaktivität (I-131)

Auch bei der Simulation des FOV an der Gammakamera zeichnet sich die Empfindlichkeit des Sonden-Messplatzes ab (Abbildung 9). Die Uptake-Differenz zwischen simuliertem FOV und Schilddrüsen-ROI nimmt ähnliche Werte analog zum tatsächlichen Gerätevergleich mit I-131 an.

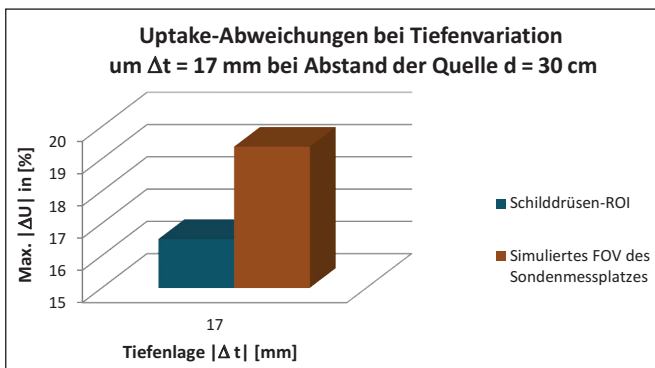


Abbildung 9: Vergleich des Uptakes zwischen Schilddrüsen-ROI und simuliertem FOV des Sonden-Messplatzes bei Tiefenvariation an der Gammakamera mit Hintergrundaktivität (Tc-99m)

## 4 Zusammenfassung

Variiert der Abstand  $d$  zwischen Phantom- und Referenzmessung, ist die Gammakamera stets unempfindlicher als der Sonden-Messplatz. Im Hinblick auf die Uptakeabweichungen im direkten Vergleich der Bildgebungsmodalitäten zeigt der Sonden-Messplatz ein Vielfaches der Abweichung der Gammakamera. Da die Gammakamera über einen detaillierten und auf das Nuklid angepassten Kollimator verfügt, ändert sich die detektierte Impulszahl an der Gammakamera durch Variation des Abstandes  $d$  kaum. Betrachtet man im Gegenzug eine Gammakamera ohne Kollimator, zeigt sich bei doppeltem Abstand  $d$  eine Abnahme der Impulszahl um das Vierfache (Abstandsquadratgesetz). Dieser Effekt kommt auch bei dem Sonden-Messplatz zum Tragen. Obwohl der Sonden-Messplatz über einen einfach konstruierten Kollimator verfügt, verhält sich die Impulsdetektion innerhalb des Sichtfeldes analog zum Abstandsquadratgesetz.

Die Variation der Tiefenlage  $t$  in Phantom- und Patientennmessung zeigt ebenso, dass die Gammakamera unempfindlicher als der Sonden-Messplatz ist.

Simuliert man hingegen den Sonden-Messplatz an der Gammakamera über die durch die effektive Halbwertsbreite des Sonden-Messplatz begrenzte ROI-Größe, zeigt sich, dass bei beiden Einstellparametern, Abstand  $d$  und Tiefenlage  $t$ , die Uptakewerte der Simulation mehr von den Vergleichswerten der eigentlichen Schilddrüsen-ROI abweichen.

## 5 Ausblick

Aus dieser Untersuchung ergibt sich die Empfehlung, anstelle des Sonden-Messplatzes die Gammakamera zum Bestimmen des Uptakes zu verwenden. Nicht nur die realitätsnäheren Uptakewerte, sondern auch die Tatsache, dass über eine Gammakamera auch eine 2-D-Aufnahme und damit eine visuelle Bewertung der vorzufindenden Herdanreicherungen gegeben sind, sprechen für den Einsatz der Gammakamera. Das FOV von ca. 8 cm (Abstand  $d = 25$  cm) am Sonden-Messplatz, in dem nahezu 100 Prozent der Herdaktivität detektiert wird, kann bei größeren Herdanreicherungen oder einer exzentrisch zur Sonde positionierten Patientenschilddrüse zu einem deutlichen Fehler in der Uptakeberechnung führen. Des Weiteren kann ohne 2-D-Darstellung nicht überprüft werden, ob die Schilddrüse vollständig von der Sonde erfasst wurde oder Herdanreicherungen berücksichtigt werden, die keinen Teil zur Therapie beitragen. Eine Umstrukturierung der Therapiestationen vom Sonden-Messplatz hin zu einer vollwertigen Gammakamera ist mit einem hohen finanziellen Aufkommen verbunden, bietet jedoch dem Patienten eine genauere Therapieplanung.

---

### **Referenzen:**

- [1] M. Dietlein, J. Dressler, W. Eschner, M. Lassmann, B. Leisner, C. Reiners, H. Schicha, Leitlinie – Verfahrensanweisung zum Radioiodtest (Version 3), <http://www.nuklearmedizin.de/leistungen/leitlinien/html/radioiodtest.php?navId=53>, 03.03.2014

### **Projektpartner:**

Kliniken Nordoberpfalz eG, Weiden

### **Kontakt:**



**Karina Schuller, M. Sc.**

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

[ka.schuller@oth-aw.de](mailto:ka.schuller@oth-aw.de)



**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)

# Protonenleitende Metalloxide für die Wasseranalytik: Stand der Technik und neuartige Messkonzepte

Prof. Dr. Peter Kurzweil  
Sebastian Chalupczok, M. Eng.  
Helmut Hartmann, M. Eng.

## Zusammenfassung

Moderne Anwendungen der pH-Bestimmung bei Temperaturen zwischen  $-35\text{ °C}$  und  $130\text{ °C}$  in technischen und biologischen Medien, die sich anders als ideale wässrige Lösungen verhalten, erfordern neue Ansätze der pH-Überwachung. Die vor fast hundert Jahren eingeführte Glaselektrode und chemische Sensoren auf Basis von Feldeffekttransistoren (ISFET) bergen spezifische Nachteile im Hinblick auf Handhabung und Langzeitstabilität. Protonenleitende Metalloxide sind eine vielversprechende Alternative zum Stand der Technik – und könnten einige Probleme der klassischen Wasserstoffelektroden und Referenzsysteme überwinden.

## Abstract

Novel applications of online pH determinations at temperatures from  $-35\text{ °C}$  to  $130\text{ °C}$  in technical and biological media, which are all but ideal aqueous solutions, require new approaches to pH monitoring. The glass electrode, introduced nearly hundred years ago, and chemical sensors based on field effect transistors (ISFET) show specific drawbacks with respect to handling and long-time stability. Proton sensitive metal oxides seem to be a promising alternative to the state-of-the-art measuring methods, and might overcome some problems of classical hydrogen electrodes and reference electrodes.

## 1 Einleitung

Platinmetalloxide sind als redoxaktive Materialien für ultraschnelle Redoxspeicher und pH-sensitive Funktionsschichten bekannt<sup>[1-3]</sup>. Leider ist es bislang nicht gelungen, eine von Kalibrierstandards unabhängige pH-Messung zu realisieren. Versuche, die eingeführte potentiometrische Messung durch eine „coulometrische Protonenzählung“ zu ersetzen, klingen futuristisch<sup>[4]</sup>.

Der pH-Begriff wurde 1909 von Søren P.L. Sørensen für den „Lösungsdruck“ von Wasserstoffionen in wässriger Lösung geprägt. IUPAC definiert die Größe pH auf Basis der temperaturunabhängigen Molalität  $b$  (in  $\text{mol kg}^{-1}$ ) und ignoriert, dass freie  $\text{H}^{\oplus}$ -Ionen in wässriger Lösung nicht existieren können. Für Berechnungen mit der molaren Konzentration muss die Dichte des Wassers korrigiert werden.

$$pH = -\lg a_H = -\lg \frac{b_H \cdot \gamma_H}{b^0} = -\lg \frac{c_H \cdot \gamma_{cH}}{c^0} + \lg \frac{\rho}{\text{g cm}^{-3}}$$

$a$  Aktivität,  $b$  Molalität ( $b^0 = 1\text{ mol/kg}$  Lösemittel),  
 $\gamma$  Aktivitätskoeffizient,  $c$  molare Konzentration  
( $c^0 = 1\text{ mol L}^{-1}$ ),  $\rho$  Dichte von reinem Wasser

Stand der Technik ist die *pH-Glaselektrode*: Eine dünne Kugel aus mit Lithium, Barium und Lanthan dotiertem Spezialglas trennt die Analysenlösung von einer Innenlösung. Die weniger als  $0,5\text{ }\mu\text{m}$  dünne Quellschicht des Glasnetzwerks tauscht mit den Lösungen Kationen gegen  $\text{H}_3\text{O}^{\oplus}$ -Ionen aus. Das Membranpotenzial wird mithilfe zweier Silber-Silberchlorid-Elektroden beiderseits der Membran gemessen. Es gilt die *Nernst-Gleichung*; doch sind absolute pH-Messungen wegen der unbekanntenen Diffusionspotenziale an den Glasritzen und dem Asymmetriepotential der nicht völlig gleichen Bezugselektroden nicht möglich.

$$\Delta\varphi_{I-II} = \frac{RT}{F} \ln \frac{a(\text{H}^{\oplus}, \text{Glas I})}{a(\text{H}^{\oplus}, \text{Lösung I})} - \frac{RT}{F} \ln \frac{a(\text{H}^{\oplus}, \text{Glas II})}{a(\text{H}^{\oplus}, \text{Lösung II})} = \frac{RT}{F} (pH_{II} - pH_I) + \Delta\varphi_{as}$$

$$E = \frac{RT}{F} (pH_{II} - pH_I) + E_{as} + E_d$$

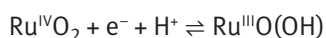
Funktionelle Gruppen auf der Glasoberfläche führen zu Abweichungen von der theoretischen Nernst-Steigung,  $dE/dpH = \ln 10 \cdot (RT/F) \approx 0,059$  bei  $25\text{ °C}$ . Der Kettennullpunkt,  $U = 0\text{ V}$ , in kommerziellen Glaselektroden liegt um



pH 6,84. Die Zellspannung muss mit Standardpufferlösungen kalibriert werden.

## 2 Metalloxid-Elektroden

Metalloberflächen mit unlöslichen Hydroxiden in wässriger Lösung, wie die Antimonelektrode, zeigen den pH-Wert an. Unter den Platinmetalloxiden zeigt Rutheniumdioxid die beste Empfindlichkeit, lässt sich aber durch Reduktionsmittel wie Sulfit und Ascorbinsäure irreversibel beschädigen. Aus der vereinfachten Redoxgleichung



ergibt sich die ungefähre pH-Abhängigkeit des Elektrodenpotenzials:

$$E = E^0 - 0,059 \text{ pH}$$

Mit Glaspulver vermischte Rutheniumdioxid-Sinterschichten sind mechanisch wenig stabil, neigen mit zunehmender Alterung zu Drift und langer Ansprechzeit. Ungelöst ist das Phänomen der Hysterese, d. h., beim Eintauchen in verschiedene pH-Pufferlösungen erreicht der Sensor nicht mehr den Ausgangswert. RuO<sub>2</sub> auf Aluminiumoxid mit metallischem Kontakt zeigt sich in Wasser, Kalilauge und pH-6-Pufferlösung lagerungsstabil mit Ansprechzeiten von 15 bis 55 s. In Salzsäure sind Empfindlichkeit und Elektrodenpotenzial unbefriedigend. Frische Metalloxidsensoren altern nach einem unbekanntem Mechanismus unter Abfall von Elektrodenpotenzial und pH-Sensitivität

und Ausbildung einer Hysterese. Binäre Metallkomposite aus RuO<sub>2</sub>/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (7 : 3) zeigen eine hohe Sensitivität bei kurzen Ansprechzeiten unter 8 s.

Neben Rutheniumdioxid sind weniger pH-sensitive Materialien: PtO<sub>2</sub>, IrO<sub>2</sub>, OsO<sub>2</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, WO<sub>3</sub>, PbO<sub>2</sub> und Bi<sub>2</sub>O<sub>5</sub> [5]. PtO<sub>2</sub> zeigt eine reproduzierbare Sensitivität, allerdings verbunden mit langen Ansprechzeiten. Als vielversprechend gilt Iridiumdioxid mit mechanischer Stabilität, geringer Drift, niedrigen Ioneninterferenzen und Stabilität in wässrigen und korrosiven Lösungen über einen weiten pH-, Temperatur- und Druckbereich. DC-Sputterschichten von IrO<sub>2</sub> haften auf Tantal, Stahl und Iridium; Aluminium, Gold, Chrom, Molybdän und Quarz zeigen schlechte Adhäsion. Der Träger beeinflusst das Elektrodenpotenzial nicht. Dicke Oxidfilme sprechen langsamer an als dünne.

Eine kostengünstige Herstellung miniaturisierter Sensoren bietet das Siebdruckverfahren. Auf Trägerfolien aus Polyester erreichen Widerstandspasten mit 9,8 Prozent RuO<sub>2</sub> die beste Reproduzierbarkeit und Sensitivität. Aluminiumoxid eignet sich wegen seiner hohen Sintertemperatur (1600 °C) als Träger für Wolfram- und Molybdänleiterbahnen in Hochtemperatur-Mehrlagenkeramik (HTCC). Die besser leitfähigen Gold- und Silberleiterbahnen werden als Niedertemperatur-Einbrand-Keramik (LTCC) unterhalb 900 °C hergestellt.

Ausgewählte Metalloxidsensoren stellt Tabelle 1 zusammen.

Tabelle 1: Stand der Technik: Protonenleitende Metalloxide für die potenziometrische pH-Messung

Herstellverfahren und Träger	Arbeits-elektrode	Bezugs-elektrode	Arbeits-pH	Bereich mV/pH	Vorteile und Ansprechzeit	Nachteile und Störungen	Referenz
Sinterschicht auf Pyrex	RuO <sub>2</sub> /Glas	SCE	2 – 12	-58	unempfindlich gegen Gelöstsauerstoff	instabil; Drift, Hysterese, lange Ansprechzeit; Chlorid	[8]
Siebdruck auf Polyester	RuO <sub>2</sub>	SCE	2 – 9	-51,2	ideal 9,8 % RuO <sub>x</sub> -Gehalt, keine Hysterese, schnelles Ansprechen	Reduktionsmittel: Sulfit, Ascorbinsäure; Korrosion	[9]
Siebdruck auf Polyester	PdO	SCE	2 – 9	-15 ... 20		wenig empfindlich	[9]
Siebdruck auf Polyester	TiO <sub>2</sub>	SCE	2 – 9	-10 ... 30		wenig empfindlich	[9]
Siebdruck auf Polyester	PtO <sub>2</sub>	SCE	2 – 9	-50	gut reproduzierbar		[9]
Siebdruck auf Aluminiumoxid	RuO <sub>2</sub>	Ag/AgCl	2 – 10	-52,1	lagerungsstabil in Wasser, KOH und pH-6-Puffer; 15 ... 55 s	Lagerung in Salzsäure	[10]
Magnetronspütern auf Tantal	RuO <sub>2</sub> / Nanotubes	Ag/AgCl	2 – 12	-55	keine Störung durch K <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , F <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ; < 40 s	Hysterese ≈ 10 mV; Alterung beim Lagern in pH 7; Iodid	[11]
Siebdruck/Sintern auf Aluminium	RuO <sub>2</sub>	Ag/AgCl	2 – 13	-58	empfindlich gegen Gelöstsauerstoff; 1 ... 2 s bis 10 min (bei 0 °C)	lange Ansprechzeit in der Kälte	[12]
Siebdruck auf LTCC	RuO <sub>2</sub> /Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (7 : 3)	Ag/AgCl	2 – 12	-56 ± 8	gute Empfindlichkeit; < 8 s	Hysterese	[13]
DC-Sputtern auf: Tantal, Stahl, Iridium	IrO <sub>2</sub>	SCE; Gegen-elektrode, Platin	3 – 10	-59,5	gute Haftung; Träger beeinflusst Elektrodenpotenzial nicht	schlechte Haftung auf Aluminium, Gold, Chrom, Molybdän, Quarz; Lebensdauer 750 h; Na <sup>+</sup> , Pb <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , Fe <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , Ag <sup>+</sup>	[14]
Elektrochemisches Zyklisieren von Iridiumdraht	IrO <sub>2</sub>	SCE	2 – 12	-60 ... 80	Sensitivität wächst mit Oxidationszustand; schnelles Ansprechen 40 ... 350 ms	Dicke Filme sprechen langsamer an als dünne	[15]
Thermische Oxidation von Iridiumdraht	IrO <sub>2</sub>	SCE	2 – 12	-59	auch für Flusssäure; Reproduzierbarkeit ± 1 mV	HF verändert die pH-Empfindlichkeit	[16]

### 3 Neue Messprinzipien

Die Entwicklung miniaturisierter pH-Sensoren auf Basis protonenleitender Metalloxide eröffnet neue Anwendungen in Chemie, Biologie und Medizin – wo immer wartungsintensive, mechanisch und chemisch empfindliche Glaselektroden ersetzt oder Volumina im Mikroliterbereich analysiert werden müssen. Unsere Arbeitsgruppe ist auf der Suche nach neuen Messprinzipien, die die überkommene Spannungsmessung ablöst (Tabelle 2).

1. Coulometrie. Ein Mikrotitrator mit RuO<sub>2</sub>-Elektrode als pH-Anzeige und an Goldelektroden elektrolytisch erzeugten H<sup>+</sup> bzw. OH<sup>-</sup> als Titrationsmittel ist grundsätzlich machbar. Beispielsweise kann 0,01 molare Essigsäure bei 6,8 µA Strom (Erzeugung von OH<sup>-</sup>-Ionen) mit einem Messfehler von 5 Prozent reproduzierbar titriert werden.
2. Amperometrie. An einem Polyanilinfilm auf einer Grafitableitelektrode stellt sich ein pH-abhängiger Strom ein, wenn ein äußeres Potenzial angelegt wird. Trotz langsamer Ansprechzeit und Nichtlinearität sind amperometrische Biosensoren in Kombination mit enzymatischen Reaktionen interessant.
3. Impedanzspektroskopie. Widerstand und Kapazität von RuO<sub>2</sub>- und SnO<sub>2</sub>-Elektroden ändern sich pH-abhängig besonders im niedrigen Frequenzbereich (< 1 kHz). Ursächlich sind Diffusionsvorgänge an der porösen Elektrodenoberfläche, die sich im sauren und

basischen Bereich leider durch unterschiedlich lineares Ansprechverhalten unterscheiden. Interdigitalsensoren mit Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (1 : 3) sprechen innerhalb von 6 s an.

### 4 Experimentelle Befunde an Metalloxiden

An den Sauerstoffdefektstellen unterstöchiometrisch zusammengesetzter Metalloxide können Ionen aus der Lösung einlagern und Protonen mit dem Metalloxid austauschen. Die Elektrodenoberfläche erscheint nanoporös (Abbildung 1). Wichtig für die Redoxaktivität ist die Vielzahl der Oxidationsstufen, die das Metalloxid in pH-abhängigen Reaktionen einnehmen kann. Die Herstellung der Oxide muss so erfolgen, dass ein amorpher Restanteil im kristallinen Gitter existiert (Abbildung 2).

Eine IrO<sub>2</sub>/Ti-Elektrode wurde gegen verschiedene Elektroden in drei pH-Puffern impedanzspektroskopisch untersucht<sup>[6]</sup>. Im Kapazität-Widerstand-Diagramm zeigen Passivschichtbildner (wie Niob, Tantal und Titan in alkalischer Lösung) eine degressive Kurvenform, während inerte Elektrodenoberflächen (wie Gold, Glaskohlenstoff, Wolfram) mit exponentiellem Anstieg verlaufen (Abbildung 3). Hierbei wird die Metalloxydelektrode als Quasireferenzelektrode eingesetzt, deren Potenzial vom pH-Wert wie bei einer Wasserstoffelektrode bestimmt wird.

Interessant ist die Krümmungsrichtung der C(R)-Kurve, die sich bei einigen Materialien mit dem pH-Wert ändert, was für einen Multi-Referenz-Sensor praktisch genutzt

Tabelle 2: Stand der Technik: Messkonzepte abseits der konventionellen Potenziometrie

Messkonzept	Arbeits-elektrode	Gegen-elektrode	Bezugs-elektrode	Messgröße und Anwendung	Eigenschaften	Referenz
Coulometrische Endpunktbestimmung	Gold, RuO <sub>2</sub>	Gold	Ag/AgCl	Titration, pH 2 – 12, –40 mV/pH;	Ansprechzeit: 30 s; Messfehler 5 %; extreme Drift bei pH < 2 und pH > 12	[17]
Amperometrie	Polyanilin auf Bleistiftgrafit	Polyanilin auf Bleistiftgrafit	SCE	Polyanilin als H <sup>+</sup> -sensitive Membran	lange Ansprechzeit in stark saurer Lösung; gute Reproduzierbarkeit: –32 ± 1 mA/pH (sauer), –16 ± 2 mA/pH (alkalisch); hohe Genauigkeit	[18]
Amperometrischer Biosensor	Platin, Gold, Grafit: mit Laurylgallat, Hämatein, Methylenblau, Poly(o-phenylendiamin)	Platin	SCE	Trend ΔI/pH erkennbar bei unterschiedlich angelegten Spannungen	nichtlineare Empfindlichkeit	[19]
Impedanz	RuO <sub>2</sub> , Siebdruck-Interdigitalsensor	–	SCE	< 1 kHz: Leitfähigkeit und Kapazität zeigen Adsorptionsprozesse	Im hohen Frequenzbereich keine pH-Abhängigkeit	[20]
Konduktometrie	SnO, Siebdruck-Interdigital	–	–	–34 µS/pH (pH 2 – 6); –1 µS/pH (pH 7 – 11)	unterschiedliche Linearität im Sauren und Basischen; im Sauren empfindlicher; Ansprechzeit 30 s	[21]
Konduktometrie	SnO <sub>2</sub> , Siebdruck-Interdigital	–	–	–102 µS/pH (pH 2 – 6), –13 µS/pH (pH 7 – 10)	höhere Sensitivität im sauren Bereich Ansprechzeit: 80 s	[21]
Konduktometrie Amperometrie	TiO <sub>2</sub> , Siebdruck-Interdigital	–	–	–59 µS/pH (pH 2 – 11), –0,1992 mA/pH (pH 2 – 11)	Linearität über weiten pH-Bereich; Abhängigkeit von Strom vs. pH (bei 2 V DC); Ansprechzeit: 20 s	[21]
Kapazitiv	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , Siebdruck-Interdigital	–	–	+5 pF/pH (pH 5 – 11)	pH 2 – 4: kein deutlicher Trend; Ansprechzeit 36 s	[21]
Kapazitiv	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (1 : 3), Siebdruck-Interdigital	–	–	+2 pF/pH (pH 3 – 11)	Auflösung des Bindemittels in Pufferlösung; Linearität (niedriger Frequenzbereich), Ansprechzeit 6 s	[21]
Kapazitiv	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (3 : 1)	–	–	+6 pF/pH (pH 2 – 11)	Auflösung des Bindemittels; Linearität (niedriger Frequenzbereich), Ansprechzeit 20 s	[21]
Kapazitiv	Bi <sub>12</sub> O <sub>20</sub> , Siebdruck-Interdigital	–	–	+100 pF/pH (pH 5 – 11)	pH 5 – 11 moderater, pH 2 – 4 kleiner Anstieg der Kapazität; Ansprechzeit: 60 s; Linear im niedrigen Frequenzbereich	[21]

werden könnte [7]. Bei halbleitenden Passivschichten spielt die Raumladungskapazität eine Rolle, die sich an der gemessenen Doppelschichtkapazität der Fest/Flüssig-Grenzfläche überlagert. Blei erzeugt durch seine Wasserstoffüberspannung und  $\text{PbO}_2$ -Bildung eine senkrecht ansteigende Kurve; während die S-Form von Gold mit der geringen Kapazität der idealen Durchtrittsreaktion ohne Wasserstoffsorption geschuldet ist. Glaskohlenstoff neigt zur Sauerstoffsorption; die Kapazität nimmt augenscheinlich mit dem Belegungsgrad zu. Platin zeigt die geringste Kapazität bei pH 7; beim Nullladungspotenzial ändern die Wasserdipole auf der Elektrodenoberfläche ihre Orientierung. Wolfram zeigt sich als in allen Medien stabile Elektrode.

Im Kapazität-Frequenz-Diagramm zeigen die Oxidschichtbildner eine nahezu lineare Abhängigkeit, die Redoxelektroden eine exponentiell abfallende Kurve (Abbildung 3-d).

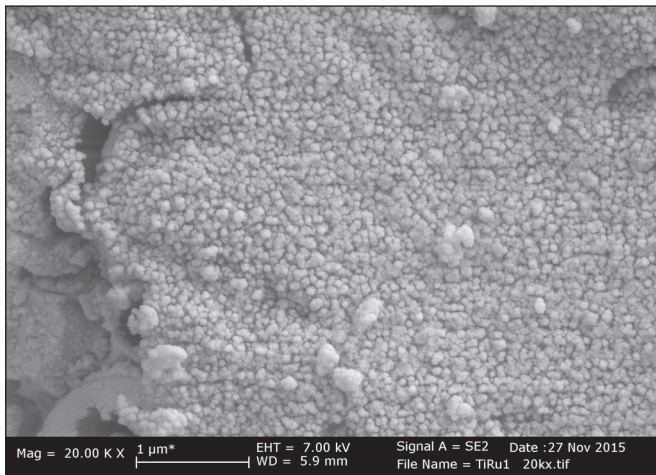


Abb. 1.: Nanoporosität einer  $\text{RuO}_2/\text{Ti}$ -Elektrode in 20.000-facher Vergrößerung [6].

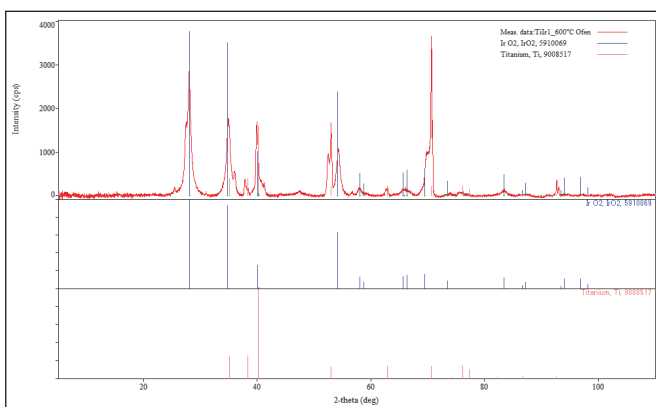


Abbildung 2: Röntgendiffraktometrie (XRD) einer  $\text{IrO}_2/\text{Ti}$ -Elektrode mit Vergleichspeaks für Titan (braun) und Iridiumdioxid (blau) [6].

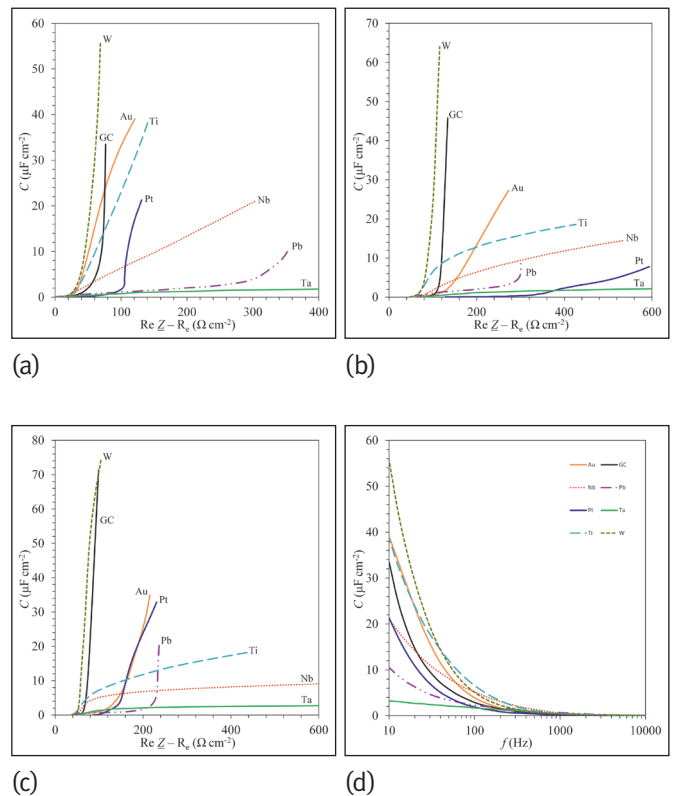


Abbildung 3: Kapazitäts-Widerstand-Kurve einer  $\text{IrO}_2/\text{Ti}$ -Elektrode gegen verschiedene Gegen-/Referenzelektroden in (a) pH 4, (b) pH 7, (c) pH 10 (25 °C). Elektrolytwiderstand korrigiert. Frequenz 1 kHz bis 10 Hz, (d) Frequenzgang der Kapazität einer  $\text{IrO}_2/\text{Ti}$ -Elektrode gegen verschiedene Gegen-/Referenzelektroden in saurer Lösung (pH 4) [6].

## 5 Folgerungen

Ein allgemeines Referenzsystem für die pH-Messung in beliebigen Medien gibt es bislang nicht. Ein coulometrischer Titrator könnte die Lösung sein, wenn erst geeignete Elektrodenmaterialien verfügbar sind.

---

## Referenzen:

- [1] P. Kurzweil, Precious Metal Oxides for Electrochemical Energy Converters: Pseudocapacitance and pH Dependence of Redox Processes, *Journal of Power Sources* 190(1) (2009) 189–200.
- [2] P. Kurzweil, Electrochemical Capacitors. Metal Oxide. In: *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, J. Garche (Ed.), Elsevier: Amsterdam, 2009.
- [3] P. Kurzweil, Long time stable electrode. EP 0622815, DE 4313474 (1994).
- [4] P. Kurzweil, Metal Oxides and Ion-Exchanging Surfaces as pH Sensors in Liquids: State-of-the-Art and Outlook, *Sensors* 9 (2009), doi:10.3390/s90x0000x.
- [5] S. Starr, Novel materials for pH sensors, Master thesis, OTH Amberg, 2009.
- [6] H. Hartmann, Entwicklung eines neuartigen pH-Sensors auf Metalloxidbasis, Masterarbeit, OTH Amberg-Weiden, 2016.
- [7] P. Kurzweil, unveröffentlichte Ergebnisse 2016.
- [8] H. N. McMurray, P. Douglas, D. Abbot, Novel thick-film pH sensors based on ruthenium dioxide-glass composites, *Sensors and Actuators B* 28 (1995) 9–15.
- [9] R. Koncki, M. Mascini, Screen-printed ruthenium dioxide electrodes for pH measurements, *Analytica Chimica Acta* 351 (1997) 143–149.
- [10] J. A. Mihell, J. K. Atkinson, Planar thick-film pH electrodes based on ruthenium dioxide hydrate, *Sensors and Actuators B* 48 (1998) 505–511.
- [11] B. Xu, W.-D. Zhang, Modification of vertically aligned carbon nanotubes with RuO<sub>2</sub> for a solid-state pH sensor, *Electrochimica Acta* 55 (2010) 2859–2864.
- [12] S. Zhuiykov, Morphology and sensing characteristics of nanostructured RuO<sub>2</sub> electrodes for integrated water quality monitoring sensors, *Electrochemistry Communications* 10 (2008) 839–843.
- [13] L. Manjakkal, K. Zaraska, K. Cvejic, J. Kulawik, D. Szwagierczak, Potentiometric RuO<sub>2</sub>-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> pH sensors fabricated using thick film and LTCC technologies, *Talanta* 147 (2016) 233–240.
- [14] T. Katsube, I. Lauks, J. N. Zemel, pH-sensitive sputtered iridium oxide films, *Sensors and Actuators*, 2 (1982) 399–410.
- [15] W. Olthuis, M. A. M. Robben, P. Bergveld, pH Sensor Properties of Electrochemically Grown Iridium Oxide, *Sensors and Actuators B*, 2 (1990) 247–256.
- [16] M. L. Hitchman, S. Ramanathan, Potentiometric Determination of Proton Activities in Solutions Containing Hydrofluoric Acid Using Thermally Oxidized Iridium Electrodes; *Analyst* 116 (1991) 1131–1133.
- [17] C. Colombo, T. Kappes, P. C. Hauser, Coulometric microtitrator with a ruthenium dioxide pH-electrode, *Analytica Chimica Acta* 412 (2000) 69–75.
- [18] W. Gao, J. Song, Polyaniline Film Based Amperometric pH Sensor Using A Novel Electrochemical Measurement System, *Electroanalysis* 21(8) (2009) 973–978.
- [19] M. Stredanský, Andrea Pizziariello, Silvia Stredanská, Stanislav Miertus, Amperometric pH-sensing biosensors for urea, penicillin, and oxalacetate, *Analytica Chimica Acta* 415 (2000) 151–157.
- [20] L. Manjakkal, E. Djurdjic, K. Cvejic, J. Kulawik, K. Zaraska, D. Szwagierczak, Electrochemical Impedance Spectroscopic Analysis of RuO<sub>2</sub> Based Thick Film pH Sensors, *Electrochimica Acta* 168 (2015) 246–255.
- [21] E. Gill, K. Arshak, A. Arshak, O. Korostynka, Mixed metal oxide films as pH sensing materials, *Microsyst. Technol.* 14 (2008) 499–507.

**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](mailto:p.kurzweil@oth-aw.de)



**Sebastian Chalupczok, M. Eng.**

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

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



**Helmut Hartmann, M. Eng.**

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

[h.hartmann@oth-aw.de](mailto:h.hartmann@oth-aw.de)

# Impressum

**Herausgeber:**

Präsidentin  
Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden  
Prof. Dr. Andrea Klug

**Redaktion:**

Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden  
Institut für Angewandte Forschung IAF

**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:**

Mundschenk Druck + Medien, Mundschenkstraße 5, 06889 Lutherstadt Wittenberg

**Erscheinungstermin:**

Februar 2017

**ISSN-Nummer:**

2365-1997



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/forschen-und-kooperieren/veroeffentlichungen/forschungsberichte](http://www.oth-aw.de/forschen-und-kooperieren/veroeffentlichungen/forschungsberichte)

# Inserentenverzeichnis

DEPRAG SCHULZ GMBH u. CO .....	U 4
F.EE GmbH .....	U 4
Förderverein der OTH Weiden e. V. ....	U 4
LangPatent Anwaltskanzlei IP LAW Firm .....	U 3
OTH Professional .....	U 4

U = Umschlagseite



## LANGPATENT

ANWALTSKANZLEI IP LAW FIRM

**Ihr Ansprechpartner:**

Dr.-Ing. Christian Lang  
Joh.-Seb.-Bach-Str. 25  
92637 Weiden  
[www.langpatent.com](http://www.langpatent.com)  
0961/40 18 5 - 66/ -77 (Fax)

Patente – Gebrauchsmuster – Marken – Designs

Ihr Partner in der Oberpfalz für globalen Schutz Ihres geistigen Eigentums

München - Weiden - Blatten b. Naters (CH)

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  
 Wörthstraße 14 | 92637 Weiden | Telefon: 0961 84-104  
[www.foerderverein-oth-weiden.de](http://www.foerderverein-oth-weiden.de)

## Nabaltec

Für die Bereiche Entwicklung und Anwendungstechnik, Werksentwicklung und Verfahren sowie unser Analysenzentrum suchen wir

### 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)  
[www.nabaltec.de](http://www.nabaltec.de)



## Studium und Beruf unter einem Hut.

Berufsbegleitendes Studium, duales Studium und modulare Weiterbildung an der OTH Amberg-Weiden.



Jetzt informieren!  
[www.oth-professional.de](http://www.oth-professional.de)



## RAUM FÜR ZUKUNFT



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

BAYERN'S  
 BEST 50  
 PREISTRÄGER



[www.fee.de/jobs](http://www.fee.de/jobs)



2014 | 2011 | 2008 | 2003



F.EE GmbH | Udo Starck | Personalabteilung  
 In der Seugn 10 | 92431 Neunburg v. W.  
 Tel.: 09672 5060 | [bewerbung@fee.de](mailto:bewerbung@fee.de)  
[www.fee.de](http://www.fee.de) | [www.facebook.com/fee.neunburg](https://www.facebook.com/fee.neunburg)



## STARTEN SIE DURCH!

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

Vielleicht sogar mit Ihnen? Zur Verstärkung unseres Teams suchen wir vielseitig interessierte und engagierte

### Nachwuchs-Ingenieure (m/w)

aus den Fachbereichen Maschinenbau, Elektro- und Informationstechnik, Angewandte Informatik/IT und Automation, BWL oder Wirtschaftsingenieurwesen.

Starten Sie jetzt Ihre Karriere! Nähere Informationen über aktuelle Stellenanzeigen und Praktikumsmöglichkeiten finden Sie auf unserer Homepage [www.deprag.com](http://www.deprag.com)!

Wir freuen uns auf Ihre Bewerbung!



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