

Forschungsbericht

2021



Liebe Leserin, lieber Leser,

die Angewandte Forschung und Entwicklung sowie der hiermit eng verbundene Wissens- und Technologietransfer von der Hochschule in die Praxis zählen zusammen mit Lehre, Studium und Weiterbildung zu den Kernaufgaben der OTH Amberg-Weiden.

Unsere Forscherinnen und Forscher haben in einer eindrucksvollen Bandbreite von praxisnahen Themen entlang wissenschaftlicher Leitrends in ihren Projekten auch im Jahr 2020 Herausforderungen unserer Zeit aufgegriffen und diese mit ihren Partnern in der Hochschulregion, aber auch national und international wissenschaftlich vorangetrieben. Die Ergebnisse dieses Engagements sind im vorliegenden Forschungsbericht 2021 dokumentiert. Die Publikation ist ein Beleg für die angewandte Forschungsleistung an unserer Hochschule.

Ein zentraler Schwerpunkt in Forschung und Transfer ist aktuell die Künstliche Intelligenz. Lern- und anpassungsfähige Systeme haben nicht nur die Wirtschaft, sondern auch unsere Gesellschaft bereits nachhaltig verändert und werden dies auch weiterhin tun. Auf diese vor allem auch für unsere Hochschulregion und ihre insbesondere mittelständischen Unternehmen relevante und herausfordernde Schlüsseltechnologie gehen unsere Forscherinnen und Forscher ein und arbeiten z. B. an einer Testplattform zur Messdatengenerierung für KI-basierte Analysemethoden, an KI-Prozessorarchitekturen für Radarmodule im autonomen Fahrzeug oder analysieren Assoziationsregeln zur Erkennung von statistisch signifikanten medizinischen Risikomustern in klinischen Daten.

Forschungserfolge wurden auch in anderen Forschungsfeldern auf dem Stand des aktuellen Wissens erreicht: Im Bereich der IT-Sicherheit wurde die Gesamtarchitektur eines kryptografischen Gateways spezifiziert, in der Ressourceneffizienz können chlorhaltige Kunststoffe zur

Rückgewinnung von seltenen Metallen beitragen und mit Blick auf die Digitalisierung in Unternehmen wird eine digitale Strategie von der Idee zur Roadmap aufgezeigt. Zu lesen gibt es noch vieles Mehr, so etwa aus den Wirtschafts- und Lebenswissenschaften.

In allen aufgezeigten Fragestellungen wurden in Verbänden Kompetenzen aus Wissenschaft und Praxis gebündelt, dies sehr oft auch interdisziplinär und mit Partnern aus Forschung und Praxis. Die Themenstellungen zeigen damit die regionale, nationale und internationale Sichtbarkeit der OTH Amberg-Weiden und ihrer Fakultäten auf. Gleichzeitig sind die im Forschungsbericht 2021 enthaltenen Beiträge ein Ausdruck dafür, dass der enge Schulterschluss mit der Wirtschaft und der Gesellschaft ein zentrales Anliegen unserer Hochschule ist. Der Ausbau unseres PartnerCircles und der Innovativen LernOrte sowie ein jüngst gegründetes EnergyLab mit dem Stadtwerk Haßfurt sind dafür nur ausgewählte Belege.

Vor diesem Hintergrund sind wir uns sicher: Unsere vier Leitthemen im OTH-Verbund „Energie und Mobilität“, „Information und Kommunikation“, „Lebenswissenschaften und Ethik“, „Produktion und Systeme“ und die beiden Querschnittstechnologien „Digitalisierung“ und „Sensorik“ haben sich bewährt und sind gut etabliert. Sie bieten nach wie vor zahlreiche aktuelle Aufgaben und praktische Fragestellungen für die Forschung und den Transfer. Erweitert werden diese Aspekte durch neue Aufgabenstellungen im Leitprojekt „Kompetenzzentrum Digitaler Campus“ mit einem Schwerpunkt auf den Ausbau der Lehre, der Forschung und des Transfers im KI-Bereich.

Die angewandte F & E wird von allen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern und auch dem Forschungsnachwuchs an der OTH Amberg-Weiden vorangetrieben. Ich danke allen Autorinnen und Autoren herzlich

für das Engagement, mit dem Forschung, Entwicklung, Transfer und insgesamt Innovation betrieben wird. Damit werden an unserer Hochschule wertvolle Beiträge aus den Fachgebieten und Disziplinen geleistet, verbunden mit Impulsen für die Weiterentwicklung der Anwendungsorientierung sowie für die regionale und überregionale Sichtbarkeit der Forschung an der OTH Amberg-Weiden.



Prof. Dr. Andrea Klug

Präsidentin der Ostbayerischen Technischen Hochschule (OTH) Amberg-Weiden

Allen Leserinnen und Lesern wünschen wir eine informative und spannende Lektüre des vorliegenden Forschungsberichtes 2021. Wir freuen uns, wenn auf diesem Wege auch weitere Initiativen für die Zukunft der forschungsbasierten Zusammenarbeit entstehen. Sprechen Sie uns gerne an!



Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

Vizepräsident der Ostbayerischen Technischen Hochschule (OTH) Amberg-Weiden/
Wissenschaftlicher Leiter
Institut für Angewandte Forschung IAF

Dear Reader,

Applied research and development as well as the closely related transfer of knowledge and technology from the university into practice are among the core tasks of the OTH Amberg-Weiden, together with teaching, studies and further education.

In 2020, our researchers have once again taken up the challenges of our time in an impressive range of practice-oriented topics along scientific leading trends in their projects and have scientifically advanced them with their partners in the university region, but also nationally and internationally. The results of this commitment are documented in this Research Report 2021. The publication is proof of the applied research performance at our university of applied sciences.

Artificial intelligence is currently a central focus in research and transfer. Learning and adaptive systems have already permanently changed not only the economy but also our society and will continue to do so. Our researchers are addressing this key technology, which is especially relevant and challenging for our university region and its medium-sized companies in particular, and are working, for example, on a test platform for generating measurement data for AI-based analysis methods, on AI processor architectures for radar modules in autonomous vehicles or analysing association rules for recognising statistically significant medical risk patterns in clinical data.

Research successes were also achieved in other research fields according to the current state of knowledge: In the field of IT security, the overall architecture of a cryptographic gateway was specified; in resource efficiency, plastics containing chlorine can contribute to the recovery of rare metals; and with a view to

digitalisation in companies, a digital strategy from the idea to the roadmap is presented. There is much more to read, for example with regard to the economic and life sciences.

In all of the issues shown, competences from science and practice were bundled in alliances, very often also interdisciplinary and with partners from research and practice. The topics thus demonstrate the regional, national and international visibility of the OTH Amberg-Weiden and its faculties. At the same time, the contributions contained in the Research Report 2021 are an expression of the fact that close cooperation with business and society is a central concern of our university of applied sciences. The expansion of our PartnerCircle and the Innovative Learning Places as well as a recently founded EnergyLab with the Haßfurt public utility company are only selected examples of this.

Against this background, we are convinced: Our four guiding themes in the OTH network "Energy and Mobility", "Information and Communication", "Life Sciences and Ethics", "Production and Systems" and the two cross-sectional technologies "Digitisation" and "Sensor Technology" have proven their worth and are well established. They continue to offer numerous current tasks and practical issues for research and transfer. These aspects are expanded by new tasks in the lead project "Digital Campus Competence Centre" with a focus on expanding teaching, research and transfer in the AI field.

Applied R & D is driven forward by all scientists and also the young researchers at the OTH Amberg-Weiden. I would like to sincerely thank all authors for the com-

mitment with which research, development, transfer and overall innovation is carried out. In this way, valuable contributions are made at our university of applied sciences from the subject areas and disciplines, combined with impulses for the further development of application orientation as well as for the regional and supraregional visibility of research at the OTH Amberg-Weiden.



Prof. Dr. Andrea Klug

President of the Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden

We wish all readers an informative and exciting reading of this Research Report 2021. We would be pleased if this also leads to further initiatives for the future of research-based cooperation. Please feel free to contact us!



Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

Vice-President of the Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden/
Scientific Director of the
Institut für Angewandte Forschung IAF

Vorwort.....	1
---------------------	----------

Digitalisierung

Digitale Modellfabrik, Low Cost Community Lösungen für die Bildverarbeitung und für Digitale Zwillinge	9
---	----------

Andreas Fuchs, M.Sc.
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmidt
Johannes Hilburger

Labor 4.0 – Automatischer Teststand zur Erprobung elektrochemischer Sensoren.....	14
--	-----------

Josef Schottenbauer, M.Eng.
Christian Gradl
Prof. Dr. Peter Kurzweil

Testplattformen zur Messdatengenerierung für KI-basierte Analysemethoden	18
---	-----------

Sebastian Schmidt, M.Eng.
Regina Trötsch, B.Eng.
Dr. Raphael Lechner
Prof. Dr.-Ing. Markus Brautsch

Numerische Simulation der Herstellung von AlN-Einkristallen mit dem PVT-Verfahren	23
--	-----------

Prof. Dr.-Ing. Marc Hainke
Dr.-Ing. Jochen Friedrich

Testumgebung für Edge Computing in Intelligenen Transportsystemen (ITS)	27
--	-----------

Mathias Schneider, M.Eng.
Seifeddine Saadani, M.Eng.
Ruben Prokscha, B.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

Maschinelles Lernen für die Personalbedarfsplanung in der Klinik	33
---	-----------

Stefan Förstel, M.Sc.
Prof. Dr.-Ing. Eva Rothgang

Energie und Mobilität

Projekt AutoDrive – fail-aware, fail-safe, fail-operational.....	37
---	-----------

Heike Lepke, M.Eng.
Mathias Schneider, M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß
Nicholas Jäger, M.Sc.
Prof. Dr. Andreas Aßmuth

AUTBUS – Entwicklung eines autonomen Kleinbusses für den ländlichen Raum.....	45
--	-----------

Fabian Zeitler, B.Eng.
Roman Babl, B.Eng.
Josef Schmid, M.Sc.
Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

KI-Prozessorarchitekturen für Radarmodule im autonomen Fahrzeug	50
--	-----------

Daniel Scharf, M.Sc.
Seifeddine Saadani, M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß
Heike Lepke, M.Eng.

Information und Kommunikation

Industriearomatisierung im Wandel – Neue Herausforderungen für die Zertifizierung durch die Einführung von TSN.....	55
--	-----------

Benedikt Etzold, M.Sc.
Sebastian Zach, M.Sc.
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmidt

Forschungsprojekt: ADACORSA "Airborne data collection on resilient system architectures"	60
---	-----------

Nicholas Jäger, M.Sc.
Patrick Purucker, B.Eng.
Christian Reil, M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß
Prof. Dr. Andreas Aßmuth

5G4Healthcare	66	Untersuchung des Einflusses eines Magneten für die Deaktivierung der ATA-Therapiefunktion in der Strahlentherapie bei 6 MV	107
Prof. Dr. rer. pol. Steffen Hamm		Larissa Blümlein, M.Sc.	
Ann-Christin Schleser, B.Eng.		Prof. Dr. Oliver Kölbl	
Prof. Dr. med. Clemens Bulitta		Prof. Dr. Ralf Ringler	
Securing Low-Power Industrial Devices in Critical Infrastructures	72	Prof. Dr. Barbara Dobler	
Simon Liebl, M.Eng.		Segmentierung musklotendinöser Strukturen der Hüfte aus der 3D-Bildgebung zur patientenspezifischen Modellierung von biomechanischen Mehrkörpersimulationen	110
Leah Lathrop, B.Eng.		Christopher Fleischmann, M.Sc.	
Prof. Dr. Andreas Abmuth		David Scherb, M.Sc.	
Prof. Matthias Söllner		Irina Leher, B.Eng.	
An IoT Crypto Gateway for Resource-Constrained IoT Devices	77	Alexander Wolf, M.Sc.	
Ahmed Alqattaa, M.Sc.		Dr.-Ing. Jörg Miehl	
Prof. Dr. rer. nat. Daniel Loebenberger		Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack	
Neue Entwicklungen, leichtgewichtige Kryptographie und Innovationen in der Industriellen Kommunikationstechnik	83	Prof. Dr. med. habil. Stefan Sesselmann	
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmidt		Odds Ratio-basierte Analyse von Assoziationsregeln zur Erkennung von statistisch signifikanten medizinischen Risikomustern in heterogenen klinischen Daten	116
Prof. Dr. Jürgen Mottok		Oliver Haas, M.Sc.	
Sebastian Renner, M.Sc.		Prof. Dr.-Ing. Eva Rothgang	
Robuste Kommunikationstechniken für Multidrop-Konzepte	89	Positionen und Thesen zur Zukunft der ländlichen Räume in Ostbayern	123
Sebastian Schaffenroth, M.Eng.		Prof. Dr. Wolfgang Weber	
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmidt		Die Relevanz von Umweltmanagementsystemen an deutschen Hochschulen	128
Maximilian Bauer, M.Sc.		Prof. Dr.-Ing. Burkhard Berninger	
Lebenswissenschaften und Ethik		Georg Klampfl, M.Eng.	
Hygiene und Medizintechnik – antimikrobielle Kunststoffe zur Infektionsprävention	93	Hauptkomponentenanalyse: Eine analytische Bierprobe	133
Dr. rer. nat. Sebastian Buhl		Niklas Zell, B.Eng.	
Alexander Stich, M.Sc.		Ina Jakobi, B.Eng.	
Sabine Gruber, M.Sc.		Elias Bisse	
Jeannine Vogt, M.Sc.		Josef Schottenbauer, M.Eng.	
Prof. Dr. med. Clemens Bulitta		Dipl.-Phys. Christian Schell	
Monte-Carlo-Simulation der Energieverteilung von Tc-99m mit GAMOS zur Detektion von Sentinel-Lymphknoten	99	Prof. Dr. Peter Kurzweil	
Alexandra Jehlicka		Produktion und Systeme	
Dr.-Ing. Philipp Ritt		Dynamische Finite-Elemente-Analyse von fremderregten Mehrmassensystemen	139
Michael Mark, B.Eng.		Prof. Dr. Franz Magerl	
Agnes Pöllmann, M.Sc.		Untersuchungen zu isolierten Versorgungsungen in IGBT-Treiberstufen	144
Prof. Dr. Ralf Ringler		Prof. Dr.-Ing. Bernhard Frenzel	
Entwicklung und Realisierung eines gewebeäquivalenten Body-Phantoms mittels 3D-Druck-Verfahren für die Dosimetrie in der Nuklearmedizin	103		
Heike Kraus			
Dr.-Ing. Philipp Ritt			
Michael Mark, B.Eng.			
Prof. Dr. Ralf Ringler			

Chlor-Plattform – Verwertung von Chlorabfällen und Recycling kritischer Metalle.....	149	Voltammetrische pH-Messung: Protonenzählen mit Rutheniumdioxid in wässrigen Lösungen und Supersäuren	187
Michael Peer, M.Sc. Prof. Dr.-Ing. Burkhard Berninger Prof. Dr. Werner Kunz		Sebastian Chalupczok, M.Eng. Prof. Dr. Peter Kurzweil	
Entwicklung und Konzeption einer 3D-Druck-Sondenhalterung und eines hochpräzisen 3D-Prüfstands zur Messung von HF-Feldern und Temperatur-Verteilungen	153	Leitfähige Polymere: Ein Polyanilinsensor für die Ammoniak- und Ammoniumbestimmung	191
Johannes Turnwald, B.Sc. Michael Gubitz, M.Eng. Larissa Blümlein, M.Sc. Finya Ketelsen, M.Sc. Sebastian Kuschkowicz, B.Sc. Dr. rer. nat. Jakob Kreutner Dipl.-Ing. (FH) Gregor Schaefers Prof. Dr. Ralf Ringler		Josef Schottenbauer, M.Eng. Dipl.-Phys. Christian Schell Niklas Zell, B.Eng. Prof. Dr. Peter Kurzweil	
Konferenzbeitrag COMAT 2020: Corrosion Resistance of 18Ni-300 Maraging Steel Manufactured by LPBF.....	159	Instrumentelle Analytik: Materialverträglichkeit von technischen Fluiden und Kraftstoffen	195
Thomas Simson, M.Sc. Jessica Schober, B.Eng. Prof. Dr.-Ing. Jürgen Koch Ing. Miroslav Zetek, Ph.D. Ing. Ivana Zetková, Ph.D.		Dipl.-Phys. Christian Schell Josef Schottenbauer, M.Eng. Prof. Dr. Peter Kurzweil	
PUR-Schaum im Automobilbau – Simulation des Reaktionsgießens	165	The "Electrochemical Nose" – An Experimental Approach towards Automated Ammonium Determination.....	200
Prof. Dr.-Ing. Heinrich Kammerdiener Manfred Hiermann, M.Eng. Dipl.-Ing. Helmut Kurz Prof. Dr. Peter Kurzweil		Niklas Zell, B.Eng. Dipl.-Phys. Christian Schell Josef Schottenbauer, M.Eng. Marc Herden, B.Eng. Prof. Dr. Peter Kurzweil	
Lager- und Stabkräfte nach dem Kräfte-Versatzverfahren	170	Intelligente Infrarotspektroskopie: Monitoring von Molekül-Ionen und Naturstoffen	205
Prof. Dr.-Ing. Andreas Holfeld		Josef Schottenbauer, M. Eng Niklas Zell, B.Eng. Dipl.-Phys. Christian Schell Prof. Dr. Peter Kurzweil	
20 Jahre angewandte Forschung am Prüfstand für Druckluftantriebe und -technik (PDLT) an der OTH Amberg-Weiden	174	Transfer	
Jan Mišák, B.Eng. Dipl.-Ing. (FH) Harald Wirth Prof. Dr.-Ing. Andreas P. Weiß		Technologiestrategische Optionen etablierter Unternehmen bei diskontinuierlichen Technologieübergängen.....	209
		Prof. Dr. Thomas Tiefel	
Sensorik		Innovation – machbar ohne Labor? Kreatives und kollaboratives Arbeiten in Corona-Zeiten	214
Entwicklung eines Verfahrens zur Inbetriebnahme und Kalibrierung von Thermolumineszenzdetektoren mittels eines Cs-137-Prüfstrahlers	181	Dr. Matthias Schöberl Marina Dötterl, M.Eng. Christine Katharina Raps, M.Sc. Karina Schuller, M.Sc. Lisa Strigl, M.Sc. Prof. Dr. med. Clemens Bulitta	
Simon Hofmann Dr.-Ing. Philipp Ritt Michael Mark, B.Eng. Prof. Dr. Ralf Ringler		Standortaufbau in Manila/Philippinen im Rahmen einer globalen Markterschließungsstrategie für B2B-IT-Services eines mittelständischen IT-Unternehmens	219
		Prof. Dr. Frank Schäfer	

Weidener Diskussionspapiere

Digitale Strategien entwickeln – von der Idee zur Roadmap 224

Prof. Dr. Johann Strassl
Prof. Dr. Günter Schicker

Derivate im Zinsmanagement: Eine Analyse der Hedging-Qualität von Bund Future Kontrakten und deren Einsatzmöglichkeiten in Theorie und Praxis 225

Christoph Wontke
Prof. Dr. Franz Seitz

Steigerung der Kundenzufriedenheit durch Gestaltung von Artikeldetailseiten am Beispiel von WITT WEIDEN..... 226

Laura Graser
Prof. Dr. Marco Nirschl

Werkvertragsarbeitnehmerinnen und -arbeitnehmer in der Fleischindustrie.....227

André Schulte, M.Sc
Ágnes Wörster, M.A

How to avoid fracture of the locking screw in modular revision arthroplasty of the hip using the MRP Titan Revision System..... 228

Theresa Semmelmann, M.Sc.
Prof. Dr. med. habil. Alexander Schuh
Prof. Dr. Horst Rottmann
Reinhard Schröder
Christopher Fleischmann, M.Sc.
Prof. Dr. med. habil. Stefan Sesselmann

SARS-CoV-2 und Bargeld: Wie ein Virus die weltweite Bargeldnachfrage fördert 229

Prof. Dr. rer. pol. Gerhard Rösl
Prof. Dr. Franz Seitz

Monte-Carlo-Evaluation von Instrumentenvariablen-schätzern..... 230

Univ.-Prof. Dr. Benjamin R. Auer
Prof. Dr. Horst Rottmann

Inserentenverzeichnis 231

Impressum..... 232

Zusammenfassung

Im Labor Anlagentechnik der Arbeitsgruppe AUT [1] wird eine „Digitale Modellfabrik“ entworfen und aufgebaut. Auf Basis des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens „Industry Software Application Center“ (ISAC) [2] wird in diesem Beitrag die Erweiterung und Ergänzung von Industriekomponenten mit Low Cost Community-Lösungen vorgestellt. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf einer industriellen Bildverarbeitung (IBV) bei der Open Source-Software in Kombination mit „Raspberry Pi“ zum Einsatz kommt und die über PROFINET [3] kommuniziert. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Realisierung eines digitalen Zwillings zum Bedienen und Beobachten der Anlage mit Smartphone, der auf Unity [4] basiert und über OPC UA [5] kommuniziert.

Abstract

Working group AUT designs and sets up a digital model factory at the university in Amberg. Basis for the digital model factory is the demonstrator of the R&D project “Industry Software Application Center”. Within this scope, potential and limitations of low cost community solutions are investigated. that accompanies industrial grade equipment We present an implementation of industrial image processing using Raspberry Pi and Open CV in conjunction with PROFINET and a digital twin based on Unity with OPC UA communication.

1 Digitale Modellfabrik

Am Hochschulstandort in Amberg soll 2021 eine Digitale Modellfabrik entstehen, die in Lehre und Forschung eingesetzt werden soll. Die Digitale Modellfabrik soll für das industrielle Umfeld neue Einsatzmöglichkeiten von IT-Lösungen aufzeigen, aber auch deren Grenzen ausloten. Studierende sollen hier die Möglichkeit bekommen, Projekt- und Abschlussarbeiten anzufertigen, die industrielle Herausforderungen von Morgen adressieren.

Als erste Basis-Komponenten werden Teile des I4.0 Demonstrators eingesetzt, der im Rahmen des ISAC-Forschungsprojekts (Industry Software Application Center) aufgebaut wurde. Darunter fällt auch eine Raspberry Pi-Anwendung für die industrielle Bildverarbeitung, die mit PROFINET kommuniziert. Weiter wurde ein virtuelles An-

lagen-Modell zum Bedienen und Beobachten umgesetzt, das mit Unity erstellt und das OPC UA als Kommunikationsstandard verwendet.

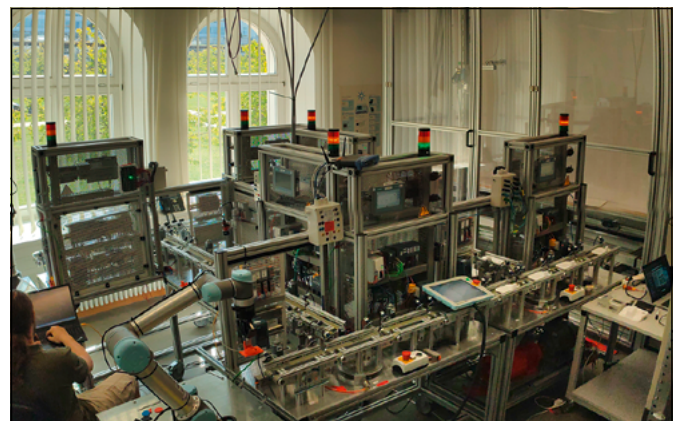


Abbildung 1: Ausschnitt I4.0 Demonstrator

2 Industrielle Bildverarbeitung mittels Raspberry Pi und PROFINET

Ein industrielles Bildverarbeitungssystem besteht im Wesentlichen aus drei Komponenten: einer Kamera als Sensor zur Bilderfassung, einem Prozessor zur Bildverarbeitung und Erzeugung prozessrelevanter Daten sowie einer Schnittstelle zur Automatisierungstechnik, welche die gewonnenen Daten für Produktionsprozesse auswertet.

Das Automatisierungssystem „I 4.0 Demonstrator“ ist mit professioneller Hardware ausgestattet, wie zum Beispiel Steuerungen vom Typ SIEMENS SPS 1500 oder Industriekameras vom Typ ALVIUM 1800, um den Anforderungen an eine robuste Industrieanlage gerecht zu werden.

Die Verarbeitung der Bilder erfolgt allerdings mit Low Cost Community-Lösungen auf Basis eines Raspberry Pi (kurz RaPi). Die vergleichsweise geringen Kosten eines RaPi ermöglichen es, redundante Systeme zu entwerfen, sodass bei Ausfall eines RaPi dieser fast nahtlos ersetzt und Ausfallzeiten sehr gering gehalten werden können.

Der Kern besteht hier darin, einen RaPi sowohl mit einer Industriekamera als auch mit einem Automatisierungssystem (SPS) zu koppeln.

Während einfache digitale IOs, wie z. B. Sensoren und Antriebe, direkt an die SPS angeschlossen werden können, müssen komplexere Systeme über einen Feldbus mit der SPS kommunizieren. Um diese Aufgabe zu erfüllen und gleichzeitig den Anforderungen an die moderne Automatisierungstechnik gerecht zu werden, wurde hierfür der echtzeitfähige Industrial Ethernet Standard PROFINET eingesetzt. Die Nutzung dieses Standards sichert unter anderem die Kompatibilität des hier entwickelten Bildverarbeitungssystems mit PROFINET-Controllern verschiedener Hersteller.

Der PROFINET Software-Stack wurde freundlicher Weise von der Firma Phoenix Contact [6] zur Verfügung gestellt und im Rahmen dieses Projekts so adaptiert, dass ein nahtloser Betrieb an einer übergeordneten Steuerung möglich ist.

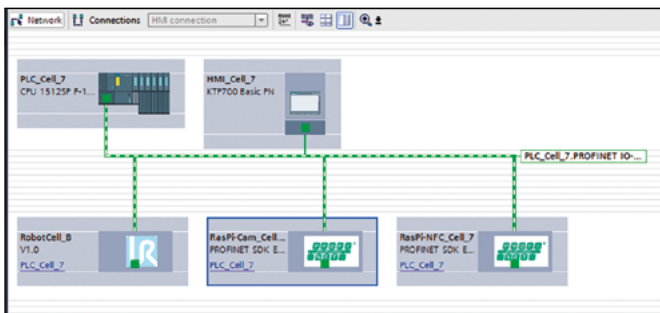


Abbildung 2: Mehrere Raspberry Pi als Profinet Devices im TIA Portal

Mithilfe dieser Stack-Implementierung lässt sich ein Raspberry Pi nun als Device in einem PROFINET Netzwerk einsetzen und an jeder PROFINET-fähigen Steuerung betreiben. Damit ist diese Lösung softwareseitig wie eine industrielle Komponente einsetzbar. Sie kann in jedem PROFINET-fähigen Engineering eingesetzt und neben anderen Geräten wie Industrierobotern eingesetzt werden.

Da das Bildverarbeitungssystem möglichst gut industrielle Anforderungen erfüllen und flexibel einsetzbar sein soll, wurde bei der Auswahl der Kamera auf bewährte Standards geachtet. So verfügt die ausgewählte Industrielkamera unter anderem über genormte C-Mount-Objektivgewinde und wird über den USB3 Vision Standard angesteuert [7]. Die Kopplung der Kamera zum RaPi erfolgt mit dem kostenlos verfügbaren VIMBA-SDK [8], mit dem eine schnelle Anwendungsentwicklung in C++ zur Ansteuerung der Kamera möglich ist.

Die eigentliche Verarbeitung der Bilder erfolgt mithilfe der OpenCV [9] Bibliothek in C++. OpenCV steht für Open Source Computer Vision. Die Bibliothek verfügt über zahlreiche hocheffiziente Algorithmen zur Bildverarbeitung.

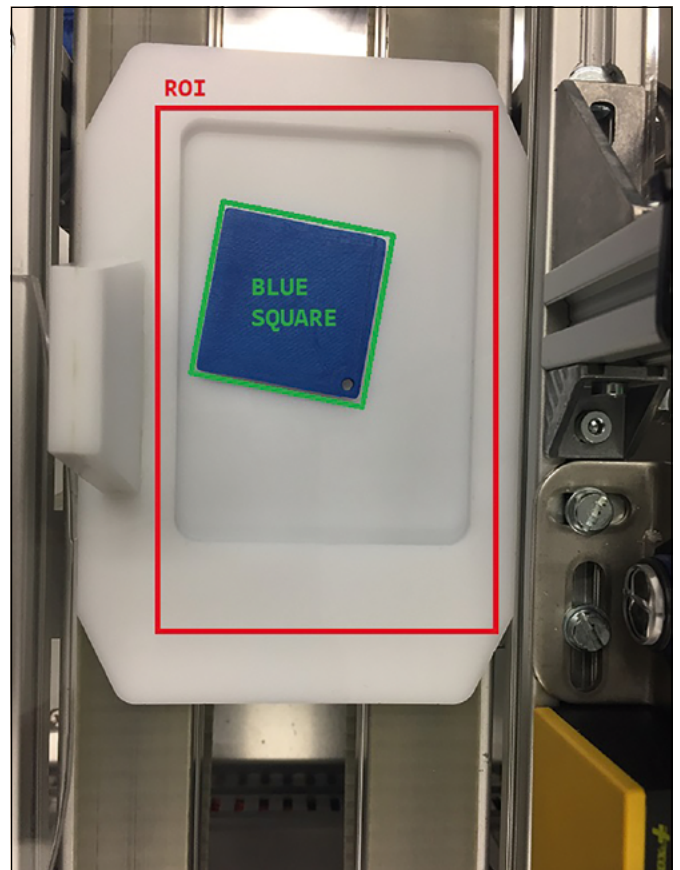


Abbildung 3: Integrationstest der Kamera, Vimba SDK und OpenCV für die Bauteilidentifizierung

Mithilfe der OpenCV Bibliothek war es möglich, in kürzester Zeit Bildverarbeitungsprozesse zu entwickeln, die in der Industrie 4.0-Demonstrationsanlage für optische Qualitätskontrolle und die Identifizierung von Bauteilen eingesetzt werden.

3 Bedienen und Beobachten über OPC-UA und Unity3D

Wie jede industrielle Produktionsanlage soll auch die Industrie 4.0-Demonstrationsanlage Lösungen zur Wartung, Diagnose und Bedienung über eine grafische Oberfläche (HMI) bieten.

Um von Anfang an einen hohen Funktionsumfang zu ermöglichen und gleichzeitig ein intuitiv bedienbares System zu erhalten, wurde eine virtuelle Abbildung der Anlage in Form eines 3D-Modells erstellt. Mittels OPC-UA verfügt dieses Modell über ein vollständiges Prozessabbild der realen Anlage.

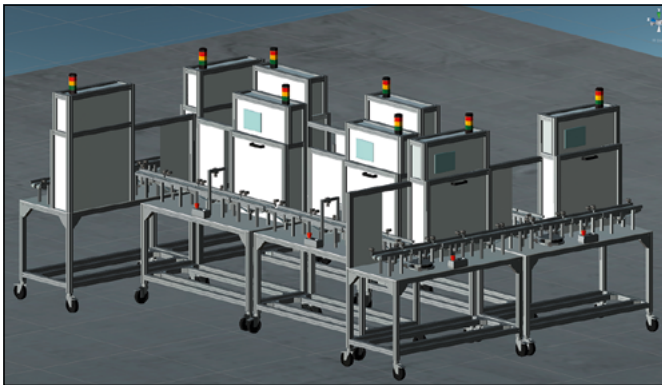


Abbildung 4: Virtuelle Abbildung der Anlage als 3D Modell

Mithilfe der virtuellen Abbildung kann der Bediener die Anlage im Live-Betrieb beobachten, aktuelle Positionen von Bauteilen einsehen und deren Daten, wie z. B. den aktuellen Bearbeitungsstand, abfragen. Bei Störungen kann die genaue Position der betroffenen Komponenten im 3D-Modell angezeigt werden. Auch bietet die virtuelle Abbildung der Anlage begrenzte Steuermöglichkeiten. Aus Sicherheitsgründen können keine Einzel-Bewegungen in der Anlage ausgeführt werden, allerdings lässt sich z. B. der Automatikbetrieb „Starten, Stoppen und Pausieren“ ausführen.

Als Engine für das 3D-Modell der Anlage wurde die Low-Cost Community Lösung Unity [4] gewählt. Unity ist im Bereich Independent Game Development weit verbreitet. Dies hat zum Vorteil, dass für zahlreiche Aufgabenstellungen Lösungsansätze oder Beispiele existieren. Außerdem fallen für den nicht-kommerziellen Einsatz der Engine keinerlei Lizenzgebühren an. Da Unity die Entwicklung für zahlreiche Zielplattformen unterstützt, kann das entwickelte HMI nicht nur auf vielen PC-Systemen, sondern auch im Webbrowser oder auf mobilen Endgeräten genutzt werden. Hier wurde neben einer PC-basierten Implementierung auch eine Implementierung auf Android erstellt, sodass die Anlage auch mittels Smartphone und Tablet zugänglich ist.

Die Übertragung der Prozessdaten der Anlage erfolgt über OPC-UA. Dieser Standard ist in der Automatisierungstech-

nik für den Datenaustausch in der Prozessebene führend und kann mit modernen Steuerungen schnell projiziert und eingesetzt werden. Die Gegenseite der Kommunikation bildet der OPC UA Stack der OPC Foundation [5], welcher in ein bestehendes Unity-Projekt eingebunden werden muss.

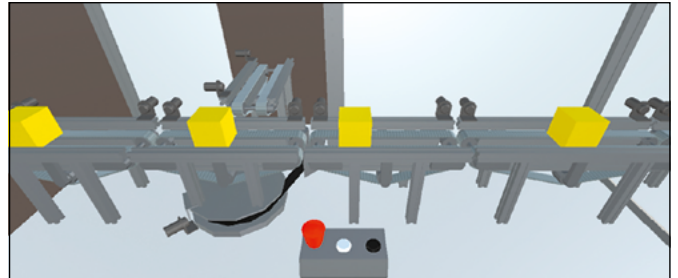


Abbildung 5: Ansicht auf eine Zelle der Anlage, wie sie z. B. durch eine VR-Brille zu sehen ist

Die Anwendungsgebiete dieses Systems gehen jedoch noch weit über die Bedienung einer realen Anlage hinaus. Mögliche Einsatzbereiche reichen von Schulungen für Bedien- und Wartungspersonal bis hin zur virtuellen Inbetriebnahme.

4 Erfahrungen mit Low-Cost-Lösungen und Fazit

Für unsere Zwecke ist ein „Raspberry Pi“ oder eine andere vergleichbare Low-Cost-Einplatinenlösung als Hardware-Plattform gut geeignet, um Konzepte kostengünstig zu untersuchen. Im Rahmen dieser Arbeit kann hierzu jedoch keine allgemein gültige Aussage gemacht werden, hier muss die geforderte Verfügbarkeit für jeden Einsatz betrachtet werden. Die Software-Plattformen Open CV und Unity haben sich in dieser Arbeit gut bewährt, sodass die beschriebenen Aufgaben relativ schnell und gut umgesetzt werden konnten.

Der Einsatz von OPC UA an sich ist auch gut möglich, da hier viele Ressourcen im Netz zu finden sind. Hervorzuheben ist der quelloffene „open62541“ Stack [10]. Dieser Stack liegt als „C-Quellcode“ vor. Andere „Offene“ Lösungen sind in der Regel mehr oder weniger stark funktionsbeschränkt. Zum Einstieg oder für sehr einfache, nicht zeitkritische Aufgaben ist für Raspberry Pi auch eine Python-Variante auf GitHub [11] verfügbar.

Als Fazit der Umsetzung der IBV und des digitalen Zwillings zeigt sich, dass der Einsatz kostengünstiger Komponenten und Technologien, die nicht industriellen Standards und Normen entsprechen, hier möglich ist, im Allgemeinen jedoch von der geplanten Anwendung abhängig gemacht werden muss. Die hohe Verfügbarkeit, die durch Industriekomponenten garantiert ist, kann mit Low-Cost-Komponenten durch Redundanz teilweise erreicht werden. Bei den Implementierungen zeigte sich auch, dass erhebliches Know-how nötig ist, um die Aufgaben zu lösen. Neben den Verfügbarkeiten muss auch

beachtet werden, dass Wartung und Pflege nur möglich sind, wenn Spezial-Know-how auch langfristig zu Verfügung steht und kontinuierlich erweitert wird. „Updates“ jedweder Art führen hier immer wieder zu Inkompatibilitäten, deren Behebung zum Teil erheblichen Aufwand und Spezial-Know-how erfordern.

5 Weiterarbeit

Es werden weitere PROFINET Devices auf Basis des Raspberry Pi entwickelt und in die Anlage eingebunden. So ist derzeit unter anderem ein NFC-Scanner in Arbeit, der in der Demonstrationsanlage NFC-Tags einzelner Bauteile lesen und schreiben kann. Durch die relativ geringen Kosten eines solchen Systems kann problemlos ein Scanner an jeder Bearbeitungsstation der Anlage integriert werden. Dadurch können alle relevanten Prozessdaten für die Bearbeitung „direkt auf dem Bauteil“ gespeichert werden.

Weiter soll der Einsatz eines RaPi als PROFINET-Controller untersucht werden. Damit kann die Kommunikation zwischen einem Roboter und einem RaPi direkt und nicht über eine Steuerung (SPS) ablaufen. Der Roboter kann Bildverarbeitungsdaten direkt vom RaPi erhalten, um Bauteile zu finden und zu greifen, oder sich zu orientieren. Dies ist dann eine Low Cost Alternative für eine im Roboter integrierte Kamera.



Abbildung 6: Roboter mit integrierter Bildverarbeitung

Danksagung

Teile des Projekts wurden mit Mitteln des Förderprojekts „ISAC“ des Freistaats Bayern, Wirtschaftsministerium, unterstützt.

Wir danken den Firmen SIEMENS AG und Phoenix Contact Electronics für die Bereitstellung von Hard- und Software.

Referenzen:

- [1] www.aut-oth.de
- [2] <https://www.isac-oth.de>
- [3] <https://www.profibus.com/technology/profinet/overview/>
- [4] <https://unity.com>
- [5] <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/>
- [6] C. Schmid 10.2019 Private Kommunikation, Phoenix Contact
- [7] <https://www.visiononline.org/vision-standards-details.cfm?id=167&type=11>
- [8] <https://www.alliedvision.com/en/products/software.html>
- [9] <https://opencv.org/>
- [10] <https://open62541.org/>
- [11] <https://github.com/FreeOpcUa/python-opcua>

Alle Internetabrufe 29.09.2020

Kontakt:



Andreas Fuchs, M.Sc.

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

a.fuchs@oth-aw.de



Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmidt

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

hp.schmidt@oth-aw.de



Johannes Hilburger

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

j.hilburger@oth-aw.de

Labor 4.0 – Automatischer Teststand zur Erprobung elektro- chemischer Sensoren

Josef Schottenbauer, M.Eng.
Christian Gradl
Prof. Dr. Peter Kurzweil

Zusammenfassung

Digitalisierung und automatische Probenverarbeitung prägen den Laboralltag seit Jahrzehnten. Neuerdings öffnen preiswert verfügbare Mikrocomputer und fortschrittliche Softwaretools das Tor zur intelligenten Labortechnik. Wir haben einen digitalen Knecht durch einen „Raspberry Pi 3“ Computer geschaffen, der elektrochemische Sensoren mit mehreren Messgeräten gleichzeitig charakterisiert, die Daten ausliest, in einer Datenbank hinterlegt und auswertet. Für den Menschen aufwendige Versuchsreihen im Rahmen einer jahrelangen Doktorarbeit schrumpfen nun auf den Aufwand weniger Tage.

Abstract

Digitization and automatic sample processing have coined everyday laboratory work for decades. However, recently inexpensive microcomputers and advances software tools have opened the door to intelligent laboratory technology. We have created a digital servant with a Raspberry Pi 3 computer that characterizes electrochemical sensors with several measuring devices at the same time, reads out the data, stores it in a database and evaluates it. Series of tests that are laborious for humans as part of a doctoral thesis lasting years are now reduced to the effort of a few days.

1 Von der Handarbeit zum Roboter

Vom Computer gesteuerte Prozesse verringern die Fehleranfälligkeit, erhöhen den Probendurchsatz und liefern oftmals präzisere Ergebnisse als menschliche Handarbeit [1]. Neuartige Sensoren basieren auf ausgetüftelten Materialien. Unseren internen Ablauf zur Qualifizierung neuer Elektroden für einen pH-Sensor zeigt Abbildung 1. In einer Testlösung im Probengefäß werden Referenzmessungen mit der Glaselektrode, Impedanzspektroskopie und Cyclovoltammetrie durchgeführt. Automatisch wird Lauge zudosiert und eine Titrationskurve aufgenommen, während simultan Potenziale, frequenzabhängige Widerstände, Kapazitäten und voltammetrische Ladungen registriert werden. Für einen Labormitarbeiter eine unzumutbar anstrengende und fehlerträchtige Aufgabe!

Die im Labor vorhandene automatische Bürette (Abbildung 2) dosiert und befüllt auf menschlichen Tastendruck hin. Über die RS232-Schnittstelle können keine Befehle vom Computer übertragen werden. Deshalb wurde der Handtaster durch eine Schaltung aus zwei Printrelais er-

setzt. Für das Dosieren einer bestimmten Menge steuert der Raspberry Pi die Relais im Wechsel an, bis das gewünschte Volumen erreicht ist. Siehe auch: Fließbild in Abbildung 5.

Das Elektrodenpotenzial selbst gefertigter Elektroden wird hochgenau als elektrische Spannung gegen eine Silber-Silberchlorid-Bezugselektrode gemessen. Wir nutzen einen 16-Bit-Analog-Digitalwandler von Adafruit. Die Verstärkung wurde so gewählt, dass ± 1024 mV mit 0.03 mV Auflösung erfasst werden können.

Eine konventionelle pH-Glaselektrode besitzt einen zu hohen Innenwiderstand für die direkte Spannungsmessung über den AD-Wandler. Aus diesem Grund wurde eine Impedanzwandler-Schaltung über einen Maxim-ICL7611B-CPA-Operationsverstärker dazwischengeschaltet (Abbildung 3). Dadurch agiert die pH-Messzelle annähernd wie eine ideale Spannungsquelle.

Ein Frequenzganganalysator (Solartron SI 1260) und die Cyclovoltammetrie (Keithley 2460 Sourcemeter) werden

über serielle RS232-Schnittstellen oder USB angesteuert und ausgelesen. Für jedes Gerät wurde in der Programmiersprache Python eine eigene Klasse mit Befehlen erstellt.

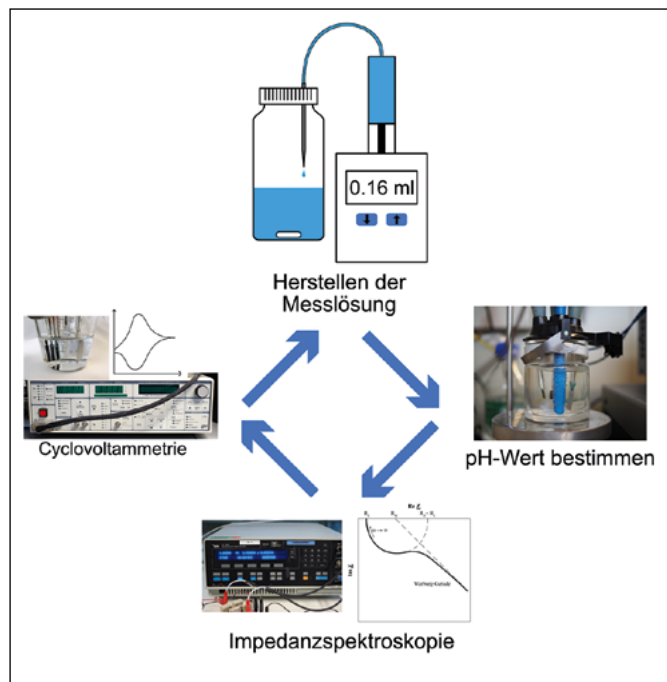


Abbildung 1: Versuchsablauf zur Erprobung einer neuen pH-Elektrode.



Abbildung 2: Automatische Bürette mit Handtaster, durch eine Printrelais-Schaltung ersetzt: 1 = Dosieren, 2 = Befüllen.

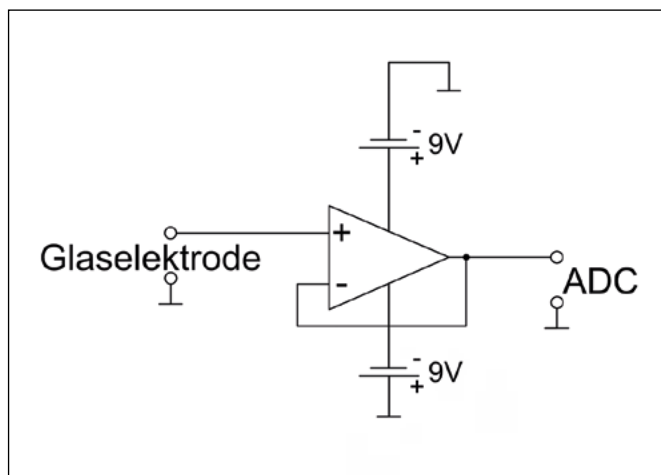


Abbildung 3: Impedanzwandler zur pH-Messung mit Analog-Digital-Wandler.

2 Alles aus einer Box

Das Herzstück des Teststandes, der Raspberry Pi 3, steuert die Titrator-Relais und die Messkanäle direkt an. Der AD-Wandler für die Ruhepotenzialmessung und die Glaselektrode ist über einen I2C-Datenbus angeschlossen. Die übrigen Geräte werden über USB oder USB-Seriell-Adapter kontrolliert. Umgebungsparameter wie Luftdruck, Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit werden über den Gassensor BME680 von Bosch erfasst. Die aufgenommenen Messwerte werden in einer MySQL-Datenbank gespeichert. Der Raspberry Pi ist über LAN oder VPN erreichbar, was eine Fernsteuerung und Überwachung des Versuchsstandes außerhalb des Labors ermöglicht. Für die bessere Handhabung und auch zur Kühlung des Prozessors wurde mittels CAD-Software und 3D-Druck ein Gehäuse konzipiert (Abbildung 4).

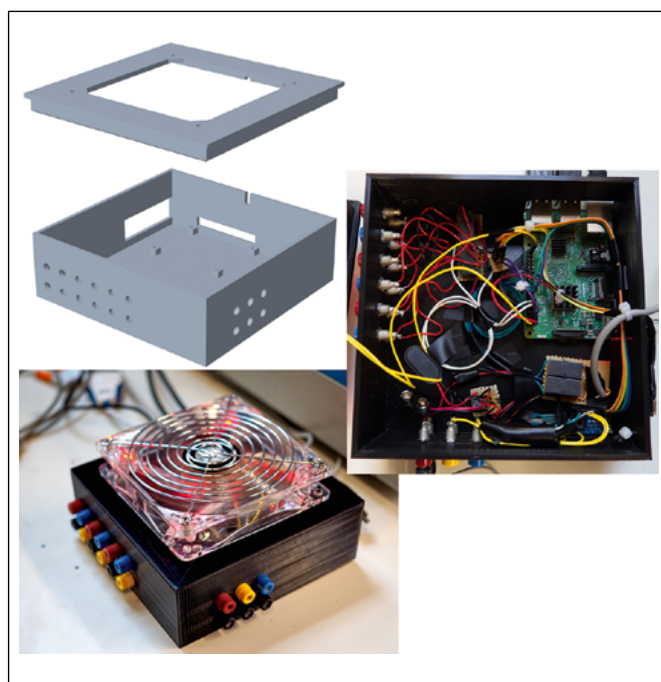


Abbildung 4: Zentraleinheit des Elektrodenteststandes: 3D-Konstruktion des Gehäuses, Innenleben und Außenansicht.

3 Praxistest

Den für Menschen ermüdenden Testplan im Fließschema der Abbildung 5 erledigt nun die Maschine in ununterbrochener Tag-und-Nacht-Arbeit. Eine Iridiumdioxid-Elektrode wurde als Arbeitselektrode eines pH-Sensors geprüft. Bezugs- und Gegenelektrode waren Silber-Silberchlorid und ein Platinblech. 50 mL 1-molare Salzsäure wurden vorgelegt und 1-molare Natronlauge in Portionen von exakt 1 mL hinzudosiert und vermischt. Es folgt die Impedanzspektroskopie im Frequenzbereich von 1 kHz bis 0,1 Hz bei 0,1 V Amplitude, 10 Messungen pro Dekade und 10 s Integrationszeit. Die Versuchszeit betrug 17 Stunden.

Die frequenzabhängige Kapazität der Testzelle (Abbildung 6) zeigt eine mit Handarbeit unmögliche Datendichte und Auflösung. Die Kapazität der Grenzfläche Elektrode/Elektrolyt ist zu Beginn der Titration in saurer Lösung hoch und fällt mit zunehmender Zugabe von Lauge. Am Äquivalenzpunkt bei 50 mmol NaOH springt die Kapazität bei Frequenzen unterhalb 1 Hz. In alkalischer Lösung fällt die Kapazität allmählich wieder. Automatisierte Messungen dieser Art erlauben es, für die chemische Analytik günstige Materialeigenschaften zu entdecken und für künftige Messgeräte und Sensoren nutzbar zu machen.

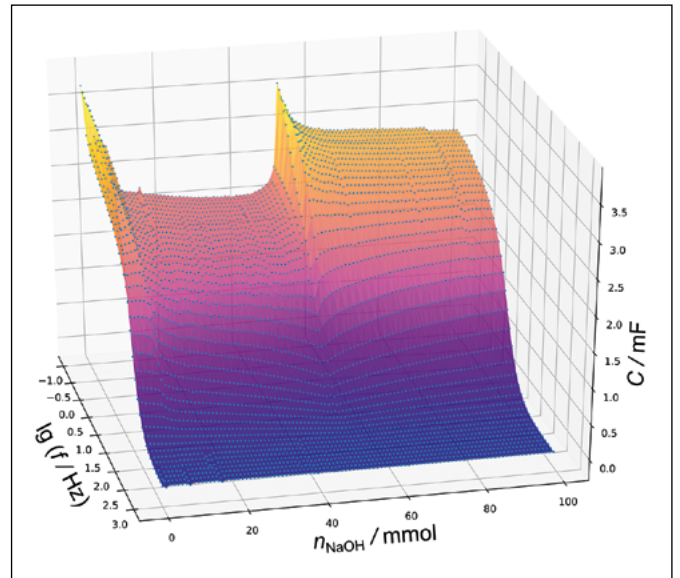


Abbildung 6: Frequenzabhängige Kapazität einer IrO₂-Elektrode während der Säure-Base-Titration. Äquivalenzpunkt bei 50 mmol.

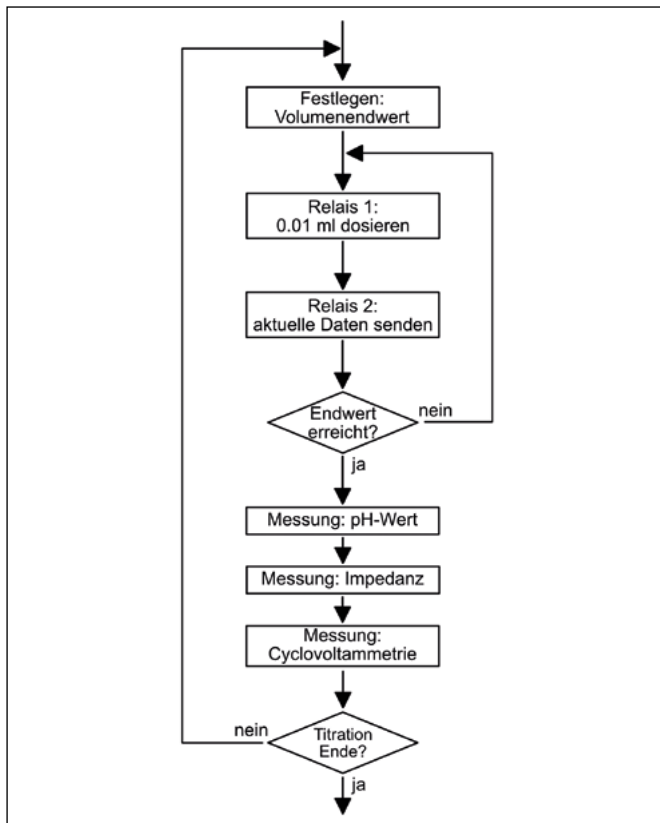


Abbildung 5: Fließschema einer automatischen Elektrodenprüfung

Referenzen:

- [1] B. Kals, Digitale Transformation: Der Weg in das Labor der Zukunft, Presseinformation, 26. Internationale Leitmesse für Labortechnik, Analytik, Biotechnologie und analytica conference (2018).

Kontakt:



Josef Schottenbauer, M.Eng.

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

jo.schottenbauer@oth-aw.de



Christian Gradl

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

c.gradl1@oth-aw.de



Prof. Dr. Peter Kurzweil

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

p.kurzweil@oth-aw.de

Testplattformen zur Messdatengenerierung für KI-basierte Analysemethoden

Sebastian Schmidt, M.Eng.
Regina Trötsch, B.Eng.
Dr. Raphael Lechner
Prof. Dr.-Ing. Markus Brautsch

Zusammenfassung

In diesem Bericht wird die Implementierung von zwei Testplattformen zur Messdatengenerierung für KI-basierte Analysemethoden erläutert, die im Rahmen des Projekts “transferable metering intelligence services” (tramis) erarbeitet werden. Ziel des Projekts ist die Schaffung KI-basierter Analysewerkzeuge zur Auswertung von Massendaten aus der Energiewirtschaft oder Sensorsystemen. Vorhandene, aber bisher ungenutzte oder verborgene Potenziale der Massendaten sollen identifiziert werden und beispielsweise für Optimierungsservices sowohl auf Versorger- als auch Verbraucherseite herangezogen werden.

Um gezielt Messdaten zu generieren sowie Schnittstellen und Datenqualität näher zu untersuchen, sind Testumgebungen für typische Haushalts-Messgeräte auf Grundlage von definierten Anwendungsfällen geschaffen worden. Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse fließen in die KI-Toolbox-Entwicklung mit ein. Über die Testplattformen für Elektrizitäts- und Wasserzähler können typische Verbraucher angeschlossen und vermessen werden. Ebenso können an den Prüfplätzen verbraucherseitig Lastprofile hinterlegt und abgefahren werden. Jede Testplattform verfügt über eine zeitlich hochauflösende Referenzmessung.

Abstract

This paper presents the implementation of two test benches regarding data generation for AI-based analytical methods. These methods are being developed as part of the project “transferable metering intelligence services” (tramis). The project aims to develop an AI-based analysis toolbox to examine energy industry or sensorsystem mass data for unused potential, such as optimization services for both consumer and supplier.

Based on defined use cases, testing environments for typical household metering devices have been created to generate data as well as to investigate common interfaces and resulting quality of data. Gained insights are being incorporated into the AI toolbox development.

Typical consumers (electricity and water) can be connected and measured via the test platforms. Also load profiles can be stored and run on the consumer side at the test stations. Each platform is equipped with a high-resolution reference measurement.

1 Einleitung

Im Rahmen des Projektes “transferable metering intelligence services” (tramis) sollen potenzielle Anwendungsfelder für KI-basierte Methoden im Kontext von energietechnischem Domänenwissen, energiewirtschaftlichen Massendaten aus Smart Metering sowie Daten aus Sensorinfrastrukturen in Gebäuden und Gebäudeleittechnik erforscht und erschlossen werden. Das Projekt wird

durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie im Rahmen des Bayerischen Förderprogramms für Forschung und Entwicklung „Informations- und Kommunikationstechnik“ gefördert.

Massendaten bergen enormes Potenzial für den Informations- und Wissensgewinn und die darauf aufbauenden Dienste, was aktuell jedoch nur sporadisch genutzt wird. So werden beispielsweise Smart-Meter-Daten in

der Regel lediglich für Abrechnungszwecke und allenfalls noch für die Nutzerinformation verwendet. Dabei bieten diese Daten Potenzial für weitergehende Services sowohl für den Versorger (z. B. bessere Lastprognosen) als auch für den Nutzer (z. B. Warnfunktionen, Energieoptimierung).

Durch den zunehmenden Einzug des Internet-of-Things (IoT) und die stetigen Kostenreduktionen im Bereich der Sensorhardware wird sich die verfügbare Datenbasis auf absehbare Zeit vervielfachen, sowohl was die Masse als auch die Qualität der gesammelten Daten anbelangt.

Das Projekt tramis zielt daher auf die Inwertsetzung der vorhandenen Massendaten durch den Einsatz KI-basierter Methoden ab und soll damit eine branchenübergreifende Wertschöpfung in bayerischen Unternehmen ermöglichen. Hierzu ist es jedoch notwendig, dass für die Zusammenführung und Auswertung dieser Daten geeignete automatisierte Methoden und entsprechende Algorithmen zur Anomalieerkennung entwickelt werden. Die Anwendung KI-basierter Methoden, insbesondere Methoden des Machine Learning und der prädiktiven Analyse auf Massendaten aus verteilten Infrastrukturen und historischen Metering-Daten, eröffnet in diesem Kontext neue Möglichkeiten etwa zum Monitoring von Objekten, zur Steigerung der Energieeffizienz durch optimierte Steuerungs- und Nutzungskonzepte, zur Schadensverhütung und -minderung oder für die prädiktive Wartung.

Ziel ist es, diese Potenziale über die Erforschung und Implementierung von KI-Toolboxes zu erschließen und so übertragbare und skalierbare Werkzeuge mit hoher Marktrelevanz zu schaffen. Ein Teilvorhaben des Projekts ist die Schaffung von Testumgebungen für Messgeräte, wie sie von Energieversorgern und Messstellenbetreibern zum Einsatz kommen, um deren Schnittstellen, Datenqualität und etwaige Besonderheiten gezielt untersuchen zu können und die gewonnenen Erkenntnisse in die Entwicklung der KI-Toolboxes einfließen zu lassen. Im Folgenden wird auf die im Teilvorhaben des Projekts an der OTH Amberg-Weiden errichteten Testumgebungen und durchgeführten Versuchsreihen in Auszügen näher eingegangen.

2 Implementierung von Testplattformen für Messgeräte

In vorgelagerten Arbeitspaketen des Projekts sind zunächst konkrete Anwendungsfälle in den Bereichen der Elektrizitäts- und Wasserversorgung definiert und ausgearbeitet worden. Basierend auf diesen Definitionen sind im Labor Thermodynamik und Energietechnik der Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik Testumgebungen für entsprechende Messgeräte entwickelt und umgesetzt worden.

2.1 Testplattform „Elektrische Energie“

Ziel ist es, eine sichere, funktionelle und möglichst praxisnahe Testumgebung für Stromzähler zu schaffen. Die Umsetzung dieser Ziele erfolgt durch den Aufbau des Prüfplatzes mit einem typischen, den gegenwärtigen Anforderungen entsprechenden Zählerschrank (vgl. Abbildung 1, links), wie er auch in Haushalten Anwendung findet. Als Prüfling ist ein modernes Messgerät (Typ Siemens TD-3511 Direktmessung bis 63A) bereitgestellt worden (vgl. Abbildung 1, rechts). Die Auslesung des Zählers erfolgt etwa alle 12 Sekunden über die optische Kommunikationsschnittstelle mittels Schnittstellenadapter. Über ein elektrisches Leistungsmessgerät (Typ Hioki 3169-20) ist die Referenzmessung mit Datenerfassung im Sekundentakt umgesetzt.

Lastseitig kann der Prüfstand mit elektrischen Geräten oder auch „beliebigen“ Lastprofilen über die programmierbare elektronische Last beaufschlagt werden. Die softwareseitige Datenerfassung, das Monitoring und die Steuerung des Prüfstands sind in LabView umgesetzt.



Abbildung 1: Testplattform für elektrische Energie (links) und zu prüfendes Messgerät im Zählerschrank (rechts)

2.2 Testplattform „Wasser“

Zur gezielten Generierung und Untersuchung von Wasserzählermessdaten ist eine entsprechende Testplattform errichtet worden. Prinzipiell besteht diese Plattform aus einem offenen hydraulischen Kreislauf mit in Reihe geschalteten Wasserzählern und einer variablen Verbraucherseite (Abbildung 2).

Im oberen Bereich des Prüfstands sind sämtliche Messgeräte, d. h. Prüflinge ebenso wie die Referenzmessung installiert. Die zu prüfenden Wasserzähler wurden anhand der Gesichtspunkte Praxisrelevanz, Messprinzip sowie der verfügbaren Datenschnittstellen zur potenziellen Anbindung an ein Messdatenerfassungssystem ausgewählt. Als Referenz und zur Validierung der zu prüfenden Wasserzähler sind zwei Ultraschall-Volumengeber mit hochauflösenden Volumenimpuls installiert.

Im unteren Bereich befindet sich der Hauptteil der hydraulischen Installation sowie der Steuerschrank. Neben der Wasserführung im Kreislauf über einen Vorratsbehälter und ein Hauswasserwerk kann die Wasserführung auch im Durchlauf erfolgen (mit Leitungswasser des Hauswasseranschlusses).

Verbraucherseitig ist ein Wasserhahn und ein Spülkasten fest am Prüfplatz integriert. Weiter kann über ein Ventil ein kontinuierlicher Wasserverbrauch eingestellt werden, um beispielsweise eine Leckage zu simulieren. Zur Abbildung von Zapfprofilen oder zur Nachbildung von Wasserverbrauchern ist eine Regelstrecke, bestehend aus einem Regulier- und Magnetventil, installiert. Mit einer speicherprogrammierbaren Steuerung erfolgt die Datenerfassung, das Monitoring sowie die Steuerung des Prüfstands.



Abbildung 2: Testplattform für Wasserzähler

3 Messdatengenerierung und Analyse

Nach umfangreichen Basistest zur Sicherstellung der korrekten Funktionsweise der Testplattformen sind verschiedene Versuchsreihen durchgeführt worden, um beispielsweise die Qualität oder auch die Grenzen der Verwertbarkeit der generierten Messdaten zu untersuchen.

3.1 Elektrische Lastprofile

Massendaten von Stromzählern liegen meist als sog. Zählerstand- oder Arbeitsgang vor. Dabei ist neben der Auflösung des Zählerstands (hier 1 Wh) die zeitliche Auflösung der Daten entscheidend, wenn beispielsweise ein Zählerstandgang rückwirkend über Analysemethoden auf bestimmte Verbrauchsmuster hin untersucht werden soll.

Exemplarisch für diesen Zusammenhang ist in Abbildung 3 der Zählerstandgang (blau) der modernen Messeinrichtung in 1-, 5- und 15-Minuten-Auflösung eines Kühlschranks ohne aktive Nutzung dargestellt. Über Differenzbildung der jeweiligen Zählerstände und bezogen auf das Zeitinkrement ist die mittlere Wirkleistung (orange) abgeleitet. Zum visuellen Abgleich ist zusätzlich das Wirklastprofil der Referenzmessung (grau) hinterlegt. Mit

abnehmender zeitlicher Auflösung des Zählerstandgangs kommt es zu größeren Verzerrungen des Leistungsprofils gegenüber der Referenz.

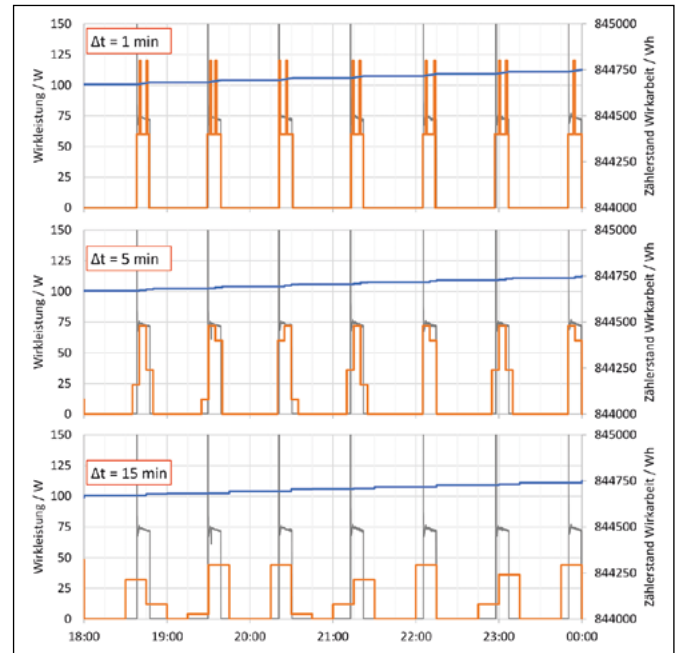


Abbildung 3: Wirklastprofil der Referenzmessung (grau), Zählerstandgang (blau) und abgeleitetes Wirklastprofil (orange) der modernen Messeinrichtung eines Kühlschranks ohne aktive Nutzung über 6 Stunden

3.2 Wasserverbraucher

Wie bei Stromzählern (Stichwort Smart Meter) ist auch bei Messgeräten zur Verbrauchserfassung von Wasser eine zunehmende Digitalisierung und ein Technologiefortschritt zu verzeichnen. Die bisherige, typische Datenauflösung des Wasserverbrauchs im Jahresturnus befindet sich im Umbruch hin zu hochauflösenden Massendaten.

Wiederum abhängig vom Anwendungsfall, sollen auf Grundlage der Daten KI-basierte Analysemethoden angewandt werden – beispielsweise sei hier die Identifizierung von Leckagen im lokalen Wassernetz genannt, um etwa Wasserschäden frühzeitig zu erkennen und entsprechende Maßnahmen zu ergreifen. Vor diesem Hintergrund sind diverse Zähler in die Testplattform „Wasser“ integriert und untersucht worden.

Abbildung 4 zeigt einen Spülvorgang (Spülkasten) in Form eines Wasser-Zählerstandgangs, exemplarisch mit Daten des Referenzvolumengebers und Zähler #1. Nach Betätigung der Spültaste wird nach kurzer Zeit das Ventil zum Nachfüllen des Spülkastens geöffnet und bei Erreichen des oberen Pegels wieder geschlossen. Über die Messstrecke wird das nachgespeiste Wasser erfasst.

Abhängig von der Schnittstelle erscheint das Bild des Zählerstandgangs mehr oder weniger stufenförmig.

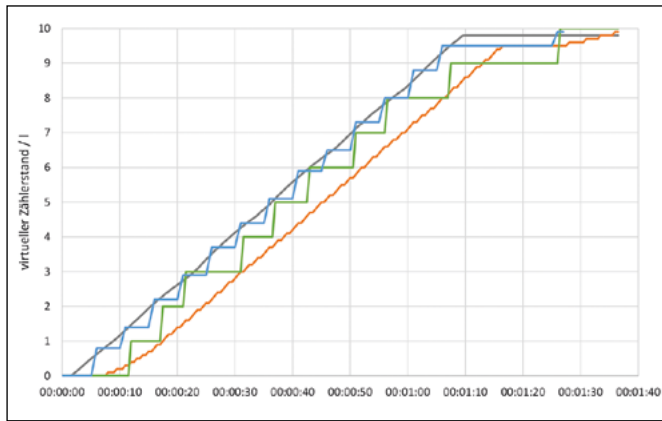


Abbildung 4: Wasser-Zählerstandgang Spülkasten, Referenzmessung (grau), Zähler #1 mit Schnittstellen „Impuls 0,1“ (orange), „Impuls 1“ (grün) und „M-Bus“ (blau)

Über die Schnittstelle des Referenzvolumengeber wird pro 0,01 Liter Wasser ein Impuls erzeugt und von der Steuerung der Testplattform erfasst. Analog geschieht es für den Zähler #1, wobei dieser über zwei Impulsschnittstellen mit 0,1 bzw. 1 Liter/Puls und über eine M-Bus-Schnittstelle (Zählerstand in 0,1 Liter Auflösung) verfügt. Auffällig ist insbesondere der Zeitversatz der „0,1 l/Puls“-Schnittstelle von Zähler #1 (orange) gegenüber der Referenz (grau). Obwohl nach ca. 1:08 min kein Wasser mehr fließt, wäre auf Grundlage der „0,1 l/Puls“-Schnittstelle der Vorgang eine halbe Minute später abgeschlossen. Diese Besonderheit würde zwar bei einer niedrigeren zeitlichen Auflösung der Messdaten (etwa im 15-Minuten-Takt) weniger ins Gewicht fallen, für die Entwicklung von Analysemethoden müssen solche oder ähnliche Schnittstelleneigenschaften aber ebenso berücksichtigt werden.

3.3 Profilkorrelation

Abhängig vom Anwendungsfall kann es hilfreich sein, Korrelationen von Profilen in KI-basierten Auswertemethoden zu berücksichtigen. Beispielsweise können diese zur Identifikation von Verbrauchern im Lastprofil genutzt werden, wenn dieses Profil in einer niedrigen zeitlichen Auflösung vorliegt. Abbildung 5 zeigt überlagerte Wirklast- und Zapfprofile einer Waschmaschine jeweils als zeitlich hochaufgelöste momentane Wirkleistung (grau) und momentaner Volumenstrom (hellblau) sowie als 15-Minuten-Mittelwert (Strom in Schwarz, Wasser in Dunkelblau), welcher vom Zählerstandgang abgeleitet ist.

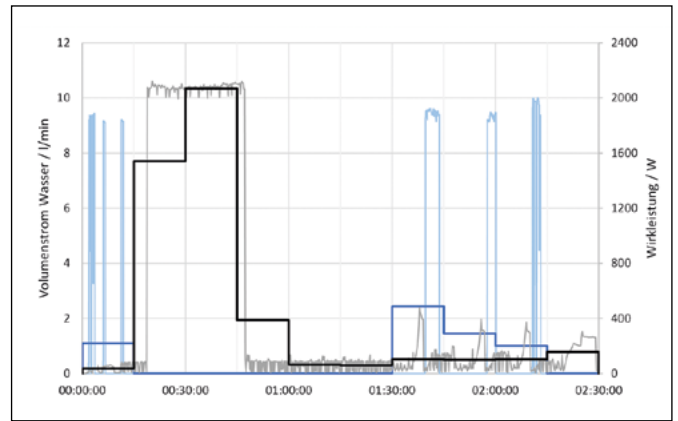


Abbildung 5: Elektrisches Lastprofil und Wasser-Zapfprofil einer Waschmaschine (Waschprogramm 60 °C)

Als charakteristisches Merkmal kann für die Waschmaschine im elektrischen Lastprofil zum einen der Aufheizvorgang zu Beginn und zum anderen das Wäsche-schleudern zum Ende des Waschvorgangs grob definiert werden. Kann der Aufheizvorgang noch genähert im 15-Minuten-Mittelwert identifiziert werden, „verschwinden“ die Lastspitzen im Bereich von 300 bis 400 W des Schleudervorgangs und führen lediglich zu einer leichten Anhebung des Sockels. Damit wäre u. U. die Waschmaschine zunächst nicht eindeutig im elektrischen Lastprofil identifizierbar. Deshalb kann es hilfreich sein, das Wasser-Zapfprofil zu überlagern und auf charakteristische Korrelationen der beiden Profile zu prüfen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In einem Teilvorhaben des Projekts „tramis“ sind in den Laboren Thermodynamik und Energietechnik der Fakultät MB/UT zwei Testplattformen zur Messdatengenerierung für KI-basierte Analysemethoden entwickelt und umgesetzt worden. Mit diesen Testplattformen ist es möglich, verschiedene Verbrauchsmuster vorzugeben. Weiterhin können typische Verbraucher angeschlossen werden und der Daten-Output von Messgeräten, wie sie typischerweise von Energieversorgern zum Einsatz kommen, erfasst werden. Auf Grundlage der gesammelten Daten können Analysemethoden u. a. getestet, validiert und auf Anwendbarkeit hin überprüft werden. Weitere Untersuchungen können mit der Ableitung synthetischer Lastprofile auf Grundlage der vermessenen Verbraucher erfolgen. Diese Daten können auch für die KI-Toolboxen genutzt werden (Supervised Training).

Projektpartner:

Institut für Energietechnik an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden
Institut für Energieinformatik an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden

Fördergeber:



Bayerisches Staatsministerium für
Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie

Kontakt:



Sebastian Schmidt, M.Eng.

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

se.schmidt@oth-aw.de



Regina Trötsch, B.Eng.

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

r.troetsch@oth-aw.de



Dr. Raphael Lechner

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

Numerische Simulation der Herstellung von AlN-Einkristallen mit dem PVT-Verfahren

Zusammenfassung

AlN-Einkristalle sind das Basismaterial für ultraviolett emittierende Leuchtdioden (UV-LEDs) mit weitreichenden Anwendungen, z. B. in Systemen zur Desinfektion und Entkeimung. Aufgrund der extremen Prozessbedingungen bei der Materialherstellung mit dem PVT-Verfahren (Physical Vapor Transport) spielt die numerische Simulation eine Schlüsselrolle bei der Prozessanalyse und -optimierung. Der entwickelte Modellansatz erlaubt eine konsistente Simulation einschließlich aller wesentlichen physikalischen Effekte.

Keywords:

Kristallzüchtung, UV-LEDs, AlN Einkristall, Multiphysik Simulation, ANSYS

Abstract

AlN crystals are the basic material for ultra violet emitting diodes (UV-LEDs) to be utilized in far reaching areas, e. g. in systems for disinfection and sterilization. Due to the extreme process conditions during material processing by the PVT method (Physical Vapor Transport) numerical simulation plays an important role in process analysis and optimization. The developed model allows a consistent simulation including all relevant physical effects.

1 Kristallzüchtung von Aluminiumnitrid (AlN)

Aluminiumnitrid (AlN) ist das Basismaterial für ultraviolett emittierende Leuchtdioden (UV-LEDs). Diese ermöglichen neue Anwendungen, die mit konventionellen UV-Lampen (Gasentladungslampen, insbes. Quecksilber-Dampflampen) nicht realisierbar sind. Der Wellenlängenbereich von 200-280nm wird als UVC (fernes) bezeichnet und ist für Systeme zur Desinfektion und Entkeimung von Wasser, Luft und Oberflächen besonders relevant. Die auf UVC-LEDs basierende Entkeimungssysteme erlauben gegenüber den herkömmlichen UV-Entladungslampen eine zielgenauere Fokussierung der wirksamen UV-Strahlung bei einer gleichzeitig flexibleren konstruktiven Gestaltung. Im Bereich der Medizin ergeben sich durch UV-LEDs mit ausreichender optischer Leistung diagnostische und therapeutische Anwendungen. Die Schmalband UVB-Phototherapie (mittleres UV, Wellenlänge 280-315nm) ist beispielsweise eine Therapieoption für zahlreiche chronische

Hautkrankheiten und wird durch die kompakten, quecksilberfreien Systeme einem breiteren Patientenkreis zugänglich. [1,2]

Im Bereich der Materialherstellung sind einige Verfahren durch extreme Prozessbedingungen charakterisiert, die eine messtechnische Erfassung nahezu unmöglich machen. So findet z. B. die Kristallzüchtung von AlN Einkristallen mit dem PVT-Verfahren (PVT: „Physical Vapor Transport“, Abbildung 1) bei extrem hohen Züchtungstemperaturen von bis zu 2500°C und in einer chemisch aggressiven Al-Atmosphäre statt. In dem induktiv beheizten Tiegel wird das Quellmaterial in Form eines Pulvers erhitzt. Die bei der Sublimation entstehenden gasförmigen Spezies werden anschließend durch verschiedene Mechanismen zu einem an der gegenüberliegenden Seite vorgegebenen Keim transportiert. Bei geeigneter Prozessführung resultiert durch die Adsorption der Spezies das definierte Wachstum des AlN-Einkristalls. [3,4]

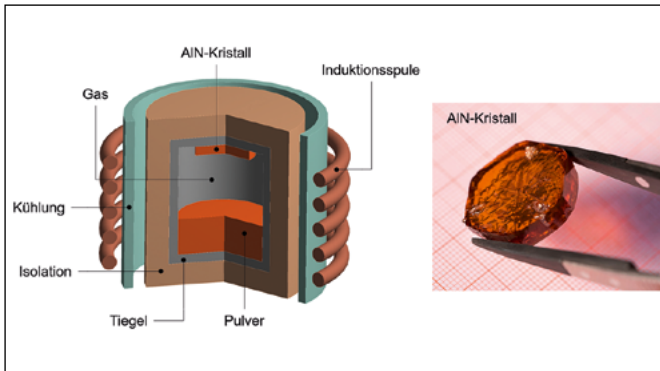
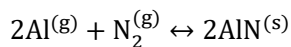


Abbildung 1: Typischer Aufbau einer PVT-Züchtungsanlage (links) und ein am Fraunhofer Institut IISB hergestellter AlN-Kristall (rechts) [5].

2 Modellbildung der physikalischen Prozesse

Die Rahmenbedingungen bei der Züchtung schließen es mehr oder weniger aus, Messdaten über die Kristallwachstumsbedingungen zu gewinnen, so dass damit der numerischen Simulation eine Schlüsselrolle zukommt. In der Literatur werden physikalischen Modelle unterschiedlicher Komplexität diskutiert [6 – 9]. Im Folgenden soll zur kompakten Darstellung lediglich die grundsätzliche Vorgehensweise bei der mathematischen Beschreibung der Materialherstellung dargestellt werden. Ausgangspunkt bildet die chemische Reaktion



zur Bildung des AlN-Kristalls. Wie üblich kann das Massenwirkungsgesetz durch die Partialdrücke der Spezies formuliert werden

$$(p_{\text{Al}}^e)^2 \cdot p_{\text{N}_2}^e = K_p(T)$$

mit der temperaturabhängigen Gleichgewichtskonstanten $K_p(T)$. Üblicherweise wird die Gültigkeit des Idealen Gasgesetzes zur Bestimmung der Dichte ρ des Gasgemisches vorausgesetzt

$$\rho = \frac{pM}{RT}$$

mit der mittleren molaren Masse $M = \sum_i x_i M_i$, dem Systemdruck $p = p_0 + \sum p_i$, der Gastkonstante R und der Temperatur T . Die chemischen Reaktionen an den Phasengrenzen können durch die modifizierte Hertz-Knudsen-Beziehung modelliert werden, so dass an diesen Grenzflächen der Netto-Massenfluss

$$J_i = \alpha_i \sqrt{\frac{M_i}{2\pi RT}} (p_i^e - p_i)$$

der Spezies i resultiert. Sublimation erfolgt für $(p_i^e - p_i) > 0$, Materialabscheidung für $p_i^e - p_i < 0$. α_i ist der Verdampfungs- bzw. Kristallisationskoeffizient der Komponente i . Der Partialdruck der Spezies p_i folgt aus der Lösung der gekoppelten Transportgleichungen für Impuls, Masse und Spezies mithilfe der CFD-Software.

Die lokale Wachstumsrate v_g an der Kristalloberfläche kann schließlich aus der Kenntnis der Massenflüsse mit der Beziehung

$$v_g = \frac{M_{\text{AlN}}}{\rho_{\text{AlN}}} J_{\text{Al}}$$

ermittelt werden.

3 Numerische Simulation

Neben den geeigneten physikalischen Modellen sind die Randbedingungen einer Berechnung wesentlich für die Genauigkeit der Vorhersagen. Bei der vorliegenden Modellierungsstrategie werden daher zwei unterschiedliche Softwaresysteme eingesetzt. Die Software CrysMAS [5] zur globalen Simulation der kompletten Züchtungsanlage und damit zur Bestimmung geeigneter Randbedingungen für die detaillierten CFD-Simulationen mit ANSYS/Fluent [10] (siehe Abbildung 2).

Die Software CrysMAS ist speziell für die globale Simulation von Kristallzüchtungsprozessen entwickelt. Dies beinhaltet die Vorhersage der Temperaturverteilung aufgrund aller relevanten Transportphänomene (insb. Wärmestrahlung), ein Modell zur Analyse der thermomechanischen Spannungen zur Beurteilung der Kristallqualität und insbesondere die Möglichkeit der inversen Modellierung. Das Multiphysik-Tool ANSYS/Fluent bietet eine Vielzahl physikalischer Modelle, die mit benutzerdefinierten Funktionen für spezielle Fragestellungen angepasst werden können. Weitere Vorteile sind die umfassenden Vernetzungsmöglichkeiten (2D/3D) und die modernen parallelisierten Lösungsalgorithmen.

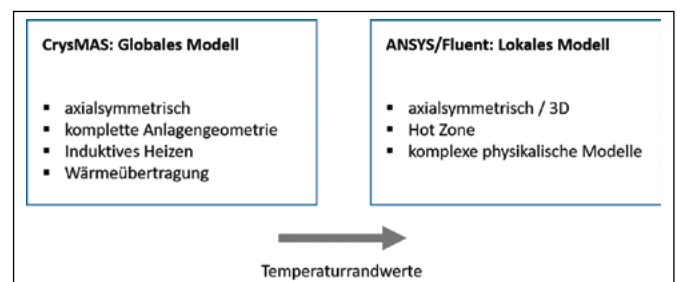


Abbildung 2: Die Verwendung der Softwaresysteme CrysMAS [5] und ANSYS/Fluent [10] ermöglicht eine konsistente Nachbildung der Prozessbedingungen bei der AlN-Kristallherstellung.

Das implementierte Modell wurde ausführlich anhand verschiedener Testfälle verifiziert. Aufgrund der Komplexität des Modells ist dies allerdings nur für Teilaspekte und vereinfachende Annahmen möglich. Die folgende Berechnung gilt für den Grenzfall eines diffusionskontrollierten 1D-Stofftransport [11,12]. Als Randbedingungen sind die Temperaturen an der Quelle $T_Q=1881.5^\circ\text{C}$ und am Keim $T_K=1850^\circ\text{C}$ fest vorgegeben. Der Abstand Quelle-Keim beträgt $d=9\text{mm}$. Mit der Annahme temperaturunabhängiger Stoffparameter existiert für diesen Fall eine analytische Lösung zur Bestimmung der Wachstumsrate. Die ANSYS/Fluent Ergebnisse stimmen

exakt mit den analytischen Werten überein und ergeben weiterhin eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten [11] (Abbildung 3). Bei kleinen Drücken bestimmen kinetische Prozesse an der Grenzfläche die Wachstumsrate des Kristalls, so dass die Werte der Wachstumsrate bei sehr kleinen Drücken wieder abnehmen (nicht dargestellt).

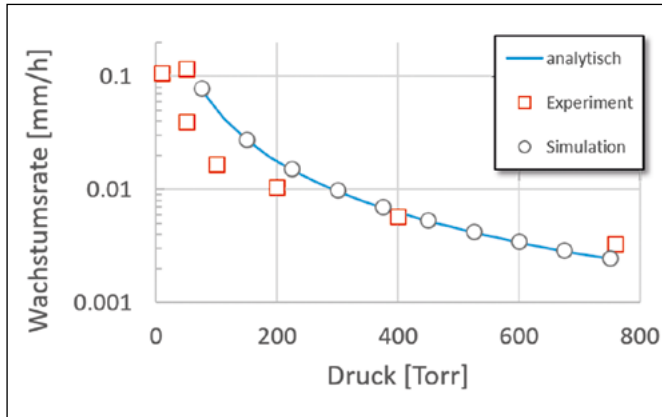


Abbildung 3: Validierung des in ANSYS/Fluent implementierten Stofftransportmodells durch Vergleich der vorhergesagten Wachstumsgeschwindigkeit mit analytischen und experimentellen Ergebnissen [11].

Abbildung 4 illustriert die typischen Ergebnisse einer Simulation der AlN-Kristallzüchtung. Basierend auf den durch die globale Simulation ermittelten Temperaturen am Rand des Tiegels können die Transportprozesse in der Zuchtungsanlage detailliert nachgebildet werden. Beispielhaft sind die Strömungsverhältnisse sowie die resultierende Speziesverteilung im Tiegel gezeigt. Die Prozessoptimierung beinhaltet Untersuchungen zum Einfluss der Tiegelgeometrie, der Spulenposition und der thermischen Prozessführung.

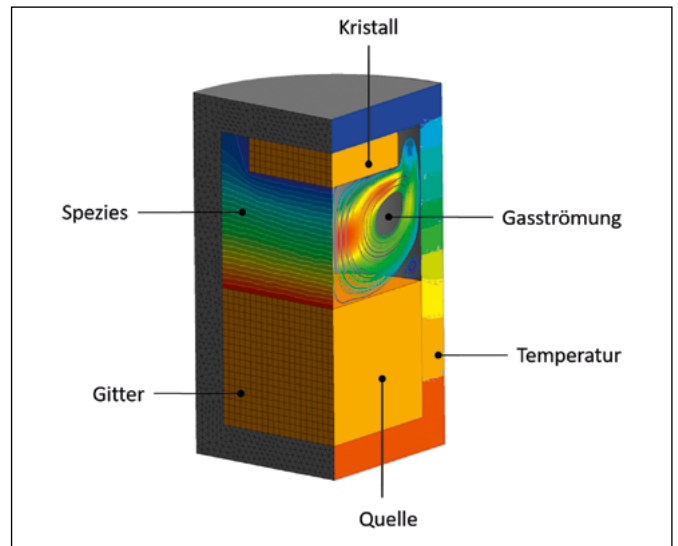


Abbildung 4: Typisches Ergebnis einer 3D-Simulation mit ANSYS/Fluent. Gezeigt sind die berechnete Gasströmung und die resultierende Speziesverteilung, sowie die mit CrysMAS berechneten Randtemperaturen.

4 Fazit

Die numerische Simulation ist ein wesentliches Tool zur Prozessanalyse und -optimierung bei der Herstellung von AlN-Kristallen nach dem PVT-Verfahren. Das in diesem Vorhaben umgesetzte Simulationsmodell berücksichtigt wesentliche Effekte des Züchtungsverfahrens und wurde durch verschiedene Testfälle verifiziert. Das Modell soll zukünftig am Fraunhofer-Institut IISB für die weitere Optimierung der Materialherstellung eingesetzt werden.

Danksagung

Die Autoren danken Herrn Dr. Kriebitzsch von der CADFEM GmbH [13] für die Unterstützung bei der Umsetzung der Modelle in ANSYS/Fluent.

Referenzen:

- [1] Li, J.; Zhang, G.Q.: Light-Emitting Diodes – Materials, Processes, Devices and Applications, Springer, 2019
- [2] Advanced UV for Life: www.advanced-uv.de
- [3] Epelbaum, B.M.; et al.: Similarities and differences in sublimation growth of SiC and AlN, J. Cryst. Growth, 305, 317 – 325, 2007
- [4] Hartmann, C.; et al.: Favourable growth conditions for the preparation of bulk AlN single crystals by PVT, CrystEngComm, 22, 1762, 2020
- [5] Fraunhofer-Institut IISB: www.iisb.fraunhofer.de/de/research_areas/materialien.html
- [6] Selder, M.: Mathematische Modellierung und numerische Simulation der Sublimationszüchtung von Siliciumkarbid-Volumenkristallen, Phd., FAU Erlangen-Nürnberg, 2002
- [7] Kadinski, Lev.: Mathematische Modellierung und numerische Simulation von CVD-Prozessen in der Halbleitertechnik, Phd., FAU Erlangen-Nürnberg, 1996
- [8] Dagner, J.: Erweiterung und Validierung des Computerprogrammes CrysVUn zur Modellierung von CVD/PVT Prozessen, Diplomarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, 2002
- [9] Chen, Q.-S.; et al.: Kinetics and modeling of sublimation growth of silicon carbide bulk crystal, J. Cryst. Growth, 224, 101 – 110, 2001
- [10] ANSYS, Inc.: www.ansys.com
- [11] Liu, L.; Edgar, J.H.: A global growth rate model for Aluminium Nitride sublimation, J. Electrochem. Soc., 149, 1, G12 – G15, 2002
- [12] Liu, L.; Edgar, J.H.: Transport effects in the sublimation growth of aluminium nitride, J. Cryst. Growth, 220, 243 – 253, 2000
- [13] CADFEM GmbH: www.cadfem.net/de/de

Kontakt:



Prof. Dr.-Ing. Marc Hainke

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

m.hainke@oth-aw.de



Dr.-Ing. Jochen Friedrich

Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme
und Bauelementetechnologie IISB
Abteilungsleiter Materialien
Schottkystraße 10
91058 Erlangen

jochen.friedrich@iisb.fraunhofer.de

Mathias Schneider, M.Eng.
Seifeddine Saadani, M.Eng.
Ruben Prokscha, B.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß



Testumgebung für Edge Computing in Intelligenten Transportsystemen (ITS)

Zusammenfassung

Die Verschiebung der Berechnung von Algorithmen aus dem Bereich des maschinellen Lernens von zentralen Serverstrukturen (Cloud), hin zu energieeffizienten Rechenplattformen in Steuergeräten etwa in Maschinen und Fahrzeugen (Edge) ist ein derzeitiger Trend der Industrie. Der Vorteil ist hierbei vielversprechend: niedrigere Verarbeitungszeiten ohne dauerhafte Verbindung zum Server. Dieses sogenannte *Edge Computing* und die damit zusammenhängenden Herausforderungen sind ein Hauptaugenmerk der Untersuchungen des europäischen Förderprojektes „*Artificial Intelligence for Digitalizing Industry*“ (AI4DI), in welchem Partner aus den verschiedensten Industriezweigen kollaborieren.

Gefördert wird das Projekt von der Europäischen Union im Rahmen des H2020 ECSEL Joint Undertaking sowie den involvierten nationalen Förderstellen, in Deutschland dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).

Die Automotive-Forschungsgruppe der Ostbayerischen Technischen Hochschule (OTH) Amberg-Weiden erforscht in diesem Projekt über einen Zeitraum von insgesamt drei Jahren die Optimierungsmöglichkeiten von KI-basierten Datenverarbeitungsprozessen in Edge-Netzwerken, welche als Teil des Anwendungsbereiches von Intelligenten Transportsystemen (ITS) einhergehen. Im abgeschlossenen ersten Projektjahr widmete sich die OTH Amberg-Weiden der Anforderungsanalyse, der Erarbeitung einer Systemarchitektur und der Konzipierung einer Testumgebung für die weiteren Untersuchungen zu Mobility-as-a-Service (MaaS).

Abstract

Moving machine learning inference from backbone servers closer to the actual process at the edge is a recent trend in the industry. Advantages are promising: lower latency for the processing pipeline without the requirement for a permanent connection to the cloud. This so-called *Edge Computing* and its related challenges are a major research objective of the investigation in the European project “*Artificial Intelligence for Digitalizing Industry*” (AI4DI), which assembles partners from various industrial sectors.

The project is funded in the program H2020 ECSEL JU by the European Union as well as the involved national authorities, including the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) in Germany.

Within three years of project duration, the Automotive Research Team of the Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden investigates concepts for the optimization of data processing pipelines in Edge networks applied in the field of Intelligent Transportation Systems (ITS). In the first project year, OTH Amberg-Weiden's activities comprised requirements analysis, system design and the setup of an ITS testbed for further investigations towards Mobility-as-a-Service (MaaS).

1 Einleitung

Bereits 2016 betitelt Bundeskanzlerin Angela Merkel Daten als „Rohstoffe des 21. Jahrhunderts“ [1]. Für die Veredelung der ungeheuren Datenmengen werden jedoch neue Methoden und Konzepte benötigt. Hierbei spielen Algorithmen aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz (KI) eine tragende Rolle in den kommenden Jahren. Um die Kommunikationslast zwischen Datenerfassung und Verarbeitung zu reduzieren und geringe Latenzzeiten zu gewährleisten, arbeitet das Konsortium des Forschungsprojektes *Artificial Intelligence for Digitalizing Industry (AI4DI)* unter anderem an der Entwicklung und Einsatz von neuen Edge Computing Plattformen, auf welchen die KI-Algorithmen gerechnet werden sollen. Das Projekt fällt unter dem Schirm *Electronic Components and Systems for European Leadership Joint Undertaking (ECSEL JU)* und umfasst ein Gesamtbudget von etwa 30 Millionen Euro für den Zeitraum von drei Jahren (2019 – 2022) [2].

Die OTH Amberg-Weiden arbeitet zusammen mit den Partnern VTT, Vaisto (beide Finnland) und ITML (Griechenland) in der Wertschöpfungskette für das Transportwesen an einem „Last-Mile“ Anwendungsfall [3]. Dieser ordnet sich in das zukunftssträchtige Konzept des Mobility-as-a-Service (MaaS) ein, welches sich der Umsetzung von individuellem, multimodalem und betreiberübergreifendem Personenverkehr widmet. Innerhalb von „Last-Mile“ soll die Umsteigezeit eines Fahrgasts zwischen öffentlichen Nahverkehr und einem automatisierten Taxi optimiert werden. Die Problemstellung umfasst dabei mehrere Dimensionen: die präzise Vorhersage von Fahrzeiten der Fahrzeuge in Abhängigkeit des derzeitigen Verkehrsaufkommens sowie das sichere, automatisierte Anfahren der Bushaltestelle. Der Beitrag der OTH Amberg-Weiden beschäftigt sich mit der Optimierung von sensornaher Datenverarbeitung mittels Edge Computing.

Im Folgenden werden die Ergebnisse des ersten Projektjahres (Mai 2019 bis Mai 2020) zusammengefasst. Aufbauend auf der Erläuterung der Vorgehensweise bei der Anforderungsanalyse und für das Systemdesigns, wird auf die von der OTH Amberg-Weiden entwickelte Testumgebung für Intelligente Transportsysteme (ITS) genauer eingegangen, welche technologische Grundlagen für MaaS bereitstellt.

2 Anforderungsanalyse und System Design

Im ersten Projektjahr beschäftigte sich der Großteil der Arbeiten des Konsortiums gemäß des V-Modells mit der Anforderungsanalyse der Anwendungsfälle und dem Systemdesign. Um insbesondere industrieübergreifende Merkmale zu identifizieren, wurde eine standardisierte Analyseverfahren mittels der ISO 25010 (*“Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – System and software quality models”*) für die Evaluation herangezogen. Die Charakteristika, welche durch die ISO spezifiziert werden, wurden um zusätzliche, für KI besonders relevante Merkmale ergänzt. Hierunter fallen eine Abschätzung des Grades der Autonomie des Systems und der Datenqualität, welche für Machine Learning (ML) Verfahren von äußerster Wichtigkeit sind.

Während funktionale Anforderungen für alle Partner im Vordergrund stehen, sind Metriken für Modularität, Zeitverhalten und Ressourcenausschöpfung von hoher Priorität für Mobility as a Service (MaaS) Betrachtungen, welche den Hauptanwendungsfall für das Forschungsteam der OTH Amberg-Weiden darstellen. Die Ergebnisse aus dieser Analyse sind mittels der Volere Anwendungsspezifikation [4] verfeinert und quantifiziert worden, so dass diese im letzten Arbeitspaket, der Systemvalidierung, abgeglichen werden können.

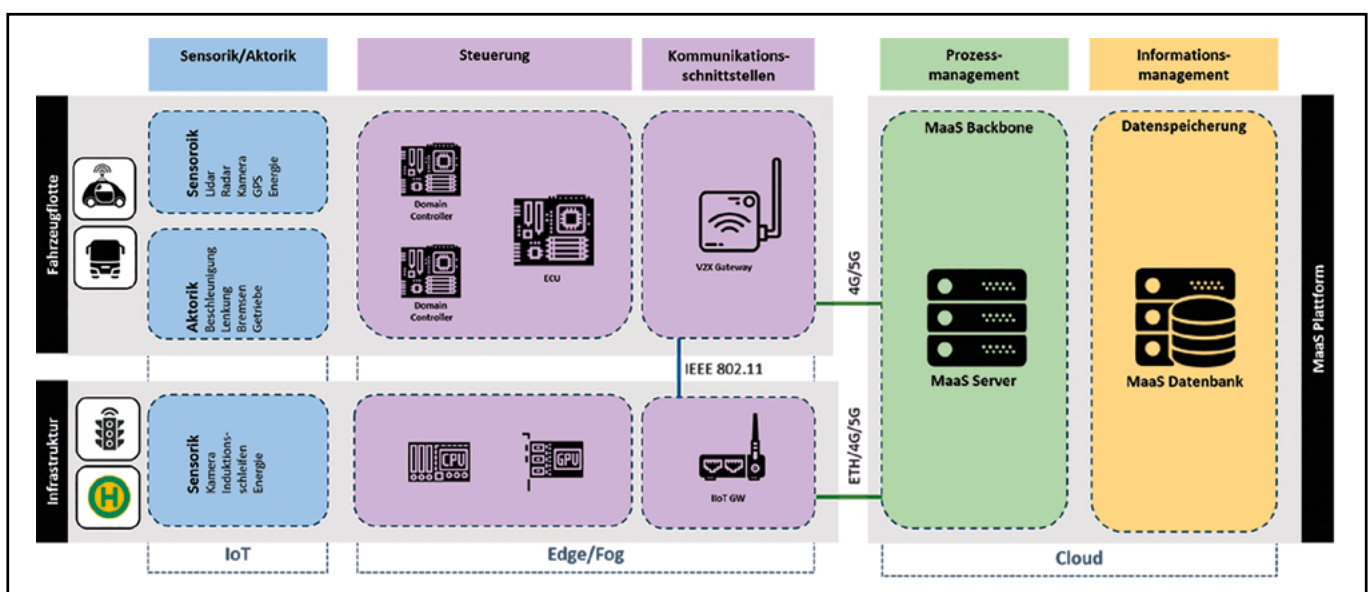


Abbildung 1: High-level Architektur für MaaS Anwendungsfall [8]

Für das Systemdesign verständigte sich das AI4DI-Konsortium auf eine harmonisierte Vorgehensweise für die Spezifikation einer hybriden Referenzarchitektur. Diese basiert auf drei bestehenden Modellen: der *Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0)* [5], der *IoT/IIoT 3D Reference Architecture* [6] und der *Industrial Internet Reference Architecture (IIRA)* [7]. Definiert werden die folgenden drei Dimensionen: die funktionalen Domänen und deren Partitionierung bezüglich der Systemkomponenten, die Systemeigenschaften, welche sich aus den Anforderungscharakteristiken ableiten, und die übergreifenden Systemfunktionalitäten wie u. a. Datensicherheit. Die Referenzarchitektur wurde dann gemäß des jeweiligen Anwendungsfalls spezifiziert (vgl. Abbildung 1).

3 Testumgebung für Intelligente Transportsysteme (ITS)

Um reproduzierbare MaaS-Szenarien testen zu können, wurde eine Testumgebung implementiert. Diese Umgebung modelliert Aspekte wie die Verteilung von Rechenprozessen auf Plattformen in der Edge und berücksichtigt dabei u. a. die Mobilität der Rechenknoten. Hiermit lassen sich Anwendungsfälle in skalierbarer Art und Weise in Bezug auf die Anzahl an Verkehrsteilnehmern (Fahrzeuge, Infrastrukturelemente und Fußgänger) simulieren – dies ist in der Realität aufgrund der beschränkten Ressourcen und der hohen Komplexität nicht möglich. Durch die Reproduzierbarkeit wird weiterhin gewährleistet, dass die entwickelten Algorithmen objektiv miteinander verglichen werden können. Somit wird ein iterativer Ansatz zur Problemoptimierung ermöglicht.





In dieser Testumgebung für ITS wird der *Hardware-in-the-Loop* Ansatz verfolgt. Hierbei werden Teile des Systems durch reale Komponenten dargestellt, wohingegen andere Teile z. B. durch bereits vorhandene Messdaten modelliert werden. Konkret bedeutet dies für den Aufbau, dass alle Rechenplattformen physikalisch in eine Simulationsumgebung eingebunden sind. Sensordaten hingegen, welche

auf den Plattformen verarbeitet werden, werden durch historische Messdaten (z. B. Zähler von Induktionsschleifen) und der Mobilitätssimulation dem Testaufbau bereitgestellt.

Tabelle 1 listet einen Ausschnitt der verwendeten heterogenen Rechenplattformen und Hardwarebeschleuniger sowie deren wichtigsten Kenndaten auf. Hierunter lassen sich neue Architekturen wie Google's *Tensor Processing Unit* (TPU) und die *Vision Processing Unit* (VPU) von Intel finden. Ergänzt wird das Portfolio durch geläufige *Graphics Processing Units* (GPUs) von NVIDIA. Alle Entwicklungsplattformen verfügen zudem über energieeffiziente *Advanced Risc Machine* (ARM) basierende *Central Processing Units* (CPUs). Ziel der Untersuchung wird es sein, insbesondere die Performance der Ausführung (engl. inference) von *Machine Learning* (ML) Modellen zu benchmarken. Der Trainingsschritt dieser Modelle ist auf den leistungsfähigeren Plattformen wie dem NVIDIA Jetson AGX Xavier möglich und wird in neuen Ansätzen, wie z. B. beim *Federated Learning*, angewandt [9]. Dieser Anwendungsfall ist allerdings fernab der derzeitigen Betrachtung, da die Modelle zentral auf einer leistungsstarken Serverplattform trainiert werden.

Metriken bezüglich der Performance der Rechenplattformen werden durch verschiedene Software und Hardwarekomponenten dauerhaft in Echtzeit gemessen. Hierunter fallen Messgrößen, welche die Auslastung der Plattformen (u. a. CPU und RAM) und der Kommunikation untereinander (Datendurchsatz und Latenz) beschreiben. Weil ein Aspekt der Untersuchungen darin liegt, die Daten energieeffizient in der Edge zu verarbeiten, wurde das Messsystem um eine Energiemessung erweitert. Bedingt durch die hohe Anzahl an Hardwareplattformen, welche gleichzeitig gemessen werden sollen, kann nicht auf kommerziell verfügbare Messsysteme zugegriffen werden. Stattdessen wurde eine prototypische Plattform entwickelt (vgl. Abbildung 2), welche gleichzeitige, nicht-invasive, Messungen von bis zu 18 Geräten mittels INA3221 Sensoren ermöglicht. Neben Ethernet, Wi-Fi und den Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART), unterstützt

Tabelle 1 Übersicht der verwendeten Edge-Rechenplattformen [10] [11] [12]

	RaspberryPi 4B + Intel Movidius NCS2	Google Coral Dev Board	NVIDIA Jetson Nano	NVIDIA Jetson AGX Xavier
				
CPU	Quad-Core ARM Cortex A72	Quad-Core ARM Cortex A53	Quad-Core ARM Cortex A57 MPCore	8-core NVIDIA Carmel ARMv8
Speicher	4 GB LPDDR4	1 GB LPDDR4	4 GB LPDDR4	32 GB LPDDR4x
KI-Chip	Intel Movidius Myriad X Vision Processing Unit	Google Edge TPU Coprozessor	128 Core Maxwell GPU	512-core NVIDIA Volta GPU mit 64 Tensor Cores
Schnittstelle	USB 3.0	PCIe	PCIe	PCIe
Chip OPs	4 TOPs	4 TOPs	472 GFLOPs	32 TOPs
Leistung	2W + 7.6W	2W + 3.5W	5W/10W	10W/15W/30W
ML-Toolkit	OpenVino	TensorFlow Lite	TensorFlow, TensorRT	TensorFlow, TensorRT

das Gerät die kabellose Übertragung von Messwerten über weite Strecken mit der Long Range (LoRa) Funktechnologie. Diese Funktionalität ist insbesondere für den späteren Einsatz im realen Umfeld von Vorteil. Im weiteren Verlauf des Projektes soll außerdem eine „Dongle“-Variante entwickelt werden. Hiermit kann dann eine beliebige, einzelne Plattform in der Infrastruktur platziert und dauerhaft aus der Ferne überwacht werden.



Abbildung 2: Messsystem für Energieverbrauch

Die Testumgebung wird durch eine Mobilitätssimulation vervollständigt. Hierfür wurde sich mit den Projektpartnern auf die Simulationssoftware *Simulation of Urban Mobility* (SUMO) [13] verständigt. Diese ermöglicht es, die Positionen und Routen von Fahrzeugen und Infrastrukturelementen zu simulieren. In der Simulation wird dabei das Stadtzentrum von Tampere (Finnland) abgebildet, welches auch anderen Partner für Untersuchungen bezüglich des MaaS-Anwendungsfalls von Nutzen ist. Die Umgebung wurde möglichst realitätsnah in SUMO modelliert und erlaubt es, eine hohe Anzahl an Fahrzeugen, Infrastrukturelementen, Radfahrern und Fußgängern reproduzierbar zu simulieren. Die Simulation kann durch verschiedenste, real verfügbare Sensordaten (u. a. Induktionsschleifen) parametrisiert werden. Für die Zukunft ist eine Anbindung dieser Umgebung an eine Unity3D Simulation in Zusammenarbeit mit Partner Vaisto geplant. Diese ermöglicht es realitätsnahe Kameraaufnahmen, z. B. für das Training von Objektdetektionsalgorithmen, zu erzeugen. Durch weitere Schnittstellen, z. B. an einen Netzwerksimulator wie OMNet++ mittels Veins [14], können weitere Aspekte wie die Konnektivität (z. B. über IEEE 802.11x oder LTE) der Verkehrsteilnehmer im Softwarestack der Simulation integriert werden. Nichtsdestotrotz bleibt zwischen Realität und Simulation weiter-

hin eine gewisse Modellierungslücke (engl. “*reality gap*”) vorhanden. Die Exploration dieser Lücke stellt derzeit ein eigenen Forschungsaspekt dar und kommt insbesondere beim Transfer von ausschließlich in einer Simulation trainierten Reinforcement Learning Modellen in die reale Umgebung zu tragen [15].

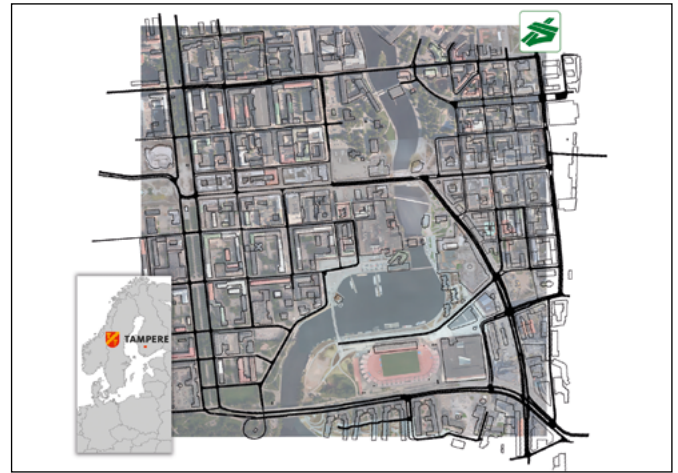


Abbildung 3: Modellierung der Testfelds in Tampere (Finnland) mittels SUMO

4 Ausblick

Im kommenden Projektjahr wird die Testumgebung für ITS dazu verwendet, die Performance der Inference verschiedenster ML-Verfahren (u. a. Objektdetektion und Segmentierungsalgorithmen) zu benchmarken. Diese Zwischenergebnisse werden darauffolgend verwendet, um konsequente Datenverarbeitungspipelines zu definieren und auf eine statische Edge Netzwerktopologie zu verteilen. Des Weiteren werden dynamische Szenarien definiert, in welchen sich die Verfügbarkeit von Rechenplattformen oder die Art der Verarbeitungsschritte verändert. Ein intelligenter Agent soll basierend auf diesen Änderungen evaluieren, ob die Zuordnung zwischen Rechenprozessen und den Verarbeitungsplattformen optimiert werden kann und gegebenenfalls die notwendigen Operationen, z. B. die Verlagerung von Rechenschritten auf eine andere Plattform, durchführen.

Referenzen:

- [1] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, „Podcast – Merkel: Wir müssen uns sputen“, 12 3 2016. [Online]. Available: <https://www.bundeskanzlerin.de/bkin-de/mediathek/bundeskanzlerin-merkel-aktuell/merkel-wir-muessen-uns-sputen-1009212>. [Zugriff am 13 7 2020].
- [2] „AI4DI“, [Online]. Available: <http://ai4di.eu/>. [Zugriff am 13 7 2020].
- [3] M. Schneider, S. Saadani und A. Höß, “Artificial Intelligence for Digitalizing Industry”, in Forschungsbericht 2020, Amberg, Ostbayerischen Technische Hochschule Amberg-Weiden, 2019, pp. 6 – 11.
- [4] J. Robertson und S. Robertson, “Volere Requirements Specification Template”, Atlantic Systems Guild, [Online]. Available: <https://www.volere.org/templates/volere-requirements-specification-template/>. [Zugriff am 26 1 2020].

- [5] P. Adolphs, H. Bedenbender, D. Dirzus, M. Ehlich, U. Epple, M. Hankel, R. Heidel, M. Hoffmeister, H. Huhle, B. Kärcher, H. Koziolok, R. Pichler, S. Pollmeier, F. Schewe, A. Walter, B. Waser und M. Wollschlaeger, "Reference architecture model industrie 4.0 (rami4.0)", ZVEI and VDI, Status report, 2015.
- [6] O. Vermesan, M. Eisenhauer, M. Serrano, P. Guillemain, H. Sundmaeker, E. Z. Tragos, J. Valino, B. Copigneaux, M. Presser, A. Aagaard, R. Bahr und E. C. Darmais, "The Next Generation Internet of Things – Hyperconnectivity and Embedded Intelligence at the Edge", in Next Generation Internet of Things – Distributed Intelligence at the Edge and Human Machine-to-Machine Cooperation, River Publishers Series in Communications, 2018.
- [7] Industrial Internet Consortium, "The Industrial Internet of Things Volume G1: Reference Architecture", 2019.
- [8] Al4DI Consortium, "D2.2 Report on HW/SW partitioning and subsystem level key architecture designs (initial report)", 2020.
- [9] K. Bonawitz, H. Eichner, W. Grieskamp, D. Huba, A. Ingerman, V. Ivanov, C. Kiddon, J. Konecny, S. Mazzocchi, B. McMahan, T. Van Overveldt, D. Petrou, D. Ramage und J. Roselander, "Towards Federated Learning at Scale: System Design", in Proceedings of the 2nd SysML Conference, Palo Alto, CA, USA, 2019.
- [10] NVIDIA Corporation, "Technical Specifications", [Online]. Available: <https://developer.nvidia.com/embedded/develop/hardware>. [Zugriff am 13 7 2020].
- [11] Intel Corporation, "Intel Neural Compute Stick 2", [Online]. Available: <https://ark.intel.com/content/www/us/en/ark/products/140109/intel-neural-compute-stick-2.html>. [Zugriff am 13 7 2020].
- [12] Google LLC, "Dev Board datasheet", [Online]. Available: <https://coral.ai/docs/dev-board/datasheet/>. [Zugriff am 13 7 2020].
- [13] P. A. Lopez, M. Behrisch, L. Bieker-Walz, J. Erdmann, Y.-P. Flötteröd, R. Hilbrich, L. Lücken, J. Rummel, P. Wagner und E. Wießner, "Microscopic Traffic Simulation using SUMO", in 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Maui, Hawaii, USA, 2018.
- [14] H. Noori, "Realistic urban traffic simulation as vehicular Ad-hoc network (VANET) via Veins framework", in 2th Conference of Open Innovations Association (FRUCT), Oulu, Finland, 2012.
- [15] F. Muratore, M. Gienger und J. Peters, "Assessing Transferability from Simulation to Reality for Reinforcement Learning", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2019.

Projektpartner:



Acknowledgement:

Al4DI has received funding within the Electronic Components and Systems for European Leadership Joint Undertaking (ECSEL JU) in collaboration with the European Union's H2020 Framework Programme and National Authorities, under grant agreement n° 826060.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert das Projekt unter dem deutschen Titel „Elektroniksysteme für Künstliche Intelligenz in der digitalen Industrie – Al4DI“ mit dem Teilvorhaben an der OTH Amberg-Weiden „KI-Algorithmen für die Optimierung von verteilten Datenverarbeitungsketten in heterogenen Rechnernetzen“ unter der Fördernummer 16ESE0343.



Kontakt:



Mathias Schneider, M.Eng.

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

mat.schneider@oth-aw.de



Seifeddine Saadani, M.Eng.

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

se.saadani@oth-aw.de



Ruben Proschka, B.Eng.

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

ru.proschka@oth-aw.de



Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

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

a.hoess@oth-aw.de

Zusammenfassung

Der aktuelle Pflegenotstand und Fachkräftemangel im Bereich der Pflege ist allgemein bekannt. Verschärft wird diese Problematik durch Unsicherheiten in der Planbarkeit des Patientenaufkommens. Dies führt teils zu Unterbesetzung und der Notwendigkeit des Überstundenaufbaus, teils zu Überplanungen und einer damit verbundenen Überbesetzung.

Um hier bei der bisherigen, auf Erfahrung basierenden Planung zu unterstützen, verfolgen wir einen datengetriebenen Ansatz zur Vorhersage des Patientenaufkommens. Auf Basis von historischen Patientendaten prognostizieren wir die erwartete Aufenthaltsdauer aktueller Patienten. Durch die in der Pflegepersonaluntergrenzen-Verordnung (PpUGV) vorgegebenen Verhältnisse von Patienten zu Pflegekräften ergibt sich daraus die Anzahl an benötigten Pflegekräfte.

Abstract

The nursing crisis and general lack of specialists in the area of care is generally known. This problem is reinforced by uncertainties in the predictability of the number of patients. This leads partly to under-planning and the need to increase overtime, and on the other hand side over-planning and hence overstaffing.

In order to support the planning process based on experience, we follow a data-driven approach to predict patient numbers. Based on historical patient data, we forecast the expected length of stay of current patients. The ratios of patients to nursing staff specified in the „Pflegepersonaluntergrenzen-Verordnung (PpUGV)“ result in the number of nursing staff required.

1 Einleitung

In Deutschland herrscht ein Mangel an qualifiziertem Arzt- und Pflegepersonal. Bereits Anfang 2018 waren 40.000 Pflegestellen unbesetzt [1]. Verschärft hat sich diese Situation durch die Pflegepersonaluntergrenzen-Verordnung (PpUGV).

Bisher geht man in der Gestaltung der Dienstpläne von einer konstanten Anzahl von Patienten und somit benötigtem Arzt- und Pflegepersonal aus. Schwankungen über den Tag (z. B. Notaufnahme) und das Jahr (z. B. Geburten, Grippewellen) werden kaum berücksichtigt.

Die Entwicklung des Patientenaufkommens in der Notaufnahme (und nachgelagerten Stationen) folgt Mustern, die

vom Wochentag, der Tageszeit oder auch der Jahreszeit abhängen. Diese Schwankungen führen zu einem stark variablen Personalbedarf, v. a. in der Pflege. Die Folge ist zum einen eine „Überbesetzung“ und zum anderen massive Überstunden der Pflegekräfte.

Vor dem Hintergrund des Pflegenotstands und des Fachkräftemangels ist es von großer Relevanz, das Pflegepersonal optimal einzusetzen, d. h. die Pflegepersonalressourcen zugeschnitten auf den tatsächlichen Bedarf einzusetzen. Derzeit müssen viele Krankenhäuser Betten sperren und Operationen verschieben, weil sie nicht genügend Pflegepersonal finden [2].

Unterstellt man nun eine Vorhersagbarkeit des Patientenaufkommens in der Notaufnahme, wie es in einer Studie

von McKinsey (Abbildung 1) gezeigt wurde, so sieht man, dass viel Potenzial zur Verbesserung in der Pflegepersonalbedarfsplanung existiert. In vielen Krankenhäusern sind starre Dienstpläne die Regel, was zu einer hohen Schwankungsbreite im Verhältnis von Pflegekräften zu Patienten führt. Aktuelle Studien belegen, dass sich dies auch in der Pflegequalität widerspiegelt [3, 4].

Neben der Anzahl an Patienten haben noch eine Vielzahl weiterer Faktoren Einfluss auf den tatsächlichen Pflegepersonalbedarf [5]:

- Unterschiede in der Pflegestufe des Patienten
- Eintreffen neuer Patienten / Patientenentlassungen
- Stationsaufbau
- Krankheit der Pflegekräfte
- Urlaub / Fortbildung der Pflegekräfte
- Erfahrungslevel / Ausbildungsgrad der Pflegekräfte

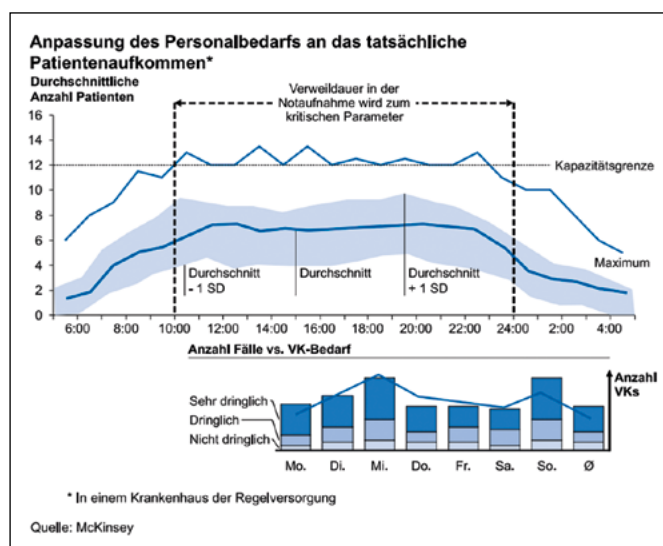


Abbildung 1: Patientenaufkommen in der Notaufnahme eines Krankenhauses der Regelversorgung über den Tag betrachtet [6].

Ziel ist es, ein maschinelles Lernsystem zu entwickeln, welches erlaubt, den Pflegepersonalbedarf rein auf Daten basiert präzise vorherzusagen. Hierbei sollen unterschiedlichste Datenquellen automatisiert und erweiterbar miteinander kombiniert werden. Der maschinelle Lernansatz ist hierbei von großer Relevanz, da er übertragbar und nicht auf ein spezifisches Krankenhaus zugeschnitten ist. Bisherige Optimierungen der Personalbedarfsplanung sind sehr spezifisch und beruhen in den meisten Fällen auf Expertenschätzungen [5].

Das maschinelle Lernsystem soll es dem Benutzer ermöglichen, präzise Antworten auf Fragen wie zum Beispiel: „Ändert sich mein Pflegepersonalbedarf während der Schulferien?“, „Kann ich, aufgrund der Wetterprognose der nächsten Tage, Pflegekräften den Abbau von Überstunden ermöglichen?“, „Welche Staffelung des Arbeitszeitbeginns ist in Hinblick optimale Patientenversorgung/ Personaleinsatz optimal?“, „Werde ich die Pflegeperso-

naluntergrenzenverordnung (PpUGV) erfüllen bzw. wie muss ich meine Bedarfsplanung anpassen?“ zu erhalten. Die Beantwortung dieser Fragen wird durch eine volumenbasierte Vorhersage ermöglicht, welche mit der Erfüllung der PpUGV einhergeht.

2 Methoden

Als Datenbasis steht der MIMIC-III-Datensatz zur Verfügung [7]. Dieser ist ein öffentlich verfügbarer Datensatz, welcher Patientendaten der Intensivstation des Beth Israel Deaconess Medical Care Centers aus den Jahren 2001 bis 2012 enthält. Neben den 53.423 Klinikaufnahmen sind außerdem Daten zu 7870 Neugeborenen enthalten, welche vor der Veröffentlichung hinreichend anonymisiert wurden. Insgesamt besteht der Datensatz aus 26 Tabellen, deren Inhalt von den Krankenhausaufenthaltszeiten, der Diagnose und Medikation über die Vitalparameter bis hin zu den Notizen der behandelnden Ärzte reicht.

Während numerische Daten wie Vitalparameter direkt als solche für Analyse- und Vorhersagezwecke verwendet werden können, stellt sich dies bei textuellen Daten wie den Notizen durchaus schwieriger dar. Hierbei handelt es sich meist um einmalige Notizen, die spezifisch auf einen einzelnen Patienten eingehen. Allerdings stellt die Anzahl der Notizen pro Tag eine gute Basis für weitere Analysen dar. Analog hierzu erfolgt eine Aufbereitung aller nicht-numerischen Daten.

Bereits zur besseren Navigation der Rohdaten und Übersicht wurde eine MySQL-Datenbank zur Datenhaltung eingesetzt. Diese Rohdaten wurden mithilfe von verschiedenen Aufbereitungsschritten, beschrieben in Skripten der Programmiersprache Python, in einen für maschinelles Lernen nutzbaren Datensatz transformiert und in der MySQL-Datenbank persistiert. Diese aufbereiteten Daten stellen eine mathematische Patientenrepräsentation dar, d. h. ein Abbild der Patientensituation zu einem vorher festgelegten, täglichen, für alle Patienten identischen Zeitpunkt.

Für die Analyse von realen, aktuellen Daten würde sich hier noch die Integration externer Daten, wie beispielsweise Wetterdaten oder Praxisöffnungszeiten von Ärzten im Einzugsgebiet, anbieten. Allerdings ist die Nutzung dieser Daten im Falle des MIMIC-III-Datensatz aufgrund der de-identifizierten Zeitstempel nicht möglich.

Da es sich bei den MIMIC-III-Daten um Patientendaten einer Intensivstation handelt, ist eine Vorhersage der erwarteten Aufenthaltszeiten der Patienten auf dieser naheliegend. In bereits vorhandener Literatur [8 – 11] werden verschiedene Ansätze zur Vorhersage evaluiert. Wir haben uns hier für die Variante der Vorhersage entschieden, ob ein Patient in den nächsten 24 Stunden ein Bett auf der Intensivstation benötigt oder nicht.

In den letzten zehn Jahren hat sich die Nutzung von Methoden des Deep Learnings in vielen Bereichen der Vorhersage als qualitativ beste Lösung etabliert. Allerdings ist in unserem Fall nicht nur die Qualität der Vorhersage, sondern auch die Nachvollziehbarkeit dieser essenziell und für eine Akzeptanz von Seiten der Domänenexperten unerlässlich. Wir haben uns daher für die Verwendung von Entscheidungsbaum-basierten Verfahren und der Interpretation mithilfe von Shapley-Werten entschieden.

3 Ausblick

Die bisherigen Vorhersageergebnisse erreichen bereits eine vergleichsweise gute Qualität mit einer Operationscharakteristik über 90%, wobei hier das Modell Random-Forrest am besten abschneidet. Die sich hieraus ergebenden Patientenzahlen gestatten in Kombination mit den in der PpUGV vorgegebenen Verhältnissen von Patienten zu Pflegekräften die benötigte Anzahl an Pflegekräften zu errechnen und damit für die Personalbedarfsplanung zu nutzen. Allerdings ist diese Vorhersage nicht nur als alleinstehende Zahl zu betrachten, sondern lässt sich anhand der oben beschriebenen Möglichkeiten zur Interpretation von Domänenexperten nachvollziehen und evaluieren.

In Kooperation mit der Kliniken Nordoberpfalz AG und der infoteam Software AG ist im Forschungsprojekt MALEB (Maschinelles Lernen für die Personalbedarfsplanung in

der Klinik) nun als nächster Schritt die Adaption aktueller Daten eines Krankenhauses, konkret des Klinikums Weiden, geplant. Hierbei ist besonders der Transfer von Daten des amerikanischen Gesundheitssystems auf Daten des deutschen Gesundheitssystems und die damit verbundenen Unterschiede in der Qualität der Vorhersage von Interesse.

Die Vorhersage der Patientenzahlen einer Intensivstation ist natürlich nur ein kleiner Baustein in der Vorhersage des Personalbedarfs eines Krankenhauses. Allerdings lässt sich das Modell aufgrund der vorhandenen mathematischen Patientenrepräsentation mit geringem Aufwand auf andere Stationen und Bereiche des Krankenhauses übertragen und auf einen langfristigeren Prognosehorizont mit Vorhersagen von Entlassungen in den nächsten 14 Tagen erweitern.

Neben der Vorhersage von Patientenzugängen und Entlassungen im Rahmen der Intensivstation, bietet sich dies analog für die Notaufnahme und die Vorhersage von Zugängen dort an. Ebenfalls ist eine Integration von geplanten Patientenzugängen, -verlegungen und -entlassungen auf und zwischen den Stationen der Fachrichtungen denkbar.

Kombiniert man diese Vorhersagen, ergibt sich ein komplettes Bild des Patientenflusses und damit verbunden der Bedarf an Pflegekräften.

Referenzen:

- [1] Rebekka Höhl, Rund 40.000 Pflegestellen unbesetzt: Neue Zahlen der Bundesagentur. [Online]. Available: https://www.aerztezeitung.de/politik_gesellschaft/pflege/article/979191/neue-zahlen-bundesagentur-viele-pflegestellen-unbesetzt.html (accessed: Oct. 5 2019).
- [2] Falk Osterloh, „Pflegekräfte: Den Personalbedarf messen“, Deutsches Ärzteblatt, vol. 116, 35 – 36, A-1526 / B-1260 / C-1240, 2019.
- [3] P. Griffiths et al., “Nurse staffing, nursing assistants and hospital mortality: retrospective longitudinal cohort study”, *BMJ Qual Saf*, vol. 28, no. 8, pp. 609 – 617, 2019, doi: 10.1136/bmjqs-2018-008043.
- [4] J. Needleman, J. Liu, J. Shang, E. L. Larson, and P. W. Stone, “Association of registered nurse and nursing support staffing with inpatient hospital mortality”, *BMJ Qual Saf*, vol. 29, no. 1, pp. 10 – 18, 2020, doi: 10.1136/bmjqs-2018-009219.
- [5] P. Griffiths et al., *The Safer Nursing Care Tool as a guide to nurse staffing requirements on hospital wards: observational and modelling study*. Southampton (UK): NIHR Journals Library, 2020. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK555320/>
- [6] B. I. Behar, C. Guth, and R. Salfeld, Eds., *Modernes Krankenhausmanagement: Konzepte und Lösungen*, 3rd ed. Berlin: Springer Gabler, 2016.
- [7] A. E. W. Johnson et al., “MIMIC-III, a freely accessible critical care database”, *Sci Data*, vol. 3, no. 1, p. 160035, 2016, doi: 10.1038/sdata.2016.35.
- [8] D. Bertsimas, J. Pauphilet, J. Stevens, and M. Tandon, “Predicting inpatient flow at a major hospital using interpretable analytics”, *medRxiv*, 2020.05.12.20098848, 2020, doi: 10.1101/2020.05.12.20098848.

- [9] A. Asheim, L. P. Bache-Wiig Bjørnsen, L. E. Næss-Pleym, O. Uleberg, J. Dale, and S. M. Nilsen, “Real-time forecasting of emergency department arrivals using prehospital data”, BMC Emerg Med, vol. 19, no. 1, p. 42, 2019, doi: 10.1186/s12873-019-0256-z.
- [10] K. I. Duwalage, E. Burkett, G. White, A. Wong, and M. H. Thompson, “Forecasting daily counts of patient presentations in Australian emergency departments using statistical models with time-varying predictors”, Emergency medicine Australasia : EMA, 2020, doi: 10.1111/1742-6723.13481.
- [11] A. F. W. Ho, B. Z. Y. S. To, J. M. Koh, and K. H. Cheong, “Forecasting Hospital Emergency Department Patient Volume Using Internet Search Data”, IEEE Access, vol. 7, pp. 93387 – 93395, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2928122.

Projektpartner:

Kliniken Nordoberpfalz AG
infoteam software

Fördergeber:



Kontakt:



Stefan Förstel, M.Sc.

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

s.foerstel@oth-aw.de



Prof. Dr.-Ing. Eva Rothgang

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

e.rothgang@oth-aw.de

Heike Lepke, M.Eng
Mathias Schneider, M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß
Nicholas Jäger, M.Sc.
Prof. Dr. Andreas Aßmuth

Projekt AutoDrive – fail-aware, fail-safe, fail-operational

Auto Drive

Zusammenfassung

Das Projekt AutoDrive bringt ein innovatives gesamt-europäisches Ökosystem zusammen, das aus 61 Partnern besteht, darunter führende Halbleiterunternehmen, Fahrzeughersteller, elektronische Systemintegratoren, renommierte Forschungsinstitute sowie kleine und mittlere Unternehmen (KMU).

Ziel ist die Entwicklung fortschrittlicher elektronischer Komponenten und Systeme für autonome Fahrzeuge zur Bereitstellung ausfallsicherer Funktionen unter Verwendung neuartiger Architekturen mit erhöhter Zuverlässigkeit, um Komplexität und Kosten zu reduzieren, gleichzeitig jedoch Robustheit und Flexibilität zu erhöhen und das Gesamtsystem in optimaler Weise auszubalancieren.

Sicherheit ist die größte Herausforderung beim autonomen Fahren. Die AutoDrive-Partner entwickeln fortschrittliche elektronische **fail-aware, fail-safe** und **fail-operational** Komponenten, Systeme und Architekturen für hoch- und vollautomatisches Fahren und setzen diese in neun Demonstratoren in verschiedenen Städten und Ländern Europas ein.

Abstract

The AutoDrive project brings together an innovative pan-European ecosystem consisting of 61 partners representing leading semiconductor companies, vehicle manufacturers, electronic system integrators, renowned research institutes, and small-medium size enterprises (SMEs).

Key objective is the development of advanced electronic components and systems for autonomous vehicles to provide fail-operational functions using novel architectures with increased reliability to manage and balance complexity, cost, robustness, and flexibility.

Safety and security are among biggest challenges of autonomous driving. The AutoDrive partners develop advanced fail-aware, fail-safe, and fail-operational electronic components, systems, and architectures for highly and fully automated driving, providing the implementation of safety in nine demonstrators being evaluated in different cities and countries across Europe.

1 Einleitung

AutoDrive ist ein europäisches Forschungsprojekt, das es sich zum Ziel gesetzt hat, die Akzeptanz und den Komfort der Endbenutzer beim automatisierten Fahren zu erhöhen, indem es die Fahrer in sehr schwierigen Situationen als auch in normalen Fahrsituationen unterstützt.



Abbildung 1: Das AutoDrive Konsortium

AutoDrive zielt hierbei auf die Entwicklung von **fail-aware** (fehlersicher durch Selbstdiagnose), **fail-safe** (fehlersicher durch Eigensicherheit), **fail-operational** (betriebsicher durch Hardware- und Softwareredundanz) Systemen. Die Ergebnisse von AutoDrive tragen dadurch erheblich zu sichererem und effizienterem Fahren bei und erlauben es, automatisiertes Fahren als eine bahnbrechende Technologie einzuführen. AutoDrive (<https://www.autodrive-project.eu/>) ist das Schlüsselprojekt des europäischen Leuchtturms **Mobility.E** (<https://www.mobilitye.eu/>) [1]: “In addition to technology research and innovation, it covers areas such as standardisation, the regulatory and policy context in which public-private collaboration interacts. The AutoDrive project will advance the current level of safety and reliability by considerably driving forward fail-operational technologies and by making use of safety and security concepts from the aviation domain.”

2 Forschungsanteile der OTH Amberg-Weiden

Die OTH AW war neben dem Projektpartner TTTech (<https://www.tttech.com/>) Leiter der Supply Chain „**Sichere, gesicherte und latenzarme Kommunikation**“.

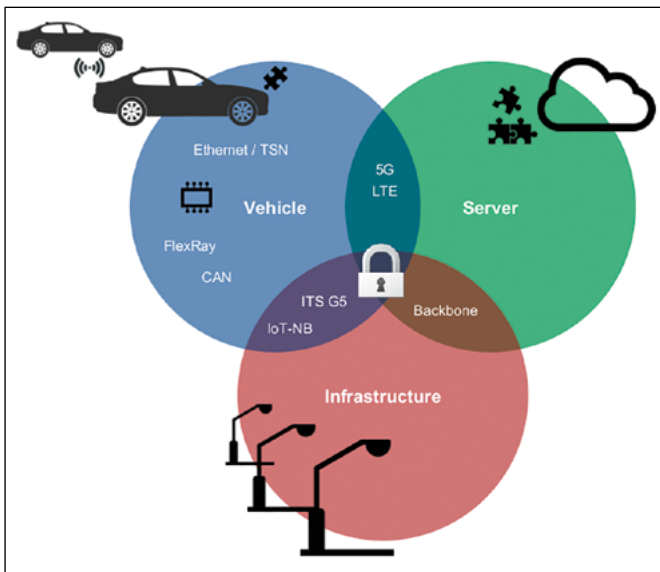


Abbildung 2: Cluster der Supply Chain 5 im Projekt AutoDrive

Der Schwerpunkt dieser Wertschöpfungskette liegt auf der Kommunikation innerhalb automatisierter Fahrzeuge und zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur. Eine sichere Kommunikation ist für kooperative Funktionalität erforderlich, ermöglicht zusätzliche Sicherheit und unterstützt einen gemeinsamen Ansatz hinsichtlich der “self-awareness” und einem fahrzeugübergreifenden Austausch von Sensordaten. Die Aufgabenbereiche der einzelnen Partner wurden, wie in Abbildung 2 dargestellt, in Clustern gesammelt, die die Aufteilung der Aktivitäten in Fahrzeuginterne und externe Bereiche zeigen.

So wird vor allem im fahrzeuginternen Bereich deterministisches Verhalten in der Kommunikation garantiert.

Dadurch wird sichergestellt, dass Nachrichten innerhalb des festgelegten Zeitrahmens ankommen und die Servicequalität aufrechterhalten wird. Ein weiterer Aspekt ist die Kommunikation zu externen Verbindungspartnern, sei es die nahegelegene Verkehrsampel, das Nachbarfahrzeug oder ein zentraler Server, für welche kabellose Schnittstellen entwickelt und eingesetzt werden. Hierbei liegt ein besonderes Augenmerk auf der Authentifizierung der Kommunikationspartner und deren Vertrauenswürdigkeit, welches u. a. durch den Einsatz von Verschlüsselungsmethoden ermöglicht wird.

2.1 Vehicle-To-Network Kommunikation

Das Automotive Team der OTH Amberg-Weiden entwickelte Algorithmen für die Vorhersage von Qualitätskriterien (engl. Quality of Service, kurz QoS) und setzte diese in ihrem Demonstrator ein, um die Zuverlässigkeit der Vehicle-To-Network Kommunikation, welche das Mobilfunknetz verwendet, zu erhöhen.

Ferner hat sich das Institut Tecnalia aus Spanien (<https://www.tecnalia.com/>) das Projektziel gesetzt, einen Reisebus vollautomatisiert auf dem Gelände des Hafens der Stadt Malaga fahren zu lassen, siehe Abbildung 3.



Abbildung 3: Automatisierter Bus im Hafen von Malaga

Der vollautomatisierte Bus wurde dafür von Tecnalia mit einem HAD-System (Highly automated driving) ausgestattet, das zusätzliche Informationen aus der Infrastruktur benötigt, z. B. Status der Ampeln oder die in der Straße verlegten Bodenwellen zur Beruhigung des Straßenverkehrs. Diese Informationen werden dem Bus über ein vom Automotive-Team der OTH Amberg-Weiden entwickeltes Kommunikationsgateway übertragen. Der Fokus der Entwicklung stand einerseits in der Implementierung dieses Webdienstes und der im Gateway verbauten Technik für die zuverlässige Datenübertragung mittels Data-Traffic-Shapings unter Einbeziehung der Algorithmen der QoS-Vorhersage. Das Data-Traffic-Shaping regelt hierbei die Warteschlangenverwaltung beim Senden der Datenpakete. So können auf Basis verschiedener Kriterien (z. B. die Nachrichtenpriorität) die

Datenpakete verzögert oder verworfen werden, welches wiederum die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems erhöht.

Architektur und Umsetzung

Im Laufe des Projekts wurden von der OTH AW Techniken des **Data-Traffic-Shapings** und der **Datenpriorisierung** unter Verwendung von geobasierten Konnektivitätsmodellen implementiert. Basierend auf sogenannten Connectivity Maps (CMs), die räumlich aggregierten QoS-Messungen aus dem bereits entwickelten TCPAnalyze-Setup [2] wiedergeben, erfolgt eine in die Zukunft gerichtete QoS-Schätzung (Prädiktionszeitraum ca. 25 Sekunden). Während Messungen physikalische Verbindungsparameter wie Empfangssignalstärke-Indikator (RSSI) und Referenzsignal-Empfangsleistung (RSRP) enthalten, konzentrieren sich die untersuchten CMs auf die Datenverbindung bzw. den Durchsatz für Downloads (TP_DL). Dabei wurden unterschiedliche Verfahren evaluiert, welche sich für die Vorhersage eignen [3, 4]. Die Messungen wurden vor Ort in Malaga, Spanien, mittels eines transportablen Systemkoffers, der in ein Fahrzeug integriert wurde, vorgenommen und innerhalb von drei Testtagen eingefahren, siehe Abbildung 4.



Abbildung 4: HW-Setup des Automotive-Teams für die Testaufnahmen in Malaga

Unter Verwendung der Informationen aus der Geschwindigkeitsschätzung, die in der Regel in HAD-Szenarien verfügbar ist, und der CM für Bandbreite über bevorstehende Routen, wird die mögliche Datennutzlast für diese Pfade berechnet. Mit der Bandbreitenvorhersage als Basis werden das Data-Traffic-Shaping und die Datenpriorisierung angewendet. Der Datenverkehr wird auf der Grundlage seiner Aktualisierungshäufigkeit (statisch, inert und dynamisch) kategorisiert, seine Anforderungshäufigkeiten werden auf der Grundlage der berechneten Bandbreite angepasst. Da die Daten außerdem mit einem kachelbasierten Ansatz übertragen werden, werden die Anfragen frühzeitig gesendet, wobei Routeninformationen genutzt werden. Dies führt zu einer insgesamt zuverlässigeren Kommunikation, mit der Möglichkeit die Daten für Punkte ohne Datenübertragungsmöglichkeit im Voraus bereitzustellen, ohne jedoch das Mobilfunknetz mit unnötigem Datenverkehr zu überlasten.

Demonstrator und Integration

Die für die Data-Traffic-Shaping-Tests verwendete Systemarchitektur, siehe Abbildung 5, zeigt die Hardware und Software im gesamten Testaufbau, der für die Systemtests im Hafen von Malaga verwendet wurde. Der Testaufbau besteht aus den folgenden Komponenten:

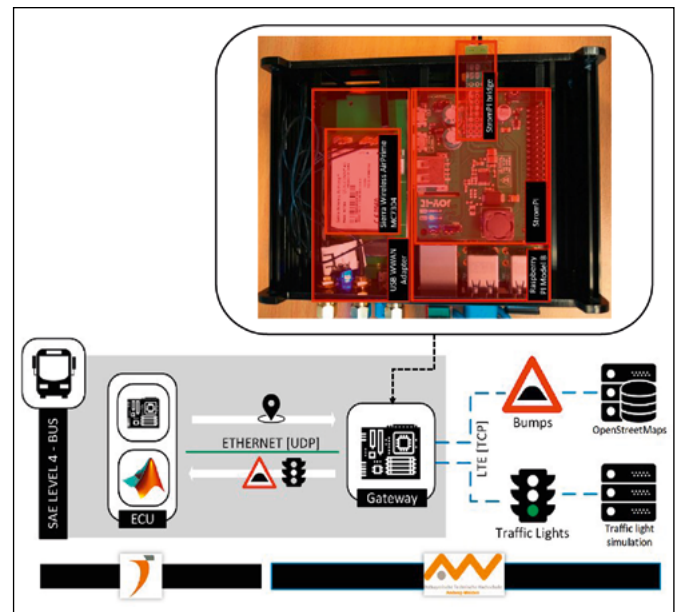


Abbildung 5: Architektur für die Kommunikation zwischen Bus – OTH AW Gateway und Server

- Server: Bereitstellung einer API auf dem von OTH AW gehosteten Server. Dieser bietet Informationen über Bodenschwellen aus einer OSM-Datenbank und eine Ampelsimulation auf der Grundlage einer bereitgestellten Route und GPS-Position.
- Gateway: Der Gateway-Dienst stellt Infrastrukturinformationen über UDP zur Verfügung. Er ist über ein Mobilfunknetz mittels einer TCP-Verbindung mit der Serveranwendung verbunden.
- Client: Client-Implementierungen (Matlab Simulink und Python) werden als Schnittstelle für den Malaga-Bus-Demonstrator und für interne Testzwecke bereitgestellt.

Traffic-Shaping-Ergebnisse

Basierend auf den entwickelten CM zur Vorhersage der QoS (Durchsatz für den Download) wurden Traffic-Shaping-Algorithmen entworfen, indem zusätzliche Warteschlangen mit unterschiedlicher Priorität hinzugefügt werden. Dies ermöglicht Traffic Shaping/Priorisierung auf Anwendungsebene. Dieser Algorithmus nutzt die Informationen der geplanten Route und schätzt die maximal verfügbare Nutzlast. Daher sind sowohl Annahmen für den Durchsatz als auch für die Dauer erforderlich. Der Durchsatz wird mithilfe der gitterbasierten Connectivity Map vorhergesagt, die das Segment auch in kachelbasierte Abschnitte unterteilt. Anschließend wird die Dauer der geplanten

Strecke durch die Open Source Routing Machine (OSRM) bestimmt. Da das OSRM-Routing in der Regel keine zusätzlichen (dynamischen) Verzögerungen integriert, die durch die Infrastruktur verursacht werden (Bodenschwellen und Fußgängerübergänge), kann diese Zeitabschätzung durch die Verwendung des in AutoDrive entwickelten Infrastruktur-Dienstes weiter verbessert werden. Schließlich werden die Durchsatz- und Zeitdauerschätzungen kachelweise multipliziert und aufsummiert, um die maximale Nutzlast für das gesamte Segment zu bestimmen.

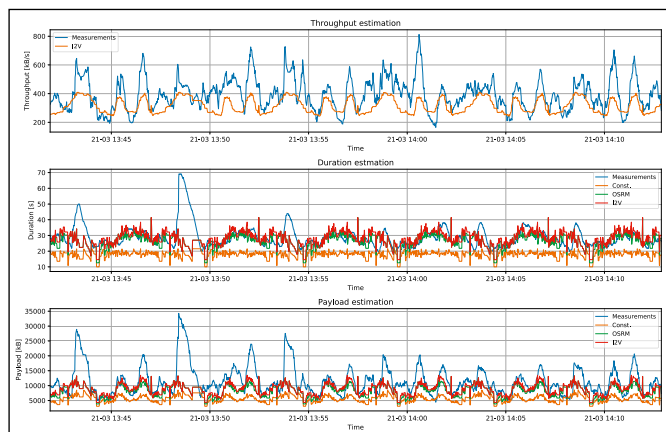


Abbildung 6: Payload-Schätzung für ein Segment

Abbildung 6 stellt die Ergebnisse der segmentbasierten Schätzung der Durchsatzrate der Nutzlast (Payload) dar. In der ersten Teilgrafik wird der gemessene Durchsatz mit dem Vorhersagemodell verglichen. Die Connectivity Map spiegelt den tatsächlichen Durchsatz in geeigneter Weise wider, ist jedoch in ihrer Leistung eingeschränkt, wenn es darum geht, den Bereich des vorhergesagten Durchsatzes zu erfüllen [mittlerer quadratischer Wurzelfehler (RMSE): 102,4 kB/s]. Dieses Problem kann in Zukunft durch die Verwendung genauerer geobasierter Modelle gelöst werden, indem über eine kachelbasierte Medianberechnung für die Vorhersage hinausgegangen wird. In der zweiten Teilgrafik werden verschiedene Strategien zur Schätzung der Dauer verglichen. Wie erwartet, ist die Annahme einer konstanten Geschwindigkeit nicht geeignet, die gemessene Dynamik der Teststrecke widerzuspiegeln. Im Gegensatz dazu ist die von OSRM berechnete Dauer eine solide Basislinie, die durch infrastrukturbezogene Informationen weiter verbessert wird. Da der Evaluationsdatensatz keine zusätzlichen Wartezeiten aufgrund von Ampelschaltzeiten umfasst, kann der Zusatznutzen für die Zeitabschätzung durch die Verwendung von I2V Nachrichten gegenüber der Abschätzung mittels OSRM in diesem Fall nicht nachgewiesen werden [RMSE: 11,9 s (konst. Geschwindigkeit), 7,9 s (OSRM), 8,3 s (I2V)]. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse auch Schwächen in der Dauerschätzung. Die gemessenen Spitzen, die vom OSRM nicht korrekt geschätzt werden, verursachen zusätzliche Wartezeiten an Fußgängerübergängen, die stark schwanken und daher schwer in diese Schätzung einzubeziehen sind. Diese Ungenauigkeit wirkt sich auch im dritten Graphen der Abbildung 6 auf die

berechnete tatsächliche maximale Nutzlast aus, aber in der restlichen Zeit ist die Nutzlastschätzung recht genau [RMSE: 8,1 MB (konst.), 6,6 MB (OSRM), 6,6 MB (I2V)].

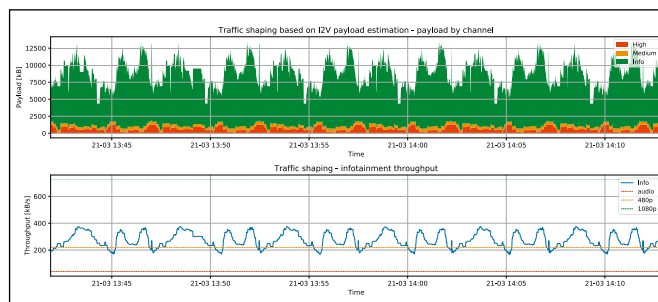


Abbildung 7: Traffic-Shaping-Ergebnisse (Infrastruktur Abfragefrequenz: 2Hz)

Ausgehend von der Schätzung der maximalen Nutzlast und den erforderlichen Downloads für die Segmente als Input, zeigt Abbildung 7 beispielhaft die Ergebnisse des Traffic Shapings. Da die Nutzlast der hoch priorisierten Nachrichten gering ist, übersteigt sie nie die verfügbare gemessene Nutzlast und es werden keine Verschlechterungen oder Fehlerzustände gemeldet. Darüber hinaus wird gezeigt, dass der Infotainmentkanal durch die Reduzierung der Frequenz der Dienstanfragen von 10Hz auf 2Hz fast immer den erforderlichen Durchsatz für das Streaming eines Videos mit 480p bietet (unter der Annahme einer erforderlichen Datenrate von 218,75 kB/s [5]).

2.2 Skalierbares verteiltes Authentifikationssystem

Autonome und hochautomatisierte Fahrzeuge verwenden zahlreiche funkbasierte Kommunikationstechnologien, um mit anderen Fahrzeugen oder Objekten zu kommunizieren. Die Fahrzeuge können dabei Vehicular Ad-hoc Networks (VANETs) selbstständig aufspannen, um miteinander Informationen auszutauschen und zu interagieren. Durch eine Verbindung zum Internet werden diese VANETs zum Internet of Vehicles (IoV) als ein Teil des Internet of Things (IoT). VANETs und das IoV dienen vor allem der Safety (funktionale Sicherheit), z. B. Warn- und Informationsnachrichten und dem Komfort, wie z. B. Infotainment und elektronische Bezahlssysteme. Die Kommunikationstechnologien und die bereitgestellten Funktionalitäten müssen jedoch entsprechend abgesichert werden, um die Security (Sicherheit vor Angriffen) der autonomen Fahrzeuge zu gewährleisten. Einen Überblick zum Thema Security beim autonomen Fahren ist in [6] zu finden.

Der Beitrag der OTH AW im Projekt AutoDrive im Bereich Security bestand in der Entwicklung eines skalierbaren verteilten Authentifikationssystems für autonome Fahrzeuge. Unter autonomen Fahrzeugen werden hier die SAE-Level 4 und 5 verstanden. D. h. die Fahrzeuge können die Fahraufgabe ohne Eingriff und Überwachung durch einen Menschen ausführen und verfügen bei Problemen

über einen Fallback-Mechanismus (vgl. [7]). Die Hauptaufgabe eines Authentifikationssystems besteht in Verifizierung der Identität des Kommunikationspartners, wodurch sichere Kommunikationskanäle zwischen den Kommunikationspartnern aufgebaut werden können. Eine typische Lösung in offenen Netzen, wie den VANETs und dem IoV, stellen Public-Key-Infrastrukturen (PKI) dar, welche es den Kommunikationspartner ermöglichen, Public-Key-Kryptographie zu verwenden. Dabei werden die öffentlichen Schlüssel durch digitale Zertifikate mit den Identitäten verknüpft. Die Vertrauenswürdigkeit dieser Verknüpfungen basiert dabei auf dem Vertrauensmodell bzw. Authentifikationsmetrik und den Vertrauensbeziehungen zu den Stellen, die die Zertifikate ausstellen. In hierarchischen PKIs haben nur die Zertifizierungsstellen das Recht anderen Teilnehmern – dazu zählen auch andere Zertifizierungsstellen – Zertifikate ausstellen und diese gegebenenfalls zu widerrufen, wodurch Zertifikathierarchien entstehen. Die hierarchischen PKI sind in den Zertifizierungsstellen zentralisiert und sind daher ein attraktives Angriffsziel. Peer-to-Peer-PKI stellen zu den hierarchischen PKI Alternativen dar. In Peer-to-Peer-PKI darf jeder Teilnehmer anderen Teilnehmer Zertifikate ausstellen und die selbst ausgestellten Zertifikate widerrufen. Die Vertrauenswürdigkeit von Verknüpfungen hängt davon ab, ob es vertrauenswürdige Bekannte gibt, die zwischen zwei Teilnehmern vermitteln. Daher haben Peer-to-Peer PKI ein schlechteres Skalierungsverhalten bei vielen Teilnehmern.

Die OTH AW hat einen Ansatz für ein Blockchain-basierte PKI für autonome Fahrzeuge entwickelt, der es ermöglicht, verschiedene Vertrauensmodelle zu verwenden und somit den Grad der Zentralität zu steuern. Die Details dazu können in [8] gefunden werden. In diesem Bericht wird nur ein grober Überblick gegeben.

Die Grundidee des Ansatzes besteht darin, die öffentlichen Schlüssel für die Public-Key-Kryptographie, gemeinsam mit Identifikationsinformationen, die von den autonomen Fahrzeugen zuverlässig detektiert werden können, in einer speziellen Blockchain zu speichern. Dadurch stehen allen Teilnehmern diese Informationen zur Verfügung. Besondere Transaktionen auf der Blockchain ermöglichen es, Vertrauensbeziehung zwischen den Teilnehmern herzustellen. Je nach Wahl des Vertrauensmodells und dem Design des Blockchainsystems verfügt das Authentifikationssystem über einen unterschiedlichen Grad an Zentralität.

Für ein Proof-of-Concept-System wurde eine Bitcoin-ähnliche Blockchain gewählt, d. h. ein Blockchainsystem mit einem Proof-of-Work-Konsensprotokoll ohne Zugangsbeschränkungen, da dieses ein offenes, dezentrales System darstellt und dessen Eigenschaften gut erforscht sind. Die Blockchain wurde um eine Zahl an Transaktionen erweitert, wodurch öffentliche Schlüssel, öffentliche Informationen und Vertrauensbeziehungen in der Blockchain

gespeichert werden können. Ein hierarchisches Vertrauensmodell wurde gewählt, da dieses besser skaliert und somit für das IoV geeigneter ist. In diesem Proof-of-Concept-System werden in der Blockchain nur generische Informationen gespeichert. Als Authentifizierungsprotokoll werden bekannte Protokolle aus dem Bereich der Public-Key-Kryptographie adaptiert. Dabei werden die Protokollregeln, in denen die Zertifikate überprüft werden, durch solche ersetzt, die die Vertrauensbeziehungen in der Blockchain überprüfen.

Zur Demonstration des Systems wurde ein Netzwerk aus drei Raspberry Pi Computern aufgebaut (vgl. Abbildung 8), die jeweils die entwickelte Software verwenden und über WLAN miteinander verbunden sind. Die Computer repräsentieren dabei die verschiedenen Kommunikationsteilnehmer im IoV (Fahrzeuge, intelligente Verkehrszeichen usw.). Der Demonstrator bietet verschiedenen Authentifikationsszenarien an. Der Authentifikationsprozess wird dabei visualisiert und kann dadurch besser nachvollzogen werden.



Abbildung 8: Schematische Darstellung des Demonstrators (links), Screenshot des Userinterfaces (oben rechts) und Foto des Aufbaus (unten rechts).

3 Fazit und Ausblick

Das Projekt AutoDrive setzte mit seinen Ansätzen ein wichtiges europäisches Zeichen für die Definition und Umsetzung von Sicherheitskonzepten im Bereich des autonomen Fahrens, welche in den kommenden Jahren von den Projektpartnern zunehmend in deren Produkten verwertet werden sollen.

Auch seitens der Forschung wird an den Ergebnissen weiter angeknüpft werden – darunter auch die Forschungsgruppen der OTH AW, welche in den europäischen Folgeprojekten Prystine und ADACORSA derzeit zum einen die Vorhersagemodelle auf Basis von Verfahren aus dem Bereich des maschinellen Lernens weiterentwickeln und zum anderen die verteilte Authentifizierungsmechanismen um komplexe Trust-Management-Aspekte erweitern werden. Dadurch soll das Ziel einer zuverlässigen und sicheren Fahrzeugkommunikation weiter vorangetrieben werden.

Referenzen

- [1] Rainer John, “Illuminating the road to electric, connected and automated cars”, Artemis Magazine 23, 2017
- [2] Josef Schmid, Philipp Heß, Alfred Höß und Björn W. Schuller: “Passive monitoring and geo-based prediction of mobile network vehicle-to-server communication”, 14th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC), 2018
- [3] Philipp Heß: “Network quality of service prediction for a mobile-based vehicle-to-server communication for automated driving”, Masterarbeit, 2018
- [4] Mathias Schneider: “Online and Microservice-based Data Throughput Prediction Framework in Context of Mobile-based Vehicle-to-server Communication for Automated Driving”, Masterarbeit, 2018
- [5] Cameron Summerson: “How Much Data Does Netflix Use?”, How-To Geek – online: <https://www.howtogeek.com/338983/how-much-data-does-netflix-use>, 2018
- [6] Jäger, Nicholas und Andreas Aßmuth: „Sicherheitsprobleme und -herausforderungen beim autonomen Fahren“, Forschungsbericht 2019, Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, 2019 S. 47 – 54.
- [7] On-Road Automated Driving (ORAD) committee: “Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles”, 2018.
- [8] Jäger, Nicholas und Andreas Aßmuth: “A Framework for a Blockchain-based Public Key Infrastructure for Autonomous Vehicles”, im Publikationsprozess.

Acknowledgement:

AutoDrive has received funding within the Electronic Components and Systems for European Leadership Joint Undertaking (ECSEL JU) in collaboration with the European Union's H2020 Framework Programme (H2020/2014-2020) and National Authorities, under grant agreement n° 737469.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert das Projekt unter dem deutschen Titel „Hochzuverlässige Elektroniksysteme und Architekturen für das autonome und elektrische Fahren – AutoDrive“ mit dem Teilvorhaben an der OTH Amberg-Weiden „Sicheres skalierbares Authentifizierungssystem und effiziente Formung der Fahrzeugkommunikation“ unter der Fördernummer 16ESE0255.



GEFÖRDERT VOM

Kontakt:



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



Mathias Schneider, M.Eng.

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

mat.schneider@oth-aw.de



Nicholas Jäger, M.Sc.

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

n.jaeger@oth-aw.de



Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

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

a.hoess@oth-aw.de



Prof. Dr. Andreas Aßmuth

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

a.assmuth@oth-aw.de

DER

VOLLTREFFER

FÜR DEINE

KARRIERE



**Erkundungstag
Praktikum
Abschlussarbeit
Direkteinstieg**

Jetzt online bewerben unter



www.witron-karriere.de

AUTBUS – Entwicklung eines autonomen Kleinbusses für den ländlichen Raum

Zusammenfassung

Ländlich geprägte Gebiete bringen Herausforderungen bezüglich der Mobilität ihrer Bewohner und der Organisation eines öffentlichen Nahverkehrs mit sich. Viele alltägliche Aktivitäten, wie Arbeiten, Einkaufen oder ein Arztbesuch, erfordern das regelmäßige zurücklegen weiter Strecken. Um eine sowohl bedarfsgerechte als auch wirtschaftliche Versorgung der ländlichen Bevölkerung mit Mobilitätsangeboten zu bieten, ist ein Ansatz die Einführung eines autonomen Kleinbusses, der von den Nutzern flexibel angefordert werden kann. Als Schritt in diese Richtung soll im Rahmen des Projektes AUTBUS ein Demonstrator entwickelt werden, der auf einem Serienfahrzeug basiert. Dieser Kleinbus soll eine Strecke im Rodinger Ortsteil Neubäu bedienen, wobei im Testbetrieb einige Einschränkungen gelten. Die gesamte Zeit wird ein Fahrer zur Sicherheit im Bus sitzen, um im Notfall eingreifen zu können. Außerdem wird nur eine festgelegte Strecke befahren und im Rahmen des Projektes wird der Dienst von vorher eingewiesenen Fahrgästen getestet. Das Projekt wird in Kooperation mit den Rodinger Verkehrsbetrieben und der Firma AVL Deutschland GmbH durchgeführt.

Abstract

Rural areas present challenges to their inhabitant's mobility and to providing public transport. Many everyday activities, such as working, shopping and consultation of a doctor, require travelling long distances frequently. To provide needs-based and economical mobility opportunities one approach is the introduction of on-demand autonomously driving buses. The project AUTBUS is meant to be a step towards the realization of this vision with a demonstration in the district Neubäu of Roding using a modified standard car. There will be some limitations during the test operation. A safety driver will be present in the vehicle in order to take action in case of an emergency. Also, the route will be fixed, and the test users of the bus will be introduced before using the system. The project is a cooperation with Rodinger Verkehrsbetriebe and AVL Deutschland GmbH.

Projektbeschreibung

Da für die alltäglichen Erledigungen oft längere Strecken zurückgelegt werden müssen, ist der ländliche Raum für Menschen ohne die Möglichkeit selbst ein Fahrzeug zu führen als Wohnort derzeit eher unattraktiv. Auf der anderen Seite ist bedingt durch die im Vergleich zu urbanen Gegenden geringere Bevölkerungsdichte der Betrieb von öffentlichem Nahverkehr mit einer hohen Taktfrequenz nicht wirtschaftlich durchzuführen. Deshalb soll im Rahmen des Projekts AUTBUS die Machbarkeit

eines autonom operierenden Rufbusdienstes mit kostengünstigen Methoden untersucht werden. Die Ergebnisse können dann in denkbaren Folgeprojekten genutzt werden um mit einer großflächigen Abdeckung ländlich geprägter Regionen mit selbstfahrenden Bussen, diese auch für Einwohner ohne eigenes Fahrzeug interessanter zu machen.

AUTBUS ist eines von sechs Teilprojekten, die alle von den Verkehrsbetrieben Roding, AVL und einer Vielzahl an Universitäten und Hochschulen durchgeführt werden.

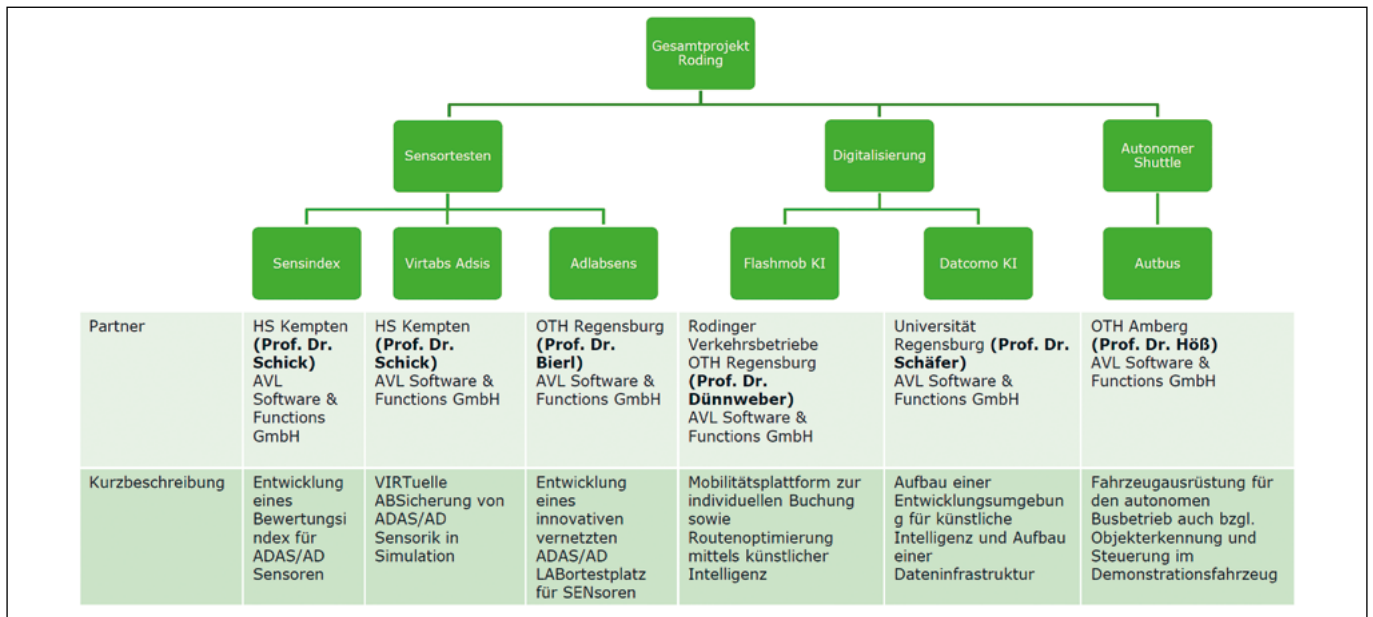


Abbildung 1: Einbettung des Projekts AUTOBUS in das Gesamtprojekt

Diese sind wie in Abbildung 1 dargestellt strukturiert. Dabei ist eine Nutzung der Synergieeffekte zwischen den einzelnen Projekten anvisiert. Die drei Projekte "Sensindex", "Virtab Adsis" und "Adlabsens" werden hierbei gemeinsam das Ziel einer Sensorvalidierung verfolgen. Die Aufgabe der Gruppe Datcomo besteht daraus das Backend für die geplante mobile App zu entwickeln und das Flashmob-Team wird das dazugehörige Frontend bereitstellen. Die Arbeitsgruppe AUTOBUS - zusammengesetzt aus einem Team bei AVL und einem Teil des Automotiven Teams der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden – soll einen serienmäßig gefertigten Kleinbus so modifizieren, dass er als Demonstrator über eine festgelegte Teststrecke autonom fahren kann.

Dabei wird im Verlauf des Testbetriebes eine „Bedingte Automatisierung“ der Stufe 3 laut SAE J3016 angestrebt [1]. Diese Klassifizierung sieht vor, dass das Fahrzeug die Quer-, Längsführung und Umgebungsbeobachtung automatisiert durchführt und der Fahrer als Rückfallebene dient. Der speziell ausgebildete Sicherheitsfahrer soll bei etwaigen Fehlern des Systems eingreifen können.

Strecke

Die vorgesehene Teststrecke, welche in Abbildung 2 zu erkennen ist, befindet sich im Ortsteil Neubäu am See der Stadt Roding und soll den örtlichen Bahnhof mit dem touristisch interessanten Bereich um den Campingplatz herum verbinden. Außerdem ist ein Zwischenhalt bei einem Gasthof denkbar.

Dabei ist aktuell geplant, dass der Bus an den Haltestellen wenden soll. Hierzu kommt entweder Wenden in drei Zügen oder einfaches Umkehren in Frage, ersteres wird mehr Aufwand bezüglich Sensorik und Aktorik mit sich bringen, während der zweite Ansatz mehr Platz benötigt,

was die Route einschränken kann. Die Route enthält unter anderem einen Abschnitt außerorts mit Tempolimit 80 Kilometer pro Stunde. Hierbei sind zwei Aspekte im Hinblick auf die Sicherheit zu bedenken: zum einen könnte ein langsames Fahrzeug andere Verkehrsteilnehmer zu riskanten Überholmanövern verleiten und zum anderen ist die maximale Geschwindigkeit des Fahrzeugs durch die Sensorreichweite und Reaktionsgeschwindigkeit bzw. den Fahrkomfort der Fahrgäste limitiert. Auf der Strecke sind insgesamt drei Kreuzungen vorhanden, wobei aktuell an keiner eine Ampelanlage installiert ist. Außerdem muss in mindestens einem Fall links auf eine Vorfahrtsstraße abgebogen werden.

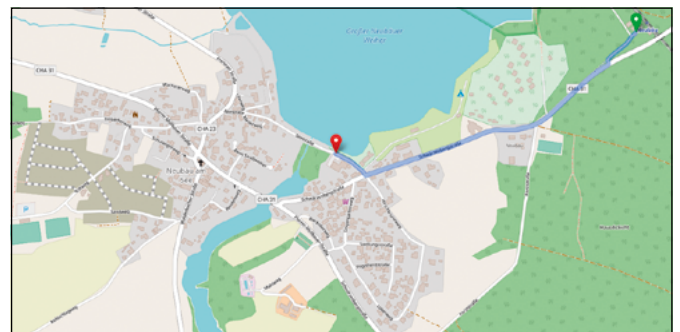


Abbildung 2: Teststrecke des Projekts AUTOBUS, dargestellt auf einer Karte von OpenStreetMaps [2]

Fahrzeug

Als Demonstrator soll ein Serienfahrzeug in der Klasse der Kleinbusse verwendet werden. Die für ein autonomes Fahren notwendigen zusätzlichen Komponenten sind Sensorik, Aktorik, Informationsverarbeitungssysteme sowie Kommunikationsmodule. Zunächst soll überprüft werden, ob die in der von AVL entwickelte Roof-Top-Box (siehe Abbildung 3) verbauten Sensoren ausreichend sind, um mit den dann verfügbaren Daten den vorgesehenen Automati-

sierungsgrad zu erreichen. Aktuell handelt es sich hierbei um drei LiDAR-Sensoren sowie vier Kameras. Außerdem ist geplant, die bereits im Fahrzeug verbaute Sensorik ebenfalls auszulesen und die dadurch gewonnenen Informationen für die Verarbeitung mit zu nutzen. Ziel ist es, nach dem Projekt unkompliziert und schnell Serienfahrzeuge mit dem zusätzlichen Equipment auszustatten, um diese dadurch für das autonome Fahren verwenden zu können.

Um die durch die Sensorik aufgenommenen Daten zu verarbeiten und auszuwerten sowie um die vorhandene Aktorik des Kleinbusses anzusteuern, wird zusätzlich ein Rechner im Fahrzeug verbaut werden. Ebenfalls soll dieser Rechner die Informationsverarbeitung der Daten aus der Kommunikation mit Infrastruktur und dem Server übernehmen. Um diese Daten senden und empfangen zu können müssen geeignete Kommunikationsmodule für den Bus ausgewählt werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Kommunikation mit dem Server, der die Buchungen koordinieren soll, über das Mobilfunknetz bewerkstelligt werden soll. Für den Austausch mit der Infrastruktur ist die bevorzugte Technologie noch in Klärung.

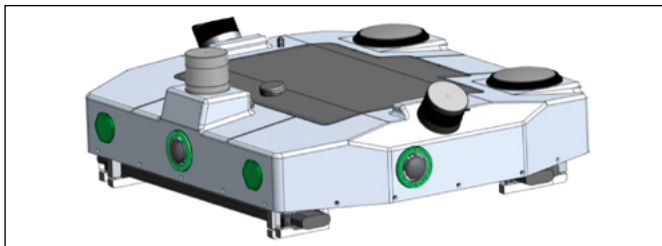


Abbildung 3: Abbildung der Sensorbox für das Demonstrationsfahrzeug

Infrastruktur

In bestimmten Verkehrssituationen kann es vorkommen, dass die Sensorik des autonomen Fahrzeugs nicht ausreichend Informationen liefern kann, da die Fahrstecke nur schlecht einsehbar ist. Um mit diesem Umstand umzugehen, könnte an diesen Stellen eine deutlich reduzierte Geschwindigkeit vorgegeben werden, damit trotzdem passend reagiert werden kann. Als Alternative bietet sich die Unterstützung des Busses durch geeignete Infrastruktur an, dies beinhaltet eine Vielzahl an möglichen Anpassungen im Verkehrsraum. Im Rahmen des Projekts werden diese technologieneutral ohne vorher getroffene Einschränkungen analysiert. Anschließend wird bewertet, welche in der jeweiligen Situation am sinnvollsten eingesetzt werden könnten. Beispielsweise verfügen große Teile der Teststrecke nicht über durchgängige Fahrbahnmarkierungen, welche zur leichteren Orientierung angebracht werden könnten. Innerorts wäre es außerdem denkbar, besonders herausfordernde Kreuzungen mit Ampeln auszustatten, um dem Testfahrzeug die Überquerung zu erleichtern. Hierbei ist zu beachten, dass die Schaltung der Ampeln dauerhaft oder nur bei Annäherung durch den Bus erfolgen könnte. Bei permanent betriebenen Ampeln

müsste beispielsweise mittels Induktionsschleifen in der Fahrbahn eine Aktivierung durch andere Verkehrsteilnehmer ermöglicht werden. Rein theoretisch wäre auch eine temporäre Abschränkung bestimmter Streckenabschnitte denkbar. Des Weiteren ist die Anbringung von Infrastruktursensoren an schwer einsehbaren Stellen eine Möglichkeit, das Fahrzeug zu unterstützen. So kann mithilfe der zusätzlichen Daten quasi „um die Ecke gesehen“ und das Fahrverhalten entsprechend flüssiger beibehalten werden, als es bei einem langsamen Herantasten an die unübersichtliche Stelle der Fall wäre. Als Sensorik werden an dieser Stelle Lichtschranken, Kamera-, RADAR- und LiDAR-Systeme in Betracht gezogen.

V2N

V2N ist eine Abkürzung für „vehicle to network“ und beschreibt die Kommunikation des Fahrzeugs mit dem Internet bzw. einem Server. Im Fall des Projektes AUTBUS sollen über den Server die Anforderung des Busses übertragen werden, sodass dieser aktiv wird und losfährt, um die anfragenden Fahrgäste abzuholen. Hierbei sind die Schnittstellen zum Buchungssystem zu klären und es ist zu bestimmen, welche Daten übertragen werden müssen. Dieser Aspekt ist essentiell für das weitere Vorgehen, da bei einer ausschließlichen Übertragung der anzufahrenden Punkte das Finden einer geeigneten Route im Fahrzeug stattfinden müsste. Zusätzlich stellt sich die Frage, welche Informationen vom Bus zum Server übermittelt werden sollen. Hierbei wäre es denkbar Statusdaten, wie beispielsweise Position, Geschwindigkeit oder mögliche während der Fahrt auftretende Verzögerungen, an den Server zu senden und von diesem weiter zu verarbeiten. Als Kommunikationstechnologie wird das Mobilfunknetz favorisiert. Dabei ist aktuell LTE im Fokus, da die entsprechende Hardware in verschiedenen Ausprägungen bereits günstig zur Verfügung steht und keine zusätzliche Netzinfrastruktur benötigt wird. Hierfür werden zunächst Messungen auf der Teststrecke durchgeführt, welche die Netzabdeckung in diesem Gebiet untersuchen sollen. Auf Basis dieser kann dann die Auswertung und Einschätzung erfolgen, ob die Abdeckung ausreichend für die erforderliche Kommunikation ist oder ob Verbesserungen sowie Alternativlösungen gefunden werden müssen. Für einen Ausblick in die nahe Zukunft werden aber auch die Vorteile einer Übertragung mittels 5G betrachtet.

V2I

Diese Abkürzung steht für „vehicle to infrastructure“ und meint eine Übertragung von Daten zwischen Fahrzeug und in der Infrastruktur verbauten Sensoren und gegebenenfalls zugehörigen Informationsverarbeitungssystemen. Da die Auswahl der zu verwendenden Sensoren noch nicht getroffen wurde, ist auch die benötigte Datenrate für die Kommunikation schwer abzuschätzen. Sollten beispielsweise Lichtschranken verwendet werden,

beschränken sich die Informationen auf ein Binärsignal und die Identifikation des Sensors. Ein wenig mehr Daten würde eine Ampelanlage mit dem Fahrzeug austauschen, da der gesamte Zustand der Kreuzung und eventuell die Entfernung und Geschwindigkeit des Busses übertragen werden müssten. Die höchsten Anforderungen an die Verbindung stellen dabei Kamera- oder LiDAR-Systeme, da diese je nach Auflösung und Bildfrequenz enorme Datenmengen generieren können. Beim letzten Punkt ist außerdem zu beachten, dass noch nicht geklärt ist, wo die Datenverarbeitung stattfinden wird.

Kann zum Beispiel ein LiDAR-Sensor bereits eine Objekterkennung vornehmen, reduziert sich die Größe der notwendigen Nachrichten immens im Vergleich zur Übertragung der gesamten Punktwolke. Ein an dieser Stelle wichtiger Aspekt, der noch weiterer Untersuchung bedarf, ist die Zulassung der Erkennungsalgorithmen für den Straßenverkehr.

Abgrenzung

Bad Birnbach autonomer Bus

Bereits im Jahr 2017 wurde in Bad Birnbach ein Probebetrieb eines autonomen Busses gestartet [3]. Das Szenario besitzt einige Überschneidungen mit dem im Rahmen von AUTBUS betrachteten. Die Strecke verbindet den etwas außerhalb liegenden Bahnhof mit der touristisch interessanten Rottal Terme und bietet zusätzlich die Möglichkeit weiter zum Ortskern zu fahren. Es gibt sowohl Bereiche der Route, die sich innerorts befinden als auch außerorts gelegene. Außerdem wird für die gesamte Testphase ebenfalls ein Sicherheitsfahrer eingeplant. Ungeachtet der Gemeinsamkeiten gibt es auch nennenswerte Abweichungen zwischen den Projekten. Der offensichtlichste Unterschied liegt in den speziell entwickelten und gefertigten Fahrzeugen, die in Bad Birnbach zum Einsatz kommen. Dieser Ansatz wurde bei AUTBUS im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit von vornherein ausgeschlossen. Eine weitere Einschränkung des Fahrzeugs in Bad Birnbach, die in AUTBUS überwunden werden soll, ist der zugrundeliegende feste Fahrplan für die Linie, hier soll die bereits erwähnte durch das Projekt Flashmob-KI zu

entwickelnde App für mehr Flexibilität sorgen. Als letztes Unterscheidungsmerkmal sei an dieser Stelle noch die Höchstgeschwindigkeit erwähnt. Diese beträgt beim Bad Birnbacher Bus 15 Kilometer pro Stunde [4], was auf dem Streckenabschnitt auf der Landstraße auf jeden Fall erheblich zu gering wäre. Eine konkrete maximale Geschwindigkeit wurde für AUTBUS bisher nicht festgelegt, dennoch ist zu erwarten, dass sie deutlich höher ausfällt.

Stauassistenten

Ebenfalls bieten bereits einige Automobilhersteller mit dem von ihnen verbauten Stauassistenten ein Fahrerassistenzsystem, bei welchem das Fahrzeug sich bedingt automatisiert bewegt. Anders als bei AUTBUS findet diese ihre Verwendung auf der Autobahn bei zähfließendem Verkehr oder Stau. Sie halten die Spur und regeln den Abstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen, dadurch soll der Fahrer bezüglich monotoner Beschleunigungs- und Abbremszyklen entlastet werden. Für den Stauassistenten sind allerdings zwingend gut ausgebaute Straßen mit deutlich erkennbaren Fahrbahnmarkierungen erforderlich sowie ein vorausfahrendes Fahrzeug, zu welchem der Abstand gehalten wird. Diese, für das Fahrerassistenzsystem notwendigen, Bedingungen werden von der Teststrecke für AUTBUS nicht erfüllt, wodurch andere Lösungen hierfür gefunden werden müssen. Aktuell werden die meisten Stauassistenten nur bis zu einer maximalen Geschwindigkeit von 60 Kilometern pro Stunde eingesetzt, diese liegt näher im Bereich des Angestrebten als die des Bad Birnbacher Busses.

Aufgabenverteilung

Die Arbeiten der OTH Amberg-Weiden betrifft hauptsächlich den Bereich der Kommunikation zwischen Fahrzeug und Server sowie Fahrzeug und Infrastruktur. Ebenfalls ist die OTH Amberg-Weiden verantwortlich für die Konzepte und Lösungen bezüglich zusätzlicher, das autonome Fahrzeug unterstützender Infrastruktur. Von AVL Deutschland GmbH wird dagegen der Bus mit der notwendigen Sensorik und Aktorik ausgestattet und die fahrzeuginterne Datenverarbeitung realisiert. Auch soll im späten Verlauf des Projektes die hardwaretechnische Umsetzung der zusätzlichen Infrastruktur durch AVL Deutschland GmbH erfolgen.

Referenzen:

- [1] Driving, A. (2014). Levels of driving automation are defined in new SAE international standard J3016. Warrendale, PA, USA: SAE International.
- [2] OpenStreetMap, M. (2. 10 2020). OpenStreetMap. Von OpenStreetMap: <https://www.openstreetmap.org/> abgerufen
- [3] Brandt, J., Böker, B., Bullinger, A., Conrads, M., Duisberg, A., & Stahl-Rolf, S. (25. 10 2017). Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Von <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/A/autonomer-bus-bad-birnbach.pdf> abgerufen
- [4] Riener, A., Appel, A., Dorner, W., Huber, T., & Kolb, J. (2020). Autonome Shuttlebusse im ÖPNV. Springer Vieweg.

Fördergeber:

Das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie fördert das Projekt im Rahmen des Bayerischen Verbundforschungsprogramms (BayVFP), Förderline Digitalisierung, unter dem deutschen Titel „AUTBUS – Entwicklung eines autonomen Kleinbusses für den ländlichen Raum“ unter der Fördernummer DIK-2006-0016// DIK0233/02.

Gefördert durch



**Bayerisches Staatsministerium für
Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie**

Kontakt:



Fabian Zeitler, B.Eng.

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

f.zeitler@oth-aw.de



Roman Babl, B.Eng.

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

r.babl@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,
wissenschaftlicher Nachwuchs
Kaiser-Wilhelm-Ring 23
92224 Amberg

a.hoess@oth-aw.de

KI-Prozessorarchitekturen für Radarmodule im autonomen Fahrzeug

Daniel Scharf, M.Sc.
Seifeddine Saadani, M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß
Heike Lepke, M.Eng.

KI-ASIC

Zusammenfassung

Die kontinuierliche Verbesserung der Rechenleistung in den vergangenen Jahren und Jahrzehnten verhilft der Künstlichen Intelligenz (KI) zum Durchbruch, nicht zuletzt bei der Entwicklung automatisierter Fahrzeuge. Hierbei werden KI-Algorithmen u. a. dazu eingesetzt, Muster oder Merkmale aus einer großen Menge an Sensordaten zu extrahieren, die für die Bewältigung der Fahraufgabe genutzt werden. Im Rahmen des Forschungsprojektes „Künstliche Intelligenz – Application-Specific Integrated Circuit“ (KI-ASIC) sollen weitere Schritte unternommen werden, leistungsfähigere und zugleich energieeffizientere Methoden der Sensordatenverarbeitung mithilfe gepulster neuronaler Netze für das Automatisierte Fahren zu entwickeln.

Gefördert wird das Projekt von den involvierten nationalen Förderern in Deutschland, dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sowie dem Verein Deutscher Ingenieure (VDI) im Rahmen der Richtlinie zur Förderung von Forschungsinitiativen auf dem Gebiet der „KI-basierten Elektroniklösungen für sicheres autonomes Fahren (KI-Element: autonomes Fahren)“.

Die Automotive-Forschungsgruppe der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden (OTH AW) forscht in diesem Projekt über einen Zeitraum von drei Jahren zusammen mit den deutschen Projektpartnern an der Entwicklung neuromorpher Mikroprozessoren, deren Signalflusskette dem menschlichen Gehirn nachempfunden sind und eine Steigerung der Rechenleistung bei gleichzeitiger Reduktion der Leistungsaufnahme ermöglichen sollen. Die Forschungsergebnisse sollen anhand definierter Fahrscenarien mithilfe eines Versuchsträgers im Realverkehr getestet werden.

Abstract

The continuous improvement of computing power in recent years and decades is helping Artificial Intelligence (AI) to achieve a breakthrough, not least in the development of automated vehicles. AI algorithms are used, among other things, to extract patterns or features from a large amount of sensor data that are used to perform the driving task. Within the research project “Artificial Intelligence – Application-Specific Integrated Circuit” (KI-ASIC) further steps are taken to develop more powerful and at the same time more energy-efficient methods of sensor data processing using pulsed neural networks for automated driving.

The project is funded by the involved national funding agencies in Germany, the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) and the Association of German Engineers (VDI) within the framework of the guideline for funding research initiatives in the field of “AI-based electronic solutions for safe autonomous driving (AI element: autonomous driving)”.

In this project, the Automotive Research Group of the Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden (OTH AW) is conducting research over a period of three years together with the German project partners on the development of neuromorphic microprocessors, whose signal flow chain is modelled on the human brain and should enable an increase in computing power while simultaneously reducing power consumption. The research results are to be tested in real traffic on the basis of defined driving scenarios using an experimental vehicle.

1 Einleitung

Hinter dem Begriff der Künstlichen Intelligenz (KI) steckt eine weit zurückreichende Entwicklungsgeschichte. Bereits 1956 waren führende Wissenschaftler der Meinung, dass Intelligenz auch außerhalb des menschlichen Gehirns geschaffen werden könne. In den darauffolgenden Jahren konnten Fortschritte auf dem Gebiet der Künstlichen Neuronalen Netze erzielt werden, jedoch waren die Möglichkeiten aufgrund der begrenzten Rechenleistung der damaligen Computer begrenzt. Erst mit leistungsfähigeren Rechnern und dem Beginn des Zeitalters des Maschinellen Lernens im Jahr 2010, bei dem gezielt Algorithmen für bestimmte, abgegrenzte Problemstellungen entwickelt werden, gelang der Durchbruch im Bereich der KI-Forschung. Auch in der Industrie findet KI immer mehr Einzug – so auch bei der Entwicklung automatisierter Fahrzeuge. Hierbei wird der Bereich um das Fahrzeug mit verschiedenen Sensoren erfasst und die große Menge an Sensordaten mithilfe KI-Algorithmen ausgewertet [1].

Die Zahl benötigter Umfelderkennungssensoren wird in automatisierten Fahrzeugen ab Autonomiestufe 3 deutlich ansteigen [2]. Mit den bislang üblichen Verfahrensweisen zur Übertragung und Verarbeitung der aufgezeichneten Sensordaten würde dies zwangsläufig zu einer erhöhten Leistungsaufnahme bei den nachgeschalteten elektronischen Komponenten führen. Erste Schätzungen lassen einen zusätzlichen Leistungsbedarf von mehreren Kilowatt erwarten, was bei Elektrofahrzeugen im Extremfall zu einer Reichweitenreduzierung von bis zu einem Viertel führen würde [3].

Dementsprechend ist auch längerfristig nicht zu erwarten, dass dieser potenzielle Mehrbedarf allein durch die Entwicklung energieeffizienterer Halbleitertechnologie ausreichend gedeckt werden kann. Das Mooresche Gesetz [4] jedenfalls verspricht bei klassischen Prozessoren, die auf der auf der Von-Neumann-Architektur basieren, einen steigenden Energiebedarf. Dieser Zielkonflikt lässt sich jedoch vermeiden: Durch Innovationen bei der Architektur der datenverarbeitenden Komponenten, Module und Systeme im Fahrzeug. Dadurch sind Einsparungen bis zu einem Faktor von 500 möglich.

Dies zu zeigen, ist Gegenstand des Forschungsprojektes „*Künstliche Intelligenz – Application-Specific Integrated Circuit*“ (KI-ASIC), das durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und den Verein Deutscher Ingenieure (VDI) unter dem Schirm der Richtlinie zur Förderung von Forschungsinitiativen auf dem Gebiet der „KI-basierten Elektroniklösungen für sicheres autonomes Fahren (KI-Element: autonomes Fahren)“ in einem Zeitraum von drei Jahren (2019-2022) mit einem Gesamtbudget von etwa 7 Millionen Euro gefördert wird [5].

2 Projektübersicht

Unter der Leitung von Infineon Technologies AG München arbeitet die OTH Amberg-Weiden gemeinsam mit den Projektpartnern Infineon Technologies Dresden GmbH, BMW AG München, TU Dresden und TU München (Abbildung 1) an der Erforschung, Implementierung und Evaluierung von neuromorphen Prozessoren (ASICs), die eine Steigerung der Rechenleistung bei gleichzeitiger Reduktion der Leistungsaufnahme ermöglichen, einschließlich der gesamten dem menschlichen Gehirn nachempfundenen Signalflusskette für gepulste neuronale Netze, sog. „*Spiking Neural Networks*“ (SNNs). Diese Signalflusskette beinhaltet die Entwicklung von fehlererkennenden, ausfallsicheren und fehlertoleranten elektrischen und elektronischen Komponenten, Architekturen sowie der zugehörigen integrierten Software, um hoch- und vollautomatisiertes Fahren auf öffentlichen Straßen zu ermöglichen.

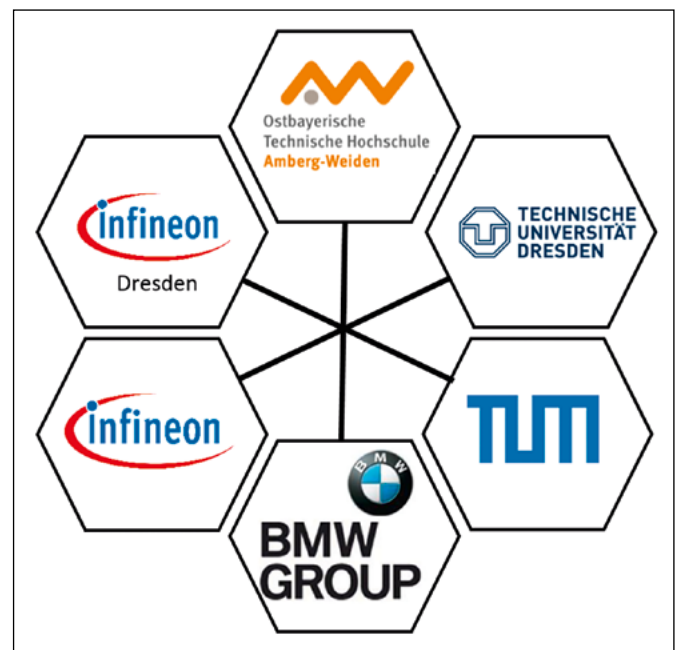


Abbildung 1: Übersicht der Projektpartner

Das Hauptaugenmerk legt KI-ASIC auf die Entwicklung intelligenter, voll integrierter Sensormodule mit neuromorphen KI-Beschleunigern für die energieminimale Datenvorverarbeitung innerhalb der Sensorik. Die sich bisher nur in Prototypen in der Forschung im Einsatz befindliche Technologie soll innerhalb des Projektes auf eine konkrete Anwendung übertragen und hinsichtlich der Integration in ein hochautomatisiertes Fahrzeug abgestimmt werden. Der Fokus liegt dabei auf KI-Methoden für Mustererkennung und -analyse mithilfe von Radarsensoren im hochautomatisierten Fahrbetrieb.

Dies soll eine verbesserte Verarbeitung der aufgezeichneten Sensordaten ermöglichen, die direkt im Radarsensor erfolgt. Diese direkte Integration der Algorithmik zur Verarbeitung der Radardaten auf Basis gepulster neuronaler

Netze lässt einen breitbandigen Zugriff auf Sensorrohdaten zu und spart infolge der KI-basierten Datenvorverarbeitung sogar Bandbreite ein. Im Gegensatz zu klassischen Prozessoren, die nach dem Von-Neumann-Prinzip aufgebaut sind, ist die Architektur neuromorpher Mikroprozessoren an die Funktion des menschlichen Gehirns angelehnt. Infolge der lokalen Datenverarbeitung und Informationsübertragung mithilfe digitaler Impulse, die als sog. „Spitzen“ (engl. „spikes“) bezeichnet werden, lassen sich so Systeme mit hoher Energieeffizienz, geringer Latenz sowie einer potenziell größeren Fehlertoleranz realisieren. Infolgedessen lässt sich das automatisierte bzw. autonome Fahren deutlich sicherer und effizienter machen.

Das Projekt KI-ASIC zielt auf den Einsatz hochauflösender Radarsensoren ab, insbesondere auf gepulste neuronale Netzwerke und dedizierte neuromorphe Hardware, die diese Algorithmen beherbergt. Daher sind die Sensoranforderungen aus den Testszenarien zu extrahieren. Die OTH AW konzentriert sich bei der Auswahl der Fahrscenarien auf Testfälle, in denen bereits heutige Radartechnik als primäre Sensoreinheit eingesetzt wird. Der Fokus liegt dabei auf innerstädtischen Testszenarien, wie z. B. Abzweigungen oder Kreuzungen, da hier eine zuverlässige und präzise Detektion bzw. Klassifikation aller sich bewegenden Objekte von essentieller Bedeutung ist, um mögliche Kollisionen frühzeitig zu erkennen und beteiligte Verkehrsteilnehmer nicht zu gefährden.

Besonders bei Abbiegevorgängen können Fußgänger und Fahrradfahrer leicht übersehen werden, was z. T. schwere Unfälle zur Folge hat. Der Erfassungsbereich des Radarsensors muss daher Objekte in unmittelbarer Nähe abdecken können, um solche Kollisionen verhindern zu können. Daher werden mehrere Radarsensoren, vorzugsweise an den Ecken des Fahrzeugs eingesetzt, um z. B. Fußgänger erfassen zu können, die direkt vor dem Fahrzeug, am Rand des Gehwegs stehen oder die bereits auf die Straße treten.

3 Entwicklung eines Referenzsystems

Ausgehend von dem oben dargestellten Anwendungsfall können Anforderungen an das Radarsystem, v. a. hinsichtlich des erforderlichen Sichtfeldes, abgeleitet werden. Demnach sollen drei Sensoren an der Fahrzeugfront des späteren Versuchsträgers montiert werden, die einen Öffnungswinkel von $\pm 60^\circ$ und eine Reichweite von bis zu 30 Metern abdecken.

Neben der Festlegung der Radarsensorik ist es notwendig, ein Referenzsystem mit ähnlichen Spezifikationen wie das Radarsystem zu definieren, um die aufgezeichneten Radardaten in geeigneter Weise annotieren zu können. Dafür wird ein Kamerasystem mit zwei identischen

Farbkameras verwendet, das den identischen Bereich erfasst. Eine der beiden Farbkameras wird dazu genutzt, die aufgezeichnete Szene mithilfe eines bereits entwickelten neuronalen Netzes zu „labeln“, d. h. alle detektierten Objekte einer bestimmten Klasse (z. B. Fahrzeug, Fahrradfahrer, Fußgänger etc.) zuzuordnen. Abbildung 2 zeigt ein beispielhaftes Ergebnis eines solchen Labeling-Prozesses, bei dem exemplarisch nur der Umriss des Objektes dargestellt wird.



Abbildung 2: Beispiel Labeling

Durch das Aufzeichnen der Bilder der beiden Kameras zur gleichen Zeit ist es mithilfe der Bestimmung der Disparität aller Bildpunkte (Pixel) möglich, aus der Distanz zwischen den Kameras, der fokalen Länge der Objektive und der Disparität, Abstände von detektierten Objekten zu berechnen. Je größer die Disparität eines Bildpunktes, desto kleiner ist dabei der Abstand des Objekts vom Referenzsystem und vice versa.

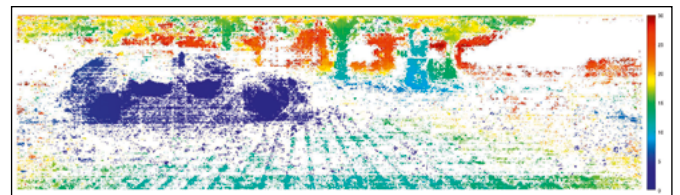


Abbildung 3: Beispiel Abstandsbestimmung

Aus Abbildung 3 lassen sich u. a. Abstände sowie horizontale und vertikale Winkel zwischen dem Referenzsystem und den detektierten Objekten bestimmen. Zusammen mit den aus dem Labeling-Prozess resultierenden Informationen und den parallel aufgezeichneten Radardaten werden für jeden Zeitschritt der mit 5 Hz durchgeführten Messung alle ermittelten Ergebnisse in einer Ergebnisdatei gesammelt. Die annotierten Daten werden anschließend der TU München für die Entwicklung des SNNs übergeben.

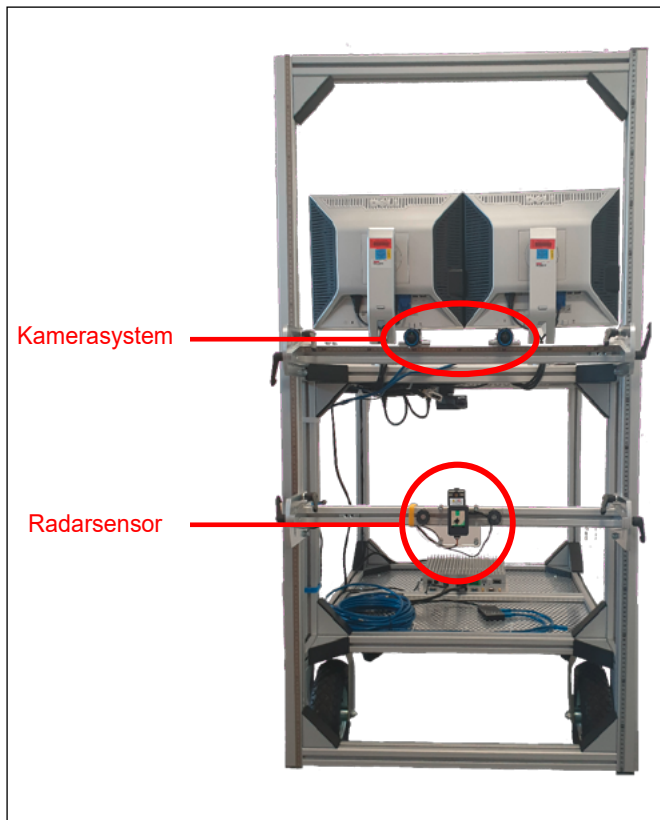


Abbildung 4: Referenzsystem – Messwagen

Das Kamerasystem wird zusammen mit dem oben beschriebenen Radarsensor an einem selbstgebauten Messwagen (Abbildung 4) montiert, mithilfe dessen die Sensordaten aufgezeichnet werden. Dieser Messwagen soll eine flexible Einstellung der Hardwarekomponenten ermöglichen, die für einen iterativen Optimierungsprozess des Versuchsaufbaus von entscheidender Bedeutung ist.

4 Ausblick

Während der ersten Projektphase befinden sich sowohl das Referenzsystem als auch die der Annotierung zugrundeliegende Datenverarbeitungsalgorithmik noch in der Entwicklungsphase. Durch den regelmäßigen Austausch mit der TU München als direkter Projektpartner wird der Prozess iterativ verbessert. Des Weiteren soll ein Lidarsensor in den Versuchsaufbau integriert werden, um die Genauigkeit der Abstandsbestimmung zu erhöhen. Infolge der späteren Integration der Sensorik in einen Versuchsträger, der von der BMW AG München bereitgestellt wird, soll die innerhalb des Projektes entwickelte neuromorphe Radarsensorik anhand definierter Fahrscenarien im Realverkehr getestet und die Ergebnisse mit bereits auf dem Markt erhältlichen Radarsensoren hinsichtlich Performance und Energieverbrauch verglichen werden.

Referenzen:

- [1] P. Buxmann und H. Schmidt, Künstliche Intelligenz – Mit Algorithmen zum wirtschaftlichen Erfolg, Darmstadt: Gabler Verlag, 2020.
- [2] MHP Management- und IT-Beratung GmbH, „Autonomes Fahren“, Ludwigsburg, 2019.
- [3] F. Greis, „Leistungshunger von Auto-Rechnern soll stark steigen“, 2019. [Online]. Available: <https://www.golem.de/news/wasserkuehlung-erforderlich-leistungshunger-von-auto-rechnern-soll-stark-steigen-1905-141155.html>. [Zugriff am 10 07 2020].
- [4] R. Gessler, Entwicklung Eingebetteter Systeme, Ravensburg: Springer Vieweg, 2014.
- [5] Bundesministerium für Bildung Forschung, „KI-ASIC KI-Prozessorarchitekturen für Radarmodule im autonomen Fahrzeug“, 2019. [Online]. Available: <https://www.elektronikforschung.de/projekte/ki-asic>. [Zugriff am 10 07 2020].

Projektpartner:

siehe Abbildung 1

Fördergeber:

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert das Projekt unter dem deutschen Titel „Radarmodule im autonomen Fahrzeug – KI-ASIC“ mit dem Teilvorhaben an der OTH Amberg-Weiden „Akquisition, Aufbereitung und Evaluation von Radar-Signalen als Datenbasis für die Entwicklung von KI-gestützten neuromorphen Prozessorarchitekturen“ unter der Fördernummer 16ES0997.



Kontakt:



Daniel Scharf, M.Sc.

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

da.scharf@oth-aw.de



Seifeddine Saadani, M.Eng.

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

se.saadani@oth-aw.de



Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

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

a.hoess@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

Industrieautomatisierung im Wandel – Neue Herausforderungen für die Zertifizierung durch die Einführung von TSN

Zusammenfassung

Bei PROFINET handelt es sich um einen führenden, echtzeitfähigen Industrial Ethernet Standard für die Automatisierung. Er basiert mit Ethernet auf derselben Technologie, die bereits seit Jahrzehnten in der überwiegenden Zahl kommerzieller und nichtkommerzieller Internettologien zum Einsatz kommt und aus diesem Grund von vielen Geräteherstellern unterstützt wird. Um die stetig wachsenden Anforderungen an moderne, industrielle Applikationen erfüllen zu können, ist der offene PROFINET-Standard ständig Gegenstand von Bestrebungen zur Erweiterung und Weiterentwicklung.

Zur Gewährleistung der Interoperabilität von Geräten verschiedener Hersteller existiert ein umfangreiches Zertifizierungsprogramm, das von der PI (PROFIBUS & PROFINET International) betreut wird. Jedes PROFINET-Gerät muss von einem akkreditierten Testlabor erfolgreich geprüft werden, bevor der Hersteller das entsprechende Zertifikat bei der PI erwerben kann. Ein solcher Prüfvorgang besteht aus einer Abfolge genau definierter Testfälle, in denen verschiedene Funktionen des Geräts untersucht werden. Ein offizielles PROFINET-Zertifikat garantiert damit eine absolut reibungslose Interoperabilität mit anderen PROFINET-Produkten.

Die Testfälle werden mithilfe einer speziellen Software namens *Automated RT-Tester* durchgeführt. Aktuell decken sie etwa 80% der PROFINET Basisspezifikation ab. Diese Software wird an der OTH Amberg-Weiden am Standort Amberg von der Arbeitsgruppe AUT mit Unterstützung des *aia – automations institut amberg* entwickelt. Aufgrund des intensiven Austauschs mit zahlreichen Industriepartnern wie Siemens, Phoenix Contact, Bosch Rexroth und vielen anderen ist es möglich, jederzeit agil auf neue Anforderungen der Entwicklungs- und Zertifizierungspraxis reagieren zu können. Die OTH Amberg-Weiden trägt damit maßgeblich zur weltweiten Qualitätssicherung und Zertifizierung industrieller Kommunikationstechnologien bei.

Abstract

PROFINET is one of the leading real-time Industrial Ethernet standards for automation. It is based on Ethernet, the same technology that has been established for the past decades in most commercial and non-commercial data networks. Therefore, it has been covered by most device manufacturers. PROFINET is constantly being extended and developed to meet the increasing demands of modern industrial applications.

There is a comprehensive certification system to ensure the interoperability of devices from different manufacturers; it is supervised by PI (PROFIBUS & PROFINET International). All PROFINET devices have to be tested successfully in an accredited PI Test Laboratory to obtain the corresponding certificates. Such a test process is a sequence of specified test cases, each of which designed to analyze different aspects of the functional capacity of the device in detail. Thus, a PROFINET certificate can guarantee full compatibility with other PROFINET products.

The test cases, which focus on analyzing the devices in terms of interoperability and real-time communications, are executed with a dedicated software called *Automated RT-Tester*. It currently covers roughly 80% of the PROFINET base specification. The working group AUT (OTH Amberg-Weiden cluster IKT) develops and maintains this piece of software at OTH's laboratories in Amberg with support of *aia – automations institute amberg*. The underlying working model incorporates close contact with numerous industry partners as Siemens, Phoenix Contact or Bosch Rexroth. Thus, changing or newly rising requirements that emerge in development or certification can be handled in quick and agile manner. With this project, the OTH Amberg-Weiden plays an important role in worldwide quality and certification processes for industrial communication standards.

Erweiterungen des Testfelds und andere Herausforderungen

Das PROFINET zugrundeliegende Gerätemodell basiert auf einer Teilung der Kommunikationsteilnehmer in passive Devices und aktive Controller, die je nach Szenario abwechselnd die Rollen von Provider und Consumer einnehmen. In den ersten Jahren des Projekts lag der Fokus zunächst auf der Zertifizierung der PROFINET Devices in einer ständig wachsenden Anzahl von Testfällen. Grundlage hierfür waren eine quasi vollständige Implementierung der meisten PROFINET Services sowie der entsprechenden Basisfunktionalitäten.

Auf Basis der Erfahrungen aus der erfolgreichen Zusammenarbeit in der Device-Zertifizierung erfolgte die Erweiterung für den Einsatz in der Zertifizierung von PROFINET Controllern. Die aktive Rolle von Controllern im Gerätemodell machte dabei eine Vielzahl von Erweiterungen der bisherigen Teststrategie notwendig. Wo die Testsoftware bislang als aktive Komponente die Ausführung der verschiedenen Testschritte auf den Devices veranlassen konnte, muss sie hier als passive Komponente fungieren, um mit den aktiven Controllern kommunizieren zu können. Mit der CDML (Controller Description Markup Language) wurde außerdem ein controllerseitiges Pendant zur in PROFINET etablierten GSDML (Generic Station Description Markup Language) in den Zertifizierungskontext eingeführt. Die Hersteller der Controller nutzen diese Dateien, um Aufbau und Kapazitäten ihrer Produkte in einem normierten Format für die Nutzung im Testsystem zu beschreiben.

Neben dem ständigen Ausbau der nunmehr etablierten Testfälle für Devices und Controller wird aktuell auch in anderen Bereichen an der Erweiterung des Testscopes gearbeitet. So wurde der *Automated RT-Tester* auch für die Zertifizierung von TSN-Features erweitert. Die ersten Testfälle für TSN-Devices und -Controller wurden den Technologie Providern und den Testlaboren bereits in mehreren TRIAL-Bundles zur Verfügung gestellt, der damit einhergehende Ausbau der Testsoftware und der -umgebung wird nachfolgend ausführlicher beschrieben.

Ein weiteres TRIAL-Bundle wurde für das ProcessAutomation Profile 4.0 veröffentlicht. Da Geräte dieser Kategorie vornehmlich in besonders sensiblen Szenarien verwendet werden, besteht gerade hier gesteigerter Bedarf an Zertifizierungsmechanismen; die entsprechenden Tests werden ebenfalls mit dem *Automated RT-Tester* durchgeführt. Um die notwendigen Voraussetzungen zu schaffen, hat die Arbeitsgruppe AUT in den vergangenen Monaten Architektur und Funktionalität des Testers an die damit einhergehenden Anforderungen angepasst. So beherrscht der *Automated RT-Tester* nun das Handling multipler GSDs für Prozessgeräte so-

wie die damit verbundenen zyklischen und azyklischen Services. Mit den begonnenen Vorbereitungen für die Zertifizierung von APL (Advanced Physical Layer) steht das nächste Thema aus dem Feld der Prozessautomatisierung bereits fest.

TSN im Zusammenspiel mit den anderen Netzwerkschichten

Mit der fortschreitenden Realisierung von Industrie-4.0-Szenarien ändern sich auch die Anforderungen an die Netzwerke in Fabriken und Produktionsstätten. Die zunehmende Digitalisierung der industriellen Prozesse und das branchenbedingte Bedürfnis nach Investitions- und Zukunftssicherheit verlangt dabei nach Kommunikationsprotokollen, die von allen gängigen Hard- und Softwareherstellern unterstützt werden. Gleichzeitig gewinnen technische Anforderungen wie Ausfallsicherheit, Echtzeitfähigkeit oder Taktsynchronität weiter an Bedeutung. Industrieprotokolle wie PROFINET reagieren auf diese Entwicklung unter anderem mit Adaptionen ihres Protokollstacks. Wo auf Layer 2 bislang proprietäre Lösungen wie IRT (Isochronous Real-Time) zum Einsatz kamen, wird künftig auch auf TSN zurückgegriffen werden können.

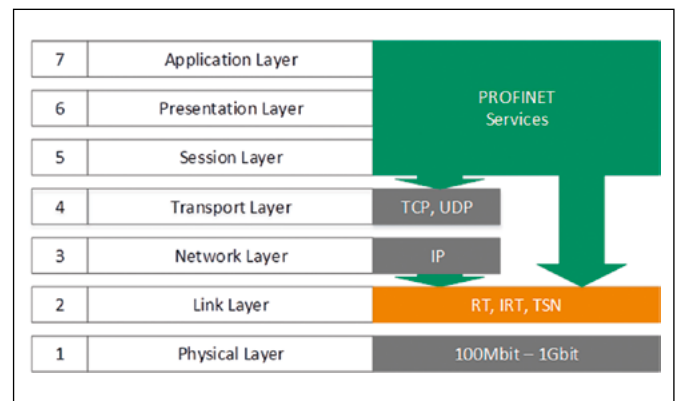


Abbildung 1: PROFINET und TSN im Protokollstack des ISO/OSI-Modells

TSN (Time Sensitive Networking) bezeichnet eine Sammlung verschiedener Kommunikationsstandards auf dem Link Layer, die nun durch die IEEE standardisiert und von einer Vielzahl von Herstellern mitgetragen wird. Damit besteht berechtigter Grund zu der Annahme, dass sich TSN in den kommenden Jahren stark verbreiten und proprietäre Lösungen nach und nach verdrängen wird.

Für den *Automated RT-Tester* bedeutet diese neue Strategie eine Reihe an tiefgreifenden Änderungen: Neue Testfälle müssen spezifiziert und implementiert werden, um die korrekte Umsetzung verschiedener TSN-Features im Zertifikationsprozess sicherstellen zu können. Die gestiegenen Anforderungen gerade im Bereich der takt-synchronen Kommunikation bedeuten auf lange Sicht zwangsläufig die Abkehr von den bis dato etablierten

Standard-Testsetups. In enger Zusammenarbeit mit Siemens wurde daher ein neues Testsetup entworfen, das es zulässt, zeitkritische Prozesse auf eine externe Hardwarekomponente auszulagern.

Anforderungen an das Testsystem

Beim Testsetup des *Automated RT-Testers* ist die Testumgebung genauestens definiert. Dadurch wird die volle Reproduzierbarkeit der Testergebnisse gewährleistet, was die Betreuung bei möglichen Problemen oder auch die Weiterentwicklung des Testers erheblich erleichtert. Die Testumgebung eines Standard-2-Port-Gerätes ist nachfolgend in Abbildung 2 dargestellt.

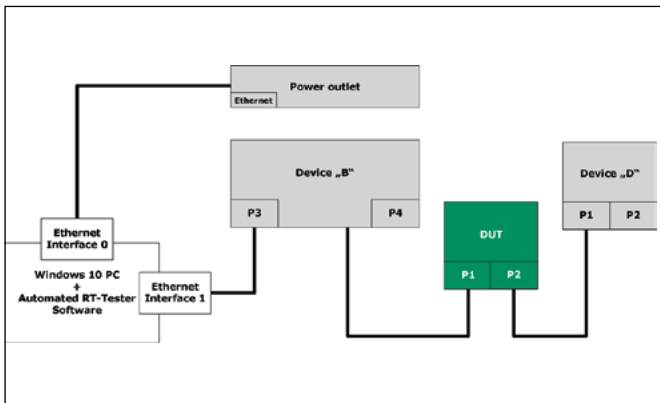


Abbildung 2: PROFINET Standard-TestSetup

Das Standard-Testsetup setzt sich aus mehreren definierten Nachbargeräten für das DUT (Device Under Test) sowie einer über Ethernet gesteuerten Steckdosenleiste zusammen. Der *Automated RT-Tester* ist somit in der Lage, einzelne Geräte je nach Testfall ein- bzw. auszuschalten. Weiterhin ermöglicht diese Peripherie beispielsweise die Überprüfung von Topologie-Informationen mit LLDP-Paketen. Aufgrund dieses Aufbaus ist es möglich, den Testablauf vollautomatisch durchzuführen. Nach dem Testdurchlauf stehen dem Testingenieur detaillierte Reports und umfangreiche Aufzeichnungen des Netzverkehrs zur Analyse der Ergebnisse und eventuell aufgetretener Fehler zur Verfügung.

Um die gesteigerten Ansprüche von TSN zu erfüllen, ist dieses Testsetup nicht mehr ausreichend; mit einem Standard PC und einer Windows10-Installation können die deutlich gestiegenen zeitkritischen Anforderungen nicht mehr garantiert werden. Für TSN wurde darum ein dediziertes Board in das Testsetup eingefügt.

In diesem neuen Testsetup wird der Testrechner, auf dem der *Automated RT-Tester* läuft, über Ethernet mit dem ETS-Board verbunden. Die Kommunikation zwischen Testsoftware und ETS-Board findet über gRPC statt. Dadurch ist es möglich, eine einfache und klar definierte API zu schaffen.

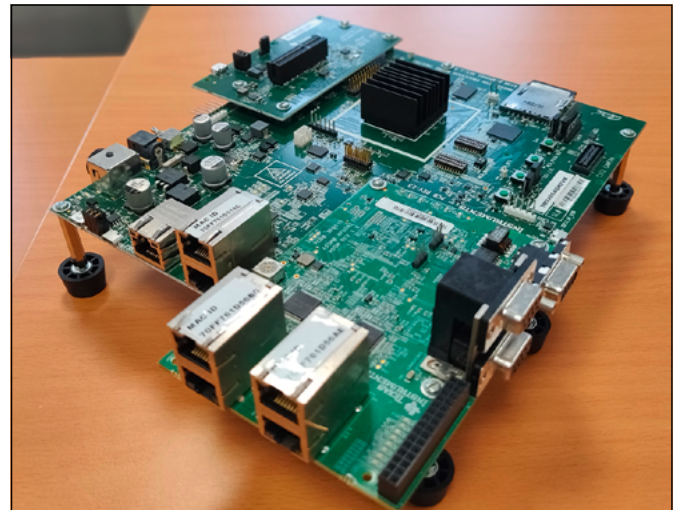


Abbildung 3: Embedded Test System – Dieses ETS (Embedded Test System) und das dazu gehörende Betriebssystem werden von Texas Instruments eigens für TSN entwickelt.

Das DUT wird (wie in Abbildung 4 zu sehen) direkt an das ETS-Board angeschlossen; alle weitere Peripherie entfällt. Für die Anwender bedeutet die dadurch verringerte Komplexität des Testaufbaus auch eine Kostenersparnis in der Anschaffung sowie die Vermeidung potenzieller Fehlerquellen in der Bedienung.

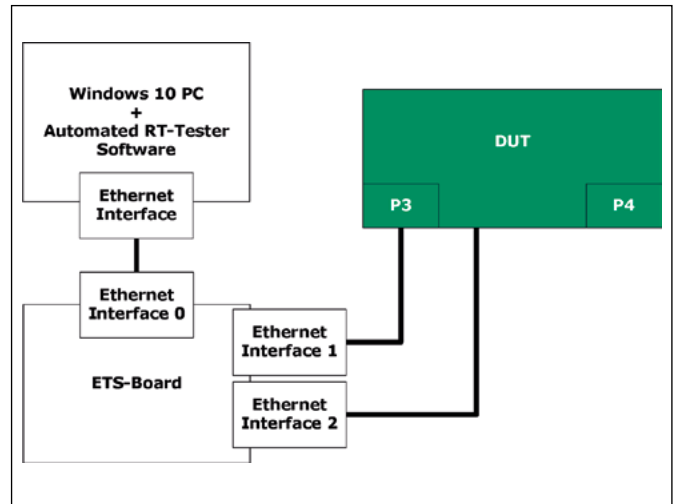


Abbildung 4: PROFINET Testsetup für TSN

Erweiterung des *Automated RT-Tester*-Frameworks

Um einen fließenden Übergang zwischen RT- und TSN-Tests zu gewährleisten, wurde der *Automated RT-Tester* um weitere Module erweitert. Durch diesen Ansatz können die alten Testcases weiter mit dem Standard-Testsetup ausgeführt werden, während man neue Testcases für das ETS-Board entwickelt. Um dies zu ermöglichen, wurde eigens eine Testumgebung (Test Execution Controller kurz TEC) als Neuentwicklung implementiert. Die Integration des ETS-Boards machte es außerdem erforderlich, die Schnittstelle für die Kommunikation komplett zu überarbeiten und als neues Modul zu integrieren. Der

aktuelle Aufbau des *Automated RT-Testers* mit ETS ist in Abbildung 5 schematisch dargestellt, die Anpassungen für die TSN-Zertifizierung sind farbig hervorgehoben.

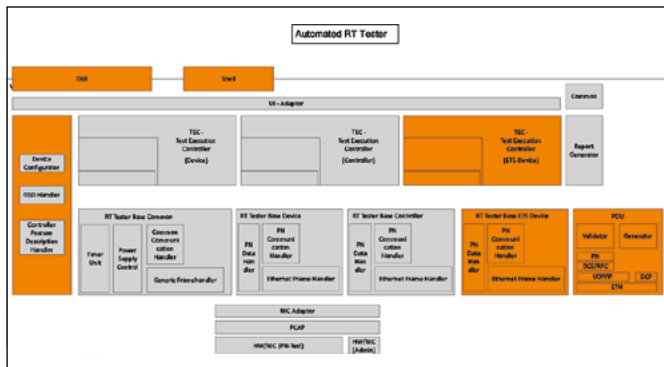


Abbildung 5: Erweiterte Softwarearchitektur des *Automated RT-Testers* für TSN-Funktionalität

Integration und Zertifizierung von RSI

In den vergangenen Monaten wurde auf dem ETS mit RSI (Remote Service Interface) ein neues Netzwerkprotokoll implementiert, das unter PROFINET in vielen Bereichen RPC ersetzen kann. Anders als RPC basiert RSI nicht auf UDP bzw. IP; damit können die durch die bislang unvermeidbare Verwendung von IP-Adressen geprägten Netzanforderungen von PROFINET für azyklische Services und Verbindungsaufbau deutlich verschlankt werden. Die damit verbundenen Vorteile beschränken sich jedoch nicht auf den Wegfall der angesprochenen Layer – der Bedarf für den Einsatz von Netzwerkmanagement-Protokollen wie z. B. ARP oder DHCP wird ebenfalls reduziert. Weiterhin wird dieser Schritt die anstehende Migration auf IPv6 für Industrienetze deutlich vereinfachen. Mit der Implementierung der RSI-Basisfunktionalität wurde außerdem der Rahmen für die ersten RSI-Zertifizierungstests geschaffen, die der Entwickler-Community bereits über ein TRIAL-Bundle zur Verfügung gestellt wurden. Daneben ist sie relevant für künftige Testfälle im Kontext von TSN, da RSI bei der Konfiguration von TSN-Devices zum Einsatz kommt.

Weltweite Sichtbarkeit

Neben der beschriebenen Zusammenarbeit mit den Geräteherstellern im Arbeitsalltag, stehen die Mitglieder der Arbeitsgruppe AUT auch im engen Austausch mit den verschiedenen Testlaboren der PT (PITLs); weiter sind sie weltweit in Spezifizierungsgremien, auf Konferenzen und Fachmessen vertreten und präsentieren den *Automated RT-Tester* und seine Verwendung in Workshops, Schulungen und anderen Informationsveranstaltungen. Einsatzorte waren in der jüngeren Vergangenheit u. a. Frankfurt am Main, Mainz, Hannover, Nürnberg, Prag, Innsbruck, Den Haag und Peking.

PROFINET-Einsatzszenarien in der Praxis

Im Rahmen eines Entwicklungsprojektes für die Firma MSF Vathauer wurde eine bestehende Frequenzrichter-Plattform, die bereits verschiedene industrielle Kommunikationssysteme unterstützt, um eine PROFINET-basierte Ansteuerung erweitert.

Die Anbindung an das PROFINET-Netzwerk wurde mithilfe eines Application Specific Integrated Circuit (ASIC), dem TPS-1 von Phoenix Contact, realisiert. Dieser ASIC wird über eine SPI-Schnittstelle von einem Mikrocontroller konfiguriert und parametrierbar. Über diesen Mikrocontroller wird ebenfalls der Frequenzrichter selbst angesteuert.

Um ein spezifikationskonformes Verhalten des Frequenzrichters zu gewährleisten, wurde der ART mit seinen automatisierten Tests entwicklungsbegleitend eingesetzt. Dies führte zur einer sofortigen Rückmeldung im Fall protokollspezifischer Fehler. Weiterhin war es hiermit möglich, umfangreichere und genauere Tests durchzuführen, als es beispielsweise mit Standardcontrollern realisierbar wäre. Durch die Möglichkeit, im *Automated RT-Tester* benutzerdefinierte Testfälle zu erstellen, konnten außerdem eigene Testschritte implementiert werden, um neu hinzugefügte Features spezifisch zu testen.

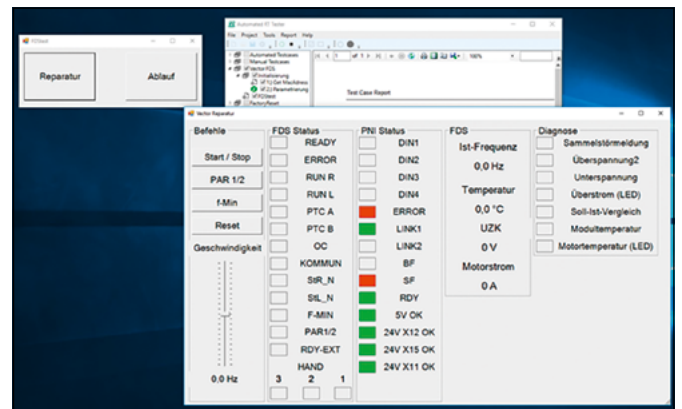


Abbildung 6: Benutzerdefinierte Oberfläche für die Inbetriebnahme eines Frequenzrichters

Weiterhin kann so im *Automated RT-Tester* eine eigene Oberfläche entworfen werden, um erste Inbetriebnahme-Szenarien durchzuführen (siehe Abbildung 6). Das abgebildete Interface dient der Inbetriebnahme-Prüfung nach der Fertigung. Es ermöglicht die frühzeitige Detektion von Fehlern noch vor Auslieferung an den Kunden.

Kontakt:



Benedikt Etzold, M.Sc.

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

b.etzold@oth-aw.de



Sebastian Zach, M.Sc.

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

s.zach@oth-aw.de



Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmidt

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

hp.schmidt@oth-aw.de

Forschungsprojekt: ADACORSA "Airborne data collection on resilient system architectures"

Nicholas Jäger, M.Sc.
Patrick Purucker, B.Eng.
Christian Reil, M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß
Prof. Dr. Andreas Aßmuth



Zusammenfassung

Drohnen verfügen im zivilen Bereich über ein großes Potenzial, welches aber gegenwärtig dadurch limitiert wird, dass Drohnen noch nicht zuverlässig (teil-) autonom außerhalb der Sichtweite operieren können und dies auch nicht dürfen. Das Ziel des von der EU und den nationalen Behörden geförderten Forschungsprojekts ADACORSA (<https://www.adacorsa.eu/>) besteht primär darin, die technischen Komponenten für Drohnen zu entwickeln, die Flüge außerhalb der Sichtweite ermöglichen. Die Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden trägt dazu im Bereich zuverlässige und sichere Kommunikation bei: Sie entwickelt Modelle zur Vorhersage von Quality of Service Parametern für die Drohnenkommunikation über das Mobilfunknetz (zuverlässige Kommunikation). Ferner entwickelt sie Systeme zur Authentifizierung und zum Trust-Management in Flying Ad-hoc Networks (sichere Kommunikation).

Abstract

Drones have a great potential in the civilian section, but this potential is currently limited by the fact that drones cannot yet operate reliably (semi-) autonomously beyond visual line of sight and furthermore it is not allowed. The primary goal of the research project ADACORSA (<https://www.adacorsa.eu/>), which is funded by the EU and national authorities, is to develop the technical components for drones that enable flights beyond visual line of sight. The Technical University of Applied Sciences Amberg-Weiden contributes to this project in the field of reliable and secure communication: It develops quality of service prediction models for drone communication based on cellular networks (reliable communication). It also enables systems for authentication and trust management in flying ad-hoc networks (secure communication).

1 Einleitung

Seit einigen Jahren erfreuen sich Drohnen bzw. unbemannte Luftfahrzeuge (UAVs - Unmanned/Uncrewed Aerial Vehicles) im zivilen Bereich zunehmender Beliebtheit (militärische Drohnen bzw. militärische Anwendungen werden nicht betrachtet). Gegenwärtig werden sie hauptsächlich als fliegende Kameras eingesetzt, um beispielsweise beeindruckende Luftaufnahmen zu machen, oder um große Anlagen, wie Windräder und Fotovoltaikanlagen, auf Schäden zu überprüfen. Neben ihrer Funktion als fliegende Kameras finden Drohnen auch im Sport- und Freizeitbereich Verwendung, z. B. in Drohnenrennen oder als Spielzeug. Darüber hinaus besitzen UAVs eine große Anzahl an vielversprechenden Einsatzmöglichkeiten im zivilen Bereich, wie z. B.: Frachtdrohnen können durch

Verwendung der dritten Dimension die Verkehrsnetze entlasten oder an Ziele liefern, die nur schwer oder unwirtschaftlich zu erreichen sind (z. B. Inseln). Ein weiteres Einsatzfeld von Drohnen besteht in der Überwachung von Gelände oder von Objekten. Sie könnten beispielsweise Wälder auf Waldbrände überwachen oder auf Wildtierbestände. In der Form von Such- und Rettungsmissionen können sie große oder schwer zugängliche Gebiete nach (bestimmten) Menschen absuchen, die Hilfe benötigen, beispielsweise nach Lawinen in Bergen. Im Bereich Katastrophenhilfe könnten sie zum Löschen von Bränden eingesetzt werden oder zum Aufbau einer Notfallinfrastruktur [1].

Um das volle Potenzial der Drohnentechnologie ausschöpfen zu können, bedarf es technischen Weiterentwicklungen und entsprechend angepassten rechtlichen

Rahmenbedingungen, damit die Drohnen im bestehenden Luftraum neben den bisherigen Luftverkehr fliegen können und dürfen. Eine Schlüsselfähigkeit dafür besteht darin, dass Drohnen BVLOS (Beyond Visual Line of Sight, außerhalb der Sichtverbindung) operieren können (siehe Abbildung 1). Dafür benötigen Drohnen ein hohes Maß an Autonomie, Zuverlässigkeit, Sicherheit sowie Kommunikations- und Kooperationsfähigkeit. Die dazu erforderliche zuverlässige Hard- und Software ist gegenwärtig im kommerziellen Bereich für Drohnen nicht verfügbar und muss noch entwickelt werden. Durch die Forschung und Entwicklung im Bereich von vernetzten und autonomen Fahrzeugen wurden Hardware- und Software-Komponenten entwickelt, die für den Einsatz in Drohnen voraussichtlich adaptiert werden können.

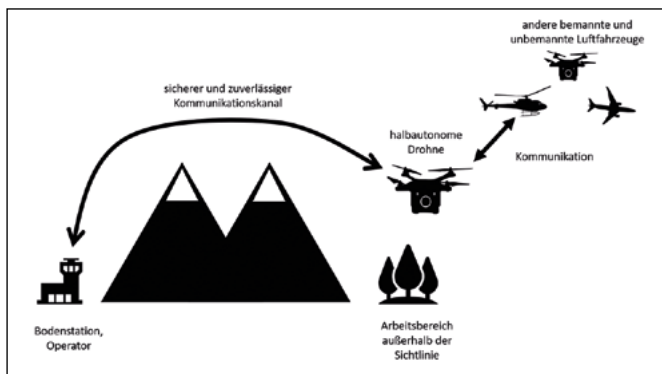


Abbildung 1: schematische Darstellung des BVLOS-Szenarios

Das Hauptziel des von der EU und nationalen Behörden geförderten Forschungsprojekts **“Airborne data collection on resilient system architectures” (ADACORSA)** besteht darin, die technischen Komponenten (Hardware, Software) bereitzustellen, die es teilautonomen UAVs ermöglichen, BVLOS-Flüge im kontrollierten und unkontrollierten Luftraum durchzuführen [2]. Dabei werden sowohl neue technische Komponenten entwickelt als auch Komponenten aus der Automobilbranche verwendet.

Die im ADACORSA geplanten Aktivitäten lassen sich fünf Hauptgebieten zuordnen: Luftfahrtelektronik für Drohnen, Kommunikationstechnologie und Infrastruktur, rechtliche Rahmenbedingungen, Sicherheit und gesellschaftliche Akzeptanz.

Im ADACORSA-Projekt arbeiten 49 europäische Partner aus zwölf Staaten (Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Italien, Litauen, Niederlande, Österreich, Portugal, Schweden, Türkei und Zypern) zusammen und bringen die Erfahrungen aus unterschiedlichen Branchen ein (Luftfahrt, Automobilbranche, Halbleiterindustrie, Forschung und Bildung). Das Projekt startete im Mai 2020 und hat eine geplante Laufzeit von drei Jahren.

Die Projektaktivitäten sind thematisch in zehn Supply Chains organisiert, die jeweils ein übergeordnetes Ziel verfolgen. Die Aktivitäten der Ostbayerischen Techni-

schen Hochschule Amberg-Weiden (OTH AW) finden primär in Supply Chain 4 **“Security and reliability of communication and identification of drones and operators”** statt. Die Aufgabe dieser Supply Chain besteht darin, die technologischen Komponenten (Hardware, Software usw.) zu entwickeln, um eine sichere, schnelle und zuverlässige Kommunikation zwischen BVLOS-fähigen Drohnen untereinander und mit der Bodenstation zu ermöglichen. Die OTH AW liefert dabei Beiträge sowohl im Bereich der zuverlässigen als auch im Bereich der sicheren Kommunikation, die in den Abschnitten 2. Zuverlässigkeit von mobilfunkbasierter Kommunikation von Drohnen und 3. Vertrauensbasierte Sicherheit in Flying Ad-hoc Networks (FANETs) vorgestellt werden.

2 Zuverlässigkeit von mobilfunkbasierter Kommunikation von Drohnen

Für BVLOS-Flüge von Drohnen ist ein zuverlässiger Kommunikationskanal essenziell, damit der Operator der Drohne das Verhalten der Drohne überwachen und gegebenenfalls eingreifen kann. Für die Kommunikation stehen verschiedene Technologien zur Verfügung, wie z. B. Mobilfunk, Bluetooth, Satellitenverbindungen oder WLAN, welche unterschiedliche Verbindungscharakteristiken aufweisen (Reichweite, Latenz, Datendurchsatz) und für unterschiedliche Situationen geeignet sind. Je nach Situation können die Daten auch über mehrere Kommunikationskanäle unter Verwendung verschiedener Technologien parallel übertragen werden. Das Ziel der OTH AW besteht darin, Modelle zu entwickeln, um die Verbindungsqualität (QoS – Quality of Service) des Mobilfunks vorherzusagen und diese in verschiedenen Algorithmen zu verwenden. Beispielsweise kann die Trajektorie der Drohne entsprechend der prädizierten QoS-Werte angepasst werden. Diese Vorgehensweise ist in Abbildung 2 visualisiert.

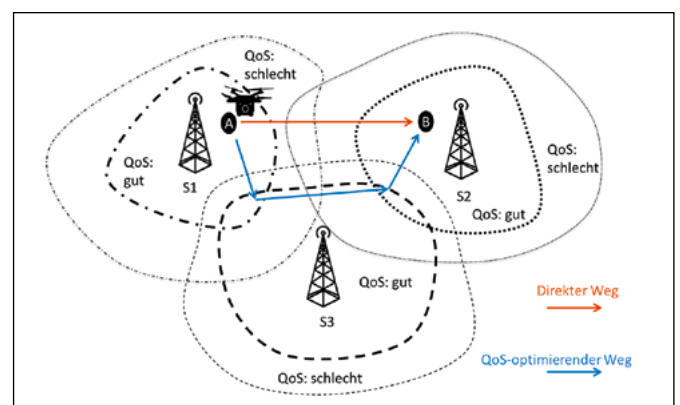


Abbildung 2: schematische Darstellung eines QoS-basierten Routings.

Die geplante Arbeit lässt sich in sechs Phasen einteilen: Analyse, Messung, Modellierung, Prädiktion, Integration. Um die Ergebnisse nach der Integration anhand des Demonstrators zu bewerten, werden im Rahmen von

ADACORSA zunächst die Anforderungen an das Kommunikationsgateway und der Stand der Technik hinsichtlich der Mobilfunkkommunikation betrachtet. Nach 3GPP [3] können die zu übertragenden Daten in Applikationsdaten und Steuerungsdaten, auch Command and Control Data (C&C), aufgeteilt werden.

Unter Applikationsdaten versteht man beispielsweise Sensordaten oder auch Bild-/Videodaten. Diese Daten sind im Vergleich zu C&C-Daten zeitunkritisch, wobei Latenzen in einem Bereich kleiner 400 ms angestrebt werden [4]. Allerdings werden für hochauflösende Videodaten Bandbreiten im Uplink von bis zu 50 Mbps benötigt [3]. C&C-Daten werden dagegen zum Steuern des UAV verwendet. Die Steuerung kann dabei direkt oder auch in Form von Wegpunkten erfolgen, wobei für die direkte Steuerung deutlich höhere Anforderungen an Latenz und Datenrate erforderlich sind und eine Videoübertragung nötig ist [5]. Für die direkte Steuerung liegt die nötige Latenz bei 40 ms und die Datenrate bei 60-100 kbps [5], [3]. Die Zuverlässigkeit des Kommunikationskanals sollte bei C&C-Daten mindestens 99,9 % betragen [5].

Um die geforderten Übertragungscharakteristiken im BVLOS-Bereich umzusetzen, wird im Rahmen des Forschungsprojektes die Datenübertragung mithilfe der aktuellen Long Term Evolution (LTE) Technologie und des künftigen 5th Generation (5G) Netzwerk genauer betrachtet.

3 Vertrauensbasierte Sicherheit in FANETs

Aufgrund ihres großen Potenzials stellen Drohnen ein attraktives Angriffsziel für Hacker dar (vgl. beispielsweise [6]). Die Angriffsfläche der Drohne erhöht sich, wenn diese (teil-) autonom operieren oder in offenen Umgebungen kommunizieren, indem sie FANETs bilden. Es ist daher unverzichtbar, die Kommunikation der Drohnen mit entsprechenden Sicherheitsmaßnahmen abzusichern, um Angriffe abzuwehren, abzumildern und zu protokollieren.

FANETs sind Ad-hoc-Netzwerkstrukturen, die von den UAVs aufgespannt werden, um miteinander zu kommunizieren (vgl. [7]). Man kann sie als eine Art Vehicular Ad-hoc Network (VANET) bzw. Mobile Ad-hoc Network (MANET) auffassen. Sie unterscheiden sich jedoch in einigen Aspekten, wie z. B. Dichte, Mobilitätsverhalten und Leistungsfähigkeit der Netzwerkknoten voneinander. Daher können Sicherheitskonzepte von VANETs bzw. MANETs übernommen werden, die jedoch aufgrund der Unterschiede an die Situationen in FANETs angepasst werden müssen, da sie ansonsten weniger wirkungsvoll sind, versagen oder sogar neue Sicherheitsprobleme erzeugen.

Der Beitrag der OTH AW zur sicheren Kommunikation besteht in der Entwicklung eines Authentifikationssystems und eines Trust-Management-Systems für FANETs, welche

vertrauensbasierte Sicherheitsmaßnahmen darstellen. Vertrauensbasierte Sicherheit basiert auf Mechanismen, die zwischenmenschlichem Vertrauen (mehr oder weniger) ähneln. Die Vertrauenswürdigkeit anderer Kommunikationsteilnehmer wird mithilfe eigener Informationen (direktes Vertrauen) und Fremdinformationen (indirektes bzw. vermitteltes) Vertrauen eingeschätzt und für die weitere Interaktion berücksichtigt.

Die Hauptaufgabe des Authentifikationssystems besteht darin, die Identität des Kommunikationspartners zu verifizieren. Dadurch wird es möglich, sichere Kommunikationskanäle aufzubauen. In offenen Netzen werden bevorzugt Public-Key-Infrastrukturen (PKI) benutzt, welche die Verwendung von Public-Key-Kryptografie ermöglichen, indem Identitäten mit öffentlichen Schlüsseln (public keys) mittels Zertifikate verknüpft werden. Die Verknüpfung der Schlüssel basiert dabei auf Vertrauensbeziehungen und einem Vertrauensmodell, welches regelt, wann ein Schlüssel als vertrauenswürdig eingestuft werden kann. Weit verbreitet sind hierarchische PKIs, die auf zentrale Vertrauens- und Informationsinstanzen (Zertifizierungsstellen) setzen. Nur die Zertifizierungsstellen verfügen über das Recht, Zertifikate anderen Teilnehmern, einschließlich anderer Zertifizierungsstellen, auszustellen und zurückzurufen, wodurch eine Zertifikatshierarchie entsteht. Dieses System ist in den Zertifizierungsstellen zentralisiert, die attraktive Angriffsziele darstellen. Im Kontext autonomer Systeme, die auch ohne zentrale Instanz funktionsfähig sein sollten, können dezentrale PKIs Alternativen darstellen. In dezentralen Systemen darf prinzipiell jeder Teilnehmer anderen Teilnehmern Zertifikate ausstellen und die selbst ausgestellten Zertifikate widerrufen. Dabei müssen die Teilnehmer bei jedem anderen Teilnehmer entscheiden, ob sie diesem vertrauen. Das Vertrauensmodell und bestehenden Vertrauensbeziehungen ermöglichen es, die Vertrauenswürdigkeit anderer Teilnehmer einzuschätzen, sofern es gemeinsame Bekannte gibt. Das Ziel der OTH AW besteht darin ein dezentrales Authentifikationssystem für (teil-) autonome UAVs zu entwickeln.

Während ein Authentifizierungssystem die Identitäten verifiziert und somit regelt, wer am Netzwerk partizipieren kann, ist es die Aufgabe des Trust-Management-Systems, das Verhalten der verschiedenen Teilnehmer zu bewerten. Ohne ein Trust-Management-System könnte ein authentifizierter Teilnehmer sich bösartig verhalten (und damit Schäden anrichten), ohne zeitnahe Sanktionen befürchten zu müssen. Das Trust-Management-System identifiziert und isoliert Teilnehmer, die sich nicht regelkonform verhalten. In MANETs und VANETs sind Trust-Management-Systeme bereits gut erforscht, während die Forschung im Bereich FANETs erst am Anfang steht (vgl. beispielsweise [8]). Die OTH AW wird ein leistungsfähiges Trust-Management-System für FANETs entwickeln.

Die Entwicklung eines Trust-Management-Systems lässt sich in verschiedene Schritte gliedern: Zunächst müssen die Szenarien und damit das Bewegungs- und Kommunikationsverhalten festgelegt werden, für die das System ausgelegt werden soll. Darauf aufbauend wird ein Grundmodell entwickelt, wofür verschiedene Methoden zur Verfügung stehen, wie z. B. Expertensysteme, Maschinelles Lernen (neuronale Netze, evolutionäre Algorithmen) und statistische Verfahren. Um die Parameter des Modells zu bestimmen, sind umfangreiche Computersimulationen notwendig, die das Verhalten der UAVs und der Angreifer in den festgelegten Szenarien abbilden, da nicht hinreichend viele Daten aus der echten Welt vorliegen. Nachdem durch die Simulationen aussichtsreiche Parameterkonstellationen gefunden wurden, müssen diese durch weitere Simulationen, die verschiedene Elemente, wie z. B. das Verhalten und Anzahl der UAVs und Angreifer variieren, ergänzt werden, um die Leistungsfähigkeit zu bestimmen.

4 Zusammenfassung

Das von der EU und nationalen Behörden geförderte Forschungsprojekt ADACORSA verfolgt das Ziel, die technischen Komponenten (Hardware, Software) zu entwickeln, um BVLOS-Flüge von (teil-) autonomen Drohnen zu ermöglichen. Dadurch erschließen sich im zivilen Bereich zahlreiche Anwendungsfälle, wie beispielsweise im Bereich der Logistik, wodurch die Verkehrsnetze entlastet werden können. Für BVLOS-fähige Drohnen ist eine sichere und zuverlässige Kommunikation erforderlich, damit die Drohne mit dem Kontrollzentrum Sensor- und Kommandodaten austauschen kann. Die OTH AW trägt im Bereich der zuverlässigen und sicheren Kommunikation zu dem Projekt bei, indem sie Modelle zur Vorhersage von QoS von Mobilfunkverbindungen sowie vertrauensbasierte Sicherheitssysteme (Authentifizierung, Trust Management) für FANETs entwickelt.

Referenzen:

- [1] M. Christen, M. Guillaume, M. Jablonowski und K. Moll, *Zivile Drohnen – Herausforderungen und Perspektiven*, Zürich: vdf, 2018.
- [2] „ADACORSA Website“, [Online]. Available: <https://adacorsa.eu/>.
- [3] 3GPP, “TR 36.777 V15.0.0 Technical Specification Group Radio Access Network; Study on Enhanced LTE Support for Aerial Vehicles”, 12 2017. [Online]. Available: ftp://www.3gpp.org/specs/archive/36_series/36.777.
- [4] G. Yang, X. Lin, Y. Li, H. Cui, M. Xu, D. Wu, H. Rydén und S. B. Redhwan, “A Telecom Perspective on the Internet of Drones: From LTE-Advanced to 5G”, *arXiv*, p. 8, 29 3 2018.
- [5] 3GPP, “TS 22.125 V17.1.0 Technical Specification Group Services and System Aspects; Unmanned Aerial System (UAS) support in 3GPP”, 12 2019. [Online]. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3545>.
- [6] K. Hartmann und K. Giles, “UAV exploitation: A new domain for cyber power”, in *2016 8th International Conference on Cyber Conflict (CyCon)*, Talinn, 2016.
- [7] İ. Bekmezci, E. Şentürk und T. Türker, “SECURITY ISSUES IN FLYING AD-HOC NETWORKS (FANETs)”, *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, Bd. 9, p. 13 – 21, 25 7 2016.
- [8] K. Singh, K. A. Verma und P. Aggarwal, “Analysis of Various Trust Computation Methods: A step toward Secure FANETs”, in *Computer and Cyber Security – Principles, Algorithm, Applications, and Perspectives*, CRC Press, 2018, pp. 171 – 193.

Projektpartner:



Acknowledgement:

ADACORSA has received funding from the ECSEL Joint Undertaking (JU) under grant agreement No 876019. The JU receives support from the European Union’s Horizon 2020 research and innovation programme and Germany, Netherlands, Austria, Romania, France, Sweden, Cyprus, Greece, Lithuania, Portugal, Italy, Finland, Turkey.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert das Projekt unter dem deutschen Titel „Verbundprojekt: Sichere Elektronik- und Sensorsysteme für autonome Luftfahrzeuge – ADACORSA“ mit dem Teilvorhaben an der OTH Amberg-Weiden „Sichere, zuverlässige und vertrauenswürdige Kommunikation für Drohnen“ unter der Fördernummer 16MEE0039.



Kontakt:



Nicholas Jäger, M.Sc.

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

n.jaeger@oth-aw.de



Patrick Purucker, B.Eng.

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

p.purucker@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



Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

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

a.hoess@oth-aw.de



Prof. Dr. Andreas Aßmuth

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

a.assmuth@oth-aw.de

Zusammenfassung

Politische, wirtschaftliche, gesellschaftliche und technologische Rahmenbedingungen durchleben im Kontext der Digitalisierung seit Jahren einen rasanten Wandel, der mittlerweile auch auf das Gesundheitswesen ausstrahlt. Treiber der Veränderungen traditioneller Gesundheitssysteme sind die neuen Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT), mit deren Hilfe hoch entwickelte Gesundheitsdienste ortsunabhängig und jederzeit für eine Vielzahl denkbarer Anwendungsfälle verfügbar sind. Diese Technologien umfassen fortschrittliche Digitalisierungskonzepte und Virtualisierungsansätze, welche sich wiederum stark auf Übertragungs- und Kommunikationsmöglichkeiten von Informationen und Daten, wie die neue 5G Technologie, stützen. Die leistungsfähige Mobilfunktechnologie 5G ist mehr als nur ein neuer Mobilfunkstandard. Zu den vielen Vorteilen der 5G-Technologie gehören Merkmale wie die schnelle Übertragung großer Datenmengen, die geringe Latenz, die schnelle Verbreitung von Informationen und die Möglichkeit, eine im Vergleich zu anderen Funkstandards deutlich größere Anzahl von Endgeräten einzubinden. Dagegen decken andere Netzwerktechnologien teilweise nur einige der genannten Vorteile ab. Die 5G-Technologie bietet das Potenzial, die Kommunikation in Bereichen wie Telemonitoring oder Telemedizin zu optimieren und die Art und Weise, wie die Gesundheitsversorgung im 21. Jahrhundert erbracht werden wird, zu verändern. Vor diesem Hintergrund wird in dem Projekt 5G4Healthcare entlang der gesamten Versorgungskette – von Prävention über Diagnostik, Therapie, sowie Rehabilitation und Pflege – in definierten Use Cases mit einem mehrdimensionalen Untersuchungsansatz herausgearbeitet, welche mehrwertstiftenden Effekte sich durch digitale Lösungen in der ländlichen Gesundheitsversorgung realisieren lassen und insbesondere, welche Rolle die 5G-Technologie dabei spielen kann.

Abstract

In the context of digitisation, the political, economic, social and technological framework conditions have been undergoing rapid change for years, which has now also been reflected in the healthcare sector. Changes in traditional healthcare systems are driven by new information and communication technologies (ICT), which make advanced healthcare services available anywhere and at any time for variety of conceivable use cases. These technologies include advanced digitisation concepts and approaches to virtualization, which in turn will strongly rely on transmission and communication capabilities of information and data, such as those offered by the new 5G technology. The high-performance 5G mobile communications technology is more than just a new mobile communications standard. Amongst the many advantages of 5G technology are main features such as high-volume data transmission, low latency, rapid diffusion of information, and the possibility to connect a significantly larger number of devices compared to other radio standards. Other network technologies, on the other hand, partially cover only some of the aforementioned advantages. The 5G technology offers the potential to optimise communication for areas such as telemonitoring or telehealth and to change the way healthcare will be delivered across the 21st century. Against this background in the project 5G4Healthcare along the entire healthcare value chain – from prevention to diagnostics, therapy, rehabilitation and care – defined use cases are to be used to determine with a multidimensional investigation approach which value-added effects can be realised through digital solutions in rural healthcare and, in particular, which impact the 5G technology can provide in this context.

1 Einleitung

Die traditionellen Gesundheitssysteme befinden sich in einem massiven und sich stetig beschleunigendem Wandel. Treiber dieser Veränderungen sind maßgeblich neue Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT), mit deren Hilfe hoch entwickelte Gesundheitsdienste zeit- und ortsunabhängig verfügbar sind. Die Entwicklung des Gesundheitswesens erfolgt synchron auf verschiedenen Ebenen. Das digitale Gesundheitswesen unterstützt die Reform der Gesundheitssysteme, von einem krankenhauszentrierten und krankheitsspezifischen hin zu einem patientenzentrierten Ansatz, in dem die multidimensionalen Bedarfe der Patientinnen und Patienten systematisch erfasst und die Leistungen von einem koordinierten, multidisziplinären Team sektorenübergreifend erbracht werden.[1] Des Weiteren emergiert die Generierung und Verarbeitung gesundheitsbezogener Daten von einer intra-institutionellen zu einer omnipräsenten Verfügbarkeit und bildet die Grundlage hin zu einer individualisierten Diagnostik und Therapie. Der Fokus der Gesundheitssysteme entwickelt sich weg von der Behandlung einzelner Krankheiten hin zur kontinuierlichen Prävention bzw. Verhinderung von Krankheiten. Dieser neue Ansatz, welcher als „P4“-Medizin (personalisiert, präventiv, prädiktiv, partizipativ) bezeichnet wird, erfordert innovative Technologien, um Mehrwerte für den Patienten schaffen zu können [2]. Derartige Technologien umfassen fortschrittliche Digitalisierungskonzepte und Virtualisierungsansätze, welche sich wiederum stark auf Übertragungs- und Kommunikationsmöglichkeiten von Informationen und Daten, wie die neue 5G-Technologie, stützen. Der Einsatz der 5G-Technologie wird darüber hinaus den Zugang der Patienten zu Gesundheitsdiensten unabhängig von ihrer geographischen Lage verbessern sowie gleichzeitig die Benutzerfreundlichkeit und den Komfort. Das Anspruchsdenken der Bevölkerung an das Gesundheitssystem steigt: Die Bevölkerung erwartet eine sofortige und personalisierte Betreuung auf höchstem Niveau – auch im ländlichen Raum. Insbesondere in diesen Regionen, mit abnehmender medizinischer Versorgungsdichte vor Ort, ermöglicht 5G einen standortunabhängigen Zugang zum besten medizinischen Expertenwissen, wodurch Kosten für die Gesundheitsüberwachung, -diagnostik und -therapie gesenkt und die Qualität der Patientenversorgung verbessert werden kann.

2 Projekteinordnung und -ziele

Das Projekt 5G4Healthcare zielt darauf ab, Möglichkeiten und Grenzen der Verbesserung der Effektivität und Effizienz in der (ländlichen) Gesundheitsversorgung durch 5G auszuloten und Handlungsempfehlungen für skalierbare Lösungen abzuleiten. Primär bezogen auf die beiden Use Cases „Homecare“ und „Integrierte Versorgung“ sollen Chancen und Potenziale der 5G-Technologie in der

Gesundheitsversorgung erforscht werden. Beispielsweise wird erforscht, wie durch 5G grundsätzlich ein Impact auf die medizinische Behandlungsqualität erzielt werden kann und welche wirtschaftlichen Potenziale 5G in der Gesundheitsversorgung realisieren kann. In welchen Anwendungsfällen die größten Effekte erzielt werden und wo alternative Technologien vorzuziehen sind, stellen weitere Forschungsfragen dar. Mit der Beantwortung der Forschungsfragen wird konkretisiert, wie durch 5G in den untersuchten Use Cases entlang der Healthcare Value Chain ein Beitrag zu mehr Effektivität und Effizienz geleistet werden kann. Neben der Beantwortung der inhaltlichen Forschungsfragen sollen insbesondere konkrete Handlungsempfehlungen für Politik und Gesundheitswirtschaft zur Realisierung und Skalierung in den realen, komplexen Strukturen des Gesundheitswesens erarbeitet und ein Verwertungs- und Verstärkungskonzept abgeleitet werden. Es wird ein Ökosystem aufgebaut, welches dazu dient, innovative Lösungen zu erproben, neue Versorgungsprozesse und -modelle zu etablieren, sowie eine Blaupause für eine zukunftsorientierte Gesundheitsversorgung im ländlichen Raum abzuleiten. Die Ergebnisse des Projektes 5G4Healthcare fließen anwendungsorientiert und nachhaltig in die gesundheitswirtschaftliche Praxis ein.

3 Was unterscheidet 5G von den derzeitigen Technologien

Die leistungsfähige Mobilfunktechnologie 5G ist mehr als nur ein neuer Mobilfunkstandard. Das Potenzial in der Wertschöpfungskette dieser Technologie ist immens und wird alle Bereiche der Wirtschaft und Gesellschaft erreichen. Beispiele für mögliche Einsatzgebiete sind die Industrie, autonome Fahrzeuge, das Internet der Dinge (IoT) und das Gesundheitswesen. Zu den vielen Vorteilen der 5G-Technologie gehören Merkmale wie die schnelle Übertragung großer Datenmengen, die geringe Latenz, die schnelle Verbreitung von Informationen und die Möglichkeit, eine im Vergleich zu anderen Funkstandards deutlich größere Anzahl von Endgeräten einzubinden. Dagegen decken andere Netzwerktechnologien teilweise nur einige der genannten Vorteile ab. WLAN beispielsweise bietet hochvolumige Datenübertragungsfunktionen, garantiert aber keine Datenübertragungszeiten. Zudem fehlen die Mobilität und ein nahtloser Übergang zwischen lokalen und mobilen Netzwerken. Im Gegensatz dazu sorgen Feldbus-Kommunikationstechnologien für eine verzögerungsarme und äußerst zuverlässige Kommunikation, es fehlen aber oftmals hochvolumige Übertragungskapazitäten. 5G vereint diese Funktionen und integriert sie zu einer Kerntechnologie. Im Wesentlichen lassen sich drei Anwendungsgruppen unterscheiden, in denen 5G zum Einsatz kommen kann. Abbildung 1 zeigt diese Anwendungsgruppen im 5G-Dreieck.

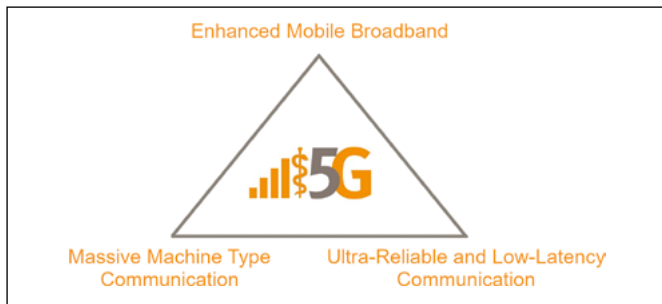


Abbildung 1: „5G Dreieck“

Enhanced Mobile Broadband (eMBB): Hochbitratige Anwendungen wie ultrahocho aufgelöstes Videostreaming sind bei vielen Nutzern in einer Zelle auf hohe Bandbreiten pro Nutzer und hohe Kapazitäten in einer Zelle angewiesen. Die maximale Spitzen-Download-Datenrate kann bis zu 10 Gbit/s erreichen, während die garantierte Download-Datenrate im Bereich von 1 Gbit/s liegen wird. So können hochauflösende Bilder und Videos drahtlos übertragen und heruntergeladen werden. [3]

Ultra-Reliable and Low-Latency Communication (URLLC): Sicherheitskritische Anwendungen, z. B. aus der medizinischen Versorgung, sind auf höchste Verbindungsqualität, Verfügbarkeit und Störfestigkeit (Quality of Service) angewiesen. Zudem benötigen sie taktile Netze, die missionskritische Daten in Echtzeit übertragen. 5G bietet die Möglichkeit, die Latenzzeit für die Datenübertragung auf 1ms zu reduzieren. Bei korrektem Netzwerkdesign und -konfiguration beträgt die Verfügbarkeit bis zu 99.999%, das bedeutet, in diesem Prozentsatz der Zeit erbringt das 5G-Netz seine Dienste ohne gravierende Verschlechterung. [3], [4]

Massive Machine Type Communication (mMTC): Durch die Vernetzung von Alltagsgegenständen wird das Internet der Dinge Realität. Die dadurch mögliche Kommunikation mit Steuerungszentralen stellt hohe Anforderungen an die Netzkapazität für das Management mehrerer hunderttausend angemeldeter Geräte pro Zelle. Die Anzahl der gleichzeitig aktiven 5G-Verbindungen innerhalb eines begrenzten Gebietes beschreibt die Verbindungsdichte. 5G unterstützt bis zu 1 Million synchrone Nutzer pro km². [3], [4]

Weiterhin zeichnet sich 5G durch eine verbesserte Energieeffizienz um den Faktor 100 gegenüber dem Vorgänger 4G. Die Batterielebensdauer von 5G-Geräten mit geringem Datenvolumen kann bis zu 10 Jahre erreichen. [5] 5G-Netze können berücksichtigen, dass unterschiedliche Nutzer und Anwendungen einen sehr individuellen Bedarf an Geschwindigkeiten, Datenraten und Kapazitäten haben. Mit einer gemeinsamen physischen Infrastruktur können mehrere logische und virtuelle Netze parallel betrieben und verwaltet werden. In den separaten Slices können die unterschiedlichen Anforderungen definiert werden. Dieses sogenannte Network Slicing generiert die Kapazität, die gerade gebraucht wird. Während ein

Internet dann z. B. besonders viel Bandbreite für die Übertragung von medizinischen Bilddaten beispielsweise in Form von MRT- und CT-Bildern hat, kann das andere für roboterunterstützte Operationen eingesetzt werden (Stichwort: geringe Latenz).

4 Überblick Methoden und Ressourcen im Projekt 5G4Healthcare

Durch ein modulares Methoden-Set werden die Projektziele von 5G4Healthcare realisiert und auf die Arbeitspakete im Projektablauf verteilt. Neben der Gesamtprojektleitung existieren Teilprojekte für das Testbed am Gesundheits- und Medizintechnik Campus der OTH Amberg-Weiden sowie für das Living Lab am Klinikum Weiden und ein mobiles Living Lab. Zusammengefasst stellen diese Teilprojekte des physischen Netzaufbaus den methodischen Anker dar, zu dem sich jeweils die Use Cases / Szenarien sowie die dazugehörigen Workstreams zuordnen lassen. (Abbildung 2)



Abbildung 2: Überblick Methoden und Ressourcen

Entlang der gesamten Versorgungskette von Prävention über Diagnostik, Therapie sowie Rehabilitation und Pflege wird in definierten Use Cases und mit einer systematischen Vorgehensweise herausgearbeitet, welche mehrwertstiftenden Effekte sich durch digitale Lösungen in der ländlichen Gesundheitsversorgung realisieren lassen und insbesondere, welche Rolle die 5G-Technologie dabei spielen kann. Den Kern und Ausgangspunkt der Erprobung der 5G-Technologie bildet ein Testbed am Gesundheits- und Medizintechnik Campus der OTH Amberg-Weiden. Es werden Szenarien konzipiert, anwendungsorientiert getestet und im Anschluss mehrdimensional evaluiert. Der Fokus liegt auf den potenziellen Möglichkeiten der neuen 5G-Technologie in der Gesundheitsversorgung. Der inhaltliche Schwerpunkt der ausgewählten Use Cases liegt auf den Themen „Homecare“ und „Integrierte Versorgung“, anhand ausgewählter Kriterien erfolgt zudem eine Granularisierung zu konkreten Szenarien. Die Auswahl dieser Szenarien in den Use Cases erfolgt unter den Gesichtspunkten Prävalenz und Inzidenz von Indikationen, Bezug zu zukünftigen Herausforderungen des Gesundheitssystems (demographischer Wandel, Multimorbidität, etc.) und operative, prozessuale Kriterien von Indikationen (Monitoring, Begleitung und Nachsorge, etc.). Vor dem Hintergrund der Charakteristika und Vorzüge der 5G-Technologie ist eine Vielzahl exemplarischer Anwendungsfälle und

Einsatzgebiete denkbar, die durch das Potenzial von 5G in hohem Maße profitieren. Für die Auswahl der in den Use Cases und Szenarien eingesetzten Applikationen / Technologien und konkreten Anwendungen wird ein mehrstufiger Scoring-Ansatz angewendet. Insgesamt wird so aus der Kombination des Anwendungsfalls und der Technologie eine Patient Journey aufgebaut, die den Weg eines Patienten durch alle Phasen seiner Behandlung visualisiert. Zur Identifikation möglicher Engpässe einerseits oder Akzeleratoren andererseits findet eine dezidierte Einschätzung der Relevanz der zu untersuchenden Workstreams je Szenario statt.

Die anschließende Evaluation insbesondere hinsichtlich der Effekte des Technologieeinsatzes in der Gesundheitsversorgung erfolgt mit einem eigens entwickelten Bewertungs- und Reifegradmodell.

Dabei wird ein ganzheitlicher Ansatz und ein Bewertungsinstrument auf Basis bestehender Modelle und Methoden (Reifegradmodell, HTA, Qualitätsdimensionen, Quadruple Aim) entwickelt, in dem u. a. die zu untersuchenden Technologien in den Qualitätsdimensionen Struktur, Prozess und Ergebnis systematisch strukturiert und bewertet werden. Hierauf basierend werden schließlich Verbesserungspotenziale und Handlungsempfehlungen für Gesundheitspolitik und -wirtschaft abgeleitet.

5 5G für die Gesundheit – Wie Menschen davon profitieren

5G-Technologien werden die Kommunikation in Bereichen wie Telemonitoring oder Telemedizin optimieren und in Kombination mit weiteren Elementen der Digitalisierung im Gesundheitswesen die Art und Weise, wie die Gesundheitsversorgung im 21. Jahrhundert erbracht werden kann, fundamental verändern. 5G-Anwendungen im Gesundheitswesen müssen grundlegende Anforderungen wie Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit für eine schnelle und großvolumige Datenübertragung erfüllen. Vor dem Hintergrund der Charakteristika und Vorzüge der 5G-Technologie ist eine Vielzahl exemplarischer Anwendungsfälle und Einsatzgebiete denkbar, die durch das Potenzial von 5G in hohem Maße profitieren. Zur konkreten Bewertung der zum Einsatz kommenden Technologien können beispielsweise – so auch im Projekt 5G4Healthcare – die Indikatoren 5G-Eigenschaften (Enhanced Mobile Broadband, Ultra-Reliable and Low-Latency Communication, Massive Machine Type Communication), der Versorgungsimpact und die zeitliche Umsetzung herangezogen werden. Der Versorgungsimpact beschreibt, wie stark das beschriebene Szenario der Gesundheitsversorgung von 5G profitieren wird. Der Implementierungszeitraum gibt den Zeitraum an, wie schnell das Szenario in der Praxis eingesetzt werden könnte, vorausgesetzt, dass 5G grundlegend für die Szenarien-Beteiligten verfügbar wäre. Die beiden nachfolgenden Szenarien stellen

Beispiele dar, wie die 5G-Technologien die Gesundheitsversorgung verändern und wie die Menschen davon profitieren können.

Augmented-Reality-Brille im Wundmanagement

5G-basierte, freihändige Augmented-Reality Technologie hat ein großes Potenzial für medizinische Fernkonsultationen in Echtzeit unter hygienischen Anforderungen. Es führt zu einer Verbesserung der Kommunikation zwischen Pflegediensten und medizinischen Fachkräften. Die Verwendung von AR-Brillen findet z. B. Einsatz bei der Unterstützung der Wundheilung. Mit einer Augmented-Reality-Brille startet die Pflegekraft eine Live-Übertragung mit einem Wundexperten, der aber nicht vor Ort ist. Die AR-Brille ermöglicht es, die Sicht auf die Wunde über die eingebaute Kamera auf den Bildschirm des Wundexperten zu übertragen, indem die Pflegekraft ihren Fokus genau auf den zu analysierenden Bereich richtet. Die Bilder ermöglichen dem Experten eine Ferndiagnose der Wunde in Echtzeit zu erstellen.

Fahrerlose Transportsysteme und unbemannte Luftfahrzeugsysteme in der Gesundheitslogistik

Aufgrund ihrer Flexibilität sind bodengebundene Fahrerlose Transportsysteme (FTS) und unbemannte Luftfahrzeugsysteme, wie z. B. Drohnen, innovative Versorgungslösungen, um eine hohe Logistikverfügbarkeit und -leistung in und zwischen Krankenhäusern und Seniorenheimen zu gewährleisten. Neben der Unterstützung logistischer Aufgaben zwischen lokal verteilten Klinikstandorten, beispielsweise beim Transport von Blutproben aus Kliniken in ein zentrales Labor, können diese Systeme auch private logistische Aufgaben wie die Lieferung von Medikamenten aus Apotheken in die Patientenwohnungen unterstützen. Während FTS derzeit in Kliniken im täglichen Einsatz sind, befinden sich unbemannte Luftfahrzeuge für zivile Anwendungen noch in einem sehr frühen Stadium. Sie sind mit Informationstechnologien wie Beacons, 3D-Kameras oder Echtzeit-Ortungstechnologien für Lokalisierung, Navigation, Umgebungserkennung und Kollisionsvermeidung ausgestattet. Die zahlreichen Fahrzeugsensoren senden ihre Daten, vor allem Bilder, über 5G-Mobilfunknetze in sehr kurzer Latenz. Die Informationen werden analysiert, in Anweisungen an den Servern übersetzt und an die Fahrzeuge zurückgegeben.

6 Ausblick

Aktuell ist das Projekt 5G4Healthcare in der ersten der drei Projektphasen weit fortgeschritten, d. h. die zu untersuchenden Szenarien wurden definiert, modelliert, priorisiert und ausgewählt. Parallel dazu ist die Konzeptionsphase von der Etablierung der technisch-infrastrukturellen Rahmenbedingungen geprägt, d. h. dem Aufbau eines 5G-Campus-Netzes am Campus Weiden sowie

analog der entsprechenden technischen Voraussetzungen in den Living Labs.

Im Jahr 2021 wird mit der zweiten Projektphase der Schwerpunkt auf der Implementierung und Erprobung der Szenarien liegen. Diese werden aus verschiedenen Perspektiven untersucht, d. h. in der praktischen Durchführung und Erprobung werden u. a. gesundheits-

ökonomische Effekte, datenschutzrechtliche Aspekte, Fragestellungen der Logistik, Themen der IT-Sicherheit oder ethische Gesichtspunkte beleuchtet. Hiermit wird die Grundlage für die umfassende Evaluationsphase gelegt, aus der konkrete Handlungsempfehlungen für den optimalen Einsatz der 5G-Technologie im Gesundheitswesen abgeleitet werden sollen.



Die Teammitglieder von links nach rechts:

4. Reihe: Benedict Keller, Johannes Dotzler, Michael Gleißner
3. Reihe: Josefine Rößle-Kress, Venkata Sai Prithvi Raj Thipparaju, Philip Bertelshofer, Petra Thomas
2. Reihe: Prof. Dr. med. Clemens Bulitta, Prof. Dr. rer. pol. Steffen Hamm
1. Reihe: Anna-Lena Dahmen, Ann-Christin Schleser, Juliana Hartig

Referenzen:

- [1] Braeseke G., Huster S., Pflug C., Rieckhoff S., ströttchen J., Nolting H.-D., Meyer-Rötz S., 2018, Berlin, Studie zum Versorgungsmanagement durch Patientenlotsen
- [2] Hood L., Friend SH., 2011, Predictive, personalized, preventive, participatory (P4) cancer medicine. Nature Reviews Clinical Oncology 8, S. 184-187
- [3] BMVI (Hrsg.), 2017, 5G-Strategie für Deutschland, Eine Offensive für die Entwicklung Deutschlands zum Leitmarkt für 5G-Netze und -Anwendungen
- [4] BMWi (Hrsg.), 2020, Berlin, Leitfaden 5G-Campusnetze – Orientierungshilfe für kleine und mittelständische Unternehmen
- [5] ITU-R (Hrsg.), 2015, Recommendation ITU-R M.2083-0, IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond

Fördergeber:

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kontakt:



Prof. Dr. rer. pol. Steffen Hamm

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen
und Gesundheit
Professur für Gesundheitswirtschaft
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

s.hamm@oth-aw.de



Ann-Christin Schleser, B.Eng.

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

an.schleser@oth-aw.de



Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen
und Gesundheit
Dekan
Leitung Institut für Medizintechnik (IfMZ)
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

c.bulitta@oth-aw.de

Securing Low-Power Industrial Devices in Critical Infrastructures

Simon Liebl, M.Eng.
Leah Lathrop, B.Eng.
Prof. Dr. Andreas Aßmuth
Prof. Matthias Söllner

Zusammenfassung

Durch das Internet der Dinge werden immer mehr Geräte aus dem Automatisierungsbereich mit dem Internet verbunden. Das sind hauptsächlich leistungsschwache Sensoren und Aktoren, die physikalische Prozesse steuern. Dies führt zu Sicherheitsrisiken in industriellen Kontrollsystemen, die in diesem Bericht beschrieben werden. Die Herausforderungen, die durch das Absichern dieser Geräte entstehen, werden skizziert. Physical Unclonable Functions, die eine vielversprechende Gegenmaßnahme sind, werden kurz vorgestellt.

Abstract

Through the Internet of Things, more devices from the automation sector are connected to the Internet. These are mainly low-power sensors and actuators that control physical processes. This results in security risks in industrial control systems, which will be described in this paper. The challenges involved in securing these devices are outlined. Physical Unclonable Functions, which are a promising countermeasure, will be briefly presented.

1 Introduction

The industry has recognized the benefits of the Internet of Things (IoT) and is already adapting them, for instance to increase productivity or optimize energy consumption. By integrating the Industrial Internet of Things (IIoT), Industrial Control Systems (ICSs) are now also connected to cloud services via the Internet. As a result, the previously isolated Operational Technology (OT) is exposed to increased risks.

The term OT is used to emphasize the difference to IT. Not only the field of application differs but also the devices and communication protocols used. OT includes Programmable Logic Controllers (PLCs), sensors, and actuators. The low-power embedded devices are usually specialized for a specific application, which considerably limits their flexibility. Security measures have not been widely implemented due to cost and time pressure. Their task within an ICS is to control and monitor physical processes. Based on sensor values, such as temperatures or positions, decisions are made on how actuators, like conveyor belts or robots, must react.

Safety is the highest priority for employees and machines. However, the internet connection of IIoT devices results in additional threats that could jeopardize safety by making it easier for attackers to take control and manipulate them. Malfunction of OT devices can have considerable consequences because people can be injured or machines destroyed. If these devices are used in critical infrastructures, even worse scenarios are conceivable. Each government itself determines which processes and sectors are particularly worth protecting and therefore count as critical infrastructure. Germany, for example, specifies nine sectors including energy supply, information technology and communication, and water among others [1]. Cyberattacks have already been carried out on these sectors. In December 2015, the Ukrainian power grid was attacked, for example. Attackers compromised the computers and Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) systems of a regional power distribution company leaving 225,000 people without power for several hours [2].

In our research project “Intelligent Security for Electrical Actuators and Converters in Critical Infrastructures (ISEC)” with two industrial partners, we want to jointly develop

solutions to prevent such incidents. The Franconian companies Grass Power Electronics GmbH and SIPOS Aktorik GmbH produce battery storage combined with electric vehicle chargers and electrical actuators that are both used in critical infrastructures. As the first step in this project, the threats to IIoT devices have been analyzed. The analysis must take into account that especially in critical infrastructures the complexity of attacks is not limited. As already described, embedded devices are not comparable to conventional IT devices. Therefore, the characteristics of these devices must be analyzed and considered during the development of threat mitigation measures to design applicable solutions. Physical Unclonable Functions (PUFs) are a promising solution to prevent hardware and software attacks. In this project, we will examine the possible applications and their feasibility.

2 Threats to and from IIoT Devices

Attacks such as those that happened in Ukraine are not singular cases. Recently, attackers attempted to poison Israel's drinking water system by increasing the chlorine level [3]. Therefore, it is essential to understand which threats exist and how attackers could proceed. In the following section, various attack vectors will be presented based on the life cycle of an IIoT device, as shown in Figure 1.

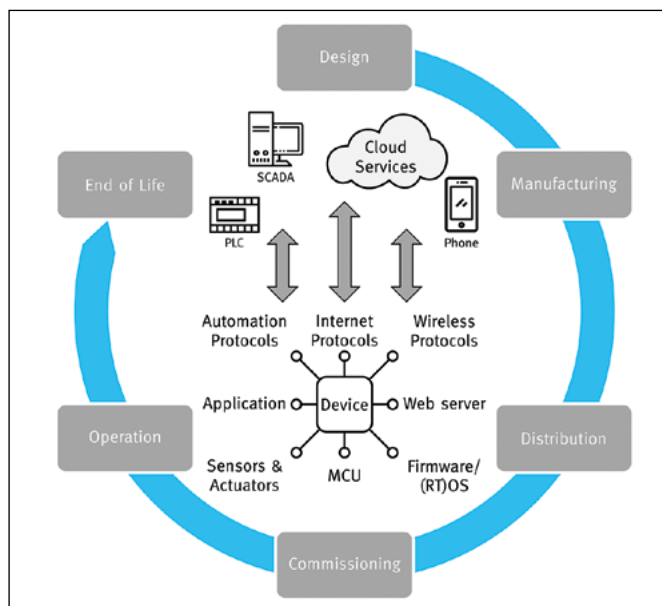


Figure 1: Life cycle of an IIoT device

The life cycle of an IIoT device starts with its design. The design complexity steadily increases among other reasons because both automation and internet protocols must be supported. Third-party software libraries are usually utilized to keep the development effort low. Vulnerabilities in these often widespread libraries can subsequently result in threats. In June 2020, numerous vulnerabilities were found in Treck's TCP/IP stack that is used in many ICS components [4]. These vulnerabilities enable remote code execution, enabling full control of the device.

An attack on the supply chain is also possible. During manufacturing, cryptographic keys are generated that are later required for secure updates or encrypted communication with the cloud. However, the database of devices and associated keys must obviously also be known to the cloud. These keys could be compromised by vulnerabilities in the cloud. As a result, unauthorized access can be gained to production data and firmware updates. The latter implies a theft of intellectual property.

Another step in the supply chain is the distribution. Not only on the way from manufacturer to customer, but also from supplier to manufacturer, devices or parts can be manipulated. Such an attack was demonstrated on the Chaos Communication Congress in late 2019 [5]. The attackers were able to reroute orders from a Microcontroller Unit (MCU) distributor. After the installation of a backdoor, the MCUs could be shipped to the actual customers without them noticing.

During the commissioning of large production plants, there are often many different companies and their subcontractors. This leads to the loss of ability to supervise the devices. Attackers could, in principle, redirect the connection to the manufacturer's cloud service via a computer controlled by them as a starting point for a man in the middle attack. There would also be enough time to overwrite the firmware via hardware interfaces like JTAG or to conduct a Side-channel Attack (SCA) to extract cryptographic keys.

The most serious damage can be caused during operation. A malfunction can stop production, destroy a machine or injure people resulting in a safety violation. Attackers can achieve this through various ways:

- design flaws or bugs (in libraries),
- physical manipulation of sensors or actuators,
- communication manipulation,
- misconfigurations, e.g., default password, or
- web-based vulnerabilities, such as cross-site scripting.

Attackers can also have other intentions. Botnet operators could use the devices for Distributed Denial of Service (DDoS) attacks or the mining of cryptocurrencies. In the former, the attacks could be against other devices, SCADA systems or the cloud, which could limit the real-time capability of the systems. There is already ransomware that is specialized in OT. For instance, an attack on a pipeline operator was reconstructed just recently [6]. The attackers first gained access to the IT and then pivoted to the OT. In addition to encrypted data, this caused a production stop for two days.

After the device has reached its end of life, the device should be properly decommissioned. All data must be overwritten to prevent the theft of confidential data. This also needs to be communicated to the manufacturer's

cloud so that the identity of the original device cannot be taken over by a cloned one that tries to get firmware updates.

3 The Challenges of Threat Mitigations

This section describes the measures required to mitigate the threats. Prior to this, the characteristics of IIoT devices are outlined in order to identify the challenges in implementing the measures.

Embedded devices are typically based on a low-cost MCU; the clock rate is usually in the double-digit MHz range. The size of the flash memory varies from a few kilobytes up to a few megabytes. MCUs are selected very specifically depending on the application, to ensure that they support sufficient features such as interfaces or timers. Security mechanisms are rarely integrated, and if they are, there is often a lack of the other just mentioned features. The controllers run a proprietary real-time operating system that must react to changes in sensor values in time to ensure safety. Controllers often run for years without being powered down because a shut down of production is associated with monetary loss. Therefore, these devices often use old software versions without any security patches.

A security level comparable to IT is only possible through high effort and costs, which is not always possible for economic reasons. Ultimately, customers must also accept security measures. In large plants there are often thousands of sensors and actuators. The time and effort required to install and operate them must not be too high.

The authentication of users is an example of this challenge. The measure is necessary to allow only authorized personnel to access the device. However, the input capabilities of these devices are often limited to buttons that complicate the entry of user names or passwords. It is also often not possible to verify the authenticity of other devices, such as PLCs, since this is not supported by the protocols. Event logging is important for detecting or reconstructing a security breach. Changes to the user management, critical states, and logins should be logged, but no sensitive personal data must be included. The data should preferably be stored on a separate, tamper-resistant memory with restricted access. This is not easy to implement on an embedded device with very limited memory capacity. Solutions are required to efficiently store the data and back it up on external resources, such as a cloud. The use of cryptography is inevitable. It is required for securely storing data, performing encrypted and signed firmware updates, and encrypted and authenticated communication. However, many algorithms are not applicable for embedded devices regarding their speed, RAM, and flash size. This requires so-called “lightweight cryptography.” However, the search for suitable algorithms and their standardization is not completed yet [7]. The hardware

must also be protected. This includes, for instance, the USB interfaces, which must be protected from bad USB devices, such as Hak5's USB Rubber Ducky or Kill USB sticks. Cryptographic keys should also be stored securely, e.g., in Trusted Platform Modules (TPMs) or with PUF. However, their integration into proprietary operating systems causes considerable effort.

4 Physical Unclonable Functions

Hardware security may not be what first comes to mind when considering cybersecurity. However, it is a prevalent issue. A recent study showed that hardware attacks are becoming a reality for many companies. 63% of decision makers from 307 different companies reported data loss or breach due to an exploited vulnerability in hardware or silicon level security within the last 12 months [8]. An example of an invasive hardware attack is the probing attack. The casing of an integrated circuit is removed and small probes are used to extract the contents of non-volatile memory. Non-volatile memory frequently contains sensitive information such as cryptographic keys. The retrieval of the information could aid an attacker in compromising the integrity and confidentiality of data sent to and from the device.

PUFs make probing attacks more laborious. Analogous to biometrics such as fingerprint detection or retinal scan, a probabilistic characteristic of a physical object is used to derive a unique cryptographic secret. Semiconductor components in electrical devices contain production tolerances which are usually unwanted and cannot be controlled. Although they are only visible at a microscopic level they manifest themselves in small differences in physical sizes, e.g., the same voltage may vary slightly between two devices. This enables the individualization of different devices which are otherwise constructed in exactly the same way.

A wide variety of different PUFs have emerged including the arbiter PUF as introduced by Lim [9]. Figure 2 shows how a single bit can be derived to illustrate the principle of the arbiter PUF. The principle of the arbiter PUF can be used to derive all 128 or 256 bits needed for strong cryptographic keys. A chain of electrical components, each having two inputs and two outputs is formed resulting in two race tracks for electrical signals. When applying an electrical signal to both inputs at exactly the same time, the signals should theoretically arrive synchronously. Contrary to what might be expected, the arrival times of the electrical signals are minutely different, due to the tolerances from the semiconductor production process. The outputs are encoded as “0” or “1” and the bit is derived based on which output the signal arrived at first. The output of a PUF is called the response. A third input allows for the configuration of the paths; each electrical component can be configured as either straight or switched. Different configurations for PUFs are called challenges. Pairs of challenges and responses are called challenge-response pairs.

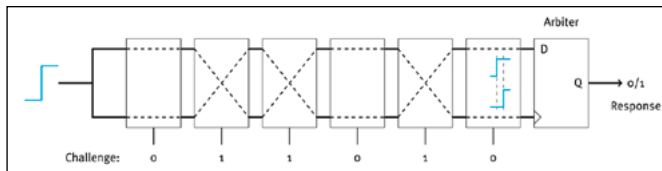


Figure 2: Arbiter PUF

A cryptographic secret can be derived from a PUF and used directly to substitute one which was stored in non-volatile memory. The PUF response can alternatively be used as a Key Encryption Key (KEK) to encrypt sensitive information stored in non-volatile memory including cryptographic keys. In this case, the complexity of the attack will increase because the PUF key is needed to decrypt the information. Depending on the design and implementation of the PUF, attackers may not even be able to retrieve the KEK. The PUF key is only used when the device is on and cannot be found anywhere on the device when it is powered off. Traditional security protocols can then be used. Several designated security protocols have been designed for PUFs. These allow the devices to profit from additional advantages offered by PUFs.

5 Conclusion and Further Work

IIoT devices offer many advantages but increase the risks for ICSs. The safety of personnel and machines could be endangered by a malfunction caused by a malicious attacker, among many other threats. Throughout the life-cycle of a device, attackers may be able to compromise it. Many IIoT devices lack security mechanisms so far. However, due to their special characteristics, it is not easy to implement these mechanisms. PUFs offer an attainable countermeasure to certain hardware attacks.

In this project, a comprehensive threat and vulnerability analysis was conducted for the devices of both industrial partners. In the further course of the project, we aim to develop mitigation measures that can be implemented on their low-power devices. The results of the efforts of securing the devices in this research project are described in two publications. One publication focuses on the threat analysis of IIoT devices [10]. The other focuses on the integration of PUFs to increase security [11].

References:

- [1] Federal Ministry of the Interior, Building and Community, Ed., “Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen” (National Strategy for the Protection of Critical Infrastructures), 2009.
- [2] R. Lee, M. Assante and T. Conway, “Analysis of the Cyber Attack on the Ukrainian Power Grid”, E-ISAC, 2016, URL: https://ics.sans.org/media/E-ISAC_SANS_Ukraine_DUC_5.pdf [accessed: 2020-12-08]
- [3] The Times of Israel, “Cyber attacks again hit Israel’s water system, shutting agricultural pumps”, July 17th, 2020, URL: <https://www.timesofisrael.com/cyber-attacks-again-hit-israels-water-system-shutting-agricultural-pumps/> [accessed: 2020-12-08]
- [4] M. Kol and S. Oberman, “Ripple20”, JSOF, White Paper, 2020, URL: https://www.jsof-tech.com/wp-content/uploads/2020/06/JSOF_Ripple20_Technical_Whitepaper_June20.pdf [accessed: 2020-12-08]
- [5] T. Roth, “36C3 – TrustZone-M(eh): Breaking ARMv8-M’s security”, Dec. 28, 2019, URL: https://media.ccc.de/v/36c3-10859-trustzone-m_eh_breaking_armv8-m_s_security [accessed: 2020-12-08]
- [6] Cybersecurity and Infrastructure Security Agency (CISA), “Ransomware Impacting Pipeline Operations”, February 18th, 2020, URL: <https://www.us-cert.gov/ncas/alerts/aa20-049a> [accessed: 2020-12-08]
- [7] National Institute of Standards and Technology, Ed., “Lightweight Cryptography”, 2019, URL: <https://csrc.nist.gov/projects/lightweight-cryptography> [accessed: 2020-12-08]
- [8] “BIOS Security The Next Frontier for Endpoint Protection”, 2019, URL: <https://www.dellemc.com/ja-jp/collaterals/unauth/analyst-reports/solutions/dell-bios-security-the-next-frontier-for-endpoint-protection.pdf> [accessed: 2020-12-08]
- [9] D. Lim, “Extracting secret keys from integrated circuits”, Master’s thesis, Massachusetts Institute of Technology, May 2004
- [10] S. Liebl, L. Lathrop, U. Raithel, M. Söllner, and A. Aßmuth, “Threat Analysis of Industrial Internet of Things Devices.” The Eleventh International Conference on Cloud Computing, GRIDs, and Virtualization, Proceedings, Nice, France, 25th to 29th October 2020, URL: https://www.thinkmind.org/index.php?view=article&articleid=cloud_computing_2020_2_30_28007 [accessed: 2020-12-08]
- [11] L. Lathrop, S. Liebl, U. Raithel, M. Söllner, and A. Aßmuth, “Securing the Internet of Things from the Bottom Up Using Physical Unclonable Functions.” The Eleventh International Conference on Cloud Computing, GRIDs, and Virtualization, Proceedings, Nice, France, 25th to 29th October 2020, URL: https://www.thinkmind.org/index.php?view=article&articleid=cloud_computing_2020_2_50_28009 [accessed: 2020-12-08]

Projektpartner:

SIPOS Aktorik GmbH, Altdorf
Grass Power Electronics GmbH, Nürnberg

Fördergeber:



Bayerisches Staatsministerium für
Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie

Kontakt:



Simon Liebl, M.Eng.

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

s.liebl@oth-aw.de



Leah Lathrop, B.Eng.

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

l.lathrop@oth-aw.de



Prof. Dr. Andreas Aßmuth

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

a.assmuth@oth-aw.de



Prof. Matthias Söllner

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

m.soellner@oth-aw.de

Zusammenfassung

Dieser Bericht stellt ein laufendes Projekt vor und spezifiziert die Gesamtarchitektur eines kryptografischen IoT-Gateways, das sich zwischen eingeschränkten IoT-Geräten und der Cloud befindet. Das Gateway kommuniziert mit der Cloud und implementiert MQTT über TLS. Auf der anderen Seite ermöglicht das Gateway den IoT-Geräten, eine Verbindung zum Netzwerk herzustellen, indem MQTT über QUIC, das derzeit noch von IETF entwickelt wird, implementiert wird. Die vorgeschlagene Implementierung könnte Zeit, Energie und Rechenleistung auf der Seite der eingeschränkten IoT-Geräte sparen, ohne deren Sicherheit zu beeinträchtigen.

Abstract

A big challenge for the Internet of Things (IoT)-Security is to implement high-end asymmetric cryptography while at the same time meeting the requirements of IoT devices due to their constrained resources. Instead of reducing the security level (e.g., by employing lightweight cryptographic primitives), this report presents a work-in-progress project and specifies the overall architecture of an IoT cryptographic gateway “IoT crypto gateway”, which sits in-between attached IoT devices and the cloud. The gateway communicates with the cloud implementing the Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) protocol over a TLS (Transport Layer Security) connection employing up-to-date asymmetric cryptography at a high security level. On the other hand, the gateway allows the IoT devices to connect to the network by implementing MQTT over the Quick UDP Internet Connections (QUIC) protocol, which is at the moment still being developed by the Internet Engineering Task Force (IETF). Since on transport layer, the gateway is fully transparent, the (logical) TLS connection in QUIC between the IoT devices and the gateway may save time, power and computation on the IoT device's side without compromising security.

1 Introduction

Through huge technological advances, society is moving towards an “always connected” paradigm. One wide concept associated with the “future Internet” is the Internet of Things (IoT). The IoT is a network where all kinds of electronic devices are connected to each other and provide the capability to interact. The “Thing” in IoT can be any device, for instance a phone or a small sensor node that is able to connect, transfer, receive or exchange data with the network [1].

The IoT converts the everyday world into a more flexible and accessible one. Thing, place and time do not matter anymore as long as there is access to the Internet. However, if the IoT devices are connected to the Internet without being protected properly, they may become vulnerable to attacks on the devices and the network itself. Thus, IoT security is a relevant aspect in the design of IoT protocols. For instance, the German Federal Office for Information Security (BSI) continuously warns against the potential attacks on the IoT and gives users possible countermeasures at hand in order to limit serious attacks

against IoT devices [2][3]. Moreover, Wenxiang et al. presented how to use multiple vulnerabilities to achieve a remote attack on some of the most popular smart speakers. The attack effects include silent listening, control of speaker speaking content, and other demonstrations, while offering no clue to the user that the device has been compromised [4].

I. Security Requirements for IoT

Various hardware mechanisms and software parameters must be taken in consideration in order to secure IoT devices. We list here the most important cryptographic ones.

- **Confidentiality:** the tunnel is private. Encryption is used for all messages after a simple handshake. Thus, the data is only visible to the endpoints (end-to-end encryption). A proper encryption mechanism is required to ensure the confidentiality of data in IoT [2][3].
- **Integrity:** the channel is reliable. It ensures that data contained in the device is not changed unnoticed during the transmission. Because of the constrained resources of IoT devices and network, the data, which is stored on an IoT node, could be vulnerable to integrity violation by compromising it [5].
- **Authentication and Authorization:** the tunnel is authenticated. A proper implementation of authentication and authorization results in a trustworthy environment, which ensures a secure environment for communication. The variety of authentication mechanisms for the IoT exists mainly because of the different heterogeneous underlying architectures and environments that support IoT devices. These environments pose a challenge for the definition of a global standard protocol for authentication in the IoT [2][3][5].

Additionally, there are non-cryptographic requirements for IoT devices, such as availability, which are not addressed here.

II. IoT Security Challenge

IoT devices are often resource-constrained, low-power, and have small storage. Thus, attacks on IoT architectures may result in an increase in energy consumption by flooding the network and exhausting IoT resources through redundant or forged service requests [6]. Moreover, cryptographic functionalities can be realized by implementing one of the two schemes: symmetric key algorithms or public key algorithms. In comparison, public key algorithms offer a totally different set of security features such as digital signatures and key exchange mechanisms, however at higher computational cost. Taking the constrained resources of IoT devices into account, the high overhead of public key cryptography has become

a major bottle-neck and triggered the use of lightweight cryptography. This, however, comes at the cost of a reduced security level [7].

In order to understand the overall approach to data security, there is a need to know about the security requirements for all key components of IoT systems, i.e., IoT devices, IoT users, the IoT gateway, communication channels and cloud applications. For instance, public key infrastructure may not be suitable for IoT environments as it becomes a computationally expensive task to calculate ciphertexts because of the high computational cost for asymmetric cryptography. On the other hand, asymmetric cryptography provides additional security functionalities against attacks [7][8].

2 Background

Two years ago, IETF finished the development of a new version of TLS, 1.3 [9]. Furthermore, the IETF is recently working on deprecating TLS 1.0 and 1.1 because these versions lack support for current and recommended cipher suites [10]. The primary goal of TLS is to secure the communication between two peers (client and server) by providing three basic properties: confidentiality, integrity and authentication. Note that other requirements, such as privacy, are not addressed by TLS and are typically not met when using TLS for IoT devices [2][3][9].

Currently, the IETF is working on developing the security of the QUIC protocol by integrating TLS 1.3 in it [11][12]. QUIC is a transport protocol developed by google, which reduces latency compared to TCP [13]. QUIC reduces a number of transport and application layers problems that occur in modern web applications, while requiring little or no modification from application writers [11][14]. In addition, QUIC was the first protocol that can create a secure connection implementing a 0-RTT handshake between the peers, which has been later adopted in TLS 1.3 with some improvements [9].

The DTLS protocol is based on TLS and provides security for UDP-based applications. The purpose of DTLS is to make only the minimal changes to TLS required to fix loosing or reordering the packets when implementing TLS over UDP (DTLS) [15]. Currently, IETF is working on developing the new version of DTLS, 1.3 [16]. However, the UDP-Based multiplexed and secure transport (QUIC) is different from DTLS. QUIC combines multiple data streams into a single flow of UDP packets and necessarily has to handle reordering and loosing packets, like TCP [11].

MQTT is a lightweight messaging protocol, which works over the transmission protocol TCP/IP and is at most used by IoT devices. For embedded devices, MQTT is highly recommended because it can work with limited processor and memory resources. In addition, through the Pub-

lish/Subscribe message pattern, the protocol provides one-to-many message distribution. The MQTT protocol itself supports only a username and a password to secure the communication between a server and clients. Any additional security, such as TLS, has to be added into the protocol individually [17].

3 Proposed IoT crypto Gateway

The storage and processing capabilities of an IoT device are restricted by the resources available, which are, for example, constrained due to size limitation, energy, and computational capability. Thus, these systems rely on IoT middleware to provide needed capabilities [18].

Traditionally, IoT devices may be connected to the cloud implementing two ways. First, the IoT devices may have the ability to securely communicate via TLS directly with the cloud (see Figure 1). In this way, both peers can perform a direct TLS-handshake between each other. Hence, the data can be secured in the private as well as the public network.

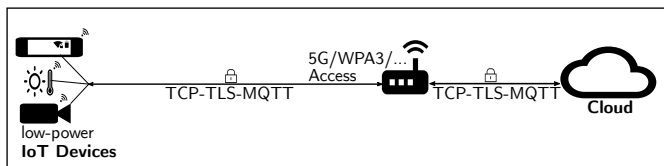


Figure 1: The IoT devices directly secure the connection with the cloud.

Second, the IoT devices might be connected to the cloud through a TLS (opt. reserve) proxy implementing a web server (e.g., NGINX), which only secures the data before emerging out to the public network (see Figure 2). Thus, the connection between the proxy and the cloud is secured via TLS, and data between the proxy and the IoT devices is transmitted without TLS. The proxy aims to reduce the risks on the IoT devices by securing the data only in the public network and to save the resources of the IoT devices by decrypting the data before emerging in the private network [19].

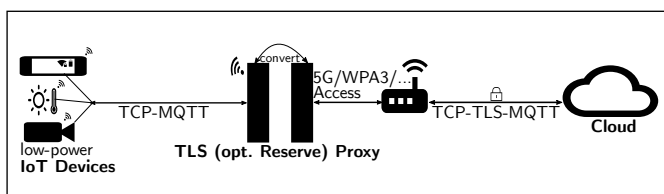


Figure 2: A TLS (opt. reserve) proxy between the IoT devices and the cloud.

Both communication scenarios have their drawbacks. By implementing the one in Figure 1, the IoT devices have to establish an (expensive) secured tunnel which is at a high security level not suitable for constrained IoT devices [9][20]. Furthermore, by implementing the

scheme in Figure 2, the connection between the proxy and the IoT devices does not provide the security requirements mentioned above in Section I. Additionally, some attacks, such as DDoS and MITM, are possible on the network [21][22].

To circumvent both problems, the IoT crypto gateway stands between the cloud and the IoT devices and communicates with the cloud as a client and with the IoT devices as a cloud. The gateway developed should perform as a translator between the IoT devices and the cloud using common protocols with the cloud and more efficient/suitable protocols with the IoT devices in order to save energy and improve performance. Precisely, this project aims to reduce the required security computations for the IoT devices by implementing MQTT over IETF QUIC in the IoT devices and developing an IoT crypto gateway, which has the ability to convert the communication from TCP-TLS-MQTT, which is the actual/common case, to QUIC-MQTT and vice versa.

When an IoT device attempts to connect to a cloud service in order to send or request some data, it first connects to the Internet using one of the Internet access protocols, such as 5G or WPA3. The IoT crypto gateway creates an Internet connection with the IoT device and starts to establish it in order to receive the data from the IoT device and transmit it to the cloud. Since QUIC does not support all TLS versions, the gateway is restricted to secure the communication with the IoT devices using TLS 1.3 and above. On the other side, the gateway secures the communication with the cloud implementing TLS 1.2 and above. However, for the reason that the transport layer (TCP-like) and TLS are integrated in QUIC, the IoT devices exchange less packets with the gateway. Hence, the battery life, the CPU computations and the resource usage in the IoT devices side may be better optimized. We summarize the benefits of our approach in Table 1.

Table 1: The proposed implementation compared with traditional connections secured directly with TLS.

#	IoT devices secured via QUIC	via TLS directly
Security	high	high
Latency	shorter	longer
Resource usage	lower	higher
Battery life	longer	shorter
Computations	lower	higher

The IoT crypto gateway establishes the connection using TCP and communicates with the cloud implementing MQTT over TLS (see Figure 3). At the same time, the IoT crypto gateway communicates with the IoT devices im-

plementing MQTT over IETF QUIC (+ TLS). Thus, the crypto gateway should perform with both peers and transmit the packets almost simultaneously.

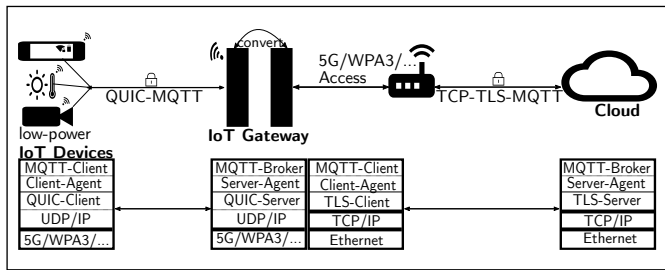


Figure 3: The IoT crypto gateway secures the connection between both peers implementing different layer protocols.

Assuming an MQTT-Publish message must be sent from one of the IoT devices to the cloud. Since the TLS is integrated in QUIC, the client can start to communicate with the gateway by sending its first packet ClientHello (CH), which is contained in the first QUIC message and should then be resent to the cloud. The gateway initiates establishing a TCP connection with the cloud and sends its CH message. Additionally, the gateway checks the CH packet sent from the client and performs a full TLS handshake if there was no previous connection with the peers before and a resumed TLS handshake using PSKs if the peers have connected with each other before. As a server, the gateway completes establishing the QUIC connection with the IoT device. Furthermore, as a client, the gateway completes the connection with the server implementing TLS over TCP (see Figures 4 and 5). The gateway may perform mutual authentication with both peers in order to hand high security for the IoT devices and may frequently use PSKs (TLS-PSK) with the IoT devices in order to optimize their performance. In addition, the gateway communicates with both peers individually and may therefore use different TLS versions, parameters and RTTs at the same time. Finally, the IoT device can communicate MQTT and send its MQTT-Publish message to the gateway, which will be sent to the server.

In case of using the TLS-PSK mechanism, the IoT gateway should check if the connection is a replay attack against the cloud and interrupt the connection/return back to a full TLS handshake if it is needed. In order to discover a replay attack, the IoT crypto gateway should implement one of the following three mechanisms: saving the session tickets which can be used once only and rejecting duplicates, recording a unique value (e.g., the random value) derived from the CH packets and refusing duplicates, or refusing old packets by checking the time in the CH packets to efficiently determine whether a CH was sent recently or it was an old packet. Furthermore, the IoT crypto gateway may check the validation of the PSKs, HMACs and signatures and interrupt/retry the connection if it is needed [9][12].

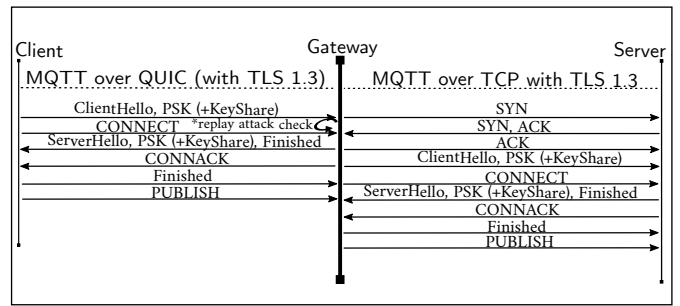


Figure 4: Packets exchange between the IoT client and the cloud using a full TLS 1.3 handshake.

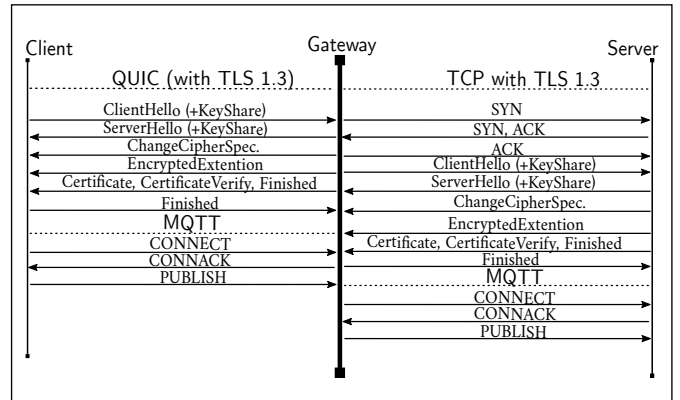


Figure 5: Packets exchange between the IoT client and the cloud using a 0-RTT TLS 1.3 handshake.

4 Conclusion

This report presented a cryptographic gateway between low-power IoT devices and a cloud service, which connects the device to the cloud service with a high security level while at the same time saving considerable resources on the side of IoT devices by using a transparent cryptographic gateway.

The proposed gateway opens in direction of the cloud a fully-fledged authenticated TLS tunnel and in direction of the IoT device a TLS connection using the new (IETF) QUIC protocol which exchanges less packets and employs after the first handshake a PSK. As a result, peers are able to establish a TLS connection with less resources for the IoT devices. Thus, the gateway may save time, power and computation on the IoT device's side without compromising security.

Referenzen:

- [1] F. Alkhabbas, R. Spalazzese, M. Cerioli, M. Leotta, and G. Reggio, “On the Deployment of IoT Systems: An Industrial Survey”, in 2020 IEEE International Conference on Software Architecture Companion (ICSAC), May 2020, pp. 17 – 24. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9095740>
- [2] BSI, “BSI – SYS: IT-Systeme – SYS.4.4 Allgemeines IoT-Gerät”. [Online]. Available: https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/ITGrundschutz/ITGrundschutzKompendium/bausteine/SYS/SYS_4_4_Allgemeines_IoT-Ger%C3%A4t.html
- [3] BSI, “BSI – IT-Grundschutz-Kompendium – Umsetzungshinweise zum Baustein SYS.4.4 Allgemeines IoT-Gerät”. [Online]. Available: https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/ITGrundschutz/ITGrundschutzKompendium/umsetzungshinweise/SYS/Umsetzungshinweise_zum_Baustein_SYS_4_4_Allgemeines_IoT-Ger%C3%A4t.html
- [4] W. HuiYu, Q. Wenxiang, and L. Yuxiang, “Breaking Smart Speaker: We are Listening to You”, December 2018, Tencent Blade Team
- [5] I. Alqassem and D. Svetinovic, “A Taxonomy of Security and Privacy Requirements for the Internet of Things (IoT)”, in 2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Selangor Darul Ehsan, Malaysia: IEEE, December 2014, pp. 1244 – 1248. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7058837/>
- [6] U. Singh and I. Chana, “Enhancing Energy Efficiency in IoT (Internet of Thing) Based Application”, in Inventive Computation Technologies, ser. Lecture Notes in Networks and Systems, S. Smys, R. Bestak, and A. Rocha, Eds. Cham: Springer International Publishing, November 2019, pp. 161 – 173.
- [7] G. Matsemela, S. Rimer, K. Ouahada, R. Ndjongue, and Z. Mngomezulu, “Internet of Things Data Integrity”, in 2017 IST-Africa Week Conference (IST-Africa), November 2017, pp. 1 – 9. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8102332>
- [8] R. Roman, C. Alcaraz, J. Lopez, and N. Sklavos, “Key Management Systems for Sensor Networks in the Context of the Internet of Things”, Computers & Electrical Engineering, vol. 37, no. 2, March 2011, pp. 147 – 159.
- [9] E. Rescorla, “The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3”, IETF, December 2018, RFC 8446. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc8446>
- [10] K. Moriarty and S. Farrell, “Deprecating TLSv1.0 and TLSv1.1”, IETF. [Online]. Available: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/draft-ietf-tls-oldversions-deprecate>
- [11] J. Iyengar and M. Thomson, “QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport”, IETF, October 2020. [Online]. Available: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/draft-ietf-quic-transport-32>
- [12] M. Thomson and S. Turner, “Using TLS to Secure QUIC”, IETF, October 2020. [Online]. Available: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/draft-ietf-quic-tls-32>
- [13] P. Kumar and B. Dezfouli, “Implementation and analysis of QUIC for MQTT”, Computer Networks, vol. 150, February 2019, pp. 28 – 45.
- [14] The Chromium Projects, “QUIC, a multiplexed stream transport over UDP – The Chromium Projects”, retrieved: December 2020. [Online]. Available: <https://www.chromium.org/quic>
- [15] E. Rescorla and N. Modadugu, “Datagram Transport Layer Security Version 1.2”, RFC 6347, IETF, January 2012. [Online]. Available: <https://rfc-editor.org/rfc/rfc6347.txt>
- [16] E. Rescorla, H. Tschofenig, and N. Modadugu, “The Datagram Transport Layer Security (DTLS) Protocol Version 1.3”, IETF, November 2020. [Online]. Available: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/draft-ietf-tls-dtls13-39>
- [17] A. Banks and R. Gupta, “MQTT Version 3.1.1”, October 2014. [Online]. Available: <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html>
- [18] W. Razouk, D. Sgandurra, and K. Sakurai, “A New Security Middleware Architecture based on Fog Computing and Cloud to Support IoT Constrained Devices”, October 2017, pp. 1 – 8
- [19] NGINX, “Improve IoT Security with NGINX Plus: Encrypt & Authenticate MQTT”, March 2017. [Online]. Available: <https://www.nginx.com/blog/nginx-plus-iot-security-encrypt-authenticate-mqtt/>
- [20] O. Rajae, “IoT, Resource Constrained Devices, Security”, February 2017, conference: RSA 2017, San Francisco, CA.

- [21] S. Andy, B. Rahardjo, and B. Hanindhito, "Attack Scenarios and Security Analysis of MQTT Communication Protocol in IoT System", in 2017 4th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI), 2017, pp. 1 – 6.
- [22] G. Perrone, M. Vecchio, R. Pecori, and R. Giaffreda, "The Day After Mirai: A Survey on MQTT Security Solutions After the Largest Cyberattack Carried Out through an Army of IoT Devices:", in Proceedings of the 2nd International Conference on Internet of Things, Big Data and Security. Porto, Portugal: SCIT-PRESS – Science and Technology Publications, 2017, pp. 246 – 253.

Fördergeber:



Kontakt:



Ahmed Alqattaa, M.Sc.

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

a.alqattaa@oth-aw.de



Prof. Dr. rer. nat. Daniel Loebenberger

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

d.loebenberger@oth-aw.de

Zusammenfassung

Im Cluster Industrial Laboratory for Safe and Secure Systems (ILaS³) arbeiten beide Forschungsgruppen AUT und LaS³ der OTH Amberg-Weiden und Regensburg auf dem Gebiet Safety und Security in der Automatisierungstechnik zusammen. Der Schwerpunkt des LaS³-Teams in Regensburg liegt auf IT-sicheren und funktional sicheren software-intensiven Systemen, während die Arbeitsgruppe in Amberg auf dem Gebiet der industriellen Kommunikationstechnik F&E Projekte durchführt. Im Cluster wird gemeinsam untersucht, wie sich aktuelle Trends der Sicherheitstechnik und Security im industriellen Umfeld und Smart Home einsetzen lassen.

Mit dem Voranschreiten der Digitalisierung und der Vernetzung in verschiedenen Lebensbereichen ergeben sich neue Anforderungen an den Schutz der übertragenen Daten. Da in den Bereichen Smart Home und Industrie 4.0 sensible Daten über öffentliche Netze übertragen werden, müssen Maßnahmen zur Absicherung dieser Kommunikation getroffen werden. In solchen Internet of Things (IoT)- und Industrial IoT (IIoT)-Netzwerken kommen oft ressourcenschwache Geräte zum Einsatz, welche übliche Methoden und Algorithmen zur Verschlüsselung nicht ausreichend unterstützen. Dieser Artikel soll einen Überblick über alternative, besonders effiziente Algorithmen geben und den aktuellen Stand der Forschung zu dem Thema Leichtgewichtige Kryptographie darlegen. Daneben werden die aktuellen Trends in der industriellen Kommunikation im Industrie 4.0 Umfeld vorgestellt und Anknüpfungspunkte aufgezeigt.

Weiterhin wird ein am LaS³ der OTH Regensburg laufendes Forschungsprojekt vorgestellt, das sich mit der Evaluierung effizienter kryptographischer Primitive befasst. Die kostengünstige Anbindung industrieller Steuerungstechnik an IT Netze demonstriert eine Anwendung der Arbeitsgruppe AUT in Amberg, die als Basis für anlagenbezogene Test und Untersuchungen im Cluster eingesetzt werden kann.

Abstract

The research groups AUT and LaS³ from the OTH Amberg-Weiden and Regensburg work together on the topics IT security, safety and automation engineering within the cluster Industrial Laboratory for Safe and Secure Systems (ILaS³). The main focus of the LaS³ team lays on developing secure and safe software-intensive systems, while the researchers at AUT follow projects in the domain of industrial communications. The ILaS³ cluster pools resources and knowledge to investigate recent trends in the field of security research and engineering in smart home und industrial environments.

The ongoing digitalization and networking in different areas results in new requirements regarding the protection of the sent data. Smart home and connected industrial facilities are examples for fields in which sensitive data is communicated over public networks. In these IoT networks, one can often only use very resource-limited devices that are not supporting conventional methods and algorithms for encrypting data. This article wants to present an overview over alternative and especially efficient algorithms and show the current state of research in the area of Lightweight Cryptography. Moreover, a current research project which aims at evaluating efficient cryptographic ciphers is introduced and a cost-effective application of industrial control systems within corporate IT networks is demonstrated.

1 Einleitung

Durch die Anbindung von immer mehr Geräten an öffentliche Netze ergibt sich ein steigender Bedarf an Methoden zur sicheren Kommunikation. Sowohl im privaten Bereich als auch in der Industrie ist die Vernetzung unterschiedlicher Geräte ein wichtiger Bestandteil der Digitalisierung.

Während in Haushalten vorwiegend Consumer-Komponenten mit dem Internet verbunden werden, spielt im industriellen Umfeld auch die Verbindung von Teilen der Produktion mit weiteren Netzwerken eine große Rolle.

Im industriellen Bereich ergeben sich gerade durch die Industrie 4.0 Paradigmen die Anforderungen, die reine Steuerungstechnik (engl. Operational Technology) mit der IT-Welt zu koppeln. In der Operational Technology (OT) liegt der Fokus auf einem abgeschlossenen System, und Security-Belange werden in der Regel an den Schnittstellen der OT-Domäne zur IT-Welt betrachtet. Durch die nahtlose vertikale Integration – also die durchgängige Kommunikation vom Sensor und Aktor bis in die Cloud – die von Industrie 4.0 Anwendungen gefordert wird – resultiert inhärent in einer Vermischung der IT- und OT-Welt.

In beiden Sparten steigt durch diese Entwicklung die Menge der übertragenen und besonders schützenswerten Daten. Je nach Einsatzzweck kann der Verlust der Integrität oder Vertraulichkeit sensibler Kommunikation schwerwiegende persönliche und wirtschaftliche Folgen haben. Besonders kritisch ist die Verletzung dieser Schutzziele in Bereichen, in denen durch Probleme der IT-Sicherheit auch Anforderungen an die funktionale Sicherheit nicht mehr erfüllt werden können. Die Erfüllung der Schutzziele der IT-Sicherheit wird durch die richtige Implementierung und Anwendung kryptographischer Methoden sichergestellt.

2 Aktuelle Trends in der industriellen Kommunikation

Sowohl bei physikalischen Aspekten der Übertragung als auch in höheren Protokollschichten gibt es umfangreiche Bestrebungen durch Standardisierung neue Technologien nun auch breit nutzbar zu machen.

2.1 Single Pair Ethernet und Advanced Physical Layer

In der industriellen Anwendung soll kostengünstige und bestehende Zwei-Draht-Verkabelung den Anschluss von einfachen Aktoren und Sensoren an die IT-Welt ermöglichen. Hierfür wurde nach mehrjähriger Standardisierungsarbeit von der Arbeitsgruppe 802.3cg bei der IEEE auch eine Variante für den industriellen Einsatz definiert: „10BASE-T1L“ [1]. Er sieht eine Datenrate von 10 Mb/s bei einer Länge der Zwei-Draht-Verkabelung von bis zu

1 km vor. Mit diesem Ethernet-Anschluss wird die Voraussetzung für eine nahtlose Integration von einfachen Sensoren und Aktoren in das IIoT geschaffen. Speziell für die Prozessautomatisierung wurde darüber hinaus der sogenannte Advanced Physical Layer definiert, bei dem die Energieversorgung des Sensors und Aktors für den Explosionsschutzbereich mit enthalten ist. Entwicklungen sind aktuell in der Umsetzung und Industrial Ethernet Standards wie PROFINET werden zurzeit so erweitert, dass diese neuen PHYs herstellerunabhängig in der Industrie eingesetzt werden können.

2.2 Time Sensitive Networks TSN

Ein weiterer wichtiger Meilenstein für die Industrie 4.0 Kommunikationsarchitektur ist die Einführung von TSN [8]. TSN ermöglicht Echtzeitverhalten im Standard Ethernet. Die umfangreichen Standardisierungs-Bestrebungen sind zum großen Teil abgeschlossen. Mit TSN fähigen Komponenten wird die bisherige Restriktion der Echtzeitfähigkeit auf Sensor- und Aktor-Ebene aufgehoben. Im Prinzip lassen sich vorhersagbare Zykluszeiten im gesamten Netz realisieren. Für PROFINET stehen den Mitgliedern bei der Nutzerorganisation bereits erste Tests für die Zertifizierung von PROFINEToverTSN-Geräten kostenfrei zur Verfügung [7]. Diese Tests werden maßgeblich von der Arbeitsgruppe AUT mit entwickelt.

Mit TSN ergeben sich auch neue Möglichkeiten für die Konvergenz von unterschiedlichen Netzwerkprotokollen. Diese werden im Rahmen des gemeinsamen Projekts der IEC und IEEE “IEC/IEEE 60802 TSN Profile for Industrial Automation” adressiert und legen den Grundstein für eine nahtlose Integration unterschiedlichster Dienste im Industrial Ethernet [3].

2.3 Open Platform Communications – Unified Architecture (OPC UA)

OPC UA hat sich zwischenzeitlich als Standard für die Kommunikation von Steuerung zu Steuerung etabliert. Auch die Anbindung von IT Services erfolgt zum Teil bereits über OPC UA. Security-Belange werden in dieser plattformunabhängigen Architektur von Anfang an mitberücksichtigt. In der Regel basieren die Anwendungen zurzeit auf dem Client-Server-Modell. Aktuell wird die Unterstützung des Pub-Sub-Modells sukzessive umgesetzt. Da bei OPC UA die Daten nicht nur übertragen werden, sondern auch semantisch in einem Informationsmodell beschreibbar sind, ist hier die Anknüpfung an eine übergeordnete Cloud und IT-Verarbeitung von vornherein gegeben. Eine Herausforderung stellt dabei jedoch die Modellierung der Anwendung und Abbildung in einem Informationsmodell dar. Während mit OPC UA die grundlegenden Dienste und die Infrastruktur definiert werden, ist das eigentliche Informationsmodell für eine Anwendung im “Companion Standard” hinterlegt.

Unterschiedlichste Sichtweisen auf ein und dieselbe physikalische Gegebenheit müssen hier für die Interoperabilität zusammengeführt sein. Besonders deutlich zeigt sich dies, wenn diese “Companion Standards” zum Teil branchen- oder anwendungsspezifisch erarbeitet wurden bzw. werden. Interoperabilität hängt hier vom gewählten “Companion Standard” und der tatsächlichen Implementierung ab.

Eine relativ neue Initiative ist OPC UA “Field Level Communication”, bei der OPC UA bis auf das Sensor- und Aktoren-Niveau heruntergebrochen werden soll. Damit wird auch bei OPC UA die Datensicherheit für einfache Sensoren und Aktoren immer mehr zu einem entscheidenden Gesichtspunkt. Die OPC UA Spezifikation enthält dazu in Teil 2 der OPC-10000 eine ausführliche Modellierung einer Sicherheitsarchitektur [6]. Diese beschreibt detailliert mögliche Bedrohungen sowie nötige Schutzziele und deren Realisierung in unterschiedlichen Anwendungsfällen. Explizite Richtlinien zur Implementierung und Verwendung von bewährten kryptographischen Primitiven werden im Rahmen von OPC UA auch in dem Standard OPC-10000-7 diskutiert. Hier werden Profile für unterschiedliche Geräte- und Funktionsklassen definiert, die je nach Einsatzzweck bestimmte Anforderungen an die Datensicherheit erfüllen können müssen. Es wird genau festgelegt, welcher Algorithmus unter Berücksichtigung welcher Parameter verwendet werden soll.

3 Stand der Forschung & Standardisierung für Secure Systems

Die auch in OPC UA verwendeten Primitive sind über Jahrzehnte erprobte und standardisierte Algorithmen, welche bei richtiger Verwendung ein definiertes Sicherheitslevel erreichen. Ein Beispiel ist der Advanced Encryption Standard (AES), der im Jahr 2000 vom National Institute of Standards and Technology (NIST) der USA als Standard eingeführt wurde und bis heute verwendet wird. AES wurde weit vor den technischen Fortschritten im (I) IoT-Bereich und für damals aktuelle Desktop-Systeme entwickelt. Mit der Internetanbindung diverser ressourcenschwacher Geräte ergeben sich neue Anforderungen an die verwendeten kryptographischen Algorithmen. Die zum Beispiel in Sensornetzwerken oder industriellen Steuerungsanlagen eingesetzte Hardware ist oft nicht geeignet für den Desktop-Bereich standardisierte Algorithmen ausreichend schnell auszuführen, dennoch ist eine Absicherung der von diesen Geräten ausgehenden Kommunikation notwendig.

Da durch die voranschreitende Vernetzung stetig mehr (ressourcenschwache) Geräte sensible Daten erfassen und kommunizieren müssen, sind neue effiziente Algorithmen nötig, die einerseits entsprechend geeignet für leistungsschwächere Hardware sind und dennoch ein definiertes Sicherheitsniveau erreichen.

Das NIST hat sich nach einer Evaluierungsphase der aktuellen Situation dazu entschieden, effiziente Algorithmen zur Verschlüsselung von Daten zu standardisieren, welche für den Einsatz in den zuvor genannten Anwendungsfällen besonders geeignet sind. Das NIST-Projekt zur Selektion leichtgewichtiger kryptographischer Algorithmen (NIST LWC) wurde 2018 gestartet [4]. Das NIST hat dazu einen “Call for Algorithms” veröffentlicht, in dem zur Einreichung von Algorithmen aufgerufen wird. Vorab wurden verschiedene Kriterien definiert, die ein optimaler Kandidat erfüllen sollte. Es wurden insgesamt 57 Primitive von unterschiedlichen Forscherteams aus der Wissenschaft und der Industrie eingereicht, von denen 56 von dem NIST zur 1. Runde des Evaluierungsprozesses zugelassen wurden. Jeder Kandidat wird in einem von den Entwicklern verfassten Dokument detailliert beschrieben, außerdem war die Abgabe mindestens einer Software-Referenzimplementierung verpflichtend. Verschiedene Experten aus dem akademischen und industriellen Bereich beteiligen sich an der Untersuchung der Algorithmen. Das verantwortliche NIST-Team forscht zudem parallel und kann so seine Entscheidungen auf viele unterschiedliche Arbeitsergebnisse stützen. Aktuell befindet sich das LWC-Projekt in der 2. Runde. Von den 56 ursprünglichen Kandidaten wurden seitens NIST 32 als Zweitrundenkandidaten ausgewählt. Planmäßig wird der Pool an Algorithmen im Dezember 2020 weiter auf ca. acht Primitive reduziert. Diese Finalisten sollen dann wieder für ein weiteres Jahr evaluiert werden, bevor voraussichtlich nur ein Kandidat ausgewählt und anschließend in einem Federal Information Processing Standard (FIPS) standardisiert werden soll.

4 Beispiel Implementierungen im Cluster ILAS₃

4.1 Untersuchungen an realitätsnahen Anlagen „OPC UA als universelle Schnittstelle zur IT-Welt“

Für Untersuchungen an realitätsnahen Anlagen wurde ein Industrie 4.0 Demonstrator in der Arbeitsgruppe AUT aufgebaut, der auch für Security Tests eingesetzt werden kann [2]. Er besteht aus zehn Zellen, die mit unterschiedlicher Funktionalität bestückt werden können und durch zwei kooperative Roboterzellen ergänzt werden. Jede Zelle beinhaltet als Kern industrielle Steuerungstechnik (Siemens S7 1500., IO-Link, etc.), die durch verschiedene Module erweitert werden kann.

Hier wird zur einheitlichen Kommunikation jede Zelle zusätzlich mit einem OPC UA-fähigen EDGE Gateway ausgestattet. Als Gateway wurde der frei programmierbare Einplatinencomputer “Raspberry Pi” gewählt. Auf diesem “Raspberry Pi” wurde OPC UA mithilfe des Open Source Stacks “open62541” neben verschiedenen anderen Anwendungen integriert. Der “Raspberry Pi” wurde gewählt, da sowohl Stacks für OPC UA als auch für PROFINET zur

Verfügung stehen und somit eine nahtlose frei programmierbare Kopplung zwischen Industrial Ethernet und OPC UA möglich ist [5]. Mit solchen OPC UA-fähigen Raspberry Pis werden auch industrielle Bildverarbeitung und andere Sensorik realisiert.

Über das EDGE Gateway wird ein digitaler Zwilling mit der tatsächlichen Anlage verknüpft und ermöglicht das Bedienen und Beobachten sowie den auszugsweisen Austausch der Prozessdaten. Dieses Modell der Anlage dient der Nachbildung des Datenaustausches zwischen OT- und IT-Welt. Hervorzuheben ist, dass der digitale Zwilling sowohl PC-basiert ist als auch unter Android als App eingesetzt werden kann. Zusätzlich kann mit der OPC UA-fähigen Sensorik auf Raspberry Pi Basis die Verknüpfung der IT-Welt mit dem einzelnen Sensor untersucht und somit auch die Implementierung des Sicherheitsmodells (siehe Abschnitt 2.3) zukünftig getestet und verifiziert werden.

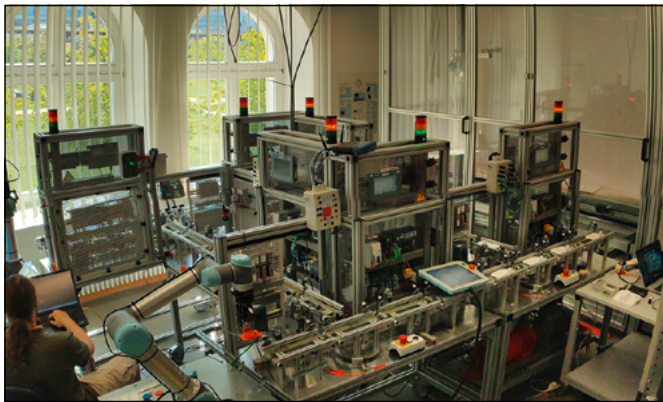


Abbildung 1: a) Demonstrator und digitaler Zwilling

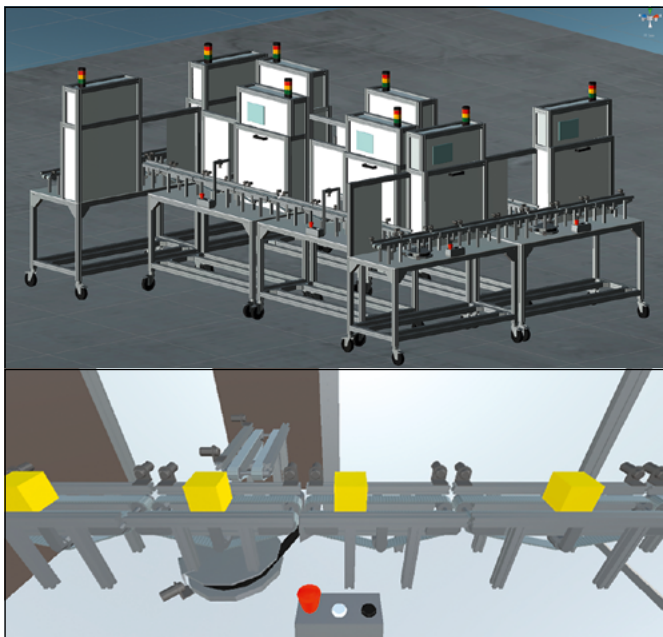


Abbildung 1: b) Digitaler Zwilling, Gesamtansicht und Detail

An dieser Testanlage wurde in einem ersten Schritt die Handhabung von OPC UA-Securitymechanismen betrach-

tet. Hier wurde sich auf die Implementierung im EDGE Gateway konzentriert. Auf der industriellen Steuerung (Siemens S7 1500) wurden der zur Verfügung stehende OPC UA Server des TIA-Portals eingesetzt. Eine eigene Betrachtung der Security-Handhabung erfolgte bei dieser kommerziellen Lösung noch nicht.

Bereits die Inbetriebnahme des Open Source Stacks – ohne jegliche Security Aspekte – erforderte detailliertes Know-how und ein solides OPC UA-Verständnis. Im Rahmen dieser ersten Betrachtungen konnten die OPC UA unterstützten Security-Maßnahmen noch nicht erfolgreich eingesetzt werden. Dies wird im weiteren Verlauf des Einsatzes von OPC UA weiterverfolgt.

4.2 Evaluierung Leichtgewichtiger Kryptographischer Algorithmen

Die Performanz der im Sicherheitsmodell definierten Primitive ist neben anderen Kriterien eine Metrik, die im Selektionsprozess eine wichtige Rolle spielt. Dabei werden Hard- und Software-Implementierungen in unterschiedlichen Anwendungsfällen betrachtet. Am LaS³ der OTH Regensburg wurde ein Benchmarking Framework mit dem Ziel entwickelt, die Performanz der NIST LWC Software-Implementierungen auf verschiedenen Microcontroller-Plattformen zu messen. Dazu wurde ein modularer Hardware-in-the-Loop (HIL)-Ansatz verfolgt, bei dem gleiche Testroutinen auf verschiedener Hardware ablaufen können. Mithilfe des Frameworks lassen sich wichtige Metriken zur Beurteilung der Software-Performanz messen, außerdem wird sichergestellt, dass die getesteten Implementierungen ordnungsgemäß und wie spezifiziert funktionieren.

Im Moment werden drei verschiedene Testfälle unterstützt. In der ersten Variante werden die vom NIST definierten Testvektoren als Input/Output-Test an die mit der Software-Implementierung bestückten Testhardware gesendet, das Framework misst dabei die Dauer jedes Entschlüsselungs- bzw. Verschlüsselungsvorgangs. Die Daten zum Hostcomputer werden über eine serielle Schnittstelle übertragen. Die Verarbeitungszeit der Algorithmen wird über hardwaregesteuerte Signale direkt auf dem Testobjekt gemessen, somit werden Messungenauigkeiten aufgrund von Latenzen auf der seriellen Leitung ausgeschlossen. Anhand der gesammelten Daten kann am Ende des Testfalls eine Aussage über die durchschnittliche Geschwindigkeit des Algorithmus getroffen werden. Weitere getestete Metriken sind die Größe der (kompilierten) Implementierung (ROM-Nutzung) und der Speicherverbrauch (RAM-Nutzung). Die Tests finden in einer hochautomatisierten Umgebung statt, womit der manuelle Arbeitsaufwand und die Menge potenzieller Messfehler durch gesteuerte Falscheingaben minimiert wird. Die Experimente werden mittels Logdateien dokumentiert, zudem werden alle getesteten Implemen-

tierungen in einem öffentlich zugänglichen Repository zur Verfügung gestellt. Weiterhin wird im Rahmen des Projekts eine Webseite betrieben, die alle im Laufe des NIST LWC Projekts gewonnenen Erkenntnisse sowie alle Testergebnisse widerspiegelt. Zum aktuellen Zeitpunkt wurden bereits mehr als 300 verschiedene Varianten der LWC-Kandidaten der 2. Runde getestet und die korrespondierenden Ergebnisse online zur Verfügung gestellt.

5 Zusammenfassung und Zukünftige Arbeiten

Mit der Evaluierung der Software-Implementierungen der NIST LWC-Kandidaten liefert das LaS³ für den allgemeinen Selektionsprozess relevante Testergebnisse. Dadurch, dass alle Testdaten öffentlich verfügbar sind und während der gesamten Dauer des Wettbewerbs aktuell gehalten werden, wird versucht, eine größtmögliche Transparenz zu schaffen. Abgesehen von dem Ausbau der unterstützten Testfälle und -plattformen soll das Framework in Zukunft so erweitert werden, dass die Erstellung und Aufnahme von Stromverbrauchsprofilen der jeweiligen Kandidaten möglich wird. Insbesondere für sogenannte Seitenkanalangriffe und zum Überprüfen von bestimmten Härtingsmaßnahmen sind diese Daten hilfreich. Weiterhin soll in diesem Zusammenhang das Spannungsfeld zwischen maximaler Performanz und

maximalem Schutz gegenüber Angriffen auf die Implementierung erforscht werden.

Mit dem Industrie 4.0 Demonstrator der OTH Amberg-Weiden stehen zudem im Cluster auch realitätsnahe Testmöglichkeiten zur Verfügung, bei denen nicht nur das einzelne Gerät, sondern die gesamte Automatisierungsanlage als Untersuchungsobjekt eingesetzt werden kann. Hier können abhängig von der vorgegebenen Automatisierungsaufgabe die Handhabung und Wirksamkeit von Security-Implementierungen auf Anlagenebene betrachtet werden.

Im Cluster sollen nun im nächsten Schritt, parallel zu den Handling Tests, auch Security-Szenarien für OPC UA anhand der Anlage untersucht werden. Dazu muss zunächst eine Implementierung und Inbetriebnahme der im OPC-10000-2/7 definierten Security-Komponenten erfolgen. Weiterhin ist es denkbar, die empfohlenen kryptographischen Algorithmen des Sicherheitsmodells gegen geeignete leichtgewichtige Primitive zu ersetzen. Anschließend könnte die konventionelle mit der neuen Implementierung verglichen werden, um Aussagen über die Performanz und die Resistenz gegenüber einfachen Angriffen zu treffen.

Referenzen:

- [1] IEEE: IEEE 802.3cg-2019 – IEEE Standard for Ethernet – Amendment 5: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 10 Mb/s Operation and Associated Power Delivery over a Single Balanced Pair of Conductors. Online verfügbar: https://standards.ieee.org/standard/802_3cg-2019.html [Zugegriffen am 26.10.2020]
- [2] Demonstrator der Arbeitsgruppe AUT (Automation) OTH Amberg-Weiden. Online verfügbar: www.aut-oth.de [Zugegriffen am 26.10.2020]
- [3] IEC/IEEE: IEC/IEEE 60802 TSN Profile for Industrial Automation. Online verfügbar: <https://1.ieee802.org/tsn/iec-ieee-60802/> [Zugegriffen am 26.10.2020]
- [4] National Institute for Standards and Technology: Lightweight Cryptography Project. Online verfügbar: <https://csrc.nist.gov/Projects/lightweight-cryptography> [Zugegriffen am 26.10.2020]
- [5] Open Source C Implementation of OPC UA. Online verfügbar: <https://open62541.org/> [Zugegriffen am 26.10.2020]
- [6] OPC Foundation: Open Platform Communications - Unified Architecture. Online verfügbar: <https://opcfoundation.org/> [Zugegriffen am 26.10.2020]
- [7] PROFIBUS Nutzerorganisation: PROFINET over TSN. Online verfügbar: <https://de.profibus.com/downloads/profinettn-trial-test-bundle/> [Zugegriffen am 26.10.2020]
- [8] IEEE: Time-Sensitive Networking (TSN) Task Group. Online verfügbar: <https://1.ieee802.org/tsn/> [Zugegriffen am 26.10.2020]



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



Prof. Dr. Jürgen Mottok

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Regensburg
Fakultät Elektro- und
Informationstechnik
Seybothstraße 2
93053 Regensburg

juergen.mottok@othr.de



Sebastian Renner, M.Sc.

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Regensburg
Fakultät Elektro- und
Informationstechnik
Seybothstraße 2
93053 Regensburg

sebastian1.renner@othr.de

Zusammenfassung

Eine wesentliche Komponente von Industrie-4.0-Konzepten ist die sichere und robuste Übertragung von Daten. Standard Industrial-Ethernet wie PROFINET, Ethernet-IP und ähnliche werden in fast allen Anwendungsbereichen eingesetzt.

In speziellen industriellen Anwendungen kann durch EMS der vor Ort genutzten Maschinen und Frequenzumrichter oder einer Fehlanpassung der Kommunikationsstrecke, der Einsatz dieser Standardverfahren bis zur Unbrauchbarkeit gestört werden. Dies ist z. B. bei kostengünstigen Übertragungsmedien wie Zweidrahtleiter der Fall. Bei der kombinierten kontaktlosen Energie- und Datenübertragung findet man ähnlich schwierige Bedingungen vor.

Durch den Entwurf eines auf OFDM basierenden robusten Physical Layers soll die Übertragung bei diesen stark gestörten Anwendungsfällen untersucht werden. Die Simulation [1] soll in einer experimentellen Untersuchung überprüft und verbessert werden. In diesem Bericht wird das auf einem DSP basierende Testsystem mitsamt realer Störquellen vorgestellt.

Abstract

An OFDM-based physical Layer model shall be analyzed for industrial use. As a first step there was created an end-to-end simulation of the complete physical layer including FEC [1]. This simulation shall be verified and improved in an experimental platform, based on an DSP and real disrupters. In this report we present the experimental platform.

A core feature of Industry-4.0-concepts is a safe and robust data-transfer. In many applications industrial ethernet standards like PROFINET, Ethernet-IP and further more are used. In some special applications the communication line can be disturbed by EMD of power drives of mismatched characteristic impedance. Especially cheap transmission mediums are affected of these disturbances. Standard industrial ethernet solutions can be disturbed to a total failure.

As alternative, an OFDM-based physical layer model shall be analyzed for industrial use. As a first step there was created an end-to-end simulation of the complete physical layer including FEC [1]. This simulation shall be verified and improved in an experimental platform, based on an DSP and real disrupters. In this report we present the experimental platform.

1 Übertragungsmodell

Die Übertragungsstrecke soll einer realen störbehafteten industriellen Anwendung nachempfunden sein. Es wird zwischen mehreren Kommunikationsmodulen über eine ungeschirmte Zweidrahtleitung kommuniziert, welche parallel zu der Stromversorgung eines Antriebs mit Frequenzumrichter geführt ist. Durch diese Verkabelung wird

ein Teil des Spannungspegels der Stromversorgung durch kapazitives Übersprechen an der Zweidraht-Datenleitung empfangen. Aufgrund der verwendeten Bandbreite der Kommunikation sind hierbei vor allem die durch den Frequenzumrichter entstehenden hochfrequenten Netzzrückwirkungen relevant.

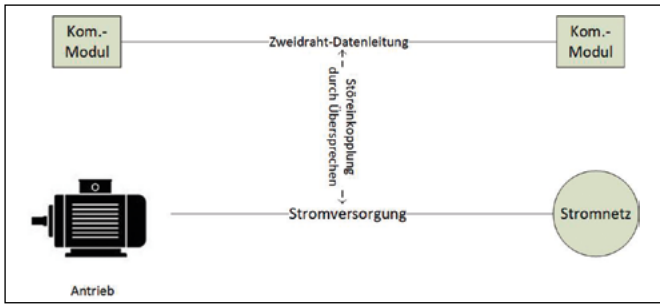


Abbildung 1: Blockschaltbild der Übertragungsstrecke

Der Antrieb soll dabei ein realitätsnahes Leistungsprofil nutzen.

2 Störquellen

Zur Erzeugung realer industrienaher Störungen wird ein Antrieb mit Frequenzumrichter verwendet. Da in der industriellen Anwendung in der Regel der Motor nicht im Leerlauf dreht, wird mithilfe eines zweiten Motors ein definiertes Gegen-Drehmoment erzeugt. Dieses Drehmoment wird mit einer Messwelle gemessen und kann dadurch exakt bestimmt werden.

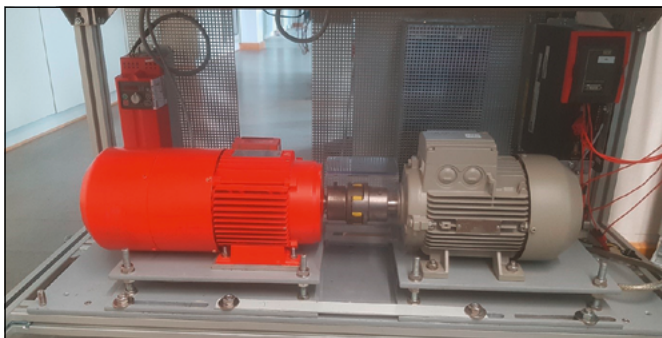


Abbildung 2: Exemplarischer Aufbau einer Störquelle

Es ist ebenfalls möglich, den bremsenden Motor in Generatorbetrieb laufen zu lassen und die Bremsleistung wieder in das Netz zurück zu speisen.

3 Kommunikationsmodul

Jedes Kommunikationsmodul besteht aus einem digitalen Signalprozessor (DSP) und einem analogen Frontend. Der DSP sendet das digitalisierte Analog-Signal über einen universalen Parallel-Port (UPP). Ein Digital-Analog-Wandler (DAC) setzt das digitale Signal als analoger Spannungspegel um.

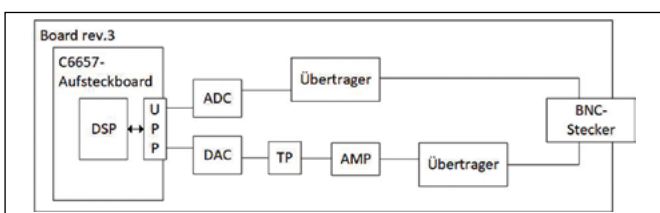


Abbildung 3: Blockschaltbild der HW-Komponenten eines Kommunikationsmoduls

Durch die Wandlung entstehen hochfrequente Störanteile, welche durch einen Tiefpass-Filter (TP) entfernt werden. Anschließend wird das Signal verstärkt (AMP) und mithilfe eines Übertragers galvanisch von der Kommunikationsstrecke getrennt. Die Übertragungs-Strecke wird über einen BNC-Stecker mit dem Kommunikationsmodul verbunden.

Auf dem digitalen Signalprozessor erfolgt die Verarbeitung, Modulation, Kodierung, Synchronisation und Entzerrung des Übertragungssignals.

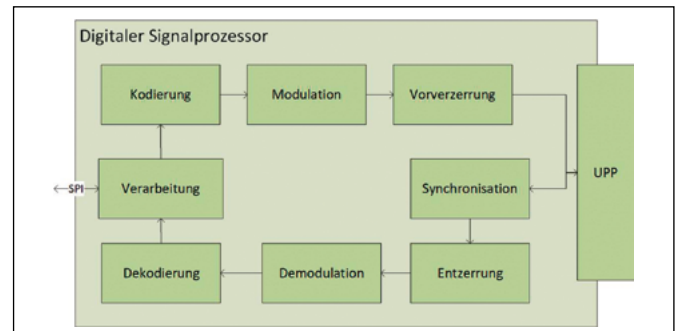


Abbildung 4: Blockschaltbild der Signalverarbeitung im digitalen Signalprozessor

Kodierung: In einer Vielzahl von digitalen Übertragungsverfahren werden als Kanalkodierung Turbo-Codes [2] [3] [4] oder LDPC-Codes [5] [4] eingesetzt. In der ersten Realisierung wurden Turbo-Codes umgesetzt, was aber in einem zweiten Schritt vergleichsweise durch LDPC-Codes ersetzt werden kann.

Um die Robustheit gegenüber frequenzabhängigen Störungen zu erhöhen, werden die Kodierten Daten doppelt auf unterschiedlichen Frequenzen übertragen.

Modulation: Die Daten werden mithilfe von OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) auf definierte Frequenzbereiche moduliert. Dieses Verfahren wird bei vielen Übertragungsverfahren wie Power-Line [6], DSL [7] oder verschiedenen Mobilfunk-Standards [2] eingesetzt. Die Information wird in die Phase (QPSK) moduliert. Da wir in diesem Aufbau leitungsgebunden übertragen, wird das Signal im Basisband übertragen und nicht auf einen hochfrequenten Träger moduliert.

Synchronisation: OFDM-Signale sind sehr störanfällig gegenüber einer fehlerhaften Synchronisation. [8] Bei der Basisband-Übertragung muss der Zeitpunkt des Paketbeginns bestimmt werden. Mithilfe einer Kreuzkorrelation einer bekannten Preamble wird der Paketempfang grob bestimmt. Die exakte Bestimmung des Paketbeginns wird mit der Entzerrung kombiniert bestimmt.

Entzerrung/Vorverzerrung: Da die Information bei OFDM-modulierten Signalen in der Phase steckt, muss die Phasenverzerrung durch den Übertragungskanal kompensiert werden.

siert werden. Durch die bekannte Soll-Phase der Präambel kann die Phasenverzerrung des Kanals bestimmt und kompensiert werden. Da eine verbleibende Abweichung des Paketbeginns sich als Phasenverzerrung auswirkt, wird diese durch Entzerrung kompensiert.

Eine dem Sender bekannte Phasenverzerrung kann durch eine Vorverzerrung ausgeglichen werden. Dies ist in den aktuellen Kommunikationsmodulen noch nicht eingesetzt.

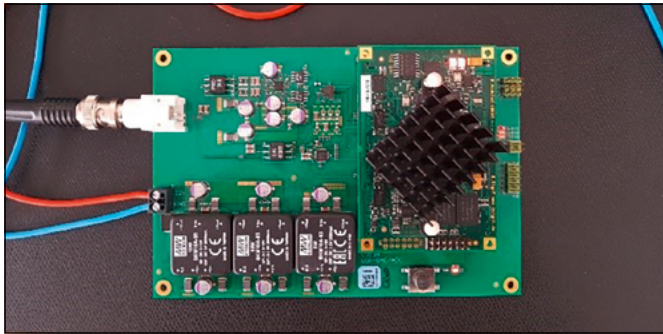


Abbildung 5: Kommunikationsmodul

4 Orientierende Messergebnisse

Es wurden erste orientierende Messungen mit dem den Kommunikationsmodulen ohne Störquellen durchgeführt. Dabei wurde ein Messaufbau mit absichtlicher Fehlanpassung realisiert. Es wurden insgesamt drei

Kommunikationsmodule verwendet, ein Sender und zwei Empfänger, sowie ein Oszilloskop. Die Empfänger und das Oszilloskop sind hochohmig an den Übertragungskanal angeschlossen, und zwischen den Slaves sind Koaxialkabel mit einer Kabellänge von 3 m verwendet. Bei der verwendeten Bandbreite von 1 – 30 MHz treten hier Reflektionen auf, welche eine starke Phasenverzerrung des Signals erwirken.

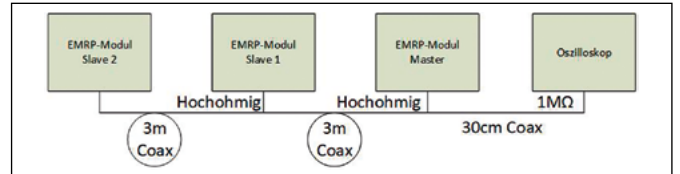


Abbildung 6: Testaufbau für orientierende Messungen mit Fehlanpassung

Die Komponenten der digitalen Signalverarbeitung werden an Slave 1 ausgewertet. Wie zu erwarten entstehen starke Reflektionen, die im Betrag sowie in der Phase zu sehen sind. Durch die Phasenkorrektur wird die Phase bis auf einen verbleibenden Fehler von $\pm 10^\circ$ korrigiert, was eine fehlerfreie Übertragung ermöglicht. Im Konstellationsdiagramm ist ersichtlich, dass die Punkte ihren Quadranten nicht verlassen.

In einem nächsten Schritt muss die Kommunikation in Kombination mit den Störeinflüssen durch die Antriebe getestet werden, wobei hier die Kanalkodierung eine entscheidende Rolle spielt.

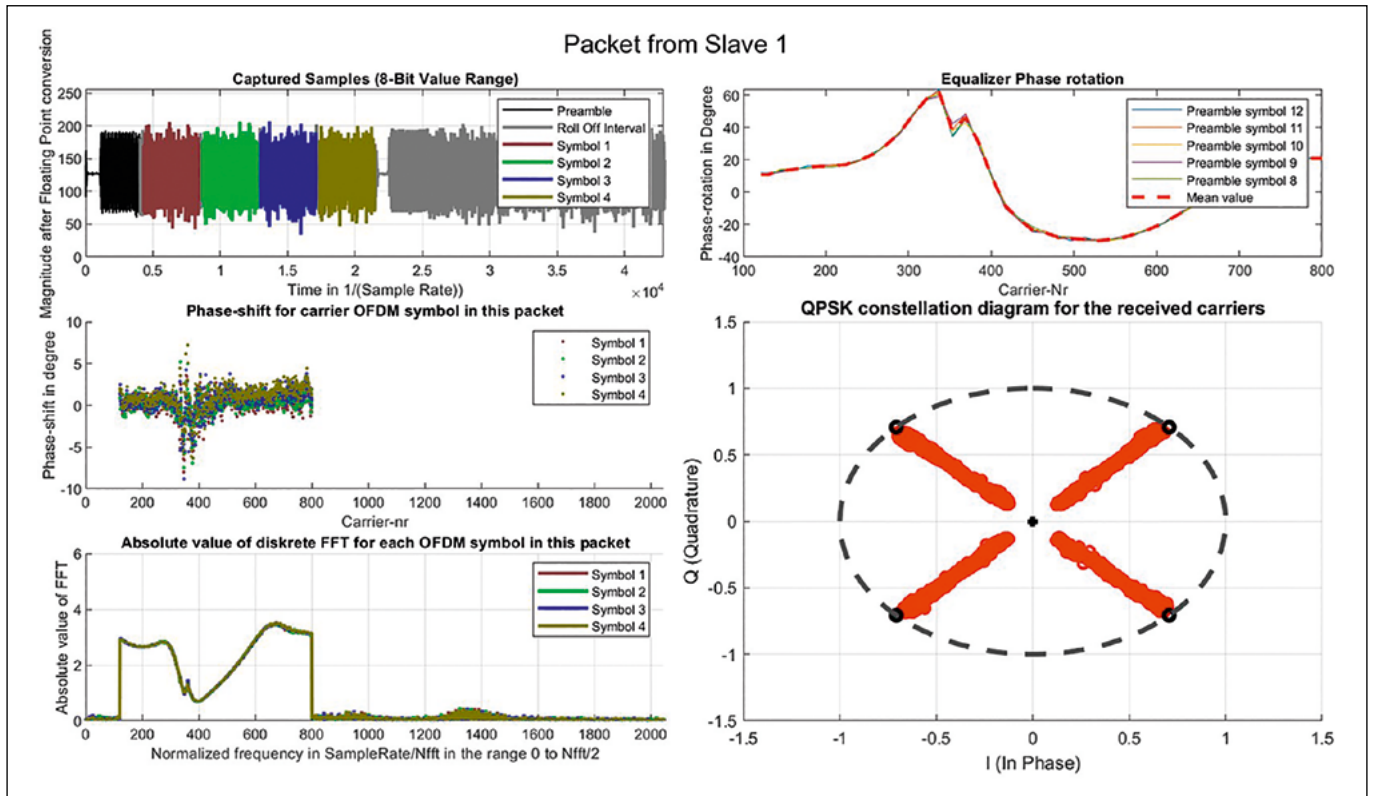


Abbildung 7: Auswertung der Kommunikation: Zeitverlauf des Signals (links oben), Phasenkorrektur (rechts oben), verbleibender Phasenfehler (Mitte, links), Betragsfrequenzgang (links unten), Konstellationsdiagramm (Mitte, rechts)

Referenzen:

- [1] A. Gercikow, „Modellierung der Datenübertragung für den Einsatz in industriellen Kommunikationssystemen“, Forschungsbericht der OTH-AW, Jg. 2020, pp. 75 – 78, 2020.
- [2] S. H. A. Shah, „Comparison between WiMax and 3GPP LTE“, 2009.
- [3] J. Y. Brankovic, Turbo Codes, Principles and Applications, Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [4] J. Göbel, Informationstheorie und Codierungsverfahren, Berlin: VDE Verlag, 2007.
- [5] G. Ungerboeck, „10GBASE-T Coding and Modulation: 128-DSQ + LDPC“, Ottawa, 2004.
- [6] H. A. Latchman und L. W. Y. I. S. G. Srinivas Katar, Homeplug AV and IEEE 1901, Piscataway: IEEE Press, 2013.
- [7] U. Freyer, Nachrichtenübertragungstechnik, Carl Hanser Verlag München, 2017.
- [8] M. Zhao, „Sampling Rate Conversion and Symbol Timing for OFDM Software Receiver“.
- [9] Z.-X. Y. C.-Y. P. M. H. a. L. Y. Jun Wang, „A Combined Code Acquisition and Symbol Timing Recovery A Combined Code Acquisition and Symbol Timing Recovery“, 2003.

Kontakt:



Sebastian Schaffenroth, M.Eng.

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

s.schaffenroth@oth-aw.de



Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmidt

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

hp.schmidt@oth-aw.de



Maximilian Bauer, M.Sc.

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

m.bauer@oth-aw.de

Dr. rer. nat. Sebastian Buhl
Alexander Stich, M.Sc.
Sabine Gruber, M.Sc.
Jeannine Vogt, M.Sc.
Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

Hygiene und Medizintechnik – antimikrobielle Kunststoffe zur Infektions- prävention

Zusammenfassung

Durch die Corona-Pandemie, die im März 2020 auch die Bundesrepublik mit aller Wucht erreicht hat, hat sich in der Gesellschaft vieles verändert. Themen, welche für lange Zeit nur bei Hygienikern und Krankenhauspersonal angesiedelt waren, rücken aufgrund der globalen Infektionslage stark in den Fokus der Öffentlichkeit. Mindestabstand, Maskenpflicht und Händedesinfektion werden zu einem gewohnten Bild, und Infektionsprävention ist ein bestimmendes Thema. Auch die Arbeitsgruppe „Hygiene und Medizintechnik“ der OTH Amberg-Weiden rückt mehr in den Fokus der Öffentlichkeit. Seit mehreren Jahren arbeitet die Gruppe an innovativen Hygienelösungen, wie antimikrobiellen Beschichtungen. Ein großer Schritt ist hierbei die Möglichkeit, solche antimikrobiellen Wirkstoffe in Kunststoffe einzubringen und für viele verschiedene Einsatzgebiete anwendbar zu machen. In Zusammenarbeit mit der Bamberger Firma HECOSOL GmbH und dem Lehrstuhl für Medizintechnische Materialien und Implantate der Technischen Universität München konnte die Arbeitsgruppe erfolgreich einen antimikrobiellen Wirkstoff in Kunststoffgranulat einbringen. Es war außerdem möglich, mit diesem Kunststoffgranulat mittels eines 3D-Druckers (Freeformer, Arburg) Probemuster zu drucken und deren antibakterielle Wirksamkeit und Beständigkeit nachzuweisen. Auf diese Weise könnten antimikrobielle Oberflächen für zahlreiche Anwendungen hergestellt werden und einen zusätzlichen Beitrag zur Infektionsprävention leisten.

Abstract

The Corona Pandemic, which also hit Germany with full force in March 2020, has brought many changes to our society. Topics that for a long time were the exclusive domain of hygienists and hospital personnel are now moving into the public discussion due to the global infection situation. Minimum distance, protection masks and hand disinfection are becoming a familiar sight and infection prevention is a defining issue. The research group for infection control, hygiene and medical engineering at OTH Amberg-Weiden is also moving more into the public focus. For several years the team has been working on innovative hygiene solutions such as antimicrobial surface technology. A big step forward is the possibility to incorporate such antimicrobially active substances into plastics and thus to make them applicable for many application fields. In cooperation with the Bamberg-based company HECOSOL GmbH and the Chair of Medical Materials and Implants at Technical University Munich, the team was able to successfully introduce an antimicrobial agent into plastic granulate. It was also possible to print samples with this plastic granulate using a 3-D printer (Freeformer, Arburg) and to prove their antibacterial effectiveness and stability. In this way, antimicrobial surfaces can be produced for a broad range of applications and make an additional contribution to infection prevention and control.

Einleitung

Antimikrobielle Oberflächenbeschichtungen können Reinigungs- und Desinfektionsmaßnahmen nicht ersetzen, aber sie können eine sehr wirksame Ergänzung

sein. Die allgemeinen Funktionsprinzipien verhindern entweder das Anhaften von mikrobiologischen Kontaminationen an der Oberfläche oder bauen sie bei Kontakt mit der Oberfläche ab und reduzieren so die Kontamination. Für die antimikrobielle Aktivität von Oberflächen

werden verschiedene Technologien mit unterschiedlichen Wirkungsweisen eingesetzt. [1] Im Idealfall behalten sie ihre antimikrobielle Wirksamkeit über den gesamten Produktlebenszyklus. Die antimikrobiellen Beschichtungen können mit verschiedenen Ansätzen in oder auf Produkte aufgebracht werden, beispielsweise durch Extrusion oder Elektropray-Verfahren. Insbesondere Gegenstände des klinischen Alltags, wie z. B. Oberflächen von Arbeitsbereichen, Geräteabdeckungen, Kanülen, Katheter oder Implantate, die mit antimikrobiellen Kunststoffen ausgestattet sind, könnten einen wichtigen Beitrag zur Prävention von behandlungsassoziierten Infektionen leisten. Die Reduzierung der Anzahl pathogener Mikroorganismen auf häufig berührten Oberflächen in hygienesensiblen Bereichen könnte ebenfalls dazu beitragen, das Infektionsrisiko zu minimieren. Im Falle von antimikrobiellen Kunststoffen könnte der Wirkstoff direkt während des Herstellungsprozesses eingebracht werden. Im Gegensatz dazu erfordern nachträglich aufgebrachte antimikrobielle Beschichtungen eine Nachbearbeitung der Geräte, um eine langfristige antimikrobielle Wirkung zu erzielen. [2]

Seit den 1980er-Jahren wurde ein neuartiger Herstellungsansatz entwickelt, der in den letzten Jahren stetig an Bedeutung gewonnen hat und der zunehmend auch in medizintechnische Prozesse Eingang findet: „Additive Manufacturing“ – auch bekannt als 3D-Druck. Dabei handelt es sich um eine hochspezialisierte Technologie, die die Herstellung komplexer und gleichzeitig sehr leichter Objekte ermöglicht. Im Bereich der Medizintechnik können mit diesem Verfahren personalisierte Individualimplantate, Prothesen und Werkzeuge hergestellt werden, die gegenüber Standardimplantaten vor allem in Bezug auf Individualität und Passgenauigkeit Vorteile bieten. Auf der anderen Seite ist aber auch die Herstellung von standardisierten Teilen in großer Stückzahl möglich. [3] Zusammen mit der Bamberger Firma HECOSOL GmbH und dem Lehrstuhl für Medizintechnische Materialien und Implantate der Technischen Universität München forscht die Arbeitsgruppe „Hygiene und Medizintechnik“ daher an einem Verfahren, mit dem ein antimikrobieller Wirkstoff direkt in einen Kunststofffertigungsverfahren eingearbeitet werden kann und somit keine Nachbearbeitung erfordert, aber dennoch über einen langen Zeitraum wirksam ist. Durch die direkte Einbringung in das Ausgangsmaterial soll eine langfristig anhaltende antimikrobielle Wirkung erzielt werden, welche durch routinemäßige Aufbereitung der Oberflächen (Reinigung, Desinfektion) nicht zerstört oder reduziert wird. Da der 3D-Druck auch im medizinischen Bereich zunehmend an Bedeutung gewinnt, wurde diese Fertigungstechnik genauer untersucht.

Einbringen eines antimikrobiellen Wirkstoffes in Kunststoffgranulat

In früheren Studien konnte bereits eine starke antimikrobielle Aktivität der TITANO-Beschichtung nachgewiesen

werden (HECOSOL GmbH, Bamberg). Daher wurde dieser antimikrobielle Wirkstoff als Additiv bei den nachfolgenden Versuchen verwendet. Zunächst wurden einfache Techniken zur Integration des antimikrobiellen Wirkstoffs in das Kunststoffgranulat systematisch getestet. Dies geschah durch einfaches Mischen von Komponenten (fest und flüssig) mit und ohne Erwärmung. Darüber hinaus wurde eine Methode zur Integration unter Druck getestet (1bar Druck bei 121°C). Schließlich wurde der Wirkstoff mit dem Rohmaterial compounding, was bei solchen Verfahren die Standard-Verarbeitungstechnologie darstellt. Nach jedem Schritt wurden standardisierte Prüfmuster mithilfe des Freeformer-3D-Druckersystems (Abbildung 1, ARBURG GmbH, Loßburg) anhand von CAD-Daten 3D-gedruckt. Dieser 3D-Drucker wurde gewählt, da die Möglichkeit besteht, Standard-Kunststoffgranulat als Druck- und Verarbeitungsquelle zu verwenden. Die verschiedenen antimikrobiellen Wirkstoffe wurden teils in flüssiger, teils in Pulverform bereitgestellt.



Abbildung 1: Freeformer-3D-Druckersystems im „Grauraum“ des OTH AW-Reinraums

Um die antibakterielle Wirksamkeit zu untersuchen, wurde für alle Proben der japanische Industriestandard Z-2801-Test durchgeführt. Dieser Test ist in der ISO 22196 für die Messung der antibakteriellen Aktivität von Kunststoffen und anderen nicht porösen Oberflächen genormt. [4] Der Vorteil des Testverfahrens liegt in der hohen Reproduzierbarkeit und Wiederholbarkeit. Die Proben wurden immer in Triplikaten getestet, um mögliche methodische Schwankungen auszugleichen und es wurden Referenzproben aus unveränderten ABS-Kunststoff verwendet.

Das getrocknete ABS-Granulat der verschiedenen Versuchsansätze (roh/gemischt/compounded) wurde dann im Freeformer-3D-Drucker als Ausgangsmaterial verwendet, und es wurden standardisierte Muster gedruckt, wie sie für die antimikrobiellen Tests nach ISO 22196 beschrieben und erforderlich sind. (Abbildung 2).

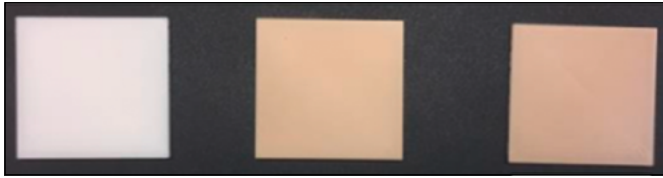


Abbildung 2: Standard Testkörper zur Durchführung antimikrobieller Wirksamkeitstest nach ISO 22196

Herstellung von 3D gedruckten Testmustern und Prüfung auf antibakterielle Wirksamkeit

Ziel der Arbeitsgruppe war es, eine antimikrobiell wirksame Wirkstoff-Granulat-Kombination herzustellen, welche vom Freeformer-3D-Drucker leicht verarbeitet werden kann und im antibakteriellen Wirksamkeitstest eine nachweisbare antibakterielle Wirkung zeigt.

Nach Auswertung der ersten Ansätze zeigte sich, dass es nicht möglich ist, den antimikrobiellen Wirkstoff durch simples Mischen oder Einschmelzen in das ABS-Granulat einzubringen. Selbst die Durchführung des 3D-Druckverfahrens führte mit einigen der Testansätze zu einer Blockade des Druckers. Dies kann auf eine schlechte Durchmischung des Materials und damit auf eine unzureichende Aufschmelzung im 3D-Drucker zurückzuführen sein. (Abbildung 3)

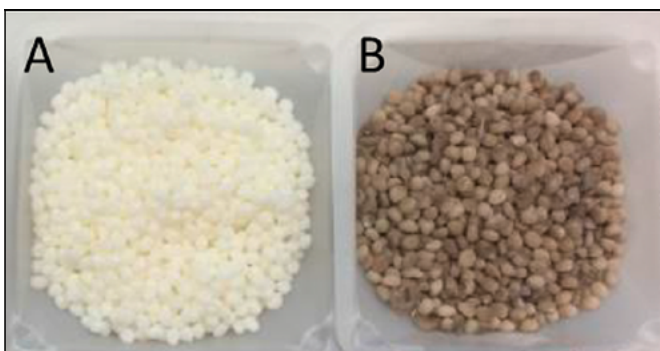


Abbildung 3: ABS-Kunststoffgranulat (A: ohne Zusatz; B: Zusatz schlecht vermischt)

Einige der Ansätze zeigten gute Eigenschaften für den 3D-Druck, jedoch konnte hier keine antibakterielle Aktivität mehr nachgewiesen werden. Dies könnte auf eine unzureichende bzw. unwirksame Einbringung des Wirkstoffs in die Testprobe hinweisen. Lediglich solche Wirkstoff-Granulat-Kombinationen, welche durch das Standardverfahren der Compoundierung hergestellt wurden, konnten beide Punkte erfüllen. Diese Testproben konnten problemlos gedruckt werden und zeigten konstant eine starke antibakterielle Aktivität. (Abbildung 4)

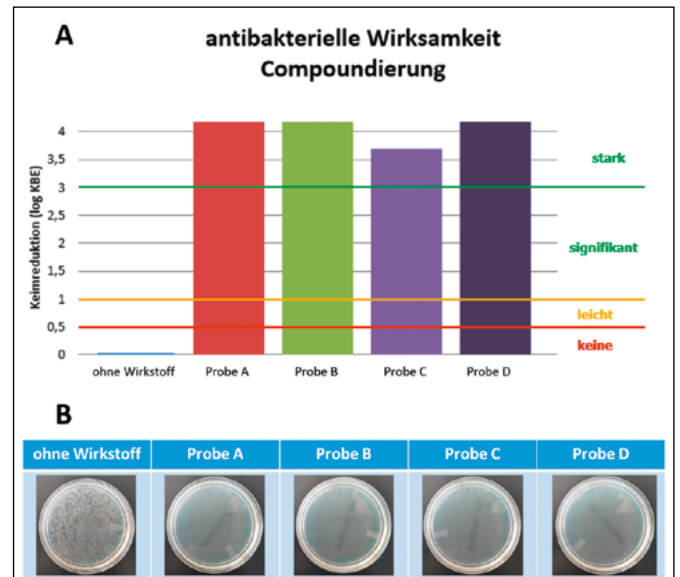


Abbildung 4: Nachweis der antibakteriellen Wirkung der compoundierten Testmuster (A: Auswertung nach ISO 22196; B: Fotografien des Keimwachstums auf einer Probe ohne Wirkstoff und auf Testkörpern)

Überprüfung möglicher Wirksamkeitsverluste der Testmuster bei simulierter Aufbereitung

Ein essenzieller Faktor für die Effektivität solcher antimikrobiellen Produkte ist die Vermeidung potenzieller Wirksamkeitsverluste unter realen Bedingungen. Besonders Augenmerk wurde auf einen möglichen Abrieb der antimikrobiellen Beschichtung durch die wiederholte Aufbereitung gelegt. Das Einbringen des antimikrobiellen Wirkstoffs direkt in das zugrundeliegende Kunststoffgranulat sollte hier einen großen Vorteil in der Beständigkeit gegenüber nachträglich aufgetragenen Beschichtungen zeigen.

Um dies zu überprüfen, wurden Triplikate in einem standardisierten Testaufbau (Abbildung 5, Elcometer 1720, Elcometer Instruments GmbH) 1000x mit einem 70% Ethanol-Wasser-Gemisch gewischt und anschließend nach ISO 22196 auf die antibakterielle Aktivität getestet. Um einen möglichen Wirksamkeitsverlust feststellen zu können, wird die Testung zum Vergleich zusätzlich mit unbehandelten und nachweislich wirksamen Proben durchgeführt.



Abbildung 5: Aufbau der Wasch- und Abriebfestigkeitsprüfung mit dem Elcometer 1720

Die Versuche zeigen, dass nach 1000 Wischzyklen die antibakterielle Wirksamkeit der Testmuster nicht nachlässt. Daher wurden die Intervalle auf 3000, 5000 und 10000 Wischzyklen erhöht, um eine noch längere Lebensdauer zu simulieren. Es konnte auch hier gezeigt werden, dass bei allen Testmustern eine antibakterielle Wirksamkeit erhalten bleibt. Bei der Auswertung dieses Versuchsdurchlaufs zeigten die aufbereiteten Proben sogar eine noch stärkere antibakterielle Wirkung als die unbehandelte Kontrolle. Dies könnte auf natürliche biologische Schwankungen oder auf eine mögliche Verbesserung der Aktivität durch die Behandlung der Oberfläche hindeuten (Abbildung 6). Somit konnte das anfängliche Ziel, eine hohe Beständigkeit durch das Einbringen des Wirkstoffes in den Kunststoff erzielen zu können, erfüllt werden.

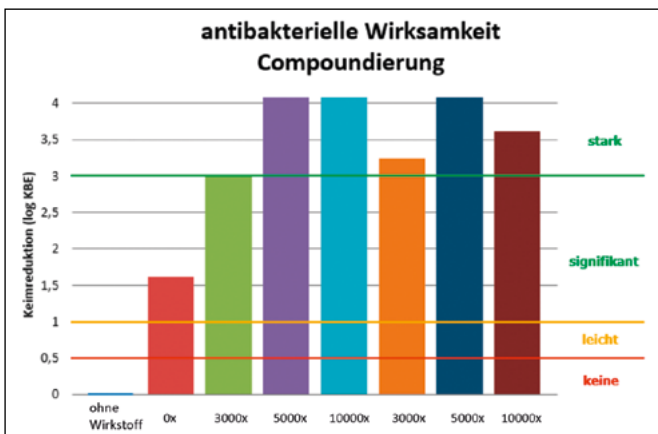


Abbildung 6: Nachweis der antibakteriellen Wirksamkeit der Testmuster nach erhöhten Wischzyklen

Fazit

Kontaminierte Medizinprodukte können zu einem erhöhten Risiko von behandlungsassoziierten Infektionen beitragen. Kürzlich durchgeführte Studien haben bereits bewiesen, dass antimikrobielle Beschichtungen die bakterielle Kontamination dieser Oberflächen reduzieren können, wodurch das Infektionsrisiko verringert werden kann. Es gibt zudem bereits wissenschaftliche Studien, welche den Nutzen solcher Beschichtungen unter realen Bedingungen im klinischen Umfeld nachweisen. [5]

Es konnte gezeigt werden, dass die Einbringung solcher antimikrobiell wirksamen Substanzen in das Ausgangsmaterial für den 3D-Druck möglich ist. Dies erlaubt die Herstellung von Produkten beliebiger geometrischer Form für nahezu jeden Zweck und mit einer integrierten antimikrobiellen Aktivität. Diese antimikrobielle Wirkung wird durch das Einbringen in den Kunststoff beständig und bleibt für lange Zeit erhalten. Der antimikrobielle Kunststoff übersteht in Laborversuchen auch eine simulierte Reinigung und Desinfektion über viele Jahre. Der in dieser Arbeit dargestellte Prozess bietet somit einen zusätzlichen Faktor im Kampf gegen Infektionen und bei der Unterstützung der Reinigung und Desinfektion.

Diese Schlussfolgerungen beruhen allerdings auf experimentellen Untersuchungen im Laborumfeld. Ein nächster Schritt muss es daher sein, diese Untersuchungen im Praxiseinsatz zu bestätigen. Dazu könnten z. B. Gegenstände aus antimikrobiellen Kunststoffen hergestellt werden, um diese im klinischen Alltag einzusetzen und so deren Auswirkungen auf die bakterielle Kontamination dieser Oberflächen und damit mögliche infektionspräventive Effekte zu überprüfen. Kombinationen dieser additiven Fertigungstechnik mit anderen Methoden wie dem 3D-Scannen könnten zu neuen Konzepten und Lösungen für die Weiterentwicklung der personalisierten Medizin, insbesondere in klinischen Fächern wie der Orthopädie und Unfallchirurgie sowie der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie führen. Es sind jedoch weitere Studien erforderlich, um die klinischen Auswirkungen solcher Produkte für die Risikominderung und Prävention von Infektionen zu bewerten.

Referenzen:

- [1] Bulitta C. ea. Antimikrobielle Oberflächen zur Infektionsprävention. VDI-Statusreport; 2020
- [2] Huppmann T. Maximierung der Oberflächentoxizität von Polymeren durch Titandioxid [Dissertation]. München; 2014
- [3] Auricchio F, Marconi S. 3D printing: clinical applications in orthopaedics and traumatology. EFORT open reviews 2017; 1. doi:10.1302/2058-5241.1.000012
- [4] ISO 22196:2011-08. Messung von antibakterieller Aktivität auf Kunststoff- und anderen porenfreien Oberflächen (2011 – 08). Beuth Verlag GmbH; 2011 (2011 – 08)
- [5] Eichner A, Holzmann T, Eckl DB, et al. Novel photodynamic coating reduces the bioburden on near-patient surfaces thereby reducing the risk for onward pathogen transmission: a field study in two hospitals. J Hosp Infect 2020; 104. doi:10.1016/j.jhin.2019.07.016

Kontakt:



Dr. rer. nat. Sebastian Buhl

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

se.buhl@oth-aw.de



Alexander Stich, M.Sc.

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



Sabine Gruber, M.Sc.

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



Jeannine Vogt, M.Sc.

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



Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen und Gesundheit
Dekan
Leitung Institut für Medizintechnik (IfMZ)
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

c.bulitta@oth-aw.de

Mitglied einer starken Gemeinschaft sein!



Gute Gründe, Mitglied zu sein:

- Exklusiv für Hausbankkunden
- Miteigentümer mit goldener Bankkarte
- Günstige Mitgliederversicherungen
- Attraktive Dividende ohne Kursrisiko

vr-nopf.de
☎ 0961 840



**Volksbank Raiffeisenbank
Nordoberpfalz eG**



Förderverein der OTH Weiden e. V.

Wir sind ein Zusammenschluss von Bürgerinnen und Bürgern, Institutionen, Unternehmen und Körperschaften in der Oberpfalz.

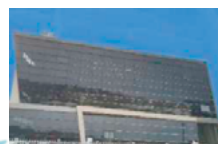
Die OTH wird von uns in jenen Bereichen unterstützt, in denen öffentliche Mittel nicht zur Verfügung stehen oder verstärkt werden müssen.

Wir sind gemeinnützig und haben folgende wesentliche Ziele:

- Ideelle und materielle Unterstützung der OTH
- Förderung des OTH-Bildungsauftrages
- Ausbau enger Bindungen zwischen Hochschule und Wirtschaft

Wir freuen uns über Ihren Beitritt!

Dipl.-Kfm. Günther Kamm
1. Vorsitzender
Förderverein der OTH Weiden e.V.
c/o Stadtbau GmbH Weiden
Leibnizstraße 4, 92637 Weiden
www.foerderverein-oth-weiden.de



PSZ 
electronic GmbH

Supplier of choice through innovation and service!

Die Firma PSZ electronic GmbH ist ein Produzent von maßgeschneiderten Kabelkonfektionen, Kabelsätzen, Schaltschränken sowie Baugruppen vorrangig für (Welt)-Marktführer und bietet in enger Zusammenarbeit mit den Kunden individuelle komplette Komponenten und Systemlösungen an. Die Firmengruppe ist mit über 1.350 Mitarbeitern an vier Standorten weltweit vertreten und produziert speziell für die Heizungs-, Klima- und Medizintechnik, den Maschinen-, Anlagen- und Gerätebau sowie für den Sonderfahrzeugbau. Die PSZ hat sich in den letzten Jahren zum Systemlieferanten entwickelt und bedient die unterschiedlichsten Branchen. Die herausragende Qualität unserer Produkte und Dienstleistungen sind der Garant unseres Erfolges.

**Kabelkonfektionen – elektromechanische Baugruppen – Systemkomponenten
Schaltschränke – Kunststofftechnik – Rapid Prototyping**



Wir bieten eine Perspektive für alle Berufsgruppen!

So vielfältig wie unsere Produkte sind auch Ihre Karrierewege in unserem Unternehmen.

Spannende Einblicke gibt es in unserer Homepage unter www.psz-electronic.com



PSZ electronic GmbH – Im Gstauch 6, 92648 Vohenstrauß - www.psz-electronic.com - 09651-924 117 – 0
info@psz-electronic.com für Bewerber: bewerbung@psz-electronic.com

Alexandra Jehlicka¹
Dr.-Ing. Philipp Ritt²
Michael Mark, B.Eng.¹
Agnes Pöllmann, M.Sc.¹
Prof. Dr. Ralf Ringler¹

1) Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, Weiden
2) Nuklearmedizinische Klinik, Universitätsklinikum Erlangen, Erlangen

Monte-Carlo-Simulation der Energieverteilung von Tc-99m mit GAMOS zur Detektion von Sentinel- Lymphknoten

Zusammenfassung

Die Dosimetrie spielt in der medizinischen Physik eine entscheidende Rolle, weshalb zahlreiche Programme für Dosisberechnungen in der medizinischen Anwendung entwickelt wurden. Diese beruhen größtenteils auf Monte-Carlo-Simulationen – ein Verfahren aus der Stochastik, wobei für eine große Anzahl an gleichartigen Zufallsexperimenten eine numerische Lösung für ein analytisch nicht oder nur schwer lösbares Problem angegeben wird.

Ein Monte-Carlo-Toolkit zur Simulation des Durchgangs von Teilchen durch die Materie ist unter anderem GAMOS (Geant₄ based Architecture for Medicine Oriented Simulations).

Mittels GAMOS soll in dieser Arbeit das räumliche Auflösungsvermögen einer Gammasonde – Crystal Probe – der Firma Crystal Photonics für den Einsatz in der Sentinel-Diagnostik bestimmt werden. Im Allgemeinen geschieht dies durch einen experimentellen Messaufbau, indem die Sonde an einer Tc-99m-Punktquelle horizontal vorbeigefahren und das FWHM (Full Width half Maximum) der Messkurve bestimmt wird.

Abstract

Dosimetry plays a crucial role in medical physics, for which reason numerous programs for dose calculations in medical applications have been developed. These are mostly based on Monte-Carlo simulations – a method from stochastics, whereby a numerical solution for a problem that cannot be solved analytically or only with difficulty is given for a large number of similar random experiments.

One Monte-Carlo-toolkit for simulating the passage of particles through matter is GAMOS (“Geant₄ based Architecture for Medicine Oriented Simulations”).

Using GAMOS, in this work the resolution of the gamma probe (Crystal Probe) from Crystal Photonics for use in sentinel diagnostics is to be determined. In general, this is done using an experimental measurement setup, in which the probe is moved horizontally past a Tc-99m point source and the FWHM (Full Width Half Maximum) of the measurement curve is determined.

1 Einleitung

GAMOS ist ein GEANT₄-basiertes Framework, womit man durch einfache Benutzerbefehle Dosisimulationen durchführen kann. Der Vorteil von GAMOS gegenüber GEANT₄ liegt darin, dass vom Anwender keine größeren C++ Kenntnisse vorausgesetzt werden und somit ein größeres Spektrum an Nutzern vor allem auch im medizinischen Bereich angesprochen wird.

Als Alternative zum experimentellen Messaufbau soll die Bestimmung der Ortsauflösung durch eine Simulation des Strahlungstransports eines radioaktiv markierten Wächterlymphknotens in einem brustgewebeäquivalenten Phantom mit GAMOS erfolgen. Für die MC-Simulation wird zuerst das Phantom und die Sonde modelliert und anschließend ein Tc-99m Punktquelle definiert. Für die Auswertung der Energieverteilung der Quelle entlang der X-Achse werden die Energiedepositionen in der Sonde berücksichtigt und in einer Datei ausgegeben.

2 Simulationsaufbau und Eingabeparameter

2.1 Geometrie

Für die Simulation in GAMOS wird zuerst die Geometrie des Lymphknoten-Phantoms und der Gammasonde über eine Parameter-Datei definiert und an der richtigen Stelle im Raum positioniert. Dem Phantom bzw. der Sonde kann mit GAMOS das entsprechende Material mit dazugehöriger Dichte zugewiesen werden. Dazu stellt GAMOS eine vordefinierte Textdatei mit sämtlichen Materialien und Elementen als Library zur Verfügung. Das im Labor verwendete Phantom besteht aus einer 5 mm dicken Weichteilgewebeschicht und ist innen mit Luft bzw. Wasser gefüllt und in Abbildung 1 als Model für die Simulation mit GAMOS nachgebildet.

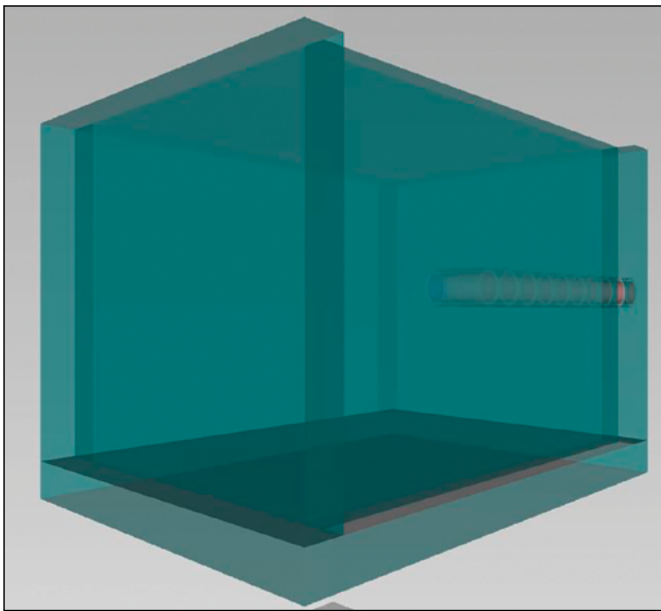


Abbildung 1: Lymphknoten-Phantom mit 10 Sonden

Die Sonde hat einen CsJ-Detektor und wurde entsprechend den Geometrien der Crystal Probe definiert. Dazu wurden ein Kollimator mit einem 40 Grad Öffnungswinkel aus Wolfram sowie eine 1 mm dicke Seitenabschirmung erstellt.

Um die Energieverteilung entlang der X-Achse zu beurteilen, werden zehn Sonden nebeneinander positioniert und anschließend jeweils um 2 mm horizontal verschoben (Abbildung 2). Somit kann die im Labor über die gesamte Breite von 10 cm verschobene Crystal-Probe-Sonde in der Simulation nachgebildet werden.

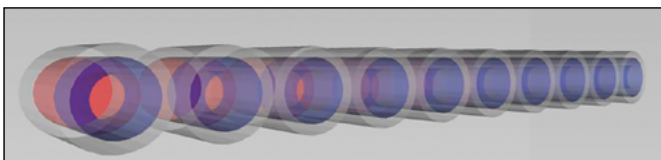


Abbildung 2: Aufbau der Sonden mit CsJ-Detektor (Rot), 40° Kollimator (blau) und Seitenabschirmung (grau)

2.2 Primärer Generator und Physikmodul

In einer zweiten Eingabe-Parameter-Datei wird zunächst ein Physikmodul festgelegt und ein primärer Generator ausgewählt. Im GAMOS stehen drei verschiedene Physikmodule (standard, penelope, low energy) zur Verfügung, welche sich in der Berechnung der physikalischen Prozesse unterscheiden. Für die durchgeführte Simulation wird auf das Standard-Modul mit dem Benutzerkommando `/gamos/physicsList GmEMPhysics` zurückgegriffen. Für die Teilchenerzeugung wird ein primärer Generator über die Eingabe von `/gamos/generator GmGenerator` erstellt und anschließend eine Tc-99m-Partikelquelle, welche den markierten Lymphknoten darstellt, mit einer Zerfallsenergie von 140 keV definiert:

```
/gamos/generator/addSingleParticleSource quelle1  
gamma 140*keV
```

Für die Partikelquelle lassen sich verschiedene Parameter, wie die Energie-, Richtungs-, Zeit- und Positionsverteilung festlegen.

In dieser Simulation befindet sich die Quelle im Phantom 1 cm bzw. 3 cm von der Sonde entfernt mit einer konstanten Zeit- und Energieverteilung, d. h. alle Partikel werden mit 140 keV zum Zeitpunkt 0 generiert.

Aufgrund der hohen Rechenzeit wurde eine kegelförmige Richtungsverteilung mit einem Öffnungswinkel von 152 Grad ausgewählt, sodass nur Teilchen in Richtung der Sonden ausgesendet werden (Abbildung 3).

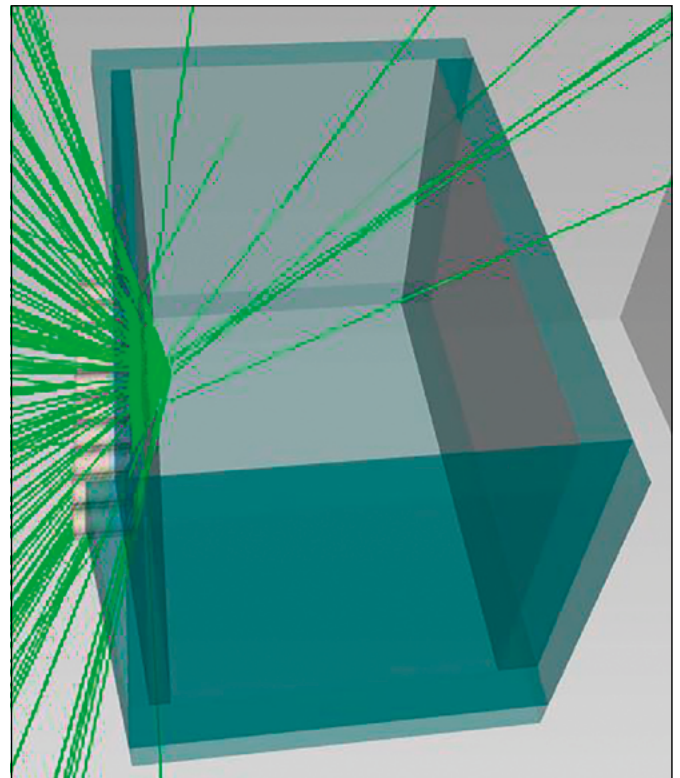


Abbildung 3: Richtungsverteilung der Tc-99m-Punktquelle mit 152° Öffnungswinkel

Analog zur Energiediskriminierung der Crystal-Probe-Sonde wird ein Minimum der kinetischen Energie von Gammapartikel und Elektronen bei 99 keV in der Simulation festgelegt. Damit wird in der späteren Analyse sichergestellt, dass nur Energiedepositionen größer 100 keV berücksichtigt werden.

Das Programm wird mit einer Anzahl von 50 000 Events gestartet. In der Simulation wird damit der Strahlungstransport für 50 000 Gamma-Quanten mit einer Startenergie von 140 keV simuliert.

2.3 Ausgabe

Für die Analyse der berechneten Ergebnisse werden aus der Simulation u. a. die folgenden Daten generiert: Position, aufsummierte oder verlorene Energien, Partikelname, kinetische Energien, Winkel, u.v.m. Um das Auflösungsvermögen der Sonde zu bestimmen, werden aus dem Ergebnis der Simulation die aufsummierten Energiedepositionen in den jeweiligen Detektoren weiter analysiert, indem zwei Filter definiert werden. Dazu wird zum einen überprüft, ob sich das Teilchen im Detektor befindet und im Weiteren wird über den Energiefilter geprüft, ob die im Detektor deponierte Energie des Teilchens noch größer als 100 keV ist. Zur Analyse werden die gesamten aufsummierten deponierten Energien im oben genannten Bereich analysiert. Um die gesamte Achse abzubilden, muss die Simulation viermal, mit jeweils 2 mm horizontaler Verschiebung der Detektoren, ausgeführt werden.

3 Ergebnisse und Auswertung

Abbildung 4 zeigt die Ortsauflösung der Sonde in Luft in 1 cm Tiefe der Quelle. Mit einer Anzahl von 319 Hits bzw. Energiedepositionen im Detektor über 100 keV pro Hit erreicht die Kurve einen maximalen Wert von 36,59 MeV bei $x = 0$. Das FWHM beträgt dabei knapp 8,5 mm. Bei der Simulation mit einem wassergefüllten Phantom ergibt sich ein Wert von 8,6 mm mit einem Maximum von 35,97 MeV bei 308 Hits über 100 keV (Abbildung 5). Damit zeigt sich, dass die Auflösung in Wasser etwas geringer ist als in Luft. Die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit der Gammapartikel ist in Wasser deutlich höher, weshalb die Anzahl an gestreuten Teilchen zunimmt. Je weiter die Quelle entfernt ist, umso schlechter wird das Auflösungsvermögen der Sonde. Die Anzahl an Streuprozessen nimmt mit der Weglänge eines Teilchens zu, weshalb auch weniger bzw. niedrigere Energiedepositionen im Detektor stattfinden. Dies lässt sich in Abbildung 6 veranschaulichen, welche die Energieverteilung der Quelle in 3 cm Tiefe darstellt. Bei einem Maximum von fast 6 MeV mit 57 Energiedepositionen und einem FWHM von 21,4 mm, zeigt die Kurve einen deutlich flacheren und breiteren Verlauf als bei einem Quellenabstand von 1 cm.

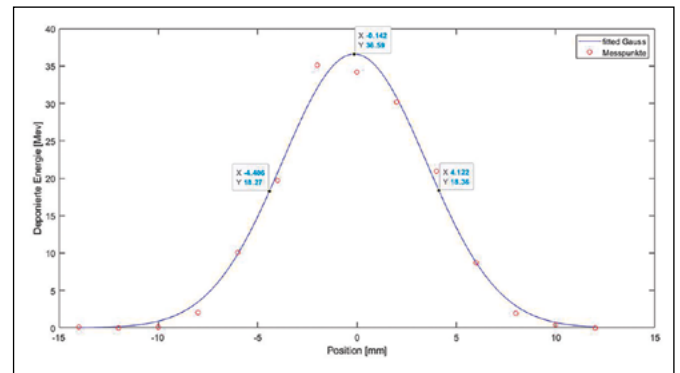


Abbildung 4: Ortsauflösung der Gammasonde in 1 cm Tiefe in Luft

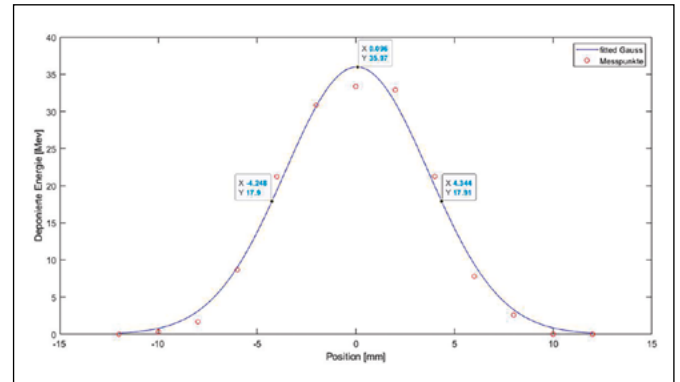


Abbildung 5: Ortsauflösung der Gammasonde in 1 cm Tiefe in Wasser

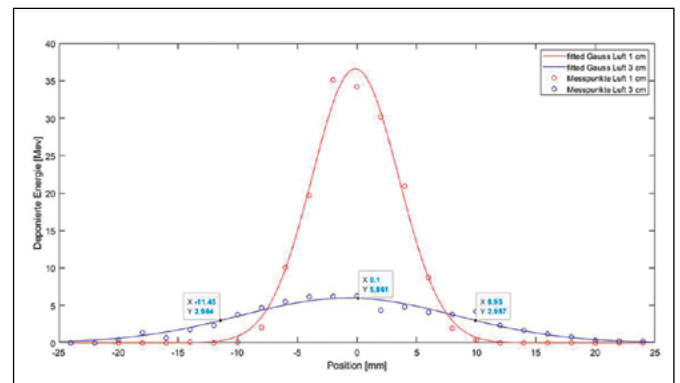


Abbildung 6: Ortsauflösung in 1 cm (rot) und 3 cm (blau) Tiefe in Luft

4 Schlussfolgerung und Ausblick

Nach Angaben der Firma Crystal Photonics hat die Gammasonde eine Ortsauflösung von < 11 mm in 1 cm Tiefe bzw. von 23 mm bei einer Tiefe von 3 cm. Durch die Simulation in GAMOS konnten diese Werte mit 8,5 mm bzw. 21,4 mm sehr gut nachgebildet werden. Eine Optimierung der Simulation ist durch eine Vergrößerung des Öffnungswinkels möglich, da auch rückgestreute Partikel berücksichtigt werden können. Im weiteren Verlauf soll der Einfluss des Öffnungswinkels genauer untersucht werden. Zusätzlich sollen Simulationen mit mehreren Partikelquellen durchgeführt werden, um den minimalen Detektionsabstand von zwei Aktivitätsanreicherungen in unterschiedlichen Tiefenlagen zu bestimmen.

Referenzen:

- [1] GAMOS Collaboration, GAMOS 5.1.0 User`s Guide (30.11.2016), http://fimed.ciemat.es/GAMOS/gamos_userguide.php
- [2] A. Pöllmann, J. Stemmer, L. Blümelein, K. Schuller, M. Stich, P. Hammer, R. Ringler, „Reduktion der Strahlenexposition durch automatisierte LabView Steuerung und Messung am Beispiel des Sentinell-Lymphknoten-Phantoms“. Forschungsbericht 2020 der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden. 85 – 90.

Projektpartner:

Universitätsklinikum Erlangen

Kontakt:



Alexandra Jehlicka

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

a.jehlicka@oth-aw.de



Michael Mark, B.Eng.

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen
und Gesundheit
Medizintechnik/Medizinische Physik
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

m.mark@oth-aw.de



Agnes Pöllmann, M.Sc.

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen
und Gesundheit
Medizintechnik/Medizinische Physik
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

a.poellmann@oth-aw.de



Prof. Dr. Ralf Ringler

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen
und Gesundheit
Medizintechnik/Medizinische Physik
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

r.ringler@oth-aw.de

Heike Kraus¹
Dr.-Ing. Philipp Ritt²
Michael Mark, B.Eng.¹
Prof. Dr. Ralf Ringler¹

1) Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, Weiden
2) Nuklearmedizinische Klinik, Universitätsklinikum Erlangen, Erlangen

Entwicklung und Realisierung eines gewebeäquivalenten Body-Phantoms mittels 3D-Druck-Verfahren für die Dosimetrie in der Nuklearmedizin

Zusammenfassung

Zur in-vitro-Dosimetrie in der Nuklearmedizin werden häufig Standard Mess-Phantome eingesetzt. Mittels Additiver Fertigungsverfahren können Mess-Phantome erweitert werden, um ein Standard Body-Phantom mit weiteren Organen zu ergänzen, damit die Dosimetrie sich mehr der in-vivo-Situation annähert. Durch unterschiedliche Druckverfahren und 3D-Druck-Materialien werden die verschiedenen Materialproben anhand ihrer Streu- und Absorptions-Eigenschaften in Bezug auf ionisierende Strahlung analysiert. Die Materialproben, die eine gewebeähnliche Eigenschaft aufzeigen, werden zur Erstellung eines neuen Body-Phantoms mit einem künstlichen Brustkorb, bestehend aus Rippen und Wirbelsäule, genutzt.

Abstract

Standard measuring phantoms are often used for in vitro dosimetry in nuclear medicine. By means of additive manufacturing processes, measuring phantoms can be extended to supplement a standard body phantom with additional organs, so that the dosimetry approaches the in vivo situation more closely. Using different printing techniques and 3D printing materials, the various material samples are analyzed for scattering and absorption properties with respect to ionizing radiation. Material samples that exhibit tissue-like properties are used to create a new body phantom with an artificial chest consisting of ribs and a spine.

1. Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Zur Diagnostik und Therapie mit offenen radioaktiven Stoffen sind der Nuklearmedizin enge Grenzen gesetzt. Die rechtfertigende Indikation muss dabei für jeden Patienten einzeln geprüft werden, um die Strahlenexposition so niedrig wie möglich zu halten. Das hat zur Folge, dass Dosismessungen oder andere Messungen im Sinne des Strahlenschutzes an Phantomen durchgeführt werden. In der Nuklearmedizinischen Klinik am Universitätsklinikum Erlangen werden derzeit Messungen mit einem Body-Phantom der Physikalisch-technischen Werkstätten (PTW) [1] Freiburg mit 3D-gedruckten Nieren durchgeführt. Ziel hierbei ist die voxelweise in-vivo-Dosimetrie für den Patienten unter Berücksichtigung und Bestimmung des Partialvolumeneffektes.

1.2 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines Body-Phantoms, das neben den 3D-gedruckten Nieren des Universitätsklinikums Erlangen einen Brustkorb bestehend aus einer Wirbelsäule und Rippen beinhaltet. In einem ersten Ansatz sollen diese Strukturen möglichst mittels 3D-Druck-Materialien in additiven Fertigungsverfahren erstellt werden.

2. Materialien zur Phantomherstellung

2.1 Additive Fertigungsverfahren

Bei additiven Fertigungsverfahren werden die zu erstellenden Organe im „Schichtbauprinzip“ gedruckt. Dabei können Strukturen im Mikrometer-Bereich erstellt werden. [2]

Die Arbeitsschritte, die von dem Modell bis zum fertigen Bauteil notwendig sind, werden in Abbildung 1 vereinfacht dargestellt.

- Schritt 1** Als erster Schritt wird ein CAD-Modell erstellt. Dieses Modell kann durch segmentierte CT-Daten unterstützt werden. [2]
- Schritt 2** Aus den gewonnenen Daten wird ein Schichtmodell generiert. Die Schichten werden später nacheinander mit dem verwendeten Druckverfahren aufgetragen, um so das Modell aufzubauen.
- Schritt 3** Die Daten werden an den Drucker übertragen, um das Organ zu drucken. [2]

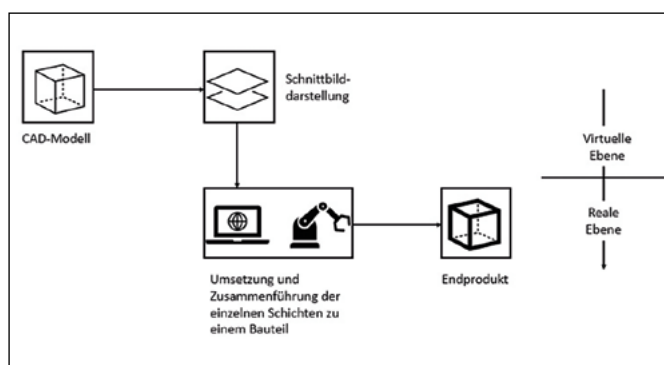


Abbildung 1: Prinzip der Additiven Fertigung, modifiziert nach [2]

Für die Erstellung des Phantoms werden die Verfahren Fused-Deposition-Modelling (FDM), Stereolithografie (SLA), Arburg Kunststoff-Freiformen (AKF), Polyjet und eine besondere Form der Stereolithografie, die mit einem LCD-Bildschirm funktioniert (UV-LCD) auf die Eignung zur Organerstellung für das Phantom untersucht. Für FDM, SLA und AKF werden feste Kunststoffe verwendet, für die anderen Verfahren flüssige Kunstharze.

2.2 Materialevaluation

Von den verfügbaren Kunststoffen werden Proben gefertigt, woraufhin diese zur Ermittlung ihrer Eigenschaften (Streuung und Absorption) mit dem CT untersucht werden. Weitere wichtige Materialeigenschaften sind die Dichte, das Verhalten in Wasser, die Druckbarkeit und die Massenschwächung.

Es werden Proben aus Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Polymilchsäure (PLA) und aus mehreren Kunstharzen gedruckt und getestet. Die genauen Materialbezeichnungen und die Hersteller sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Materialien mit Hersteller und Bezeichnung

Material	Hersteller, Bezeichnung
Feste Ausgangsstoffe	
ABS_F	Filamentworld, ABS
ABS_I	Ineos Styrolution, Terluran GP-35
PLA	Filamentworld, PLA
Kunstharze	
Grey Pro	Formlabs, Photopolymer Harz für Form 2
VeroClear	Stratasys, VeroClear
VeroWhitePlus	Stratasys, VeroWhitePlus
Filamentworld Resin	Filamentworld, UV-sensitives Epoxydharz

Als Skala für eine CT-Untersuchung werden Hounsfield-Units (HU) verwendet. Die HU-Werte geben Aussage über die Schwächung der Röntgenstrahlung in Gewebe oder auch Materialien. Die Darstellung der Aufnahmen erfolgt in Graustufen. Um die HU-Werte der Materialien herauszufinden, werden die gedruckten Materialproben im CT untersucht. Anschließend werden die Aufnahmen mittels des open-source-Programmes ITK-SNAP ausgewertet.

Um einen guten Kontrast mit gleichmäßigem Hintergrund zu bekommen, werden die Proben in Wasser gemessen (Abbildung 2). Das Wasser dient zudem als Referenzwert für die Bestimmung der HU-Werte der 3D-Druck-Materialien.

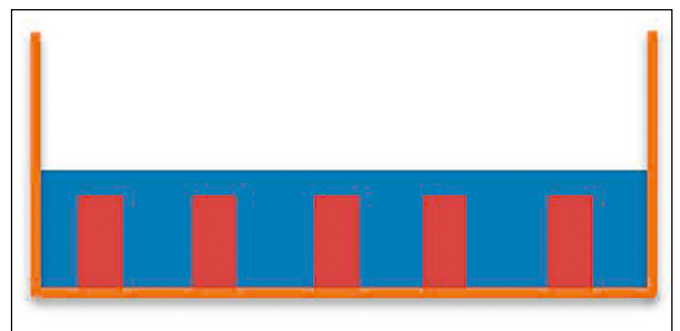


Abbildung 2: Versuchsaufbau mit Wasserbad zum Test der 3D-Druck-Materialien im CT

2.3 Erstellung des Body-Phantoms

Das erweiterte Phantom wird mit einem Brustkorb bestehend aus fünf Rippenpaaren und einer Wirbelsäule ergänzt. Die 3D-Modelle wurden in CATIA V5R20™ erstellt (Abbildung 3).

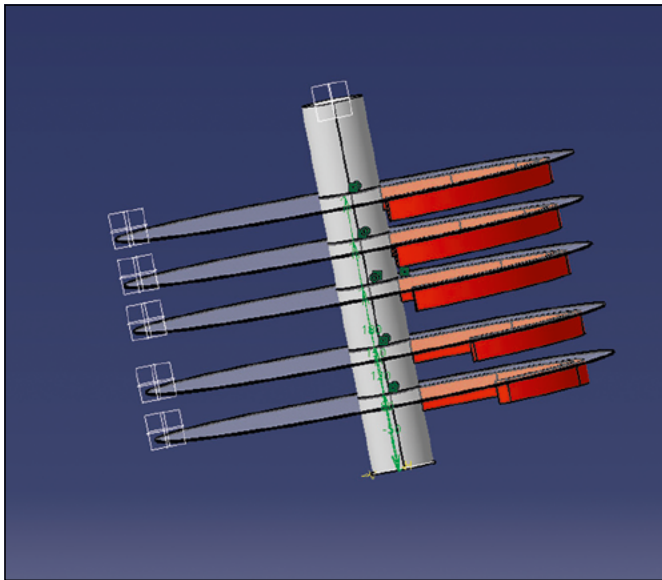


Abbildung 3: Dreidimensionale Darstellung des Brustkorbes für das neue Phantom

3 Ergebnisse

Im nachfolgenden Abschnitt sind die Ergebnisse aus der Materialevaluation und der Entwicklung des Body-Phantoms aufgelistet.

3.1 Materialevaluation

Die HU-Werte stammen aus den CT-Aufnahmen der Materialproben und wurden mit dem open-source-Programm ITK-SNAP ausgewertet. Das Verhalten in Wasser ist den Datenblättern der jeweiligen Hersteller – soweit verfügbar – entnommen, siehe Tabelle 2.

Tabelle 2: Ergebnisse der Materialevaluation

Material	HU	Wasser	Druck
ABS_I	-172,6	-	gut
ABS_F	-53,0	Unlöslich	befriedigend
PLA	157,4	Unlöslich	befriedigend
GreyPro	111,8	-	gut
VeroWhitePlus	107,9	Unlöslich	sehr gut
VeroClear	104,9	Unlöslich	sehr gut
Filamentworld Resin	147,2	-	sehr gut

Die Bewertung des 3D-Druckes erfolgt mit der Einteilung in den drei Stufen: sehr gut – gut – befriedigend. So zeigt beispielsweise der Druck mit dem Grey Pro Kunstharz eine sehr gute Oberfläche und ist sehr fein gedruckt. Jedoch hat die Probe aus unbekanntem Gründen eine klebrige Oberfläche und wird damit nur als gut eingestuft.

3.2 Entwicklung des Body-Phantoms

Das erweiterte Body-Phantom besteht aus einer Hülle aus PLA, im FDM-Verfahren mit dem Drucker Makerbot Replicator Z18 erstellt. Der Boden und der Deckel bestehen aus einer PMMA-Platte.

Der Body ist zweischichtig gedruckt, um die Wasserdichtigkeit zu gewährleisten. Dies ist in einer stark vergrößerten CT-Aufnahme zu erkennen – Abbildung 4.

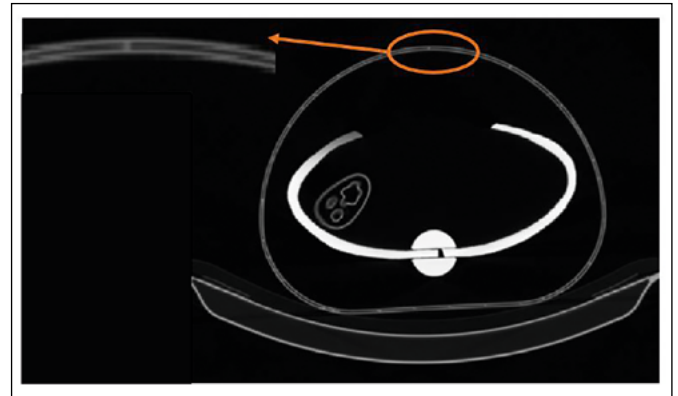


Abbildung 4: CT-Aufnahme des neuen Body-Phantoms in Luft mit einer Niere und Brustkorb. Der stark vergrößerte Bildausschnitt zeigt die zwei Schichten der Wand des Body.

Der Brustkorb und die Wirbelsäule bestehen aus Polytetrafluorethylen (PTFE oder Teflon, Dichte $2,2 \text{ g/cm}^3$), das eine ähnliche Schwächungseigenschaft wie Knochen besitzt. Aufgrund der Material-Eigenschaften von Teflon werden die Rippen und die Wirbelsäule auf Grundlage technischer Zeichnungen in konventioneller Weise hergestellt. Die Wirbelsäule und Rippen sind durch Steckverbindung miteinander verbunden, sodass der Brustkorb schnell und einfach im Phantom montiert werden kann. Am Boden des Phantoms können die 3D-Druck-Modelle der Nieren und die Wirbelsäule sicher positioniert werden.

4 Ausblick

Der Einbau des Brustkorbs ist die erste Stufe, um das Body-Phantom an anatomische Gegebenheiten anzupassen. Um die Dosimetrie im Phantom weiter zu verbessern, ist in den nächsten Schritten geplant, die Leber, die nach oben hin an die rechte Niere grenzt, sowie die Milz, die oberhalb der linken Niere angesiedelt ist, zu ergänzen. Durch das Einfügen dieser Strukturen und weiterer Strukturen, wie dem Abdomen, kann in Zukunft die Patientendosimetrie optimiert werden.

Damit wird es möglich, patientenspezifisch eine individuelle Therapie in der Nuklearmedizin anzubieten. Die Ergebnisse aus vorherigen Messungen können genutzt werden, um die Patientendosimetrie zu verbessern.

Referenzen:

- [1] Physikalisch-Technische Werkstätten (PTW): User Manual PET/SPECT Phantoms L981602, L981605, L981606 and L981607. Freiburg: 2011
- [2] Gebhardt, Andreas: Additive Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping – Tooling – Produktion. 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, München: Hanser, 2016.

Projektpartner:

Universitätsklinikum Erlangen

Kontakt:



Heike Kraus

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

h.kraus@oth-aw.de



Michael Mark, B.Eng.

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen
und Gesundheit
Medizintechnik/Medizinische Physik
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

m.mark@oth-aw.de



Prof. Dr. Ralf Ringler

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen
und Gesundheit
Medizintechnik/Medizinische Physik
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

r.ringler@oth-aw.de

Larissa Blümlein, M.Sc.^{1,2}
Prof. Dr. Oliver Kölbl¹
Prof. Dr. Ralf Ringler²
Prof. Dr. Barbara Dobler¹

1) Klinik und Poliklinik für Strahlentherapie, Universitätsklinikum Regensburg, Regensburg
2) Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, Weiden

Untersuchung des Einflusses eines Magneten für die Deaktivierung der ATA-Therapiefunktion in der Strahlentherapie bei 6 MV

Zusammenfassung

Einflüsse ionisierender Strahlung auf aktive Implantate sind vielschichtig. U.a. können Änderungen der Antitachyarrhythmie (ATA)-Therapieeinstellung bei Implantierbaren Kardioverter-Defibrillatoren (ICDs) auftreten. Die ATA-Therapieeinstellung in ICDs wird daher vor der Bestrahlung mit einem Magneten deaktiviert. Ziel der Studie war, den Einfluss des Magneten auf die Dosisverteilung im Patienten zu überprüfen. Anhand der Ergebnisse lassen sich Überhöhungen der Hautdosis aufgrund erhöhter Streustrahlung bei direkter oder ipsilateraler Bestrahlung des Magneten feststellen. Eine PTV-Unterdosierung durch Abschirmung kann ebenfalls auftreten. Große Abweichungen zwischen dem Bestrahlungsplanungssystem und der Messung treten auf, wenn der Magnet kontralateral bestrahlt und im out-of-field Bereich liegt. Hierbei wird der Einfluss des Magneten unterschätzt.

Abstract

The influences of ionizing radiation on active implants are complex. For example, changes in the antitachyarrhythmia (ATA) therapy settings of implantable cardioverter defibrillators (ICDs) may occur. The ATA therapy setting in ICDs is therefore deactivated before irradiation with a magnet. The aim of the study was to examine the influence of the magnet on the dose distribution in the patient. The results show excessive skin dose due to increased scattered radiation when the magnet is irradiated directly or ipsilaterally. PTV underdosage due to shielding may also occur. Extreme deviations between the irradiation planning system and the measurement occur when the magnet is irradiated contralaterally and is in the out-of-field range. Here, the influence of the magnet is underestimated.

Einleitung

Bei Patienten mit ICDs wird unter bestimmten Voraussetzungen ein Magnet zur Deaktivierung der ATA-Therapiefunktion direkt über dem Implantat, auf die Haut aufgesetzt. Dies soll eine inadäquate Schockabgabe während der Bestrahlung verhindern. Ist der Magnet in der Nähe des Zielvolumens platziert, ist es fraglich, ob es dadurch zu Überdosierungen oder auch Unterdosierungen kommen kann. Überdosierungen könnten durch die erhöhte Streustrahlung am Magneten direkt auf der Haut auftreten. Ist der Magnet zu nahe am Zielvolumen platziert, könnte es zu einer Abschirmung und somit zu einer Unterdosierung im Zielvolumen kommen. Beide Hypothesen wurden folgend untersucht.

Material und Methoden

Um den Einfluss eines Magneten auf die Dosisverteilung bei 6 MV zu untersuchen, wurden drei verschiedene Bestrahlungsszenarien durchgeführt:

- (1) Direkte Bestrahlung des Magneten im RW3-Plattenphantom mit statischem 10 x 10 cm Bestrahlungsfeld, bei SSD 100 und mit 2 Gy. (Abbildung 1)
- (2) Ipsi- sowie (3) kontralaterale VMAT Bestrahlung im Aldersonphantom mit Anlehnung an eine Mammastrahlung (VMAT, DArc Teilrotation, 1,8 Gy) sowie jeweils eine Referenzmessung ohne Magnet (Abbildung 2).

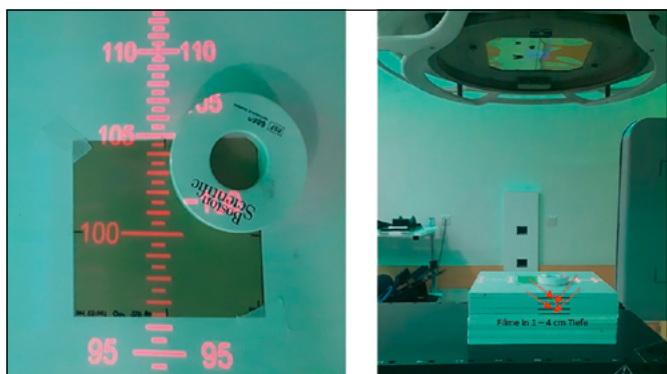


Abbildung 1: Szenario 1: direkte Bestrahlung des Magneten im RW3-Plattenphantom. Gafchromic-Filme sind direkt unter dem Magneten sowie in 1 – 4 cm Tiefe eingebracht.

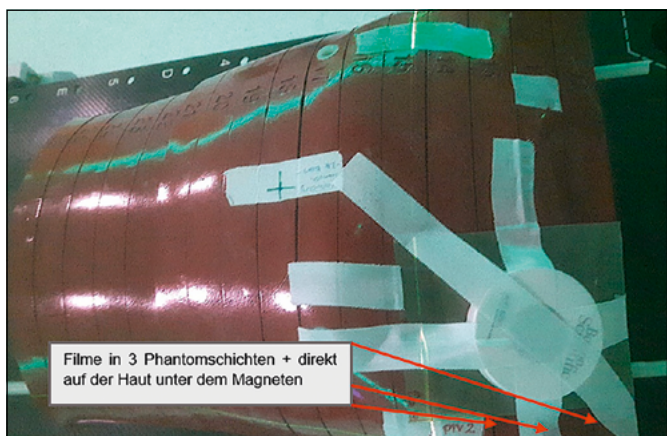


Abbildung 2: Szenario 2 und Ipsi- und kontralaterale Bestrahlung des Magneten anhand einer Mammabestrahlung. Gafchromic-Filme sind in 3 Phantomschichten vertikal eingebracht sowie unter dem Magneten horizontal, um die Hautdosis unterhalb des Magneten zu messen.

Für (2) und (3) erfolgte die Bestrahlungsplanung ohne Magnet im Bestrahlungsplanungssystem Monaco (Elekta, Stockholm, Schweden). Zur Dosimetrie wurden Gafchromic-EBT3-Filme verwendet, welche im RW3-Plattenphantom horizontal in verschiedenen Tiefen (1 – 4 cm) sowie vertikal in 3 verschiedenen Schichten des Aldersonphantoms eingebracht wurden. Zur Messung der Hautdosis wurde ein Film direkt unter dem Magneten positioniert. Für alle Filme wurden die Abweichungen zur Referenzmessung sowie der Kalkulation ohne Magnet in Monaco berechnet. Die Auswertung erfolgte anhand der MyQA Software (iba Dosimetry GmbH, Schwarzenbruck, Deutschland). Die Referenzmessung (ohne Magnet) wurde dabei der Messung mit Magnet gegenübergestellt. Anhand der eingezeichneten ROIs konnte die Hautdosis sowie in 1 – 4 cm Tiefe die Dosis ermittelt werden. Die Software gibt dabei die mittlere Dosis sowie die minimale und maximale Dosis der ROI aus.

Ergebnisse

Bei direkter Bestrahlung (1) trat eine um Faktor 5 überhöhte Hautdosis auf. Im weiteren Tiefenverlauf geht die

Dosis aufgrund des Magneten stark zurück (20%). (Abbildung 4)

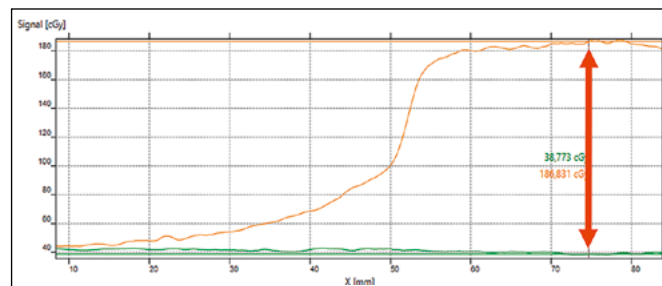


Abbildung 3: Bei direkter Bestrahlung kommt es unter dem Magneten zu einer überhöhten Hautdosis um Faktor 5. Darstellung für eine Fraktion.

Bei ipsilateraler Bestrahlung (2) konnten eine Überhöhung der Hautdosis um 31 % sowie Doseinbrüche in 2 cm Tiefe unter dem Magneten von 18 % festgestellt werden.

Bei kontralateraler Bestrahlung (3) trat eine reduzierte Hautdosis von 10 % auf, während in 3 – 4 cm Tiefe ein Anstieg der Dosis um 4 % ermittelt wurde. (Abbildung 4)

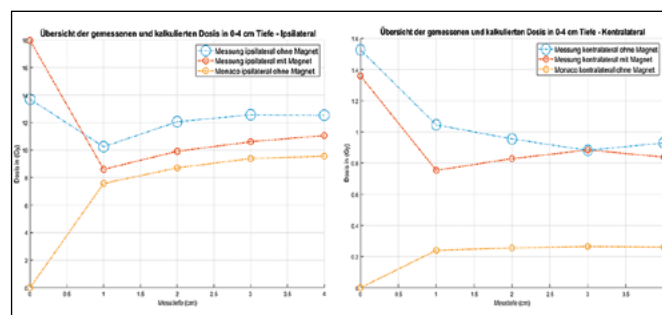


Abbildung 4: Gegenüberstellung der Filmmessungen mit und ohne Magnet sowie der kalkulierten Dosis in Monaco (ohne Magnet) für die ipsi- und kontralaterale Bestrahlung des Magneten im Aldersonphantom. Dargestellt in den verschiedenen Messtiefen 0 – 4 cm. Alle Dosiswerte wurden auf 28 Fraktionen hochgerechnet ($GD=50,4$ Gy).

Die Dosisberechnung in Monaco ohne Magnet zeigt im Vergleich zur Messung mit Magnet bei ipsilateraler Bestrahlung keine großen Abweichungen. Auffällig ist die große Abweichung bei kontralateraler Bestrahlung. Hier wird die Dosis im out-of-field-Bereich von Monaco um Faktor 3 unterschätzt.

Die großen Abweichungen zwischen der gemessenen und kalkulierten Dosis bei kontralateraler Lage des Magneten können mit der nach [1] definierten „out-of-field nontarget dose“ erklärt werden. Als out-of-field nontarget dose wird die Strahlung beschrieben, die nicht nur außerhalb des Zielvolumens, sondern auch außerhalb der primären Feldgrenzen entsteht. Der out-of-field-Bereich liegt hier weder im Ein- noch im Austrittsbereich des Beams. Die Strahlung wird nur aufgrund von Streuung oder sekundärer Strahlung erzeugt. In diesem Bereich ist bekannt, dass das Planungssystem generell

sehr ungenau die Dosis kalkuliert, wodurch sehr große Abweichungen entstehen können.

Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen Überhöhungen der Hautdosis aufgrund erhöhter Streustrahlung bei direkter Bestrahlung um den Faktor 5. Bei ipsilateraler Bestrahlung des Magneten konnte eine Überhöhung der Hautdosis von 31 %

festgestellt werden. Eine Unterdosierung am Rande des Zielvolumens durch Abschirmung des Magneten kann ebenfalls bei einer ipsilateralen Bestrahlung auftreten. Liegt der Magnet kontralateral zum PTV, verhält sich die Hautdosis durch den Magneten unkritisch. Auffällig sind hier große Abweichungen zwischen der Messung und der Kalkulation im TPS, da der Magnet im out-of-field-Bereich liegt. Hier wird die Dosis in Monaco unterschätzt.

Referenzen:

- [1] S. F. Kry et al. (2017), AAPM TG 158: Measurement and calculation of doses outside the treated volume from external-beam radiotherapy, Med. Phys. 44 (10), e391-e429

Projektpartner:

Universitätsklinikum Regensburg

Fördergeber:

BayWISS
Bayerisches Wissenschaftsforum

Bayerisches Staatsministerium für
Wissenschaft und Kunst



Kontakt:



Larissa Blümlein, M.Sc.

Universitätsklinikum Regensburg
Franz-Josef-Strauß-Allee 11
93053 Regensburg

larissa1.bluemlein@ukr.de



Prof. Dr. Ralf Ringler

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen
und Gesundheit
Medizintechnik/Medizinische Physik
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

r.ringler@oth-aw.de

Segmentierung muskulotendinöser Strukturen der Hüfte aus der 3D-Bildgebung zur patientenspezifischen Modellierung von biomechanischen Mehrkörpersimulationen

Christopher Fleischmann, M.Sc.
David Scherb, M.Sc.
Irina Leher, B.Eng.
Alexander Wolf, M.Sc.
Dr.-Ing. Jörg Miehling
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack
Prof. Dr. med. habil. Stefan Sesselmann

Zusammenfassung

Aufgrund einer stetigen Zunahme implantierter Hüftendoprothesen rücken biomechanische Mehrkörpersimulationen zum Verhalten dieser Implantate im Körper immer mehr in den Fokus. Solche Simulationen ermöglichen die Berechnung durch die von Kunstgelenken veränderten Kräfte, Momente und Muskelaktivitäten im menschlichen Körper und sollen zukünftig zur Verbesserung der Operationsplanung und somit der Operationsergebnisse beitragen. Für diese Simulationen werden in der Regel Modelle des menschlichen Körpers verwendet, die meist nur auf Größe und Gewicht des Patienten zugeschnitten werden. Für eine Optimierung der Operationsergebnisse müssen diese Modelle entsprechend noch an den Patienten individuell angepasst werden. Daher werden individualisierte 3D-Knochenmodelle durch Segmentierung von CT- und MRT-Scans erstellt und mit verschiedenen Orientierungspunkten versehen. Dies erlaubt es, sowohl die Form als auch die Größe der Knochen, in diesem Fall des Oberschenkelknochens, für das Menschmodell anzupassen und anschließend patientenspezifische Anpassungen von Muskelansatzpunkten vorzunehmen. Auch einzelne Muskeln können in der 3D-Bildgebung segmentiert werden, um das Muskelvolumen zu bestimmen. Dies ermöglicht indirekte Rückschlüsse auf weitere Simulationsparameter, wie beispielsweise die maximale isometrische Kraft und erlaubt somit eine immer bessere, individuelle Anpassung der Modelle.

Abstract

Due to a steady increase in the number of implanted hip endoprotheses, biomechanical multi-body simulations of the behavior of these implants in the body are increasingly coming into focus. Such simulations enable the calculation by means of the forces, moments and muscle activities in the human body which are changed by artificial joints. In the future, they should contribute to the improvement of surgical planning and thus the surgical results. For these simulations, so-called generic models of the human body are generally used, which are usually only tailored to the patient's height and weight based on anthropometric data. In order to optimize surgery results, these models must be tailored to the individual patient. Therefore, individualized 3D bone models are created by segmenting CT and MRI scans and providing them with different orientation points. This makes it possible to adapt both the shape and the size of the bones, in this case the femur, for the human model and then to make patient-specific adjustments to muscle insertion points. Individual muscles can also be segmented in the 3D imaging to determine the muscle volume. This allows indirect conclusions to be drawn about other simulation parameters, such as the maximum isometric force, thus allowing a better, individual adaptation of the models.

1 Einleitung

Die Implantation von Hüfttotalendoprothesen (Hüft-TEP) hat in den letzten Jahrzehnten aufgrund des demographischen Wandels zugenommen [1, 2].

Die erhöhte Lebenserwartung führt zu steigenden Prävalenzen chronischer Erkrankungen und Verletzungen des muskuloskelettalen Systems wie Arthrose, artikulares Rheuma oder Schenkelhalsfrakturen [3]. Die Implantation einer Hüft-TEP garantiert Patienten, die unter diesen Diagnosen leiden, eine verbesserte Mobilität und

Lebensqualität und wurde deshalb als die „Operation des Jahrhunderts“ bezeichnet [4]. Hauptsächlich die biomechanische Funktion der Hüft-TEP ist vor allem bei Revisionen oder bei außergewöhnlichen anatomischen Strukturen des Patienten, z. B. bei schweren Dysplasien, häufig unzureichend.

Das biomechanische Potenzial dieser Implantate hängt von vielen Faktoren ab, wie z. B. dem Centrum-Collum-Diaphysen-Winkel und dem Offset des Hüftschafes oder der Anteversion und Inklination der Hüftpfanne. Ausschließlich das Einhalten der empfohlenen Grenzwerte dieser Parameter für die Planung und Implantation einer Hüft-TEP reicht häufig nicht aus, um eine optimale biomechanische Funktionalität der Hüfte zu gewährleisten. Um die Implantatpositionierung für ein verbessertes biomechanisches Ergebnis zu optimieren, ist es notwendig, den individuellen präoperativen muskuloskelettalen Status des Patienten und die Belastungen des Gelenks zu bestimmen. Diese Belastungen werden stark von anatomischen Gegebenheiten wie dem umliegenden Knochen, den Bändern und Muskeln beeinflusst. Da es schwierig ist, die in-vivo-Kräfte und Belastungen des menschlichen Körpers zu messen, gewinnen in-silico-Mehrkörpersimulationen dieser Parameter zunehmend an Bedeutung.

Mithilfe von Mehrkörpersimulationen können biomechanische Parameter wie Muskelaktivitäten, Muskelbelastungen oder Gelenkreaktionskräfte berechnet werden. Muskuloskelettale Modelle repräsentieren den menschlichen Bewegungsapparat und ermöglichen dadurch die Vorhersage von Belastungen, die während der Aktivitäten des täglichen Lebens auftreten, und können so bei der Planung von Hüft-TEP-Operationen helfen [5]. Die für diese Berechnungen zwingend erforderlichen muskuloskelettalen Modelle basieren jedoch häufig auf empirischen Daten. Obwohl diese Modelle für die meisten Standardfälle geeignet sind, versagen sie häufig bei Simulationen von Ausnahmefällen.

Eine Möglichkeit, diese Modelle patientenspezifischer zu gestalten, besteht in der Anpassung des passiven und aktiven muskuloskelettalen Modells. Einerseits können die Knochen segmentiert und mit verschiedenen Landmarken versehen werden. Dies erlaubt es, sowohl die Form als auch die Größe der Knochen, in diesem Fall des Oberschenkelknochens, individuell an die Anatomie des Patienten anzupassen. Andererseits können die Muskeln segmentiert werden, um wichtige Parameter wie das Muskelvolumen zu bestimmen. Dies erlaubt die Spezifizierung wichtiger Simulationsparameter, wie z. B. die maximale isometrische Kraft [6].

2 Material und Methoden

Die knöchernen Strukturen und Muskeln werden anhand von MRT- und CT-Datensätzen des Beckens und Femurs

mit der Software Materialise Mimics Research (Materialise NV, Leuven, Belgien) segmentiert. Die DICOM-Datei wird importiert und liefert drei Schnittbilder des Datensatz für die drei anatomischen Körperebenen (Schnittbild Frontalebene siehe Abbildung 1(a)).

Die Segmentierung unterscheidet sich grundsätzlich in der Vorgehensweise zwischen MRT- und CT-Daten. Die Graustufen – Hounsfield Units (HU) – des CT-Bildes werden anhand des linearen Schwächungskoeffizienten (μ) des Gewebes (x) berechnet, dadurch können knöcherne Strukturen optimal segmentiert werden. HU ist wie folgt definiert:

$$HU = \left(\frac{\mu_x - \mu_{Water}}{\mu_{Water} - \mu_{Air}} \right) \times 1000 \quad (1)$$

Der Kontrast der MRT-Bilder beruht hauptsächlich auf der unterschiedlichen Protonenanzahl der verschiedenen Gewebetypen und dem Verhalten dieser Protonen in speziellen Messsequenzen in Magnetfeldern. Zu erwähnen ist auch, dass die CT- und MRT-Diagnostik nicht zum klinischen Alltag vor einem Gelenkersatz oder einer Revisionsendoprothetik gehört, sondern immer mehr in den Fokus rückt [7]. Häufig werden für diese Fragestellung nur Röntgenbilder erstellt, mit denen weder Muskeln noch Knochen segmentiert werden können.

2.1 Segmentierung der Knochen

Anhand von CT-Bildern lassen sich knöcherne Strukturen zuverlässig segmentieren, da aufgrund der hohen Knochen-dichte genügend HU-Kontrast zwischen Knochen und dem umliegenden Weichteilgewebe vorhanden ist. Es wird ein HU-Schwellenwert definiert, um den Knochen vom restlichen Gewebe abzugrenzen (Abbildung 1 (b)). In einem zweiten Schritt müssen artikulierende knöcherne Strukturen abgetrennt werden. Zu diesem Zweck werden das Femur, das Becken und die Tibia separat in verschiedenen Schichten des CT-Datensatzes markiert (Abbildung 1 (c)). Drittens – aus den segmentierten Schichtbildern kann ein 3D-Modell des Femurs rekonstruiert werden (Abbildung 1 (d)). Anschließend wird die Oberfläche mit einer *smoothing function* geglättet (Abbildung 1 (e)). Im letzten Segmentierungsschritt wird die *wrap function* angewendet, um die bei der Segmentierung entstandenen artifizialen Löcher in der Knochenoberfläche zu schließen (siehe Abbildung 1 (f)).

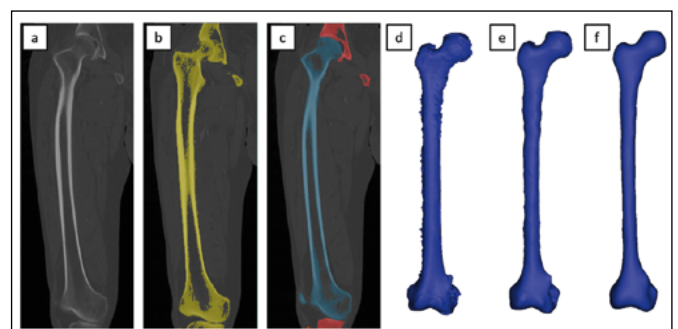


Abbildung 1: Segmentierungs-Workflow des Oberschenkelknochens

Wenn die DICOM-Bilder aus MRT-Daten bestehen, unterscheidet sich das Verfahren geringfügig von dem beschriebenen Workflow in Abbildung 1. Da aufgrund der fehlenden HU kein *Thresholding* angewendet werden kann, muss die Kontur des Femurs „manuell“ in den Schichten markiert werden. Das Nachbehandlungsverfahren entsprechend der Definition des Femurs (Abbildung 1 (d – f)) bleibt gleich.

2.2 Definition der anatomischen Landmarken des Femurs

Der segmentierte Oberschenkelknochen kann nun an ein patientenspezifisches Mehrkörpermodell angepasst werden. Dazu werden 19 Landmarken (siehe Tabelle 1) auf der Oberfläche des Femurs definiert. Diese Orientierungspunkte definieren die Form und Größe des Knochens. Sobald diese Landmarken festgelegt sind, kann der Femur in einem Mehrkörpersimulationsprogramm implementiert werden. Anstelle einer generischen Skalierung (d. h. basierend auf anthropometrischen Daten) wird die wahre Form und Größe des Femurs angewendet. Die Muskel- und Sehnenansatzpunkte werden dann automatisch an die individuelle Form des Oberschenkelknochens angepasst.

Tabelle 1: Anatomische Landmarken

Nr.	Anatomische Lage
1	Medial Head Point
2	Anterior Lateral Condyle Point
3	Anterior Medial Condyle Point
4	Posterior Greater Trochanter Point
5	Anterior Greater Trochanter Point
6	Anterior Shaft Point
7	Posterior Lateral Condyle Point
8	Posterior Medial Condyle Point
9	Posterior Head Point
10	Anterior Head Point
11	Proximal Head Point
12	Proximal Greater Trochanter Point
13	Medial Lesser Trochanter Point
14	Distal Trochanteric Fossa Point
15	Posterior Trochanteric Fossa Point
16	Proximal Posterior Greater Trochanter Point
17	Lateral Distal Trochanteric Fossa Point
18	Lateral Lesser Trochanter Point
19	Femoral Center of Rotation

2.3 Segmentierung der Muskeln

Ausgehend von der diagnostischen Bildgebung (MRT oder CT) der Datensätze gibt es verschiedene Ansätze zur Segmentierung der Muskeln. Das Materialise *muscle segmentation tool* wird für MRT-Datensätze verwendet, welches eine halbautomatische Segmentierung der Muskeln ermöglicht. Zuerst wird ein Schwellenwert bestimmt, der alle Weichkörperregionen umfasst. Im nächsten Schritt wird ein *gradient threshold* durchgeführt, der starke Grauwert-Differenzen erkennt. Dadurch werden die einzelnen Muskeln voneinander getrennt. Dann werden die Muskeln automatisch erkannt und Schicht für Schicht mithilfe eines vordefinierten Algorithmus segmentiert. Da die Differenzierung der Muskeln in der CT-Bildgebung deutlich schwieriger ist, kann das *muscle segmentation tool* nicht angewendet werden und die Muskeln müssen manuell segmentiert werden. Diese Methodik kann sehr zeitaufwändig sein.

3 Ergebnisse

Die vorgestellte Methode zeigt, dass die Segmentierung von anatomischen Strukturen in CT- und MRT-Scans und die Anpassung dieser Strukturen an Mehrkörpersimulationen erfolgreich durchgeführt werden kann. Allerdings sind die Algorithmen zur Muskelsegmentierung noch zu optimieren. Die beschriebene Nachbehandlung (*smooth* und *wrap*) ermöglicht die Bearbeitung der Femuroberfläche zur Definition von Landmarken. Diese Landmarken erlauben die Übertragung des segmentierten Knochens in ein patientenspezifisches Mehrkörpersimulationsmodell. Mit dem exportierten Datensatz werden auch die Muskel- und Sehnenansatzpunkte neu definiert, was wiederum zu einer realistischeren Berechnung der Gelenkreaktionskräfte und -momente führt.

Das dargestellte Verfahren der Muskelsegmentierung ermöglichte eine Abbildung aller wesentlichen Muskeln der Hüfte (siehe Tabelle 2). Durch die Segmentierung dieser Muskeln ist es möglich, Muskelvolumina zu bestimmen, um Muskelparameter patientenspezifisch anzupassen. Dies erlaubt es, eine mögliche Muskelschwächung oder -atrophie in der Mehrkörpersimulation zu simulieren.

Tabelle 2: Segmentierte femorale Muskeln und deren Hauptfunktionen

Funktionelle Gruppe	Muskel	Hauptfunktion
Innere Hüftmuskulatur	M. psoas major	Hüfte: Flexion und Außenrotation
	M. iliacus	
Äußere Hüftmuskulatur	M. gluteus maximus	Hüfte: Extension und Außenrotation
	M. gluteus medius	Abduktion
	M. gluteus minimus	
	M. tensor fasciae latae	Hüfte: Abduktion, Flexion und Innenrotation
	M. piriformis	Hüfte: Außenrotation, Abduktion und Extension
	M. obturatorius internus	Hüfte: Außenrotation, Adduktion und Extension
	M. quadratus femoris	Hüfte: Außenrotation und Adduktion
	M. gemellus superior	Hüfte: Außenrotation, Adduktion und Extension
	M. gemellus inferior	
Adduktoren	M. obturatorius externus	Hüfte: Adduktion und Außenrotation
	M. pectineus	Hüfte: Adduktion und Außenrotation
	M. adductor longus	Hüfte: Adduktion und Flexion
	M. adductor brevis	
	M. adductor magnus	Hüfte: Adduktion, Außenrotation und Extension
	M. gracilis	Hüfte: Adduktion und Flexion Knie: Flexion und Innenrotation
Extensoren	M. sartorius	Hüfte: Flexion, Abduktion und Außenrotation Knie: Flexion und Innenrotation
	M. rectus femoris	Hüfte: Flexion und Knieextension
	M. vastus medialis	Knie: Extension
	M. vastus lateralis	
	M. vastus intermedius	
Flexoren	M. biceps femoris caput longum	Hüfte: Adduktion und Extension Knie: Flexion und Außenrotation
	M. biceps femoris caput breve	Knie: Flexion und Außenrotation
	M. semimembranosus	Hüfte: Adduktion und Extension
	M. semitendinosus	

4 Diskussion

Es müssen weitere Studien durchgeführt werden, um den Einfluss der Muskelvolumina auf die Muskelkraft und damit auf die Mehrkörpersimulation zu bestimmen. Daher ist es unerlässlich, Parameterstudien durchzuführen, die Aufschluss über den Einfluss des Volumens eines bestimmten Muskels auf die Gelenkreaktionskräfte geben. Da die Segmentierung der Muskeln in der 3D-Bildgebung zeitaufwendig ist, sollten nur relevante Muskeln oder Muskelgruppen analysiert werden. Die Relevanz bestimmter Muskeln oder Muskelgruppen ist noch zu beurteilen.

Der Unterschied zwischen einer generischen Skalierung und patientenspezifischem Knochenmorphing, d. h. den neu definierten Muskelansatzpunkten, muss quantifiziert werden. Die Segmentierung von knöchernen und muskulären Strukturen ist die Grundlage für die biomechanische Planung der Endoprothetik. Dieser Schritt zur patientenspezifischen Versorgung verspricht bessere Operationsergebnisse.

Referenzen:

- [1] C. Eingartner, “Current trends in total hip arthroplasty”, *Ortopedia, traumatologia, rehabilitacija*, vol. 9, no. 1, pp. 8 – 14, 2007.
- [2] C. Pabinger, H. Lothaller, and A. Geissler, “Utilization rates of knee-arthroplasty in OECD countries”, *Osteoarthritis and cartilage*, vol. 23, no. 10, pp. 1664 – 1673, 2015, doi: 10.1016/j.joca.2015.05.008.
- [3] J. A. Singh, “Epidemiology of knee and hip arthroplasty: a systematic review”, *The open orthopaedics journal*, vol. 5, pp. 80 – 85, 2011, doi: 10.2174/1874325001105010080.
- [4] I. D. Learmonth, C. Young, and C. Rorabeck, “The operation of the century: total hip replacement”, *The Lancet*, vol. 370, no. 9597, pp. 1508 – 1519, 2007, doi: 10.1016/S0140-6736(07)60457-7.
- [5] S. Sesselmann, J. Miehl, S. Wartzack, and R. Forst, “Enhancement of Surgical Planning through Patient-Specific Biomechanical Modeling and Simulation”, *SICOT Orthopaedic World Congress – Rome 2016*.
- [6] D. Scherb and C. Fleischmann, “Conceptual Approach to estimate the musculoskeletal follow-ups of endoprosthetic hip replacements”, *CAMS-Knee OpenSim Workshop – Zürich 2020*.
- [7] S. Sesselmann, M. Reinmuth, S. Tiefenböck, N. Strödick, and R. Forst, “Retrospektiver Vergleich der Ergebnisse präoperativer Planung in der Hüftendoprothetik mittels 2D- bzw. 3D-Software”, 2017.

Kontakt:



Christopher Fleischmann, M.Sc.

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

c.fleischmann@oth-aw.de



David Scherb, M.Sc.

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Martensstraße 9
91058 Erlangen

scherb@mfk.fau.de



Irina Leher, B.Eng.

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

i.leher@oth-aw.de



Alexander Wolf, M.Sc.

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Martensstraße 9
91058 Erlangen

a.wolf@mfk.fau.de



Dr.-Ing. Jörg Miehling

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Martensstraße 9
91058 Erlangen

miehling@mfk.fau.de



Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Martensstraße 9
91058 Erlangen

wartzack@mfk.fau.de



Prof. Dr. med. habil. Stefan Sesselmann

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

s.sesselmann@oth-aw.de

Odds Ratio-basierte Analyse von Assoziationsregeln zur Erkennung von statistisch signifikanten medizinischen Risikomustern in heterogenen klinischen Daten

Oliver Haas, M.Sc.
Prof. Dr.-Ing. Eva Rothgang

Zusammenfassung

Medizinische Risikomuster sind wertvoll in der evidenzbasierten Medizin. Automatisierte Ansätze für ihre Entdeckung sind notwendig, da Muster in heterogenen klinischen Datensätzen komplex sein können. Association Rule Mining, also die Suche nach häufigen Wenn-Dann-Regeln ist eine passende Technik für diese Aufgabe, da sie Epidemiologen erlaubt, heterogene Daten zu analysieren. Die entstehenden Muster sind aber schwieriger nutzbar in der Epidemiologie, da sie eventuell nicht statistisch signifikant sind. Eine andere Einschränkung von bisherigen Methoden ist das Fehlen von Metriken, die relevant sind für Epidemiologen. Ein neuer Ansatz für Association Rule Mining wird präsentiert. Er nutzt Odds Ratios und statistische Tests, um Muster zu erkennen, die mit den Methoden der Epidemiologie kompatibel sind. Die Methode wurde mittels eines öffentlich verfügbaren klinischen Datensatzes mit etwa 60.000 Fällen getestet und validiert. Es wurden 118 statistisch signifikante Muster mit dem Ausgang Sepsis erkannt. Es wurden heterogene und komplexe Muster erkannt. Die Methode erkennt statistisch signifikante, heterogene Muster, die nicht manuell zu erkennen sind. Die genutzte Taktik zum Kürzen des Suchbaums macht den Algorithmus schnell und effizient. Die Methode gibt Epidemiologen einen neuen Weg, um mit großen, heterogenen klinischen Datensätzen zu arbeiten.

Abstract

Medical risk patterns are valuable assets in evidence-based medicine. Automated approaches for their discovery are needed because patterns in heterogeneous clinical datasets can be complex. Association rule mining, i. e. the search for frequent if-then-rules, is a suitable technique as it allows epidemiologists to analyze heterogeneous data. However, the produced patterns are less usable in epidemiology because they might not be statistically significant. Another limitation of existing methods is the lack of metrics that are useful for epidemiologists. A novel approach to association rule mining is presented. It uses odds ratios and statistical tests to produce patterns that follow best practices established in epidemiology. The method was tested and validated on a publicly available clinical dataset with about 60,000 cases. It returned 118 statistically significant patterns with the outcome sepsis. These included heterogeneous and complex patterns. The method returns statistically significant, heterogeneous patterns that cannot be discovered manually. The pruning tactics used make the algorithm fast and efficient. The proposed method is anticipated to provide epidemiologists a novel way to work with large, heterogeneous clinical datasets.

1 Einleitung

Medizinische Sachverhalte und Behandlungen sind komplex. Ausgänge von Behandlungen werden durch Risikofaktoren beeinflusst. Beispielsweise hängt die Sterblichkeit bei Sepsis von sozio-demographischen Faktoren wie Alter, Geschlecht und ethnischer Zugehörigkeit ab [1, 2].

Das gemeinsame Auftreten von Krankheiten kann ebenfalls Ausgänge beeinflussen und die Kosten des Gesundheitswesens steigern [3].

Diese Situation ist ähnlich zur Warenkorbanalyse, bei der Transaktionen (wie Warenkörbe von Einkaufenden) als Mengen von Elementen betrachtet werden, unabhängig

vom ursprünglichen Typ des Elements und der Quelle [4]. Die Warenkorbanalyse beschäftigt sich damit, wie das Auftreten von Elementen zusammenhängt. Eine weit verbreitete Art der Analyse dieser Transaktionsdaten ist Association Rule Mining (ARM) [5]. Diese Technik sucht häufige Muster $P \rightarrow Y$ zwischen Mengen P und Y von Elementen, d. h. die Anwesenheit von P in einer Transaktion führt oft auch zur Anwesenheit von Y .

Algorithmen für ARM suchen meist nach häufigen Mengen von Elementen, d. h. Mengen von Elementen, die öfter als eine gewisse untere Schranke auftreten. Das spiegelt sich in der großen Anzahl an verfügbaren Algorithmen wider [6]. Während Händler, die Warenkorbanalyse einsetzen, an Mustern interessiert sind, die möglichst viele Kunden abdecken, sind Kliniken auch an seltenen Krankheiten interessiert. Da es hier wenige Fälle gibt, sind andere Metriken nötig. Wir schlagen vor, Odds Ratios (ORs), also den Quotienten der Chancen auf Y unter den Fällen, in denen P auftritt und den Fällen, in denen P nicht auftritt, als die Hauptmetrik für epidemiologisches ARM zu nutzen. Odds Ratios sind in der Epidemiologie weit verbreitet, um die Stärke von Assoziationen zwischen Risikofaktoren und Ausgängen zu messen [7]. Sie können einfach auf statistische Signifikanz getestet werden.

1.1 Verwandte Arbeiten

Es gibt verschiedene Algorithmen für ARM. Ein weit verbreiteter Algorithmus ist Apriori [8]. Er ist die Basis für viele weitere Algorithmen [6]. ARM wird eingesetzt, um Muster in verschiedenen klinischen Datensätzen zu finden. Einige behandelte Themen sind die Vorhersage von Ausgängen [9], die Korrelation von Diagnosen und Behandlungen [10] sowie die Medikament-Medikament-Interaktion [11]. Diese Ansätze nutzen Metriken, die nicht in der Epidemiologie üblich sind und daher im Allgemeinen weniger nützlich sind.

Es gibt zwei Studien, die ARM mit epidemiologischen Metriken untersuchen [12, 13]. Beide Ansätze suchen Muster mit ORs bzw. relativen Risiken über einer gewissen Schranke. Während es wahrscheinlich ist, dass dieses Muster statistisch signifikant ist, kann das in beiden Fällen nicht garantiert werden.

Statistische Signifikanztests werden bereits in ARM-Suchstrategien genutzt [14]. Fishers exakter Test [15] wird für positive und negative Assoziationen genutzt [16, 17, 18]. Er wird benutzt um Muster herauszufiltern, die nicht statistisch signifikant sind. Apriori [19] benutzt eine Schätzung der Binomialverteilung, um den Suchbaum effizient zu kürzen und nutzt dann einen exakten Test in einem zweiten Schritt. Ein anderer Test, der in ARM genutzt wird, ist der Chi-Quadrat-Test [20]. Während all diese Ansätze statistische Tests nutzen, bauen sie nicht auf epidemiologischen Metriken auf und sind daher weniger nützlich.

2 Methodische Vorgehensweise

Im Folgenden sei D der klinische Datensatz. Jedes Element von D beschreibt einen klinischen Fall, der als Menge der aufgetretenen klinischen Variablen beschrieben wird.

Es reicht, einzelne Ausgänge zu betrachten. Komplexere Muster können durch die Kombination einfacher Muster analysiert werden. Wir können uns daher auf Muster der Form $P \rightarrow y_0$ beschränken, wobei y_0 ein festes Element aus dem Datensatz ist. Ein weniger komplexes Muster mit größerem OR ist hilfreicher als ein komplexeres Muster mit niedrigerem OR. Das führt zur folgenden Definition.

Definition 1. Wir nennen ein Muster $P \rightarrow y_0$ redundant, wenn eine echte Teilmenge P' von P existiert, so dass das Muster $P' \rightarrow y_0$ einen größeren oder gleichen OR wie $P \rightarrow y_0$ hat.

Wir nutzen die Zahl 1, um die Anwesenheit von y_0 zu beschreiben und die Zahl 0 für dessen Abwesenheit. So können wir jedem Fall die Zahl 1 oder 0 zuordnen, je nachdem ob der Ausgang y_0 aufgetreten ist oder nicht. Im Beispiel der Diagnose Sepsis bedeutet $y_0 = 1$ dass eine Sepsis diagnostiziert wurde, $y_0 = 0$ dagegen, dass keine Sepsis diagnostiziert wurde. Damit erhalten wir folgende Definition.

Definition 2. Sei P eine Menge von Elementen und y entweder 0 oder 1. Dann bezeichnen wir mit $supp(P, y)$ die Anzahl der Fälle, die P beinhalten und den Ausgang y haben, d. h.

$$supp(P, y) = |\{A \in D \mid P \subseteq A, A \text{ hat Ausgang } y\}|$$

$supp(P, y)$ heißt der Support von P mit Ausgang y . Im Fall $P = \emptyset$ ergibt das die Anzahl aller Fälle mit Ausgang y . Analog dazu definieren wir die Menge aller Fälle, die P nicht enthalten, als

$$supp(\neg P, y) = supp(\emptyset, y) - supp(P, y)$$

Mithilfe dieser Definition kann das OR ausgedrückt werden als

$$OR(P) = \frac{supp(P, 1) \cdot supp(\neg P, 0)}{supp(\neg P, 1) \cdot supp(P, 0)}$$

Bei 1000 Patienten, von denen beispielsweise 100 Medikament A und 200 Medikament B erhalten haben und eine Sepsis aufweisen sowie 400 Medikament A und 300 Medikament B erhalten haben und keine Sepsis aufweisen, gilt

$$\begin{aligned} supp(\{\text{Medikament A}\}, 1) &= 100 \\ supp(\neg\{\text{Medikament A}\}, 1) &= 200 \\ supp(\{\text{Medikament A}\}, 0) &= 400 \\ supp(\neg\{\text{Medikament A}\}, 0) &= 300 \end{aligned}$$

und damit

$$OR(\{Medikament A\}) = \frac{100 \cdot 300}{200 \cdot 400} = 0,375$$

Da das OR kleiner als 1,0 ist, tritt Medikament A seltener zusammen mit einer Sepsis auf als Medikament B.

Nun kann die Taktik zur Kürzung des Suchbaums formuliert werden. Sie entfernt redundante Muster vom Suchbaum. Analog zu [13] nutzen wir das folgende Lemma.

Lemma 1. Sei P eine Menge von Elementen und y_0 der Ausgang. Sei x ein anderes Element das nicht in P enthalten ist. Wenn $supp(P \cup \{x\}, o) = supp(P, o)$, dann gilt $OR(P \cup Q \cup \{x\}) \leq OR(P \cup Q)$ für alle Mengen von Elementen Q die x nicht enthalten. $P \cup Q \cup \{x\}$ ist also redundant, insb. auch $P \cup \{x\}$.

Als Beweis genügt eine einfache Rechnung. Es gibt daneben ein weiteres Kriterium für die Kürzung des Suchbaumes. Es benutzt die folgende Definition des lokalen Supports, auch als Recall bekannt [21].

Definition 3. Der lokale Support einer Menge von Elementen ist definiert als

$$lsupp(P) = \frac{supp(P, 1)}{supp(\emptyset, 1)}$$

Analog zum Support kann er benutzt werden um Muster herauszufiltern, die nicht in genug Fällen auftreten. Im Gegensatz dazu betrachtet er nur Fälle, in denen der Ausgang auftritt und nicht auf alle Fälle. Da $P \subseteq Q$ auch $supp(P, 1) \geq supp(Q, 1)$ impliziert, ist der lokale Support auch antimonoton.

Mit diesen Vorbereitungen kann nun der Algorithmus beschrieben werden. Es wird mit einzelnen Elementen begonnen und schrittweise neue Elemente hinzugefügt. Wenn der lokale Support unter eine konfigurierbare Unterschranke fällt oder die Bedingung von Lemma 1 erfüllt ist, kann der komplette zugehörige Zweig des Suchbaumes entfernt werden. Es wurde bereits festgestellt, dass diese Taktik effizienter ist als konventionelle ARM-Algorithmen [13]. Nachdem der Baum vollständig durchsucht wurde, wird Fishers exakter Test zur Hypothese „OR = 1.0“ pro Muster angewandt, um zu entscheiden, ob das Muster statistisch signifikant ist. Bonferroni-Korrektur [22] kann genutzt werden. Wenn sie aktiviert ist, wird der konfigurierte p-Wert vor den statistischen Tests durch die Anzahl an auszuführenden Tests dividiert.

3 Ergebnisse

Die präsentierte Methode wurde mit dem öffentlich verfügbaren klinischen Datensatz Medical Information Mart for Intensive Care (MIMIC-III, Version 1.4 [23]) getestet und validiert. Dieser Datensatz enthält etwa 60.000 Intensivstationsfälle. Er beinhaltet verschiedene Variab-

len wie Diagnosen, Medikamente, sozio-demographische Faktoren und vieles mehr. Nur kategorische Daten, also Werte die benutzt werden können, um Fälle zu kategorisieren, wurden eingesetzt. Andere Informationen (z. B. Vitaldaten, zeitliche Informationen) sind weniger nützlich für epidemiologisches ARM. Die benutzten Elementtypen sind Geschlecht, Religion, ethnische Gruppe, Familienstand, Sprache, Versicherungsart, Fallgruppe, klinischer Dienst, Medikament, Diagnose und Prozedur. Die folgenden Parameter wurden eingesetzt. Als Ausgang y_0 wurde die Diagnose Sepsis gewählt. Der minimale lokale Support wurde auf 0,5 gesetzt und der maximale p-Wert war 0,05. Bonferroni-Korrektur wurde angewandt, mit 121 statistischen Tests war der modifizierte p-Wert 0,000417.

Anhand dieser Parameter wurden 118 Muster entdeckt. Alle p-Werte waren weit unter 0,000417. Niedrige p-Werte sind zu erwarten, da die Methode ORs maximiert und größere ORs meist niedrigere p-Werte haben. Die ORs reichen von 1,38 bis 23,70.

Tabelle 1: Einige der entdeckten heterogenen Muster zusammen mit dem OR, dem p-Wert und dem lokalen Support. Der Ausgang der Muster ist die Diagnose Sepsis.

Menge der Elemente	OR	p-Wert	lok. Support
Diagnose = nicht spezifizierte Septikämie	23,70	0	0,57
Medikament = Heparin Klinischer Dienst = Innere Medizin Medikament = Kochsalzlösung 0,9% Medikament = Isoosmotische Dextrose	6,60	$1,10 \cdot 10^{-121}$	0,51
Prozedur = Venenkatheterisierung, nicht anderweitig beschrieben	3,76	$6,31 \cdot 10^{-113}$	0,51
Medikament = Docusat-Natrium	1,38	$9,75 \cdot 10^{-9}$	0,56

Einige der entdeckten Muster sind in Tabelle 1 gelistet. Darin enthalten sind die höchsten (23,70) und niedrigsten (1,38) gefundenen statistisch signifikanten ORs. Während die zweite Regel eine typische Behandlung von Sepsis beschreibt (Innere Medizin, Flüssigkeits- und Blutzuckermanagement, Antikoagulantium), stellt die dritte Regel einen bekannten Risikofaktor für Sepsis dar [24]. Solche Regeln können etwa in Kliniken dazu genutzt werden, Behandlungsrichtlinien mit der in den Daten dokumentierten Realität abzugleichen.

Es wird keine explizite Untergrenze für die Stärke der Assoziation eingesetzt. Das bedeutet, dass auch schwache Effekte erkannt werden, solange sie statistisch signifikant sind. Das zweite Muster zeigt die komplexen Korrelationen in diesem heterogenen Datensatz. Mehrere Elemente interagieren und erhöhen so das OR für Sepsis signifikant.

4 Diskussion

Die Methode wurde validiert, indem die statistischen Tests und die Überprüfung des lokalen Supports mit GNU R [25] ausgeführt wurden. Das Kürzen des Suchbaums nach Lemma 1 wurde manuell ausgeführt. Das ergab die gleichen Muster wie die vorgestellte Methode.

5 Zusammenfassung

Der vorgestellte Ansatz erkennt automatisch heterogene Muster in klinischen Datensätzen unter Einsatz von epidemiologisch validen Workflows. Die entdeckten Muster sind statistisch signifikant und benutzen Metriken, die Epidemiologen bekannt sind. Die vorgestellte Methode bietet einen neuen Weg, um heterogene klinische Datensätze zu analysieren.

Referenzen:

- [1] M. Shankar-Hari, D. A. Harrison, P. Ferrando-Vivas, G. D. Rubenfeld, K. Rowan, Risk factors at index hospitalization associated with longer-term mortality in adult sepsis survivors, *JAMA network open* 2 (5) (2019) e194900.
- [2] J. M. O'Brien, B. Lu, N. A. Ali, D. A. Levine, S. K. Abernethy, S. Lemeshow, Insurance type and sepsis-associated hospitalizations and sepsis-associated mortality among US adults: A retrospective cohort study, *Critical Care* 15 (3) (2011) 1 – 11.
- [3] J. L. Wolff, B. Starfield, G. Anderson, Prevalence, expenditures, and complications of multiple chronic conditions in the elderly, *Archives of internal medicine* 162 (20) (2002) 2269 – 2276.
- [4] T. Kutuzova, M. Melnik, Market basket analysis of heterogeneous data sources for recommendation system improvement, *Procedia Computer Science* 136 (2018) 246 – 254, 7th International Young Scientists Conference on Computational Science, YSC2018, 02-06 July 2018, Heraklion, Greece.
- [5] M. Kaur, S. Kang, Market basket analysis: Identify the changing trends of market data using association rule mining, *Procedia Computer Science* 85(2016) 78 – 85.
- [6] P. Yazgana, A. O. Kusakci, A literature survey on association rule mining algorithms, *Southeast Europe Journal of Soft Computing* 5 (1) (2016) 5 – 14.

- [7] M. Szumilas, Explaining odds ratios, *Journal of the Canadian Academy of Child and Adolescent Psychiatry = Journal de l'Academie canadienne de psychiatrie de l'enfant et de l'adolescent* 19 (3) (2010) 227 – 229.
- [8] R. Agrawal, R. Srikant, Fast algorithms for mining association rules in large databases, in: J. B. Bocca (Ed.), *Proceedings of the 20th International Conference on Very Large Data Bases*, September 12 – 15, 1994, Santiago, Chile, Morgan Kaufmann, Hove, East Sussex, 1994, pp. 487 – 499.
- [9] J. Paetz, R. Brause, A frequent patterns tree approach for rule generation with categorical septic shock patient data, in: J. Crespo, V. Maojo, F. Martin (Eds.), *Medical Data Analysis: Second International Symposium, ISMDA 2001 Madrid, Spain, October 8-9, 2001 Proceedings*, Vol.2199 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Berlin and Heidelberg, 2001, pp. 207 – 213.
- [10] U. Abdullah, J. Ahmad, A. Ahmed, Analysis of effectiveness of Apriori algorithm in medical billing data mining, in: *4th International Conference on Emerging Technologies, 2008: ICET 2008* ; 18 – 19 Oct. 2008, Rawalpindi, Pakistan ; proceedings, IEEE, Piscataway, NJ, 2008, pp. 327 – 331.
- [11] Y. Noguchi, A. Ueno, M. Otsubo, H. Katsuno, I. Sugita, Y. Kanematsu, A. Yoshida, H. Esaki, T. Tachi, H. Teramachi, A new search method using association rule mining for drug-drug interaction based on spontaneous report system, *Frontiers in pharmacology* 9 (2018) e197.
- [12] H. Li, J. Li, L. Wong, M. Feng, Y.-P. Tan, Relative risk and odds ratio: A data mining perspective, in: F. Afrati (Ed.), *Proceedings of the twenty-fourth ACM SIGMOD-SIGACT-SIGART symposium on Principles of database systems*, June 13 - 15, 2005, Baltimore, Maryland, Association for Computing Machinery, New York, NY, United States, 2005, pp. 368 – 377.
- [13] J. Li, A. W.-c. Fu, P. Fahey, Efficient discovery of risk patterns in medical data, *Artificial Intelligence in Medicine* 45 (1) (2009) 77 – 89.
- [14] G. I. Webb, Discovering significant patterns, *Machine learning* 68 (1) (2007) 1 – 33.
- [15] R. A. Fisher, The logic of inductive inference, *Journal of the Royal Statistical Society* 98 (1) (1935) 39 – 54.
- [16] Y. S. Koh, R. Pears, Efficiently finding negative association rules without support threshold, in: M. Orgun, J. Thornton (Eds.), *AI 2007: Advances in Artificial Intelligence, 20th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence*, Gold Coast, Australia, December 2 – 6, 2007, Proceedings, Vol.4830, 2007, pp. 710 – 714.
- [17] J. Li, O. Zaiane, Associative classification with statistically significant positive and negative rules, in: *Proceedings of the 24th ACM International Conference on Information and Knowledge Management*, October 19 – 23, 2015, Melbourne, Australia, CIKM '15, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2015, pp. 633 – 642.
- [18] W. Hämmäläinen, Efficient discovery of the top-k optimal dependency rules with fisher's exact test of significance, in: G. I. Webb, B. Liu, C. Zhang, D. Gunopulos, X. Wu (Eds.), *IEEE International Conference on Data Mining, ICDM*, December 11-14, 2011, Vancouver, Canada, 2011, pp. 196 – 205.
- [19] W. Hämmäläinen, StatApriori: An efficient algorithm for searching statistically significant association rules, *Knowl. Inf. Syst.* 23 (2010) 373 – 399.
- [20] I. N. M. Shaharane, J. M. Jamil, A framework for interestingness measures for association rules with discrete and continuous attributes based on statistical validity, in: T. Dillon (Ed.), *Artificial Intelligence in Theory and Practice IV*, Daejeon, South Korea, October 4-7, 2015, Springer International Publishing, Cham, 2015, pp. 119 – 128.
- [21] M. Ohsaki, S. Kitaguchi, K. Okamoto, H. Yokoi, T. Yamaguchi, Evaluation of rule interestingness measures with a clinical dataset on hepatitis, in: J.-F. Boulicaut, F. Esposito, F. Giannotti, D. Pedreschi (Eds.), *Knowledge Discovery in Databases: PKDD 2004*, Vol. 3202 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2004, pp. 362 – 373.
- [22] J. P. Shaffer, Multiple hypothesis testing, *Annual Review of Psychology* 46 (1) (1995) 561 – 584.
- [23] A. E. W. Johnson, T. J. Pollard, L. Shen, L.-W. H. Lehman, M. Feng, M. Ghassemi, B. Moody, P. Szolovits, L. A. Celi, R. G. Mark, Mimic-III, a freely accessible critical care database, *Scientific data* 3 (2016) e160035.
- [24] M. Delgado-Capel, A. Gabillo, L. Elías, J. C. Yébenes, G. Sauca, J. A. Capdevila, [Peripheral venous catheter-related bacteremia in a general hospital], *Rev Esp Quimioter* 25 (2) (2012) 129 – 133
- [25] R Core Team, R: A Language and Environment for Statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria (2019). URL <https://www.R-project.org/>

Fördergeber:

bidt

Bayerisches Forschungsinstitut
für Digitale Transformation

BayWISS

Bayerisches Wissenschaftsforum

BayWISS
Verbundkolleg Gesundheit

Kontakt:



Oliver Haas, M.Sc.

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

o.haas@oth-aw.de



Prof. Dr.-Ing. Eva Rothgang

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

e.rothgang@oth-aw.de



Be a PRO. Join IGZ. | IGZ das SAP Projekthaus für Logistik und Produktion
Top-Arbeitgeber der Region Nordoberpfalz

PROfessionalität, Engagement und Qualitätsbewusstsein sind die Eckpfeiler unserer Unternehmenskultur. Wenn das auch Ihr Selbstverständnis ist, freuen wir uns auf Ihre Bewerbung. Auf Sie warten verantwortungsvolle Aufgaben beim Marktführer für SAP Logistik- und Produktionssoftware in Europa. Wir suchen (m/w/d):

Hochschulabsolventen

- Wirtschaftsingenieure – Schwerpunkt Logistik / IT
- Informatiker, Betriebswirtschaftler – Schwerpunkt SAP
- Elektro- und Informationstechniker – Schwerpunkt IT



IGZ unterstützt die OTH Amberg-Weiden beim Auf-/Ausbau einer SAP-basierten Lehr-/Forschungsplattform zum Thema „Digitale Fabrik“.

IGZ Ingenieurgesellschaft für logistische Informationssysteme mbH | Logistikweg 1 | 95685 Falkenberg | jobs@igz.com | www.igz.com

WERDE TEIL UNSERES TEAMS!

IN DEN BEREICHEN WERKSTOFFTECHNIK, VERFAHRENS-
TECHNIK, ELEKTROTECHNIK, BAUWESEN UND MASCHINENBAU

Mit mehr als 135 Jahren Erfahrung im Glasschmelzwannenbau bietet HORN eine weit gefächerte Produktpalette im Bereich der Planung, Herstellung und dem Vertrieb von verschiedenen Ofentypen zur Herstellung von Behälterglas, Wirtschaftsglas, Float-, Solar- und Gussglas sowie Spezialglas.

HORN BIETET

- Ein vielfältiges Angebot für Fachkräfte
- Flexible Arbeitszeitmodelle
- Eigenverantwortung
- Eine sichere Zukunft

CHANCEN BEI HORN

- Internationale Erfahrungen sammeln
- Kundennähe bewirken
- Karrieremöglichkeiten
- Leadership Entfaltung

TOP ARBEITGEBER

- Familienfreundlich
- Teamplayer
- Fundamentale Werte
- Marktführer

Deine aussagekräftigen Bewerbungsunterlagen schickst du per E-Mail an: personal@hornglas.de



HORN Glass Industries AG
Frau Rupprecht-Bouziane
Bergstraße 2
95703 Plößberg

WWW.HORNGLASS.COM

HORN
GLASS INDUSTRIES

innovation
ENGINEERED IN GERMANY

Positionen und Thesen zur Zukunft der ländlichen Räume in Ostbayern

Zusammenfassung

Noch vor wenigen Jahren wurden die räumlichen Kennziffern Ostbayerns, und hier speziell der nördlichen Oberpfalz und auch des östlichen Oberfrankens, mit eher zurückhaltenden Aussagen verbunden. Das Institut der deutschen Wirtschaft (Köln) kommt in seiner Studie „IW-Regionalranking 2020“ jedoch zum Ergebnis, dass etwa die nördliche Oberpfalz in einem Dynamikvergleich auf Basis der Analyse von 55 Einzelindikatoren zur Bildung eines Erfolgsindex in die Spitzengruppe des bundesweiten Vergleichs einzuordnen ist. Insgesamt weisen die Strukturdaten Ostbayerns in den vergangenen Jahren auf einen nicht kurzfristig volatilen, sondern auf einen nachhaltigen Aufschwung zu einer Raumkategorie hin, die als „Chancen-Region“ für die Bevölkerung und die sowohl öffentlichen als auch privaten Unternehmen bezeichnet werden kann, mit Entwicklungsmöglichkeiten über alle Phasen des Lebenslaufes und damit auch eines Beitrages zur regionalen Identität. Den Autor verbindet eine langjährige Zusammenarbeit mit dem Wirtschaftsclub Nordoberpfalz (170 Unternehmen mit 30.000 Beschäftigten) in Form gemeinsamer Erstellungen von Positionspapieren, die bis in das Jahr 2001 zurückreichen, und in denen in regelmäßigen Abständen die Herausforderungen während der vergangenen 20 Jahre thematisiert worden sind. Eine aktuelle Studie in Form eines „Positionspapiers Nördliche Oberpfalz“, basierend auf der Datenanalyse regionaler Strukturen und Prozesse, einer SWOTAM-Analyse und darauf aufbauend empirischen Workshops mit Unternehmen sowie einer Podiumsdiskussion mit der Landes- und Regionalpolitik wird in ihren wichtigsten Ergebnissen vorgestellt.

Abstract

Only a few years ago, the spatial indicators of Eastern Bavaria, and here especially the Northern Upper Palatinate and Eastern Upper Franconia, were associated with rather reserved statements. However, in its study „IW-Regionalranking 2020“, the „Institut der deutschen Wirtschaft“ (Cologne) comes to the conclusion that the Northern Upper Palatinate, for example, can be placed in the top group in a nationwide comparison of dynamics based on the analysis of 55 indicators for the formation of a success index. Overall, the structural data of Eastern Bavaria in recent years indicate a sustained rather than short-term volatile upturn into a spatial category that can be described as an “Opportunity Region” for the population and for both public and private companies, with development chances across all phases of the life cycle and thus a contribution to regional identity. The author is linked to the Wirtschaftsclub Nordoberpfalz (170 companies with 30,000 employees) by a long-standing cooperation in the form of joint compilations of position papers dating back to the year 2001, in which the challenges during the past 20 years were discussed at regular intervals. A current study in the form of a “Position Paper Northern Upper Palatinate”, based on the data analysis of regional structures and processes, a SWOTAM analysis, empirical workshops with companies and a panel discussion with state and regional politicians will be presented in its main results.

1 Einleitung

Noch vor wenigen Jahren wurden die räumlichen Kennziffern Ostbayerns, und hier speziell der nördlichen Oberpfalz und auch des östlichen Oberfrankens, mit eher zurückhaltenden Aussagen verbunden. „Haben die ländlichen Regionen noch eine Chance?“, „Krisenregionen“ oder „Quo Vadis aus der Strukturschwäche?“ – diese Aussagen bezeichneten eine Stimmung, die noch ungünstiger war als die Realität. Regionalentwicklung ist aller Erfahrung nach in einem bedeutenden Maße mit Psychologie verbunden, und dies ist – verbunden mit einem zunehmenden Regionalbewusstsein und auch regionalem Selbstbewusstsein – wohl eine der Ursachen, weshalb das Institut der deutschen Wirtschaft (Köln) in seiner neuen Studie „Ländliche Regionen in Deutschland – IW-Regionalranking 2020“ [1] zum Ergebnis gelangte, dass die Nördliche Oberpfalz in einem bundesweiten Dynamikvergleich der 401 Landkreise und kreisfreien Städte auf Basis einer Analyse von 55 Einzelindikatoren zur Bildung eines Erfolgsindex in die Spitzengruppe einzuordnen sei. So sind im Regressionsergebnis die Landkreise Neustadt an der Waldnaab und Tirschenreuth den zehn Regionen mit der stärksten Dynamik zugewiesen, die Stadt Weiden der oberen Mittelgruppe im Niveauranking (vgl. Abbildung 1). Zwei zentrale Aussagen in der IW-Studie sind, dass regionaler Erfolg in der Regel individuell gestaltbar ist und dieser zur Hälfte (49 %) von Faktoren der Lebensqualität bestimmt wird. Bedeutung wird der Resilienz zugeschrieben, also der Fähigkeit, Krisensituationen zu widerstehen und diese zu bewältigen, was im Falle des jahrzehntelangen Strukturwandels, zum Teil Strukturbruchs, in der Nördlichen Oberpfalz von einer „altindustrialisierten Region“ hin zu einem Standort von Zukunftsbranchen (etwa Medizintechnik, Logistiksysteme, Mechatronik) mit einer nahezu Vollbeschäftigung nachvollziehbar ist.

Es gelang in den vergangenen Jahren, auch durch Strategiekonzepte, Positionspapiere und Innovationsnetzwerke [2], gemeinsam und selbstbewusst optimale Rahmenbedingungen und Standortfaktoren für diese Erfolgsgeschichte in einem ehemals als strukturschwach und peripher (einschließlich von Abhängigkeitsbeziehungen, Beispiel Zweigbetriebe aus Zentren) kategorisierten Raum zu schaffen. Ohne diese Ansätze der Nutzung endogener Potenziale ist der Aufschwung insgesamt von Ostbayern, etwa was den Arbeitsmarkt und die Stabilisierung der demographischen Entwicklung betrifft, kaum zu erklären. Die Schaffung kreativer Milieus, von Vertrauen und Netzwerken der intraregionalen Kooperation soll im Folgenden am ausgewählten Beispiel der konzeptionellen und empirischen Erarbeitung eines Positionspapiers des Autors für die Nördliche Oberpfalz mit dem Wirtschaftsclub Nordoberpfalz dargestellt werden.

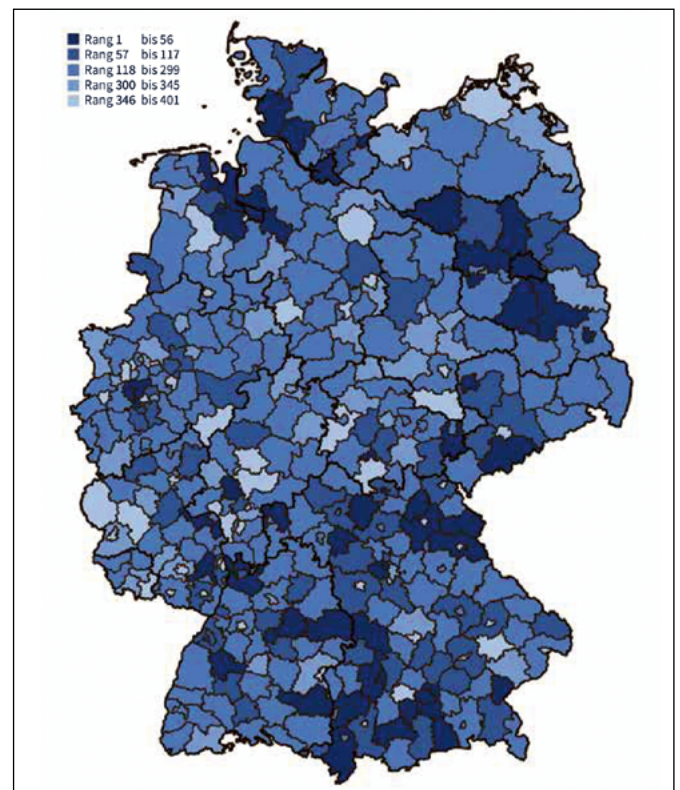


Abbildung 1: Ergebnis IW-Dynamikranking 2020 [3]

2 Faktoren der Regionalentwicklung und Wettbewerbsfähigkeit

2.1 Ansätze räumlicher Typisierung

Die räumliche Analyse war über viele Jahre auf eine Betrachtung von ökonomischen Kennziffern fokussiert, verbunden mit der Typisierung von Raumkategorien wie Verdichtungsräume und Ländliche Räume über die Bevölkerungsdichte, d. h. Einwohnern pro Quadratkilometer (mit eher geringer Aussagekraft), dies meist verbunden mit dem Label ländlicher Räume als „Abwanderungsregionen“. Damit wurden, auch mangels verfügbarer Daten, soziale, gesellschaftliche und auch ökologische Positionierungen z. B. Ostbayerns als Raum entlang einer heute nicht mehr vorhandenen Grenze zu den Nachbarn in der Tschechischen Republik weitgehend ausgeklammert. Zentrale Faktoren der räumlichen Positionierung und Attraktivität wie Lebensqualität, Resilienz, Governance, Alleinstellungen und auch einer „Verbundenheit“ mit der Region (nur über empirische Erhebungen und nicht über statistische Daten erfassbar) werden jedoch in der Bundes-Raumordnung nur wenig berücksichtigt.

Gerade hier setzte die o. g. Studie des Instituts der deutschen Wirtschaft (IW) 2020 an, in die neben Faktoren der Wirtschaftsstruktur und des Arbeitsmarktes die regionale Lebensqualität in die Betrachtung einbezogen wurde, mit der Identifizierung von 14 aus 55 Indikatoren, die gemäß IW einen signifikanten Einfluss auf den Erfolgs-Index

haben. Betont wird die Funktion von Ankerunternehmen, regionalen Entwicklungspfaden, Pull-Faktoren und Innovationskooperationen.

Demgegenüber ist in der Raumordnung bis heute ein persistentes Fremdimage von Ostbayern erkennbar, das die Bezeichnungen „Peripherie“ (hier beschränkt auf Distanzen z. B. zu Infrastrukturen) und „Strukturschwäche“ verwendet. Hilfreich erscheinen umso mehr komplexe Indices mit einer Komprimierung auf Hauptkomponenten regionaler Entwicklung, wie sie das BBSR (Bonn) heranzieht [4], so etwa in Form einer Kombination von Daten der Bevölkerungsentwicklung einschließlich des Wanderungsverhaltens, des Arbeitsmarktes und der Realsteuer- sowie Kaufkraft.

Unbenommen bleibt die Kritik – wie sie auch an der Berechnung des Bruttoinlandsproduktes mit seiner rein ökonomischen Betrachtung von Entstehung, Verteilung und Verwendung der volks- und regionalwirtschaftlichen Wertschöpfung geübt wird – bestehen, bleiben doch subjektive Einschätzungen der Bürger(innen) und Unternehmen, die Wirksamkeit nachhaltiger Netzwerke und weiterer endogener Potenziale, die sich im qualitativen und damit nicht immer direkt messbaren Bereich bewegen, außen vor.

2.2 Von der Armut- zur Chancen-Region

Insgesamt weisen die Strukturdaten Ostbayerns auf einen nicht kurzfristig volatilen, sondern auf einen nachhaltigen Aufschwung zu einer Raumkategorie hin, die als „Chancen-Region“ für die Bevölkerung und die sowohl öffentlichen als auch privaten Unternehmen bezeichnet werden kann, mit Entwicklungs- und Entfaltungsmöglichkeiten für alle Phasen des Lebenslaufes bzw. der Biografien von Bürgern und Unternehmen und damit eines Beitrages zur regionalen Identität. Als Belege können ein Arbeitsmarkt nahe der Vollbeschäftigung, eine stabile Unternehmensstruktur, der Weg in Wachstumsbranchen (zum Teil High-Tech) sowie private und öffentliche Investitionen in Forschung, Entwicklung sowie – ein wesentlicher Faktor – in die Diffusion und Adaption von Inventionen im Innovationsprozess Ostbayerns gelten. Hier kommt dem Wissens- und Technologietransfer eine bedeutende Funktion zu, damit der Komponente der intraregionalen Umsetzung von kreativen Ideen.

2.3 Engpass-Faktor Jugend

Versucht man eine Übertragung des grundsätzlich positiven Weges Ostbayerns hin zur Sicherung der Daseinsvorsorge für die Bevölkerung in eine gleichzeitig notwendige regionale Differenzierung, so wird schnell deutlich, dass Pauschalbetrachtungen nur wenig weiterhelfen, ebenso wenig der Verlass auf Vergangenheitsdaten. Lenkt man den Blick vielmehr in die Ausgangssituation und den

Versuch von Prognosen, besser Szenarien, zu den Zukunftspotenzialen und Stärken, auch Alleinstellungen der ländlichen Räume in Ostbayern, so werden trotz aller Erfolge Herausforderungen in interregionalen Benchmarks deutlich. Diese können – legt man eine Gewinner-Verlierer-Kategorie an – in einem Hauptfaktor definiert werden, der die regionale Entwicklung maßgeblich prägt: Die Bevölkerung, ihre Struktur und insbesondere ihr räumliches Verhalten, beeinflusst von Push- und Pull-Faktoren, verkürzt auf die Frage, was Menschen – z. B. die Jugend einer Region – „bewegt“, zu bleiben oder zu gehen. Auch wenn Ostbayern nicht mehr als eine Abwanderungsregion bezeichnet werden kann (jedoch bis heute als persistentes Fremdimage plakativ verwendet), so muss doch in der natürlichen Bevölkerungsentwicklung von einem signifikanten Rückgang der jungen Bevölkerung ausgegangen werden, der sich in Ostbayern bis zum Jahr 2035 nach allen Prognosen auf Werte bis zu minus einem Viertel belaufen wird. Dieses Risiko eines „Verlustes der Jugend“ ist eng gekoppelt an den zunehmenden Überhang von Ausbildungsplätzen, der den heute schon vorhandenen Fachkräftemangel in Zukunft noch verstärken wird. Dies umso mehr, als die Entwicklung der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten bereits seit Mitte der 90er-Jahre in Ostbayern einen Positivtrend aufweist, der sogar von der „Krise“ in den Jahren 2008/2009 und – gemäß den aktuell vorliegenden Daten – auch von der Corona-Pandemie 2020 (noch) nicht erheblich tangiert wurde.

3 KMU als Stabilitätsfaktor

Einen zentralen Erfolgsfaktor bilden die Ostbayern prägenden kleinen und mittleren Unternehmen, sei dies in Industrie, Handwerk oder in den Dienstleistungen. So weist die Oberpfalz unter den ostbayerischen Regierungsbezirken und in Bayern insgesamt mit 126 Beschäftigten pro 1000 Einwohnern den höchsten Industriebesatz auf, gefolgt von Oberfranken (114) und Niederbayern (108). Eine zunächst positive Sichtweise sollte jedoch mit dem anhaltenden Strukturwandel im Rahmen der Tertiärisierung verbunden werden und einem Szenario, das bis hin zu den Zulieferbetrieben etwa der Automobilindustrie im Zuge der Elektromobilität reicht. So sind die regionalen Schwerpunkte der Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes in Ostbayern auf die Landkreise Hof, Schwandorf und Passau konzentriert, betrachtet man jedoch die Verteilung der Beschäftigten, dann kommt eine ausgeglichene Regionalstruktur zum Tragen, nicht zuletzt zurückzuführen auf die dezentrale Standortsituation der KMU. Dass dieser positive Strukturwandel einer einst altindustrialisierten Region (mit den prägenden Branchen Stahl, Glas, Keramik, Textil und einer ausgeprägten Abhängigkeit von Zweigbetrieben aus Verdichtungsräumen, heute an Leerständen zu beobachten) mit völlig neuen Anforderungen an die Qualifikationen im Arbeitsmarkt verbunden ist (Stichworte Industrie 4.0, Künstliche Intelligenz), liegt auf der Hand.

Erweitert man die Analyse um das Handwerk, dann wird dessen Relevanz ersichtlich: 55.170 Betriebe, 292.800 Beschäftigte und 20.549 Ausbildungsverhältnisse im Jahr 2019 in Oberfranken, in der Oberpfalz und in Niederbayern machen deutlich, welcher Beitrag für Ostbayern hier geleistet wird. Dies jedoch verbunden mit der Problematik von nicht immer gesicherten Betriebsnachfolgen und damit der Fortführung etablierter Strukturen gerade im ländlichen Raum.

4 Empirische Forschung: Positionspapier Nördliche Oberpfalz

Der Wirtschaftsclub Nordoberpfalz ist ein seit dem Jahr 1977 bestehender Zusammenschluss von aktuell rund 170 Unternehmen und unternehmerisch tätigen Personen, die verbunden mit einem Jahresumsatz von 5,8 Milliarden Euro über 30.000 Mitarbeiter(innen) beschäftigen und damit eine überaus bedeutende Funktion für die Regionalentwicklung besitzen. Eines der wesentlichen Ziele ist die Interessensvertretung für die Nördliche Oberpfalz und ihre Unternehmen nach innen und außen. Den Autor verbindet eine langjährige Zusammenarbeit mit dem Wirtschaftsclub in Form gemeinsamer Erstellungen von Positionspapieren, die bis in das Jahr 2001 zurückreichen und in denen in regelmäßigen Abständen die Herausforderungen während der vergangenen 20 Jahre thematisiert worden sind. Eine aktuelle Studie in Form eines „Positionspapiers Nördliche Oberpfalz“, basierend auf der Datenanalyse regionaler Strukturen und Prozesse, einer SWOTAM-Analyse und darauf aufbauend empirischen Workshops mit den Unternehmen sowie einer Podiumsdiskussion mit der Landes- und Regionalpolitik soll im Folgenden in ihren wesentlichen Ergebnissen vorgestellt werden.

4.1 Herausforderungen für die Regionalwirtschaft

In einer Analyse unterschiedlicher Dynamik in den 97 Raumordnungsregionen Deutschlands kommt ein Zusammenhang zum Ausdruck: Es tritt eine Korrelation zwischen der Entwicklung im Arbeitsmarkt und der Entwicklung der Bevölkerung zu Tage [5]. Diese äußert sich darin, dass jene Regionen, die den Strukturwandel im Arbeitsmarkt gut bewältigen und hier Erfolge verzeichnen, gleichzeitig eine wachsende oder zumindest stabile Bevölkerungszahl aufweisen. Wirtschaftliche Dynamik scheint in einem engen Zusammenhang mit der demografischen Entwicklung zu stehen. Positioniert sich eine Region zudem mit effizienten Instrumenten der – auch kommunalen – Wirtschaftspolitik, dann ist eine erhebliche Hebelwirkung für die Regionalstruktur im Sinne kreativer Milieus und einer innovationsorientierten Regionalpolitik gegeben. So bewerteten die im Wirtschaftsclub Nordoberpfalz organisierten Unternehmen die folgenden Herausforderungen ab 2018 als relevant (vgl. Abbildung 2):



Abbildung 2: Herausforderungen aus Sicht regionaler Unternehmen [6]

4.2 Die Strategie-Ansätze

Die Herausforderungen aus (über)regionalen Rahmenbedingungen wurden in eine SWOTAM-Analyse übergeführt, aus der wiederum Strategie-Ansätze in sechs Handlungsfeldern abgeleitet worden sind (vgl. Abbildung 3).



Abbildung 3: Strategie-Ansätze für die Region [7]

5 Fazit

Versucht man die Ergebnisse auf die Zukunft der ländlichen Räume in Ostbayern zu übertragen, dann können folgende wesentliche Faktoren für einen erfolgreichen Weg definiert werden:

- Ein ausgeprägtes Vertrauen zwischen den regionalen Akteuren sowie Resilienz
- Die Bereitschaft, sich mit Durchhaltevermögen gemeinsam für eine Region einzusetzen
- Die Auslösung von organisatorischen Innovationen, Regional Governance

- Der Schulterschluss in Modellen der Private-Public-Partnership (PPP)
- Die Konzeption und vor allem Umsetzung von Verbundstrategien
- Die Berücksichtigung langfristiger Trends und das Denken in Szenarien
- Die Forcierung des Regionalbewusstseins und Optimismus auf allen Ebenen
- Die Intensivierung intraregionaler Kreisläufe
- Die umfangreiche Zeitbudgets erfordernde Korrektur persistenter Negativ-Images
- Die Third Mission in einer regionalen Gesellschaft mit Einbezug der sozialen Akteure

Referenzen:

- [1] Institut der deutschen Wirtschaft Köln, Ländliche Regionen in Deutschland – Ergebnisse des IW-Regionalrankings 2020, in: IW-Trends, Vierteljahresschrift zur empirischen Wirtschaftsforschung, Köln, Jg. 47, H. 2/2020, S. 65 – 88
- [2] vgl. etwa Weber, W., Anselstetter, R., Kreisentwicklungskonzept des Landkreises Neustadt an der Waldnaab: Zukunfts-Strategien des regionalen Managements und regionalen Marketings, Weiden, 2014
- [3] Institut der deutschen Wirtschaft Köln, Ländliche Regionen in Deutschland – Ergebnisse des IW-Regionalrankings 2020, a.a.O., S. 77
- [4] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Regionalforschung (BBSR), Raumordnungsbericht 2017: Daseinsvorsorge sichern, Bonn, 2017
- [5] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Regionalforschung (BBSR), a.a.O., S. 20f.
- [6] Weber, W., Positionspapier Nördliche Oberpfalz 2018 des Wirtschaftsclubs Nordoberpfalz, Weiden, 2018, S. 24
- [7] Weber, W., Positionspapier Nördliche Oberpfalz 2018 des Wirtschaftsclubs Nordoberpfalz, a.a.O., S. 31f.

Projektpartner:

Wirtschaftsclub Nordoberpfalz

Kontakt:



Prof. Dr. Wolfgang Weber

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen
und Gesundheit
Wirtschaftsgeographie
und Makroökonomie
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

w.weber@oth-aw.de

Die Relevanz von Umweltmanagementsystemen an deutschen Hochschulen

Prof. Dr.-Ing. Burkhard Berninger
Georg Klampfl, M.Eng.

Zusammenfassung

Umweltmanagementsysteme spielen im Alltag von deutschen Hochschulen meist noch eine untergeordnete Rolle, auch wenn Vorreiter bereits entsprechende Strukturen eingeführt haben. Dabei hat auch das Handeln von Hochschulen Auswirkungen auf die Umwelt: Die Gebäude der deutschen Hochschulen sind zum großen Teil alt und entsprechen häufig nicht den modernen Anforderungen der Energieeffizienz. Im alltäglichen Hochschulbetrieb wird viel Abfall verursacht, Wasser verbraucht und insbesondere die Verwaltung ist nach wie vor stark auf die Verwendung von Papier ausgerichtet. Der vorliegende Beitrag soll deshalb die Möglichkeiten eines umweltfreundlicheren Hochschulbetriebs durch die Einführung eines Umweltmanagementsystems aufzeigen.

Abstract

Environmental management systems usually still play a subordinate role in everyday life at German universities, even though pioneers have already introduced corresponding structures. The actions of universities have a great impact on the environment: The buildings of German universities are to a large extent old and often do not meet modern energy efficiency requirements. In everyday university life, a lot of waste is generated, water is consumed extensively and, in particular, the administration is still strongly oriented towards the use of paper. This paper therefore aims to outline the possibilities of a more environmentally friendly university operation by introducing an environmental management system.

1 Einleitung

Umweltschutz und Klimawandel bestimmen zunehmend das Handeln in Wirtschaft und Gesellschaft. Sichtbar wird dies auf globaler Ebene durch immer häufiger auftretende Wetterextreme und auf gesellschaftlicher Ebene beispielsweise in Form von Massendemonstrationen im Rahmen der Aktion "Fridays for Future". Es ist kaum noch möglich die Thematik zu verdrängen oder sich davor zu verschließen. Die Politik in Deutschland hat bereits früh die Problematik erkannt und in den vergangenen Jahren wichtige Weichenstellungen für Gegenmaßnahmen getroffen. Als jüngste Maßnahme ist beispielsweise der Erlass des Klimaschutzgesetzes im Jahre 2019 zu nennen, in welchem sich die Regierung selbst verpflichtet, die Treibhausgasemissionen jährlich schrittweise zu verringern. Zur Erreichung dieser und weiterer umweltbezogener Ziele bedarf es eines gesamtgesellschaftlichen Zusammenwirkens, das auch die Hochschulen umfasst.

Eine Reihe deutscher Hochschulen hat bereits ihre Verantwortung gegenüber der Gesellschaft erkannt und als Beitrag ein Umweltmanagementsystem aufgebaut.

2 Was ist ein Umweltmanagementsystem?

Nach Artikel 2, Nr. 13 der Verordnung EG 1221/2009 ist ein Umweltmanagementsystem (UMS) „der Teil des gesamten Managementsystems, der die Organisationsstruktur, Planungstätigkeiten, Verantwortlichkeiten, Verhaltensweisen, Vorgehensweisen, Verfahren und Mittel für die Festlegung, Durchführung, Verwirklichung, Überprüfung und Fortführung der Umweltpolitik und das Management der Umweltaspekte umfasst“ [1].

Grundsätzlich soll ein Umweltmanagementsystem gewährleisten, dass die Gesamtheit der Abläufe und die Struktur der Organisation zu einem umweltverträglichen Handeln führen. Dies umfasst unter anderem einen scho-

nenden Umgang mit Ressourcen und eine systematische Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen.

Zur Einführung eines solchen Umweltmanagementsystems kann sich die Organisation freiwillig internationalen Standards unterwerfen, die die Anforderungen an die erforderlichen Strukturen festlegen. Die beiden wesentlichen Regelwerke sind dabei die internationale Norm DIN EN ISO 14001 [2] und die EMAS-Verordnung [1].

Die Anforderungen der ISO 14001 sind in der EMAS-Verordnung vollständig enthalten. Die EMAS-Verordnung stellt darüber hinaus allerdings noch weitere Anforderungen, wie beispielsweise die Erstellung einer zu veröffentlichen Umwelterklärung oder die weitergehende Beteiligung der Arbeitnehmer an der Etablierung eines Umweltmanagementsystems. Das EMAS-System verfolgt also einen umfassenderen Ansatz. In Deutschland haben nach derzeitigem Stand rund 8.000 Organisationen ein Umweltmanagementsystem nach ISO 14001 implementiert [3], während 1.150 Organisationen und 2.176 Standorte [3] in Deutschland EMAS registriert sind. Der Begriff „Organisation“ ist sehr weit gefasst und beinhaltet neben Unternehmen, Behörden, Hochschulen beispielsweise auch Vereine oder auch Bundeswehrstandorte.

3 Umweltmanagement an deutschen Hochschulen

Die Etablierung eines solchen Umweltmanagementsystems ist auch für die deutschen Hochschulen eine effiziente Handlungsoption hin zum umweltverträglicheren Handeln. Eine Bestandsaufnahme von 2020 zeigt, welche deutschen Hochschulen bereits nach EMAS validiert sind und teilweise bereits zuvor eine ISO 14001 Zertifizierung durchlaufen haben [4].

Augustana-Hochschule Neuendettelsau	HTW Berlin	Hochschule Bremen	Universität Bremen
BTU Cottbus-Senftenberg	Technische Universität Dresden	Hochschule Esslingen	Universität zu Kiel
HNE Eberswalde	KU Eichstätt-Ingolstadt	Hochschule Biberach	Hochschule Harz
Hochschule Heilbronn	Universität Paderborn	Hochschule für Technik Stuttgart	Technische Hochschule Lübeck
Technische Hochschule Köln	HfWU Nürtingen-Geislingen	Leuphana Universität Lüneburg	Hochschule Furtwangen
Eberhard Karls Universität Tübingen	im Aufbau: OTH Amberg-Weiden	Hochschule Weihenstephan-Triesdorf	

Abbildung 1: Deutsche Hochschulen mit einem zertifizierten Umweltmanagementsystem

Von derzeit insgesamt 424 Hochschulen in ganz Deutschland [5] haben folglich nur etwa 5 % Prozent ein Umweltmanagementsystem nach ISO 14001 und/oder EMAS integriert. Dies zeigt erheblichen Nachholbedarf in der deutschen Hochschullandschaft. Die OTH Amberg-Weiden hat sich vor diesem Hintergrund entschlossen, ein Umweltmanagementsystem nach ISO 14001 einzuführen.

4 Ablauf zur Etablierung eines Umweltmanagementsystems nach ISO 14001 an der OTH Amberg-Weiden

Um ein Umweltmanagementsystem nach ISO 14001 erfolgreich an Hochschulen etablieren zu können, bedarf es sequenzieller Projektphasen [6]. Die einzelnen Phasen besitzen einen logischen Ablauf, sodass die jeweilige Phase auf der vorherigen aufbaut. Für die Praxis gilt es daher, jede Etappe vollständig abzuschließen, ehe ein neuer Abschnitt beginnt, sowie das Überspringen von Phasen zu vermeiden.



Abbildung 2: Zusammenfassung des nachfolgend geschilderten Projektablaufs

Um ein Umweltmanagementsystem an der OTH Amberg-Weiden erfolgreich aufbauen zu können, bedarf es der **Festlegung und Verabschiedung** von **Umwelleitlinien** (auch Umweltpolitik genannt) seitens der Hochschulleitung. Die Leitlinien der OTH Amberg-Weiden beinhalten unter anderem die kontinuierliche Verbesserung der Leistungen im Umweltschutz, den nachhaltigen und sparsamen Umgang mit Strom, Wärme und Wasser, die Verpflichtung zur Einhaltung aller geltenden Umweltvorschriften sowie die Ermittlung, Beurteilung und Minimierung von Umweltbelastungen aller Art. Ein erfolgreiches

Umweltmanagementsystem setzt die Beteiligung aller Hochschulangehörigen voraus. Deshalb müssen in einem ersten Schritt die Umweltleitlinien veröffentlicht und jedem Hochschulangehörigen zugänglich gemacht werden (beispielsweise per E-Mail). Ebenso muss ein Umweltmanagementbeauftragter bestellt werden, der zentral für die Etablierung und Koordinierung der Systemeinführung zuständig ist. Insbesondere in einer Hochschule mit ihren komplizierten Hierarchien spielt die übergeordnete Koordination eine wichtige Rolle.

Im nächsten Schritt werden alle **Umweltaspekte** der Hochschule **identifiziert** und nach ihrer Relevanz **priorisiert**. Unter Umweltaspekten wird derjenige Bestandteil der Tätigkeiten, Produkte oder Dienstleistungen einer Organisation verstanden, welcher sowohl positive als auch negative Auswirkungen auf die Umwelt hat oder haben kann. Beispielsweise können dies Verbräuche von Wasser, Strom und Wärme, das Auftreten von Lärmquellen, Emissionen in die Atmosphäre sowie Abfälle aller Art sein. Diese Bestandsaufnahme wird durch den Umweltmanagementbeauftragten koordiniert und besteht aus einer Vor-Ort-Begehung und Gesprächen mit den zuständigen Ansprechpersonen. Zu diesen Räumlichkeiten gehören Labore mit den zuständigen Ingenieuren, Räume der Fakultäten (z. B. Hörsäle), technische Einrichtungen wie Heizungen, Tanks und Abwasserreinigungsanlagen, Verwaltungsgebäude sowie die jeweiligen Bibliotheken, Mensen und Technologicampi der beiden Hochschulstandorte. Nach erfolgreicher Identifizierung aller auftretenden Umweltaspekte werden diese nach ihrer Relevanz priorisiert und in einer Matrix festgehalten. Damit sind im ersten Anlauf die wichtigsten Umweltauswirkungen der Hochschule identifiziert.

Auf dieser Grundlage wird nun ein **Umweltkennzahlen-system** aufgebaut. Die Umweltkennzahlen dienen dazu, die Umweltaspekte und den Erfolg von Verbesserungsmaßnahmen messbar zu machen. In der Regel werden die als Basis bekannten Verbrauchswerte verwendet. Bisher werden an der OTH Amberg-Weiden bereits Verbrauchswerte von Strom, Wasser und Wärme regelmäßig erfasst. Darüber hinaus werden Abfallmengen und Gefahrstoffe von den zuständigen Angestellten in vorgegebene Tabellen eingepflegt. Damit diese Werte zukünftig eine valide Aussagekraft bekommen, muss ihre Vollständigkeit sichergestellt werden. Die erfassten Rohdaten sind in aller Regel als Steuerungsgrößen für die Umweltaspekte nicht geeignet, sondern müssen in geeigneter Form aggregiert werden. Bestimmte Werte sind sinnvollerweise auf eine geeignete Basisgröße zu beziehen, z. B. Heizenergie auf die beheizte Fläche oder Sanitärabwasser pro Kopf.

Nachdem, wie oben beschrieben, ein aussagefähiges Umweltkennzahlensystem an der Hochschule etabliert wurde, können Auswertungen für die gesamte Hochschule oder einzelne Bereiche erstellt werden. Daraus und aus den

gültigen Rechtsvorschriften lassen sich erforderliche Verbesserungsmaßnahmen ableiten, die der Umweltmanagementbeauftragte im **Umweltprogramm** zusammenfasst, welches Umweltziele und Maßnahmen zu deren Erreichen beinhaltet. Diese Ziele und Maßnahmen sind ein zentrales Element der kontinuierlichen und systematischen Verbesserung des materiellen Umweltschutzes und auch des Umweltmanagementsystems. Sie müssen deshalb systematisch verfolgt und regelmäßig auf Erreichung überprüft werden. Um dies zu gewährleisten muss das Umweltprogramm mit konkreten Maßnahmen, quantifizierten und messbaren Zielen, Verantwortlichen und Mitwirkenden sowie Terminen und Mitteln hinterlegt werden.

Damit sichergestellt werden kann, dass das Umweltmanagement alle **umweltrelevanten Abläufe** der Hochschule abdeckt, bedarf es wie im Qualitätsmanagement auch hier einer Ermittlung der erforderlichen Prozesse. Aufbauend auf dieser Identifizierung, können die erforderlichen Abläufe beschrieben, entsprechende Verfahrensanweisungen erstellt und analog zum Qualitätsmanagement im OTH-Prozessportal eingebettet werden. Hierzu gehören beispielsweise ein umweltfreundlicher Beschaffungs- und Einkaufsprozess und der Ablauf der Abfallentsorgung. Parallel dazu müssen in diesem Schritt aber auch geeignete Vorkehrungen zur Notfallvorsorge und -planung erarbeitet und getroffen werden. Beispielsweise muss durch präzise definierte Abläufe der richtige Umgang mit Gefahrstoffen und die Einhaltung aller Rechtsvorschriften sichergestellt und den daraus entstehenden Risiken vorgebeugt werden. Aktuell gibt es an der OTH Amberg-Weiden bereits einzelne umweltbezogene Verfahrensanweisungen. Die noch fehlenden Prozesse muss der Umweltmanagementbeauftragte zusammen mit den betroffenen Ansprechpartnern identifizieren und ausarbeiten. Dieser Schritt ist der zeit- und personalaufwendigste beim Aufbau des Umweltmanagementsystems. Um die erforderliche Akzeptanz zu erreichen, müssen alle betroffenen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter einbezogen werden.

Nach der beschriebenen Phase des Aufbaus einer Ablauforganisation muss ebenso die **bisherige Aufbauorganisation** an das neu zu etablierende Umweltmanagementsystem **angepasst** werden. Für diese Systemangleichung müssen zuerst alle umweltbezogenen Funktionen inklusive ihrer Anforderungen an Ausbildung und Schulungen festgestellt und beschrieben werden. Noch nicht vorhandene Funktionen müssen dazu neu eingerichtet werden. Konkret muss hier beispielsweise der Schulungsbedarf von betroffenen Angestellten für das Umweltmanagement ermittelt und anschließend organisiert werden. Anschließend empfiehlt es sich, eine Verantwortungsmatrix zu erstellen, um die Aufgaben klar zuzuordnen.

Als Voraussetzung für die langfristige Funktionsfähigkeit müssen bestimmte Elemente des Systems dokumentiert werden. Diese Dokumentation erfolgt meist in Form eines

Umweltmanagementhandbuchs, dessen Inhalte sich an der high-level-structure der ISO 14001 orientieren. Wichtige Bestandteile sind eine übergeordnete Beschreibung des Systems, alle Prozessbeschreibungen und Arbeitsanweisungen, aber auch das Umweltprogramm, ein Rechtsverzeichnis sowie die Bewertung von Risiken und Chancen des Umweltmanagements durch die Hochschulleitung. Es ist vorgesehen, dieses Handbuch im Verlauf der Systemeinführung analog zum Qualitätsmanagementsystem im Prozessportal der Hochschule zu verankern.

In der abschließenden Etablierungsphase muss das eingeführte Umweltmanagementsystem einem internen **Umweltaudit** standhalten. In diesem Schritt wird die Funktionsfähigkeit des Systems kontrolliert. Diese interne Überprüfung der Systemleistung erfolgt zukünftig in jährlichen Intervallen. Sofern das Umweltmanagementsystem intern seine Funktionsfähigkeit nachgewiesen hat und als Ergebnis die Hochschule in die Lage versetzt, Beiträge zur kontinuierlichen Verbesserung ihrer Umweltleistung zu liefern, kann eine Überprüfung in Form einer **Zertifizierung** nach ISO 14001 durch eine externe akkreditierte Zertifizierungsstelle erfolgen. Sofern diese Begut-

achtung zu einem positiven Ergebnis führt, darf sich die Hochschule über eine erfolgreiche Zertifizierung nach ISO 14001 freuen. Im ersten Anlauf sind häufig eine Reihe meist kleinerer Abweichungen zu korrigieren.

5 Ausblick

Die OTH Amberg-Weiden hat sich entschlossen, ihrer Verantwortung für die Umwelt gerecht zu werden. Die Einführung eines Umweltmanagementsystems nach ISO 14001 ist als Ziel mit dem zuständigen Ministerium vereinbart und bildet neben den Studienangeboten im Umweltbereich einen weiteren Schritt in Richtung "green thinking". Zusammen mit den Studierenden und dem Personal an der Hochschule soll der Betrieb in Zukunft ständig nachhaltiger gestaltet werden. Es bleibt zu hoffen, dass sich auch weitere Hochschulen zukünftig ihrer Verantwortung für die Gesellschaft bewusst werden und mit der Einführung eines Umweltmanagementsystems als gutes Beispiel vorangehen. Denn nur, wenn alle in der Gesellschaft aktiv werden, können die großen Herausforderungen des Klimawandels und des Umweltschutzes im Allgemeinen bewältigt werden.

Referenzen:

- [1] Europäisches Parlament und Europäischer Rat (2009): Eco-Management and Audit Scheme (EMAS), Verordnung (EG) Nr. 1221/2009, Straßburg und Brüssel.
- [2] Deutsches Institut für Normung e. V. (2015): DIN EN ISO 14001:2015, deutsche Fassung, Berlin.
- [3] Umweltbundesamt, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/umwelt-energiemanagementsysteme#eco-management-and-audit-scheme-emas> (zuletzt aufgerufen am 03.10.2020)
- [4] Institut für Hochschulentwicklung, <https://his-he.de/portale/nachhaltige-entwicklung/emasiso/> (zuletzt aufgerufen am 03.10.2020)
- [5] Statistisches Bundesamt, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bildung-Forschung-Kultur/Hochschulen/Tabellen/hochschulen-hochschularten.html;jsessionid=F124A2E3BC3A8513737488D-27D7E362B.internet8711> (zuletzt aufgerufen am 03.10.2020)
- [6] Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (2005): Umweltmanagement an Hochschulen. Leitfaden zur Einführung eines Umweltmanagementsystems nach EMAS an Hochschulen, München.

Kontakt:



Prof. Dr.-Ing. Burkhard Berninger

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

b.berninger@oth-aw.de



Georg Klampfl, M.Eng.

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

g.klampfl@oth-aw.de

Niklas Zell, B.Eng.
Ina Jakobi, B.Eng.
Elias Bisse
Josef Schottenbauer, M.Eng.
Dipl.-Phys. Christian Schell
Prof. Dr. Peter Kurzweil

Hauptkomponenten- analyse: Eine analytische Bierprobe

Zusammenfassung

Chemische Analytik ist trocken – von wegen! Die Geschichte einer Bierverkostung unter Kollegen entwickelt sich zur aufregenden Erkundungstour durch die Chemie. Ein derart komplexes Gärprodukt in aller Vollständigkeit zu erfassen, überfordert bereits im nüchternen Zustand. Also bedienen wir uns einer statistischen Methode: der Hauptkomponentenanalyse. Damit gelingt es, umfangreiche Datensätze zu strukturieren und verborgene Muster zwischen den Daten zu erkennen. Schauerhafte Mythen und angsteinflößende Erzählungen um dieses mathematische Instrument erschrecken nicht nur Statistik-Neulinge. Deswegen erlauben wir uns die Demystifizierung an realen Gerstensaftproben.

Abstract

Chemical analysis is boring – by no means! The story of a beer tasting among colleagues developed into an exciting exploration tour through chemistry. Capturing such a complex fermentation product in its complete composition is already overwhelming in the sober state. So we used a statistical method: principal component analysis. This method makes it possible to structure extensive data sets and to recognize hidden patterns between the data. Horrible myths and terrifying stories about this mathematical instrument do not only frighten newcomers to statistics. That is why we allow ourselves the demystification by the help of real barley juice samples.

1 Von der Probenahme zur Beurteilung

Dunkles und helles Bier, Weizenbier und Craftbier, alkoholfreie Biere und Radler wurden nach Geruch und Geschmack von menschlichen Testpersonen beurteilt. Ein übereinstimmendes Urteil blieb aus. Also musste eine chemisch-analytische Untersuchung herausfinden, inwieweit sich die Proben in der Zusammensetzung unterscheiden, da sie den Charakter jedes Bieres prägt. Der Kohlenhydratgehalt als Saccharoseäquivalent wurde mit UV/VIS-Spektroskopie [1] quantifiziert, beim Alkoholgehalt auf die Angabe auf dem Etikett vertraut.

Den dabei generierten Datensatz gilt es sinnvoll zu strukturieren, um eventuell vorhandene Muster zu erkennen. In den neun Zeilen der Matrix in Abbildung 1a stehen die Bierproben, in den zwei Spalten der Kohlenhydrat- und Alkoholgehalt. Fertig ist der erste Schritt der Hauptkomponentenanalyse (*Principal Component Analysis*, PCA) [2 – 6], die 9×2 Matrix wird fortan als Objektmatrix \mathbf{X} bezeichnet.

Weitere Proben würden den n Reihen, weitere Merkmale wie pH-Wert oder Proteingehalt den k Spalten angefügt.

Die Tabelle gibt die Geschmacksunterschiede schwerlich preis, weswegen der Alkoholgehalt in Abbildung 1b über den Kohlenhydratgehalt aufgetragen wird. Beide Merkmale werden um ihre Mittelwerte zentriert und durch Division mit der Standardabweichung auf vergleichbare Dimension gebracht: $x_i := (x_i - \bar{x})/s_x$. Diese Autoskalierung [4, 6] bringt die autoskalierte Objektmatrix \mathbf{X}^{auto} hervor.

In Abbildung 1b sammeln sich die Proben mit niedrigerem Alkoholgehalt im rechten unteren Abschnitt, aber ist diese Art der Darstellung überhaupt sinnvoll? Sagt der stark variierende Kohlenhydratgehalt etwas über den Charakter der Biere aus? Oder hängt der Alkoholgehalt vom Zuckergehalt ab, womit eine Größe verzichtbar würde? Jetzt kommt die Hauptkomponentenanalyse ins Spiel, um unabhängige Größen aus dem Alkohol- und Kohlenhydratgehalt abzuleiten.

(a)

Bierprobe	k Merkmale (hier 2)	
	Kohlenhydrat- gehalt ¹⁾ a / (g / l)	Alkoholgehalt ²⁾ b / Vol.-%
Diätweizen (W)	26	2,9
Craftbier (C)	41	7,5
Oster-Festbier (O)	43	5,8
Helles Bier (H)	35	5,0
Dunkles Bier (D)	34	5,0
Radler 1 (R1)	52	2,4
Radler 2 (R2)	69	2,5
Alkoholfrei 1 (A1)	61	0
Alkoholfrei 2 (A2)	67	0
Mittelwert	$\bar{a} = 47,6$	$\bar{b} = 3,5$
Standard- abweichung	$s_a = 15,4$	$s_b = 2,6$

n Proben (hier 9) Objektmatrix X

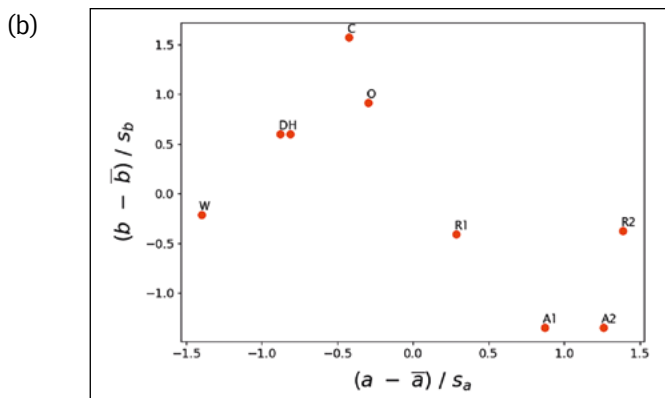


Abbildung 1: (a) Objektmatrix X von neun Bierproben mit Kürzel: 1 = als Saccharose-Äquivalent, 2 = laut Etikett. (b) Alkohol- und Kohlenhydratgehalt der Biere in autoskalierter Form.

2 So funktioniert die Hauptkomponentenanalyse

Gesucht sind die Hauptkomponenten der Objektmatrix X . Sie spannen ein neues Koordinatensystem auf, bei dem die erste Hauptkomponente PC_1 in Richtung der maximalen Varianz von X zeigt. Die weiteren Hauptkomponenten, in unserem Beispiel noch eine, stehen senkrecht zu ihr. Jede Hauptkomponente setzt sich aus den ursprünglichen Probenmerkmalen zusammen. Die PCA generiert keine neuen Informationen, sondern bringt Zusammenhänge ans Tageslicht, die für das menschliche Auge zunächst verborgen sind.

Der autoskalierte Datensatz X^{auto} wird in die Hauptkomponentenmatrix P und die Ladungsmatrix L zerlegt. Übrig bleibt die Residuenmatrix E , die nicht durch die Hauptkomponenten erklärt werden kann.

$$X^{\text{auto}} = P \cdot L^T + E$$

Das Gleichungssystem wird gelöst, in dem man es auf ein Eigenwertproblem zurückführt [5]. Vereinfacht gesagt wird dabei aus Matrix X mal Vektor $x =$ Eigenwert λ mal Vektor x , und zwar für jede Hauptkomponente i .

Aus satztechnischen Gründen sind Matrizen und Vektoren (ohne Pfeil) hier fett gedruckt.

$$\text{Corr}(X) \cdot x_i = \lambda_i \cdot x_i$$

Die Eigenwerte λ_i sind ein Maß für die Varianz von X . Die Korrelationsmatrix $C = \text{Corr}(X)$ enthält die Korrelationskoeffizienten $r_i = \text{corr}(a, b)$ für den linearen Zusammenhang zweier Merkmalsvektoren a und b [7]. Zur Berechnung braucht man noch die arithmetischen Mittelwerte und Standardabweichungen s der Merkmale.

$$r(a, b) = \frac{\text{cov}(a, b)}{s_a \cdot s_b} = \frac{1}{s_a \cdot s_b} \cdot \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a}) \cdot (b_i - \bar{b})$$

Für unser Beispiel kann die Korrelationsmatrix von X mit den zwei Merkmalen Kohlenhydratgehalt a und Alkoholgehalt b mithilfe der Excel-Funktion $\text{KORREL}(a, b)$ oder $\text{numpy.corrcoef}(a, b)$ in PHYTHON berechnet werden:

$$C = \begin{pmatrix} 1 & r(a, b) \\ r(b, a) & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -0,644 \\ -0,644 & 1 \end{pmatrix}$$

Nun gilt es das Eigenwertproblem zu lösen. Für größere Matrizen helfen das Programm MATHCAD mit der Funktion $\text{eigenvals}(\text{Matrix})$, MATLAB mit $\text{eig}(\text{Matrix})$ oder PHYTON mit $\text{linalg.eig}(\text{Matrix})$ aus der Bibliothek SciPy weiter. Die zwei Eigenwerte kann man in dem 2×2 -Beispiel von Hand berechnen. In der Hauptdiagonalen wird „minus Lambda“ ergänzt und das Gleichungssystem $(C - \lambda E) = 0$ gelöst, indem man das Polynom $|C - \lambda E| = 0$ nach λ auflöst. Aus $(1 - \lambda)^2 - 0,644^2 = 0$ folgen $\lambda_1 = 1,644$ und $\lambda_2 = 0,356$.

Die zwei Eigenvektoren e_i ergeben sich aus einer der beiden Gleichungen $C \cdot e_i = \lambda_i \cdot e_i$, zum Beispiel aus der ersten Zeile, wobei eine Komponente willkürlich Eins gesetzt wird. Für $\lambda_1 = 1,644$ und $e_x = 1$ ist $e_1 = (1; -1)^T$. Für $\lambda_2 = 0,356$ und $e_y = 1$ ist $e_2 = (1; 1)^T$. Die normierten Einheitsvektoren sind dann $e_1 = (0,707; -0,707)^T$ und $e_2 = (0,707; 0,707)^T$.

Damit steht endlich die Hauptkomponentenmatrix $P = X \cdot L$ mit dem Alkohol- und Kohlenhydratgehalt der Bierproben fest. Die Eigenvektoren e_i sind zugleich die Spaltenvektoren der Ladungsmatrix L und müssen nur noch mit X^{auto} multipliziert werden. Im Beispiel:

$$P = \begin{pmatrix} \text{Merkmal } a & b \\ -1,396 & -0,216 \\ -0,424 & 1,574 \\ \vdots & \vdots \\ 1,259 & -1,345 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} PC_1 & PC_2 \\ 0,707 & 0,707 \\ -0,707 & 0,707 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} PC_1 & PC_2 \\ -0,834 & -1,140 \\ -1,413 & 0,813 \\ \vdots & \vdots \\ 1,841 & -0,060 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{Probe} \\ 1 \\ 2 \\ \vdots \\ 9 \end{matrix}$$

Objektmatrix X · Ladungsmatrix L = Komponentenmatrix P

Jede Zeile P enthält die Hauptkomponenten einer Bierprobe. Werden sie in Abbildung 2 übereinander aufgetragen, erhält man die zu Abbildung 1 gehörige Komponentendarstellung. Die alkoholfreien Biere sammeln sich rechts, die würzigen oben. Bei der 2- und 3-dimensionalen Hauptkomponentenanalyse werden die Datenpunkte nur im Raum rotiert und die erhoffte Strukturierung bleibt aus. Doch Datensätze mit vielen Merkmalen geben aufschlussreiche Ergebnisse.

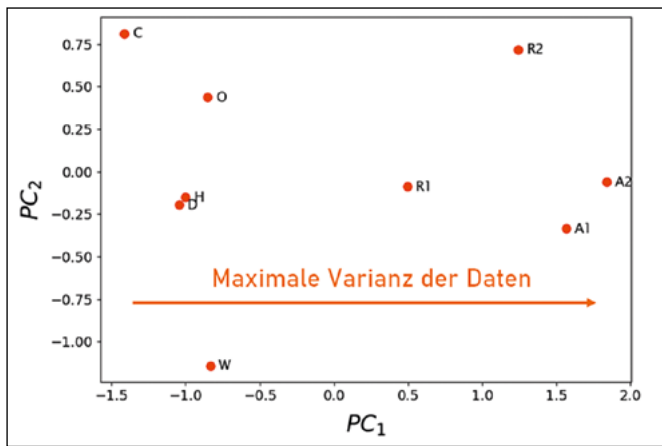


Abbildung 2: Hauptkomponentendarstellung von neun Bierproben bezüglich Zucker- und Alkoholgehalt.

3 Bierseliger Datensatz

Wir sind damit keineswegs am Ende unserer Bierprobe angelangt, denn das PCA-Werkzeug zur multivariaten Datenanalyse braucht einen großen Datensatz. Statt allein den Kohlenhydrat- und Alkoholgehalt der Biere zu betrachten, bietet sich die Analyse von Infrarotspektren mit ihren charakteristischen Deformations- und Valenzschwingungen an [8]. Mit einem Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer mit ATR-Einheit (Fa. Bruker) haben wir die Spektren der neun Proben gemessen. Die ersten Ableitungen im aktivsten Bereich der IR-Spektren bei Wellenzahlen um 1050 cm^{-1} eignen sich zur Beurteilung wesentlich besser als die Grundspektren, die durch den Hauptbestandteil Wasser geprägt sind und sich wenig unterscheiden. Für jede Probe liegen 661 Datenpunkte (Merkmale) vor, die in Abbildung 3a aufgetragen sind. Die Objektmatrix der Form 661×661 ist für den menschlichen Verstand schwer greifbar, aber die Hauptkomponentenanalyse findet Eigenwerte und -vektoren unabhängig von den Ausmaßen. Die Berechnung erfolgt mit dem NIPALS-Algorithmus [4], der in Form einer Python-Klasse „PCA“ implementiert und mit Testdatensätzen verifiziert wurde. Die Spektren werden um das Mittelwertspektrum autoskaliert, die Korrelationsmatrix aufgestellt, das Eigenwertproblem gelöst und die Hauptkomponentenmatrix gebildet.

Die 661 Datenpunkte können auf zwei Hauptkomponenten reduziert werden, die etwa 62 % der Varianz des Datensatzes beschreiben. Die übrigen Komponenten enthalten nur rauschähnliche Signale, die nicht zur Unterscheidung der Proben beitragen. Dies zeigt die „Leave-One-Out“-Kreuzvalidierung [4], bei der jeweils eine Probe aus dem Datensatz entfernt, die PCA mit den übrigen Proben kalibriert und die Hauptkomponenten für die ausgelassene Probe berechnet wird. Aus den Fehlern dieser Vorhersage ergibt sich eine Prüfgröße, die bei der besten Komponentenzahl ein Minimum besitzt. Im Beispiel: $\text{PRESS}_i / \text{RSS}_{i-1} = 1,631$ für zwei Hauptkomponenten, aber 1,971 (für 3), 2,907 (für 4) bis 22,177 (für 7).

Drei Gruppen sind unterscheidbar: alkoholfreie Biere, alkoholhaltige Biere und Bier-Mischgetränke (Radler). Das war die „Lernphase“, in der das PCA-Modell kalibriert wird. In der „Anwendungsphase“ wurden die FTIR-Spektren von vier weiteren Bierproben analysiert, d. h. ihre Hauptkomponenten werden über die Eigenvektoren der Korrelationsmatrix der Kalibrierproben berechnet. Die Proben fallen perfekt in die zugedachten Gruppen, womit das Modell bestätigt ist (Abbildung 4). Es ist folglich möglich, gänzlich unbekannte Bierproben anhand ihres IR-Spektrums in diese Kategorien einzuordnen, womit theoretisch die Grundlage für eine automatisierte Bierbeurteilung geschaffen wurde.

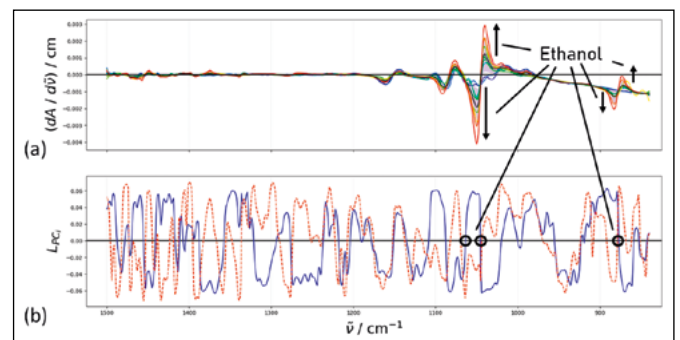


Abbildung 3: (a) FTIR-Spektren (1. Ableitung) von neun Bierproben: rot = viel Alkohol (Probe C > O > D) über grün (H > W) nach blau = wenig Alkohol (R > A). Schwarz = Mittelwertspektrum mit Standardabweichung (fliederfarben). – (b) Ladungskurven der Ableitungswerte für die Hauptkomponente PC1 (blau) und PC2 (rot).

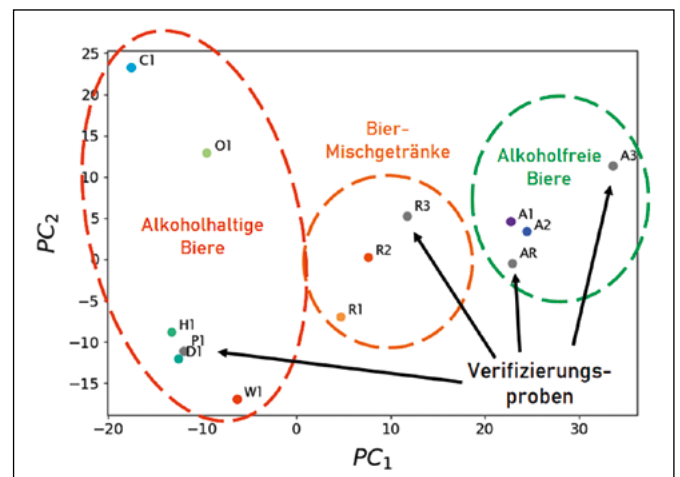


Abbildung 4: Hauptkomponentenanalyse der FTIR-Spektren (1. Ableitung) mit neun Lernproben und vier Verifizierungsproben (grau): Pils (P1), Radler (R3), alkoholfreies Radler (AR), Alkoholfreies Bier (A3).

4 Das Ende der Bierprobe?

Unsere analytische Bierverkostung zeigt indirekt den Alkoholgehalt auf der PC1-Achse als Klassifizierungskriterium für das Handelsprodukt. Die Einträge des ersten Einheitsvektors in der Ladungsmatrix, über die Wellenzahl aufgetragen, ergibt die Ladungskurve für PC1 (Abbildung 3b). Je größer der absolute Ladungswert e_{ij} , desto wichtiger ist ein autoskalierter Messwert $y(x)$ in der

Hauptkomponente PC₁, denn die Merkmalsmatrix mal Einheitsvektor ist eine Linearkombination:

$$PC_1 = \mathbf{X}^{\text{auto}} \cdot \mathbf{e}_1 = y_1 e_{11} + y_2 e_{21} + \dots + y_n e_{1n}$$

Die Vorzeichenwechsel in Abbildung 3b bestätigen die Wichtigkeit einzelner Wellenzahlen von Ethanol für PC₁. Hoher Alkoholgehalt zieht PC₁ in negative Richtung in Abbildung 4. Die unanschauliche PC₂-Achse codiert wohl die vielfältigen Geschmacksnoten. Damit bestätigt sich die anfängliche Annahme, dass Alkohol und Zucker den Geschmack eines Bieres am stärksten prägen. Dass Craftbier und Osterfestbier würzig-süß schmecken, liegt auf der Hand. Das herbe Pils und das magere Diätweizen kontrastieren mit negativen PC₂-Werten. Im Radler hebt aromatische Limonade den PC₂-Wert und im alkoholfreien Bier muss der Geschmack überzeugen.

Referenzen:

- [1] S. S. Nielsen, *Food Analysis Laboratory Manual*, Berlin: Springer 2015.
- [2] H. Mark, J. Workman, *Chemometrics in Spectroscopy*, Amsterdam: Elsevier 2018.
- [3] P. Geladi, B.R. Kowalski, Partial Least-Squares Regression: A Tutorial, *Analytica Chimica Acta* 185 (1986) 1 – 17.
- [4] E. Reh, *Chemometrie*, Berlin: de Gruyter, 2017.
- [5] I. Stanimirova et al., Robust Methods in Analysis of Multivariate Food Chemistry Data, in: F. Marini, *Chemometrics in Food Chemistry*, Vol. 28, Amsterdam: Elsevier 2013.
- [6] M.L. Vigni et al., Exploratory Data Analysis, in: F. Marini, *Chemometrics in Food Chemistry*, Vol. 28, Amsterdam: Elsevier 2013.
- [7] J. Hartung et al., *Statistik*, München: Oldenbourg 2009.
- [8] H. Hug, P. Kurzweil, *Tabellenbuch der analytischen Chemie*, Haan: Europa-Lehrmittel, 2017.

Fördergeber:

Bayerisches Staatsministerium für
Wissenschaft und Kunst



Kontakt:



Niklas Zell, B.Eng.

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

ni.zell@oth-aw.de



Josef Schottenbauer, M.Eng.

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

jo.schottenbauer@oth-aw.de



Dipl.-Phys. Christian Schell

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

ch.schell@oth-aw.de



Ina Jakobi, B.Eng.

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

i.jakobi@oth-aw.de



Elias Bisse

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

e.bisse@oth-aw.de



Prof. Dr. Peter Kurzweil

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

p.kurzweil@oth-aw.de



EINE STARKE VERBINDUNG FÜR DIE ZUKUNFT

Erleben Sie, wie Industriemineralien von uns zu hochfunktionellen Füllstoffen für die unterschiedlichsten Produkte veredelt werden.

Sie möchten im Rahmen eines Praktikums interessante Einblicke in unsere alltägliche Arbeit gewinnen? Oder Sie studieren Angewandte Chemie, Maschinenbau/Versorgungstechnik, Verfahrenstechnik, Werkstofftechnik oder Wirtschaftsingenieurwesen und stehen kurz vor dem Abschluss?



Dann schauen Sie doch auf unserer Homepage vorbei.
Dort veröffentlichen wir regelmäßig attraktive Stellenausschreibungen,
Abschlussarbeiten oder Praktika.

Gebrüder Dorfner GmbH & Co.
Kaolin- und Kristallquarzsand-Werke KG

Scharhof 1
92242 Hirschau
Deutschland

Tel: 096 22 / 82-0
E-Mail: karriere@dorfner.com

www.dorfner.com



Zusammenfassung

Im Betrieb von Schwingsiebmaschinen entstehen prozessbedingt Kraftübertragungen auf das Fundament eines Gebäudes, die die gesamte Gebäudestruktur in Schwingungen versetzen können. Um dies einzuschränken erfolgt die Lagerung einer Schwingsiebmaschine klassischerweise direkt am Fundament, wodurch eine einfache und kostengünstige Verbindung mit der Gebäudekonstruktion gegeben ist. Ist das Schwingsiebsystem jedoch in einem Gebäude mit schwingungsempfindlicher oder älterer Bausubstanz oder in einer für das Gebäude in Bezug auf Schwingungen ungünstigen Lage montiert, können diese entstehenden Schwingungen zu Schäden oder Versagen der Baukonstruktion führen. Eine Möglichkeit zur Minimierung dieser Schwingungen ist die Einbringung eines Gegenschwingrahmens in das System. Diese Gegenschwingmasse führt durch eine im Betrieb entstehende Kompensationsbewegung zu einer Verringerung der Kraftübertragungen auf das Fundament. Durch eine dynamische Finite-Elemente-Analyse mit MSC/Marc wurden existierende Einmassen- und Zweimassensysteme von Schwingsiebförderern untersucht und bewertet. Zur Optimierung wurden anhand der Variation der Parameter „Masse des Gegenschwingrahmens“, der „Federsteifigkeiten“ und der „Dämpfungskennwerte der Schwingungsdämpfer“ praktikable Optimierungsvorschläge erarbeitet. Die mittels der FE-Analysen erzielten Ergebnisse wurden anschließend konstruktiv umgesetzt und experimentell untersucht und bewertet.

Abstract

During practical Vibration conveyors for bulk material mill has to be reduced, the entire Vibrating Mill and its drive will be put on an additional countervibration frame. The objective of vibration isolation systems is either to reduce the transmission of periodic, pulse-like or stochastic forces from a source of vibrations (for example, a machine) to adjoining structures (source isolation, protection against vibration emissions) or to protect people and susceptible machines, devices or buildings against vibrations that originate in their environment (receptor isolation, protection against vibration immissions). Both tasks can be fulfilled through the use of vibration isolators. This creates a system whose dynamic behaviour is affected decisively by the properties of the source of vibrations, the dynamic properties of the source- and receptorside structures and the properties of the vibration isolator elements. Optimizing system design in terms of the relevant requirements for vibration protection, necessitates comprehensive and detailed knowledge of all the factors that affect the resulting properties and the beneficial use of vibration isolators for a particular machine or installation.

1 Einleitung

Im Betrieb einer Siebmaschine entstehen prozessbedingt Kraftübertragungen auf das Fundament eines Gebäudes, die die gesamte Gebäudestruktur in Schwin-

gungen versetzen können. Um dies einzuschränken erfolgt die Lagerung einer Siebmaschine klassischerweise direkt am Fundament, wodurch eine einfache und kostengünstige Verbindung mit der Gebäudekonstruktion gegeben ist. Ist das Siebsystem jedoch in einem

Gebäude mit schwingungsempfindlicher oder älterer Bausubstanz oder in einer für das Gebäude in Bezug auf Schwingungen ungünstigen Lage montiert, können diese entstehenden Schwingungen zu Schäden oder Versagen der Baukonstruktion führen. Die hohen Reaktionskräfte und die Vibrationsübertragungen führen zu Materialermüdungen in der Stahlstruktur und ungenauer Arbeitsweise der Folgemaschinen und Steuerungen. Weiter machen sie dem Bedienungspersonal den längeren Aufenthalt auf den verschiedenen Plattformen und Arbeitsbühnen unmöglich. Auf filigranen Stahlstrukturen sind somit bei der Aufstellung von Sieben hochisolierende, möglichst reaktionsneutrale und den Auslauf kontrollierende Lagerungen gefragt. Während des Siebauslaufes, nahe des Resonanzfrequenzbereichs, entstehen zusätzliche hohe Beanspruchungen auf das Gesamtsystem.

Bei sehr hohen, leicht konzipierten Stahlbauten wird deshalb bei der Sieblagerung oft auch ein zusätzlicher, energieabsorbierender Gegenschwingrahmen unter die eigentliche Siebmaschine gestellt. Diese Gegenschwingmasse führt durch eine im Betrieb entstehende Kompensationsbewegung zu einer Verringerung der Kraftübertragungen auf das Fundament. Diese Einbringung einer zweiten Masse führt jedoch zu erhöhten Kosten, weshalb eine Montage oftmals nur in Sonderfällen vorgenommen wird. Die Schwinglagerung des Siebes steht auf der ebenfalls elastisch gelagerten Gegenschwingmasse, was geringfügig die Schwingweite der Siebmaschine reduziert, jedoch einen Großteil der resultierenden, dynamischen Beschleunigung mittels Gegenbewegung abbaut. Erfahrungsgemäß wiegen diese Gegenschwingrahmen zwischen 50 % und 100 % der eigentlichen Siebmaschine. Aufgrund der großen Massenträgheit der Siebmaschine kompensiert die Gegenschwingmasse nur einen relativ kleinen Bruchteil der effektiven Schwingweite des Siebes. Die Schwinglagerungen müssen hierbei das Gewicht der Siebmaschine und des Gegenschwingrahmens tragen können.

2 Aufgabenstellung

Die Zielsetzung dieser Arbeit war die Reduzierung der in das Fundament und dem Stahlbau eingeleiteten dynamischen Lagerkräfte und den dadurch resultierenden Beanspruchungen in der Gebäudestruktur. Durch eine dynamisch transiente Finite-Elemente-Analyse mit MSC/Marc soll das mit Fliehkraft angeregte reale Zweimassensystem des Siebförderers untersucht und bewertet werden. Zur Optimierung des Gesamtsystems wurde anschließend durch die Variation der mechanischen Parameter, besonders der Masse des Gegenschwingrahmens und der Federsteifigkeit und Dämpfungskennwerte der Schwingungsdämpfer, ein Trend herausgearbeitet. Anhand dieses Trends wurde ein optimiertes Modell erstellt, das die gewünschte Verringerung der dynamischen

Lagerkräfte aufweist. Dieses Modell wurde anhand einer FE-Analyse mit dem Realsystem verglichen und die resultierende Optimierung wurde in Bezug auf die Validität experimentell untersucht und bewertet.

3 Modellsystem zur Durchführung von Grundsatzuntersuchungen

Für Voruntersuchungen wurde ein Beispiel aus der Literatur [1] herangezogen. Das Modell wird mit MSC/Marc modelliert und simuliert. Das Ziel war neben der Nachrechnung, dass durch eine Parametervariation die ersten Schlussfolgerungen für das nachfolgende Realsystem gemacht werden können. Da das Modellsystem Eigenschaften beinhaltet, die denen des Gegenschwingrahmens eines Siebförderers ähneln, lassen sich damit überschaubare Parametervariationen durchführen, aus denen sich Kenntnisse und Schlussfolgerungen ohne lange Rechenzeiten für die Simulation des Realsystems gewinnen lassen.

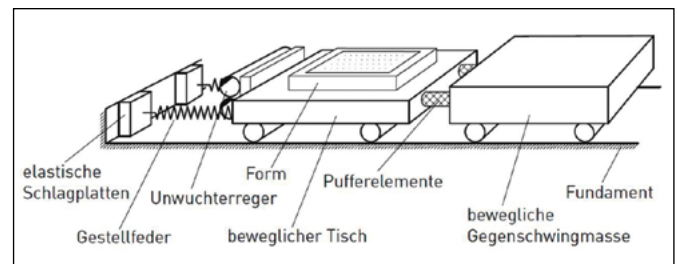


Abbildung 1: Skizze des Vibrationstisches aus der Aufgabenstellung [1]

Das Modell wird hierbei angenähert und vereinfacht modelliert. Die Vereinfachungen beinhalten ein Weglassen der Rollen, wodurch die Massenkörper direkt auf dem Fundament aufliegen. Dieser Kontakt wird als reibungsfrei angenommen. Den Körpern wird nach Angabe der Aufgabenstellung jeweils eine Masse von 440 kg zugewiesen. Die Verbindungen im System erfolgen mit zwei lineare Federn, die den Tisch und die Wand, und zwei nichtlineare Federn, die den Gegenschwingrahmen mit dem Tisch verbinden. Die Steifigkeit der linearen Feder beträgt 2 MN/m während die nichtlinearen Federn mit der Funktion $F = c_{20} \cdot s(1 + s^2/\alpha^2)$ mit α als Parameter für die Nichtlinearität dargestellt wird. Die Dämpfungskonstanten betragen 654,8 Ns/m für die Dämpfung zwischen Tisch und Wand und 6548 Ns/m für die Verbindung zwischen Tisch und Rahmen. Als Randbedingungen für die Simulation wurden die Freiheitsgrade der Wandknoten in x-, y- und z-Richtung eingeschränkt. Um eine Führung der Massen realitätsgetreu darzustellen, wurden die Körper in y- und z-Richtung geführt, wodurch diese nur noch in der x-Richtung frei beweglich waren. Für die Unwucht wird der Tisch mit einer von der zeitabhängigen Kraft $F(t)$ angeregt, welche nur in der x-Achse wirkt. Die Amplitude dieser angebrachten Kraft beläuft sich auf 24 kN mit einer Kreisfrequenz ω von 96 1/s.

Um den Einfluss der systemrelevanten Parameter auf das Verhalten des Systems zu erschließen, wurden Simulationen mit veränderten Parametern durchgeführt und bewertet, wobei die Unwuchtkraft nicht verändert wurde. Die Hauptzielsetzung hierbei war das Verständnis der Anregungsschwingungen mit einem besonderen Fokus auf die Amplitude und Frequenz für den beweglichen Tisch und dem Reaktionskräfteverlauf der Wandlagerung.

Zuerst wurde das Verhältnis der Masse des Tisches und des Gegenschwingrahmens variiert. Neben der Ausgangsmasse wurden die Masse des Gegenschwingrahmens für die Simulation verdoppelt und halbiert; die Simulation wurden also mit den Massenverhältnissen 1:1, 1:2 und 2:1 bei unveränderten Feder-Dämpfer-Eigenschaften durchgeführt. Anschließend wurden für die Bewertung des Einflusses des Feder-Dämpfer-Systems die Federsteifigkeiten und Dämpfungswerte halbiert. Der Entschluss die Federsteifigkeiten zu verringern, anstatt diese zu erhöhen oder gleichbleibend zu halten, um die Lagerkräfte zu verringern, erfolgt anhand analytischer Bewertungen basierend auf der Fachliteratur.

Aus den durchgeführten Simulationen lassen sich einige Schlüsse für einen Trend zur Optimierung der auftretenden Lagerkräfte ziehen. Hierbei wird die Funktionalität des Systems jedoch berücksichtigt, da die Tischbewegung nicht zu sehr verringert werden darf.

Der erste betrachtete Parameter, der zur Optimierung hilfreiche Informationen liefert, ist die Masse des Tisches und des Rahmens und deren Massenverhältnis zueinander. Eine Halbierung der Rahmenmasse führt zu einer Verdoppelung der auftretenden Lagerkraft. Ein Erhöhen der Masse des Gegenschwingrahmens führt hingegen zu einer Verringerung der entstehenden Lagerkraft um ca. 50 %. Die Variation dieses einen Systemparameters allein hat erheblichen Einfluss auf die Auslegung des Gesamtsystems. Jedoch lässt sich nicht in jedem System die Masse einer Komponente so drastisch verändern, da bauliche und funktionale Bedingungen einzuhalten sind.

Nachfolgend wurde der Fokus auf die Systemparameter Federsteifigkeit und Dämpfungskonstante gelegt. Es konnte hierbei eine erhebliche Verringerung der auftretenden Lagerkräfte beobachtet werden. Die Lagerbeanspruchungen haben sich ungefähr gedrittelt. Beide Optimierungsmethoden in einer Simulation angewandt, verglichen mit dem Ausgangszustand, zeigt das Optimierungspotenzial. Bei der originalen Feder-Dämpfer-Variante im Verhältnis 1:1 entstehen Lagerkräfte von ± 10 kN, bei der Variante mit erhöhter Rahmenmasse (1:2) und verringerter Steifigkeit und Dämpfung entstehen jedoch nur noch Lagerkräfte von $\pm 2,1$ kN. Wie schon erwähnt, darf jedoch die verringerte Vibrationsbewegung nicht aus den Augen verloren werden. Als Nebenprodukt dieser Verringerung der Lagerkraft verringert sich die Bewegung des

Tisches von $\pm 5,5$ mm auf nur noch $\pm 2,5$ mm und die des Rahmens von $\pm 6,56$ mm auf ± 4 mm. Als Schlussfolgerung ergab sich, dass eine Verringerung der Feder-Dämpfer-Kennwerte zu einer Verkleinerung der Vergrößerungsfunktion führt, also den Bewegungen und damit den resultierenden Lagerkräften. Ebenso führt eine Erhöhung der Gegenschwingmasse zu einer Verringerung der Vergrößerungsfunktion.

4 Analyse des Realsystems

Für das Realsystem wurden die relevanten Parameter und Randbedingungen übernommen, die die Simulationsgrundlage und die Referenzkennwerte für die Optimierung lieferten.

- Abmessungen der Maschine
- Drehzahl und resultierende Unwuchtkraft der Motoren
- Kennwerte der eingesetzten Schwingungsdämpfer
- Lagerungsbedingungen
- Massenbelegung der Siebmaschine und Masse der Siebmaschine
- Masse des Gegengewichtsrahmens

Die Analyse des Realsystems erfolgt in zwei Durchgängen; das System wird einmal komplett mit Gegenschwingrahmen simuliert und analysiert. Anschließend wird eine weitere Simulation durchgeführt, bei der der Gegenschwingrahmen aus dem System entfernt wurde. Die Federn, die den Gegenschwingrahmen mit der Tragkonstruktion verbinden, werden entfernt und der Siebkasten mitsamt an diesem angebrachten Federn ist stattdessen mit an die Stahlbaukonstruktion angebunden. Wie den Abbildungen zu entnehmen ist, sind die Tragkonstruktion und der Gegenschwingrahmen parallel zum Fundament montiert und der Siebkasten in einem Winkel von $3,5^\circ$ zum Boden angebracht. Im Realsystem wird die Verbindung zwischen dem Siebkasten und dem Gegenschwingrahmen durch insgesamt acht Feder-Dämpfer-Kombinationen an vier Befestigungspunkten, jeweils am Rahmen und Siebkasten, mit Federsteifigkeiten in vertikaler und horizontaler Richtung realisiert. Um eine Förderung des Siebgutes zu gewährleisten, sind an der Oberseite des Siebkastens zwei synchron laufende Unwuchtmotoren angebracht, deren kombinierte Leistung den Siebkasten in Bewegung versetzt. Diese Bewegung führt zur Schwingung des Siebes. Durch diese gleiche Antriebsfrequenz ohne Phasenverschiebung entsteht eine harmonische Bewegungsform mit der gewünschten Krafrichtung.

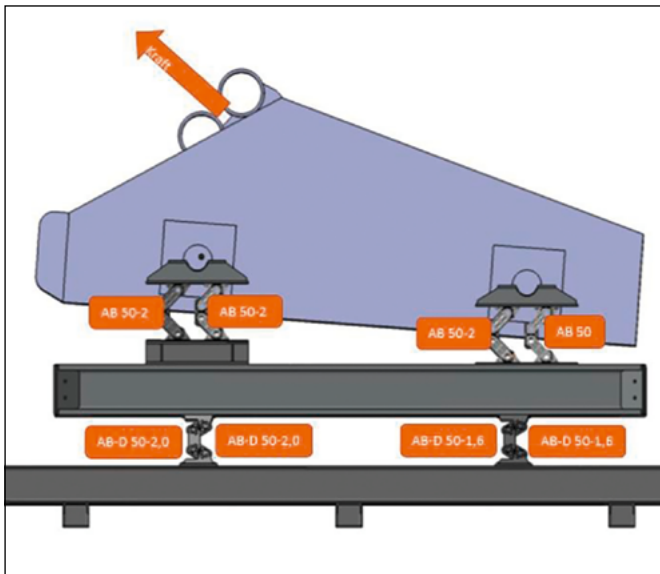


Abbildung 2: Schwingfördersystem mit Kenndaten des Feder-Dämpfer-Systems

Für die Bewertung der Simulationsergebnisse wurde die Last im Punkt 1 bevorzugt betrachtet, da an dieser Stütze konstruktionsbedingt die höchsten Beanspruchungen auftreten. Die Position 0 kennzeichnet den Punkt der Krafteinbringung in die Siebmaschine (Schwingungserreger).

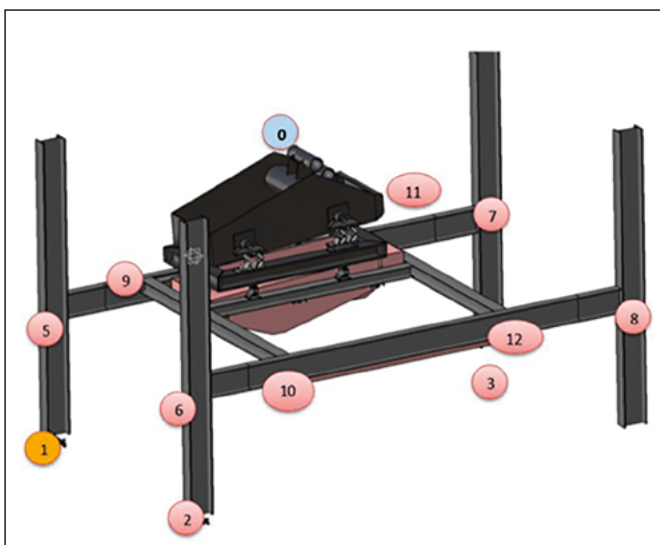


Abbildung 3: Siebmaschine mit Gegenschwingrahmen und den relevanten Messpunkten im Stahlbau

Der Siebkasten der Anlage wiegt 4000 kg; wenn dieser mit einer betriebsüblichen Menge an zu entwässertem Sand gefüllt ist, müssen weitere 1200 kg dazu addiert werden. Diese Gesamtmasse von 5200 kg wird in der Modellierung durch Weglassen des Siebgutes dem Siebkasten zugewiesen. Der direkt darunter angebrachte Gegenschwingrahmen wiegt weitere 3000 kg. Im Modell beträgt das Gesamtgewicht des Siebkastens 5,206 t und das des Rahmens 3,065 t. Für die Simulation werden zwei hintereinander geschaltete Lastfälle verwendet. Der erste Lastfall ist der statische und verläuft über eine

Sekunde. Dieser stellt nur den Einfluss der Lagerungen und der Gravitation auf das System dar und setzt die Anlage in einen statischen Gleichgewichtszustand. Der zweite Lastfall bringt die Unwuchtkraft in das System ein. Dieser Lastfall beschreibt den laufenden Zustand der Anlage mit aktivierten Unwuchtmotoren und lassen einen kurz- und langzeitlichen Effekt des Betriebs der Anlage erkennen. Die Zeitschrittweite der Simulation des Systems wurde anhand einschlägiger Literatur bestimmt und in Anbetracht der Rechenzeit und der maximal erreichbaren Genauigkeit optimiert.

Nach etwa 95 s Simulationszeit haben sich die Kurven eingeschwungen und weisen keine merkliche Abschwächung der Schwingungen mehr vor. Die Amplituden haben sich auf einen konstanten Wert eingeschwungen. Bei allen Überlegungen, die Übertragung der Lagerkräfte auf das Fundament zu minimieren, darf aber die Primärfunktion der Siebanlage nicht beeinträchtigt werden. Der Hauptaufgabenbereich des Systems ist das Siebfördern von Schüttgut, welches durch Mikrowürfe des Substrats erreicht wird. Hierfür wird die Siebplatte durch die Arbeit der Unwuchtmotoren in Schwingungen versetzt, die das Fördergut über kurze Distanzen voran wirft. Zur Analyse der entstehenden Vibrationen werden zwei Knoten des Siebbodens zur genaueren Betrachtung herangezogen.

5 Ergebnisse

Die Anwendung der Trenderkenntnisse auf das Realsystem führte zu der Erstellung des optimierten Systems, dessen Vergleich mit dem Realsystem die bisher gefundenen Optimierungstrends bestätigt. Dies zeigt sich in der nachfolgenden Abbildung, in der der Vergleich der Lagerkraftamplituden der beiden Varianten dargestellt ist. Es zeigt sich eine signifikante Verringerung der dynamischen Lagerkräfte an allen vier Fundamentknoten, das bedeutet eine geringere Lager- und Vibrationsbelastung der Fundamentknoten durch den Betrieb des Systems. Ein Nebeneffekt dieser Optimierung ist leider die Erhöhung der statischen Belastung der Tragstruktur, welche jedoch baulich einfacher zu bewältigen ist.

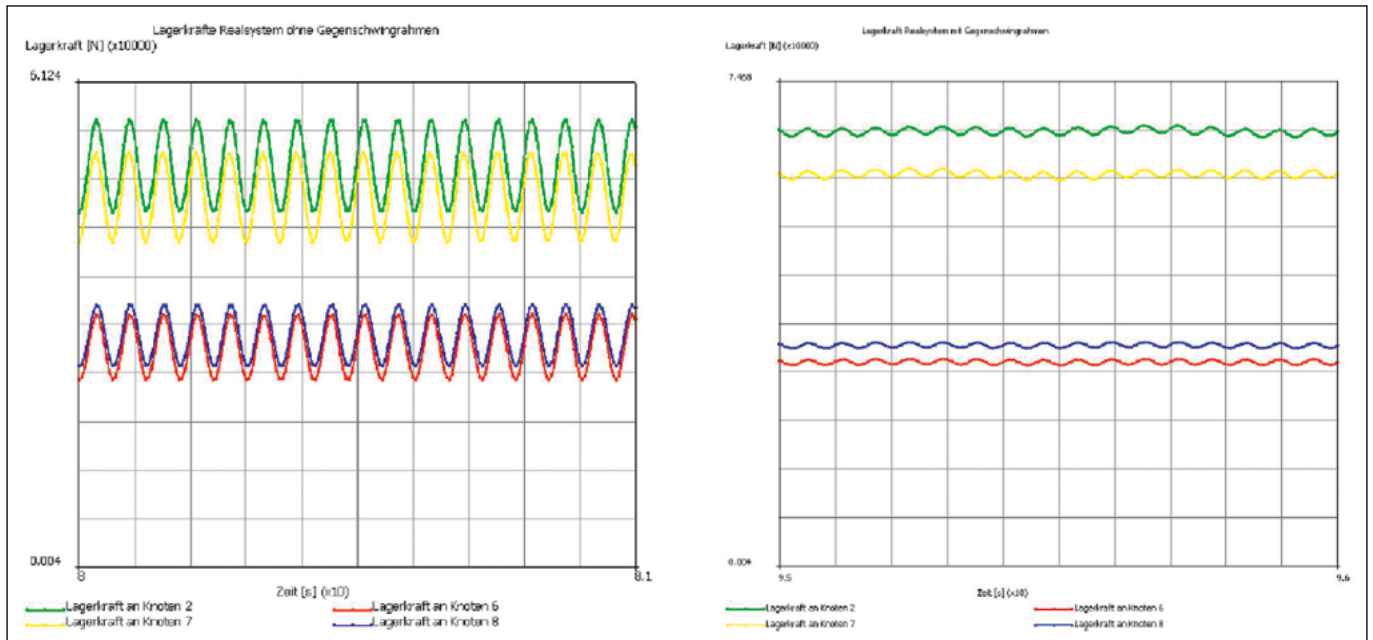


Abbildung 4: Krafteinleitung in das Fundament ohne und mit Gegenschwingrahmen

Die Betriebsfunktion des Siebkastens ist durch die Optimierung auch nicht eingeschränkt worden. Im Gegenteil, wie in Tabelle 1 dargestellt, haben sich die Bewegungsamplituden der Siebkastenbodenknoten leicht erhöht, d. h. die Schwingung wurde sogar durch die Optimierung leicht verstärkt. Die Betriebssicherheit des Systems in Bezug auf Resonanz wurde durch die Optimierung nicht gefährdet.

Die Erregungsfrequenz befindet sich durch die Veränderung der Federsteifigkeit und Masse sogar weiter von den Eigenfrequenzen entfernt als im Realsystem. Als Fazit ist zu erkennen, dass durch die beschriebene Veränderung der Systemparameter die gewollte Optimierung des Systems in Bezug auf dynamische Lagerkräfte ohne negative Beeinflussung der Betriebsfunktion erreicht wurde.

Referenzen:

[1] Beitel Schmidt Michael; Dresig, Hans: Maschinendynamik – Aufgaben und Beispiele. 2. Aufl. Springer Verlag, 2017

Kontakt:



Prof. Dr. Franz Magerl

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

f.magerl@oth-aw.de

Zusammenfassung

Isolierte Versorgungen findet man in nahezu allen modernen elektrischen Leistungsstellern, die zum Betrieb elektrischer Maschinen und Antriebe eine unverzichtbare Komponente geworden sind. Beispiele sind Solarwechselrichter zur Ankopplung von DC-Solarmodulen an das Drehstrom-Energieversorgungsnetz oder Maschinenumrichter zum Betrieb elektrischer Maschinen als drehzahlvariable Positionierantriebe.

Die galvanische Isolation stellt zum einen sicher, dass die in den Leistungsstellern enthaltenen digitalen Komponenten wie Mikroprozessor oder AD-Wandler vor den vergleichsweise hohen Spannungen oder Strömen von mehreren hundert Volt oder Ampere der Leistungsseite geschützt werden. Zum anderen werden für den korrekten Betrieb der Leistungsschalter auf der Leistungsseite zusätzlich kleine Betriebsspannungen benötigt, die während der Schaltvorgänge um mehrere hundert Volt potenzialfrei springen können. Auch hierzu ist eine Isolation unabdingbar.

Die vorliegende Untersuchung vergleicht daher zwei Konzepte, wie eine elektrisch isolierte Hilfsversorgung für IGBT-Gatetreiber mit geringem Aufwand realisiert werden kann. Für messtechnische Zwecke wird ein Konzept entwickelt und realisiert und einer kommerziellen Lösung gegenübergestellt. Anhand der Ergebnisse wird eine Bewertung hinsichtlich des technischen Aufwands, Platzbedarfs und Preises abgegeben.

Abstract

Isolated power supplies can be found in almost all modern electric power controllers, which have become an indispensable component for the operation of electrical machines and drives. Examples are solar inverters for coupling DC solar modules to the three-phase power grid or machine converters for operating electrical machines as speed-variable positioning drives.

On the one hand, the galvanic isolation ensures that the digital components contained in the power controllers, such as a microprocessor or AD converter, are protected from the comparatively high voltages or currents of several hundred volts or amperes on the power side. On the other hand, for the correct operation of the circuit breakers on the power side, additional small operating voltages are required, which can jump several hundred volts potential-free during the switching processes. Isolation is also essential here.

Therefore, the present study compares two concepts of how an electrically insulated auxiliary supply for IGBT gate drives can be implemented with little effort. For measurement purposes, a concept is developed and implemented and compared to a commercial solution. On the basis of the results, an evaluation is made regarding the technical effort, space requirements and price.

1 Einleitung

Viele Leistungsstufen von Wechselrichtern arbeiten heute mit IGBTs als Leistungstransistoren, die in Form einer Gegentaktendstufe gemäß Abbildung 1 aufgebaut sind [1]. Zur Veränderung der Ausgangsspannung U_U werden dabei abwechselnd der obere und untere Transistor eingeschaltet. Durch Veränderung des Tastverhältnisses $D=T_E/T_p$ als Verhältnis aus Einschaltdauer T_E zu Periodendauer T_p kann die Ausgangsspannung U_U in den Grenzen zwischen 0 V und der vergleichsweise hohen Spannung $+U_{DC}$ beliebig und verlustarm variiert werden. Bei Drehstromantrieben werden häufig modifizierte Sinusfunktionen der Spannung zur Realisierung der Raumzeigermodulation verwendet [2].

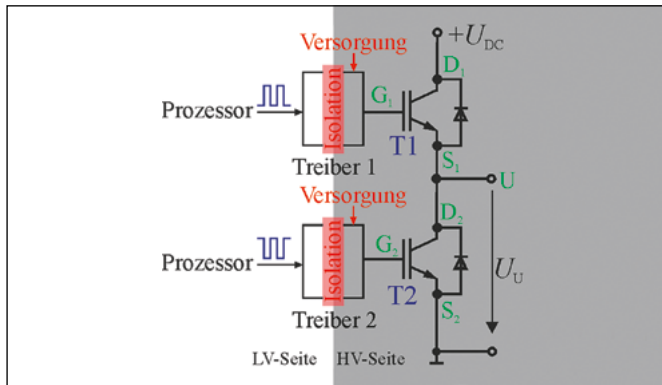


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau einer IGBT Halbbrücke mit Treibern (HV: High Voltage, LV: Low Voltage)

Damit die Transistoren T_1 oder T_2 als Schalter zuverlässig einschalten, muss das Potenzial an den Gate-Anschlüssen G_1 oder G_2 um etwa +15 V höher sein als an den Source-Anschlüssen S_1 oder S_2 . Hierfür müssen die IGBT-Treiber auf der HV-Seite – in Abbildung 1 grau dargestellt – elektrisch isoliert versorgt werden. Bei Endstufen ab einigen Kilowatt aufwärts sind zudem beim Ausschalten die Potentiale an den Gate-Anschlüssen um etwa -8V niedriger als an den Source-Anschlüssen einzustellen, um ein versehentliches Wiedereinschalten sicher zu verhindern [1]. Auch dies müssen die Versorgungen auf der HV-Seite sicherstellen.

Die Isolation erfolgt in der Regel galvanisch. Bei Verwendung einer Bootstrap-Schaltung kann darauf verzichtet werden, jedoch ist die Anwendung auf Leistungssteller kleinerer Leistung beschränkt und wird bei den weiteren Untersuchungen nicht weiter berücksichtigt. Nähere Informationen zu dieser Schaltungsvariante finden sich in der vollständigen Veröffentlichung [18].

Deshalb wird bei größeren IGBT-Modulen wie auch bei dem in dieser Studie verwendeten Leistungsmodul [5] generell eine galvanisch isolierte Hilfsversorgung mit positiver und negativer Spannung gefordert. Im Folgenden werden zwei häufig verwendete Verfahren zur Realisierung galvanisch isolierter Netzteile vorgestellt, von denen eine Variante realisiert und mit einer fertigen Kauflösung verglichen wurde.

2 Versorgungskonzepte

2.1 Gegentaktwandler – Push-Pull Converter

Das von der Firma Infineon in [6] vorgeschlagene, galvanisch isolierte Versorgungskonzept zur sekundärseitigen Versorgung der IGBT-Treiber des verwendeten Leistungsmoduls beruht auf dem Prinzip eines Gegentaktwandlers [7], nähere Informationen finden sich in [18].

Zur Verdeutlichung der Verhältnisse wurde die Schaltung zur Bereitstellung der Versorgungsspannung der Transistortreiber gemäß den Angaben in [6] auf der Sekundärseite nachgebildet und mit der Simulationssoftware ngspice [9] simuliert. Die Schaltung und Spannungsverläufe zeigt Abbildung 2.

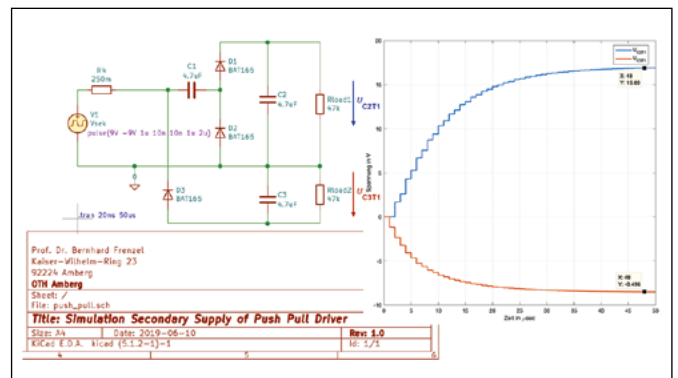


Abbildung 2: Simulation der Spannungsverläufe der Sekundärseite des Gegentaktwandlers beim Einschalten

2.2 Sperrwandler – Flyback Converter

Die Topologie eines Sperrwandlers kann sowohl als galvanisch isolierter Hochsetzsteller als auch als ebenfalls isolierter Tiefsetzsteller verwendet werden, das Prinzip zeigt Abbildung 3 [11]. Mit dem Übersetzungsverhältnis des Speichertransformators lässt sich die Ausgangsspannung erhöhen oder erniedrigen.

Die Energieübertragung von Primärseite auf die Sekundärseite kann in zwei Phasen eingeteilt werden. Während der Leitungsphase ist der primärseitige Schalter geschlossen, während der folgenden Sperrphase ist er geöffnet.

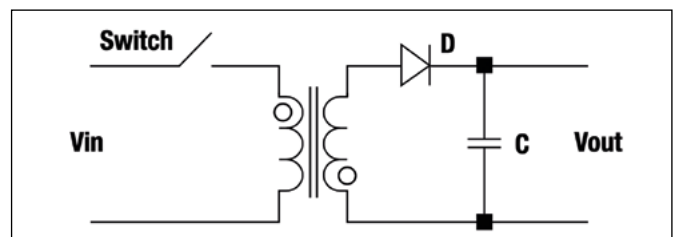


Abbildung 3: Sperrwandlerprinzip als Eintaktwandler

Der Vorteil dieser Schaltung ist die sehr kompakte Bauweise und geringe Komponentenzahl bei gleichzeitiger Erzeugung mehrerer potenzialfreier Ausgangsspannungen.

gen, wenn für den Transformator ein Modell mit mehreren sekundärseitigen Abgriffen verwendet wird. Daher wurde für Untersuchungen in dieser Arbeit eine von TI vorgeschlagene Variante dieses Konzepts aufgebaut und untersucht [12].

3 Schaltungsentwurf

Für die Untersuchungen wurde eine Schaltung nach dem Prinzip des Flyback Converters entwickelt und aufgebaut. Der Schaltungsentwurf orientierte sich an [12] und wurde zum Betrieb mit dem Modellwechselrichter nach [13] angepasst. Zum Test des Versorgungskonzepts unter realen Bedingungen und zum Vergleich mit dem Konzept nach [6] wurde mit dem Modellwechselrichter ein Servomotor [14] unter Verwendung des Realtime Schedulers nach [15] angesteuert. Ein digitales Mockup sowie die vollständig bestückte Platine sind in Abbildung 4 dargestellt.

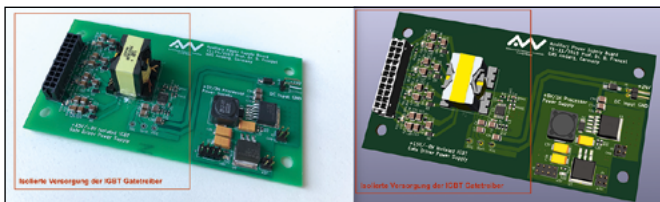


Abbildung 4: Digitales Mockup (rechts) und bestückte Platine (links) des Flyback Converters

4 Messungen

4.1 Abmaße

Die von der Schaltung in Abbildung 4 eingenommene Platinenfläche beträgt etwa 65 mm x 65 mm, die benötigte Schaltungsfläche des zum Vergleich verwendeten Push-Pull-Converters benötigt etwa 120 mm x 80 mm [6]. Dieses Platzersparnis von etwas mehr als 50 % gegenüber dem Push-Pull-Converter erklärt sich zum einen aus der Verwendung nur eines zentralen Transformators. Zum anderen wird die sekundäre Ausgangsschaltung platzsparend nur mit Zenerdioden stabilisiert, beim Push-Pull-Converter jedoch mit Linearreglern samt notwendiger externer Beschaltung.

4.2 Leerlaufspannung und Ausgangsspannung unter Nennlast

Detaillierte Messergebnisse an den entwickelten Schaltungen zu Leerlaufspannung und Ausgangsspannung unter Nennlast sind in [18] dargestellt. Zusätzlich wurden die prozentualen Fehler der sekundären Spannungen zur Versorgung der IGBT-Treiber im Leerlauf und im Nennbetrieb aufgeführt. Abschließend wurden beide Schaltungen zusammen mit dem Leistungsmodul IFS200V12PT4 [5] erfolgreich im Modellwechselrichter nach [13] zum feldorientierten Betrieb eines Siemens-Stellantriebs [14] getestet.

5 Ergebnis

In der Untersuchung konnte bestätigt werden, dass mithilfe des Sperrwandlerprinzips eine galvanisch mehrfach isolierte IGBT-Treiberversorgung preisgünstig und mit geringem Aufwand aufgebaut werden kann. Die Vorteile liegen in der geringen Baugröße, der Einfachheit der Schaltung und der geringen Bauelementezahl. Auch wird nur ein zentraler Transformator zur galvanischen Trennung von Primär- und Sekundärseite benötigt. Der Transformator ist Übertrager und magnetischer Speicher in einem Bauteil, so dass keine weiteren magnetischen Speicher notwendig sind.

Sekundärseitig liefert eine Stabilisierung der Versorgungsspannungen mit Linearreglern keine signifikanten Vorteile gegenüber einer Stabilisierung mit Zener-Diode, deren Schaltung kleiner und preisgünstiger ist. Zudem wirken sich stromabhängige Längsspannungsabfälle am Linearregler sowie die schlechtere Stabilisierung der negativen Versorgungsspannung nachteilig aus. Eine Stabilisierungsschaltung mit Zener-Diode genügt den Anforderungen an eine galvanisch isolierte IGBT-Treiberversorgung und sollte somit bevorzugt werden.

Nachteilig gegenüber dem Gegentaktwandler war beim Sperrwandler, dass ein höherer Ruhestrom aufgenommen wurde. Dies erhöhte die Leistungsaufnahme im Ruhemodus um näherungsweise fast 30 %. Da der Transformator beim Sperrwandler auch zur Zwischenspeicherung der zu übertragenden Energie verwendet werden muss, hat er einen Luftspalt, der zur Erhöhung der Streuverluste führt. Auch ist der Eisenkern häufig höher magnetisch ausgelastet, so dass vermehrt Eisenverluste auftreten. Zudem war der verwendete Transformator in offener Bauform, sodass mehr elektromagnetische Störungen auftraten als beim Gegentaktwandler, bei dem vergossene Impulsübertrager verbaut wurden. Auch ist der primäre Schalttransistor bei einem Sperrwandler stärker belastet als die beiden Schalttransistoren beim Gegentaktwandler, so dass ein früherer Ausfall wahrscheinlicher ist.

Sind niedrige Leistungsaufnahme, lange Lebensdauer und niedrigere EMV-Belastung Optimierungsziele, sollte der Entwurf eines Gegentaktwandlers mit sekundärer Zener-Stabilisierung zur galvanisch isolierten Versorgung von IGBT-Treiberbausteinen bevorzugt werden. Sind hingegen kleiner Bauraum und niedrige Bauteilekosten vorrangig, sollte ein Design nach dem Sperrwandlerprinzip bevorzugt werden.

Danksagung

Besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Jürgen Stich für die Umsetzung der praktischen Aufbauten, die Bestückung der Platinen sowie das Korrekturlesen des Manuskripts.

Referenzen:

Alle online verfügbaren Quellen wurden zuletzt am 22. Februar 2020 und 30. September 2020 abgerufen.

- [1] Specovius, J. (2018) Grundkurs Leistungselektronik (5. Auflage). Springer Vieweg, Wiesbaden
- [2] Quang N.P., Dittrich JA. (2008) Inverter control with space vector modulation. In: Vector Control of Three-Phase AC Machines. Power Systems. Springer, Berlin, Heidelberg
- [3] Khan I. (2011) Gate Drive Circuitry for Power Converters. In: Muhammad H. Rashid (ed) Power Electronics Handbook (Third Edition). Pages 549 – 564, Butterworth-Heinemann, Burlington
- [4] ON SEMICONDUCTOR (2018) Design and Application Guide of Bootstrap Circuit for High-Voltage Gate-Drive IC (Rev. 2). Application Note AN-6076, Phoenix – Firmenschrift. [<https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AN-6076.pdf>]
- [5] INFINEON (2012) MIPAQ serve IFS200V12PT4 (Rev. 2.1). Technical Information, Neubiberg – Firmenschrift. [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IFS200V12PT4-DataSheet-v02_01-%20EN.pdf?fileId=db3a30432a40a650012a461a9c8b2b52]
- [6] INFINEON (2010) MA040E12_EVAL – Isolate Gate Driver Power Supply and Logic Interface for MIPAQ Serve (V1.0). Application Note AN 2010-04, Neubiberg – Firmenschrift. [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-AN2010_04_MA040E12_EVAL-AN-v1.0-en.pdf?fileId=db3a30432a7fedf012a843766342bd1]
- [7] Martis J. (2018) Push–Pull Converter Transformer Maximum Efficiency Optimization. In: Březina T., Jabłoński R. (eds) Mechatronics 2017. MECHATRONICS 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 644. Springer, Cham
- [8] Angelo, E.J. (1958) Electronic Circuits, McGraw-Hill, New York
- [9] Vogt H., Hendrix M., Nenzi P. (2019) ngspice – open source spice simulator: Ngspice Users Manual (Version 31). [<http://ngspice.sourceforge.net/docs/ngspice-31-manual.pdf>]
- [10] Frenzel B., Kurzweil P., Gebhard, F. (2017) Physik Formelsammlung (4. Auflage). Springer Vieweg, Wiesbaden
Conference Proceedings PCIM Power Conversion Intelligent Motion (2012), S. 1639 – 1645
- [11] WÜRTH ELEKTRONIK (2018) Custom Capabilities Catalog 2020. Bobbin Packages, Toroid Headers. Niedernhall – Firmenschrift. [https://www.we-online.com/web/en/index.php/show/media/o6_passive_components_-_custom_magnetics/toolbox/Custom_Capabilities_Catalog.pdf]
- [12] TEXAS INSTRUMENTS (2015) Wide-Input Isolated IGBT Gate-Drive Fly-Buck Power Supply for Three-Phase Inverters. Application Note TIDU670A, Dallas – Firmenschrift. [<http://www.ti.com/lit/ug/tidu670a/tidu670a.pdf>]
- [13] Frenzel, B. (2019) Untersuchung zum System on Chip (SoC) – Ansatz für digitale Wechselrichter. Forschungsbericht der OTH Amberg-Weiden, Seiten 142 – 148, Amberg. [https://www.oth-aw.de/files/oth-aw/Aktuelles/Veroeffentlichungen/Forschungsbericht/OTH_Amberg_Weiden_FB_2019_Internet.pdf]
- [14] SIEMENS, Datenblatt Simotics S Synchronservomotor 1FK7100-5AF71-1TGo, Erlangen – Firmenschrift. [<https://mall.industry.siemens.com/mall/Document/GetDocumentBasedOnCode?code=aHR-ochHM6Ly9tYWxsLmluZHVzdHJ5LnNpZWl1bnMuY29tL3NwaWNlL2RvY3VzZXJ2aWNlL2RvY3V- zZXJ2aWNlP2NvbWZpZ2lkPTEoJmRvY3UubWxmYjoxRks3MTAwLTVBRjcxcLTFURzAmZG9jd-S5pbmlodHlwZT1NTEZCJmRvY3UuZ2VuZXJhdGlvbnR5cGU9VklFVyZkb2N1LnZpZXdpZD1QREYmcmVnaW9u-PURFJmXhbmdd1YWdlPWRIJmRvY3UubGFuZ3VhZ2UubG9jYXVzZS2kb2N1LmXhbmdd1YWdlLmXvY2FsZTI9ZW4=>]
- [15] Frenzel, B. (2015) Untersuchung zum Einsatz von ARM Cortex-M Prozessorkernen in voll digitalisierten Wechselrichtern. Forschungsbericht der OTH Amberg-Weiden, Seiten 14 – 23, Amberg. [<https://www.oth-aw.de/files/oth-aw/Aktuelles/Veroeffentlichungen/Forschungsbericht/Forschungsbericht-2015.pdf>]
- [16] TEXAS INSTRUMENTS (2018) LM5160-Q1 WideInput 65-V 2-A Synchronous Buck Fly-Buck DC/DC Converter. Datasheet SNVSAE4C, Dallas – Firmenschrift. [<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm5160-q1.pdf>]
- [17] TEXAS INSTRUMENTS (2017) LP295x-N Series of Adjustable Micropower Voltage Regulators. Datasheet SNVS764Q, Dallas – Firmenschrift. [<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lp2951-n.pdf>]
- [18] Frenzel B. (2020) Untersuchungen zu isolierten Versorgungen in IGBT Treiberstufen, OTH Amberg-Weiden, Amberg (vollständige Veröffentlichung) https://www.oth-aw.de/files/oth-aw/Professoren/Frenzel/Veroeffentlichungen/20200222_Untersuchungen_zu_isolierten_Versorgungen_in_IGBT_Treiberstufen.pdf

Kontakt:



Prof. Dr.-Ing. Bernhard Frenzel

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

b.frenzel@oth-aw.de

Chlor-Plattform – Verwertung von Chlorabfällen und Recycling kritischer Metalle

Zusammenfassung

Chlorhaltige Kunststoffabfälle, die vor allem Polyvinylchlorid (PVC) enthalten, werden hauptsächlich thermisch verwertet. Hierbei muss das erzeugte Hydrogenchlorid (HCl) aus dem Verbrennungsgas durch Neutralisation entfernt und die dabei entstehenden Salze entsorgt werden. Durch die Verwertung von verschiedenen chlorhaltigen Kunststoffabfällen ist es möglich, eine ökonomische und ökologische Rückgewinnung von „Kritischen Metallen“ mit einer innovativen technischen Lösung im Projekt „Chlor-Plattform“ darzustellen. Verschiedene chlorhaltige Kunststoffabfälle werden hierzu thermo-chemisch behandelt. Dabei entsteht im ersten Schritt ein HCl-reiches Gas. Im zweiten Schritt wird dieses durch einen weiteren Reaktor geleitet, welcher einen Stoffstrom mit kritischen Metallen enthält. Hier werden Metallchloride erzeugt und verdampfen. In einer nachgeschalteten Kühlereinheit kondensieren diese aus und bilden ein Metallkonzentrat, aus dem durch nachgeschaltete Prozessschritte die kritischen Metalle zurückgewonnen werden können. Verschiedene PVC-haltige Abfallströme, wie Schredderückstände aus der Elektro- und Elektronikaltgeräteaufarbeitung, Fußböden und Fensterprofile aus PVC wurden thermo-chemisch bei unterschiedlichen Temperaturen behandelt, um ein HCl reiches Gas zu erzeugen. Dieses wurde in einen zweiten Reaktor geleitet, der mit LCD-Panels gefüllt war. Das Indium in Form von Indium-Zinn-Oxid reagierte zu Indiumchlorid und bildete nach der Kühlereinheit das metallreiche Konzentrat. Bis zu 53% des in den LCD-Panels vorliegenden Indiums wurden in Produktfraktionen Kühlereinheit und Metallkonzentrat nachgewiesen. Durch weitere Extraktionsschritte und das Entfernen von Lösungsmitteln könnte das Indium durch Elektrolyse zurückgewonnen werden. Schlussendlich zeigen die Versuche, dass ein höherer Chlorgehalt und eine höhere Pyrolysetemperatur bei den PVC enthaltenden Abfällen zu einer höheren Rückgewinnungsrate von Indium führen.

Abstract

Chlorine containing plastic waste fractions, especially those containing polyvinylchloride (PVC) are mainly incinerated. The formed hydrogen chloride (HCl) has to be removed from the vapour by neutralization, resulting in a salt which needs to be disposed of. Such PVC-containing waste is used in the project “Chlor-Plattform” to recover critical metals from other waste streams, where recycling routes exist only for valuable metals like platinum group metals. With the presented technique, an economic and ecologic recycling of critical metals should be possible. In a first step, PVC-containing plastic waste is thermo-chemically treated in a first reactor to form vapour, rich in HCl. In a second step, this vapour passes a second reactor, which is filled with critical metal containing material. Under these circumstances, metal chlorides are formed and evaporate. In a following condenser, the metal chlorides are condensed and a metal-rich concentrate is generated, where the metal can be recovered with further processing steps. Different wastes like shredder residues of electrical- and electronic equipment, floorings and window-profiles were thermo-chemically treated by different temperatures to generate HCl-rich gas. The Indium in form of indium-tin-oxide in LCD-panels reacts to indium chloride, generating a metal-rich concentrate downstream. Up to 53 % of the containing indium was found in the product fractions, cooling units and metal concentrate. With further extraction-steps and removing of solvents, the indium can be recovered by electrolysis. In summary a higher chlorine content and a higher pyrolysis temperature of the PVC-containing waste results in a higher recovery of indium.

1 Einleitung

Die EU veröffentlichte 2017 eine Liste mit 27 Rohstoffen, wie Indium, Germanium oder Metalle der seltenen Erden, die als versorgungskritisch eingestuft wurden. Bei diesen Rohstoffen existiert ein höheres Risiko gegenüber anderen Rohstoffen hinsichtlich eines Versorgungsengpasses und dessen Folgen für die Wirtschaft (Europäische Kommission 2017). Um diese kritischen Metalle aus Abfallströmen zurückzugewinnen, wurden bisher verschiedene Prozesse, meist hydrometallurgische Verfahren, angewendet. Am Beispiel der Rückgewinnung von Indium zeigten Vostal et al. 2017 auf, dass die von ihnen vorgestellten Verfahren unwirtschaftlich sind, da die Kosten der benötigten Chemikalien höher sind als mögliche Erlöse aus dem Verkauf des Indiums bzw. Indiumkonzentrats (Vostal et al. 2017). Mangels wirtschaftlichem Interesse werden daher viele kritische Metalle wie Indium in LCD-Panels in gängigen Recyclingprozessen nicht wiedergewonnen, sodass sie dem Wirtschaftskreislauf irreversibel verloren gehen. Gleichzeitig betrug die Menge der Polyvinylchlorid-(PVC-)Abfälle 687.000 Mg im Jahr 2017, wobei 62 % davon energetisch verwertet wurden (Conversio 2018). Bei dieser Verwertung entstehen, selbst bei Abfällen mit geringen Chloranteilen, hohe Entsorgungskosten infolge einer aufwändigen Abgasreinigung und Schäden durch Korrosion. Eine weitere Möglichkeit neben einem werkstofflichen Recycling für vergleichsweise reine PVC-Abfälle oder der energetischen Verwertung ist die rohstoffliche Verwertung und Wiederverwendung von Hydrogenchlorid (HCl). Das Ziel des Projekts „Chlor-Plattform“ ist es, für viele Hightech-Metalle erstmalig eine ökonomische und ökologisch vorteilhafte Rückgewinnung durch eine neue technische Lösung zu ermöglichen. Hierbei wurden als Hightech-Metalle versorgungskritische Metalle sowie

zusätzlich Titandioxid (TiO_2) definiert. Die thermo-chemische Konversion von PVC-Abfällen ermöglicht die Herstellung von HCl, welches für die Chlorierung der Metalle genutzt wird. Diese Idee wurde erfolgreich im Labormaßstab demonstriert. Dabei wurde das HCl, welches durch die thermo-chemische Konversion von reinem PVC entstand, zur Rückgewinnung von Indium aus LCD-Panels genutzt (Park et al. 2009). Die Isolation der chlorierten Metalle ist unter wesentlich milderem Bedingungen als bei den elementaren Metallen und Oxiden möglich. Durch die Kombination der rohstofflichen Verwertung von PVC-Abfällen und der Rückgewinnung von kritischen Metallen könnte die Effizienz beider Prozesse deutlich erhöht werden. Dies zu verifizieren ist Gegenstand des Projektes „Chlor-Plattform“.

2 Lösungsansatz zur Verwertung von chlorhaltigen Kunststoffabfällen und Rückgewinnung von kritischen Metallen

Mittels Pyrolyse der PVC-Abfälle und der Nutzung des halogenhaltigen Dampfes zur Chlorierung der kritischen Metalle in einem nachgeschalteten Reaktor wird ein metallreiches Kondensat gebildet, aus dem die kritischen Metalle zurückgewonnen werden. Hierbei wurden beispielsweise PVC-Fensterprofile thermo-chemisch behandelt, um Indium aus LCD-Panels zurückzugewinnen. Durch anschließende Extraktionsschritte und das Eindampfen des Lösungsmittels wurde eine indiumreiche Lösung erzeugt, die über eine Elektrolyse schließlich die Rückgewinnung von elementarem Indium ermöglichte. Die chlorarmen Fraktionen und die von kritischen Metallen befreiten Fraktionen können dem Wirtschaftskreislauf wieder zur Verfügung gestellt werden. Dieser Ansatz ist in der Abbildung 1 schematisch stark vereinfacht dargestellt.

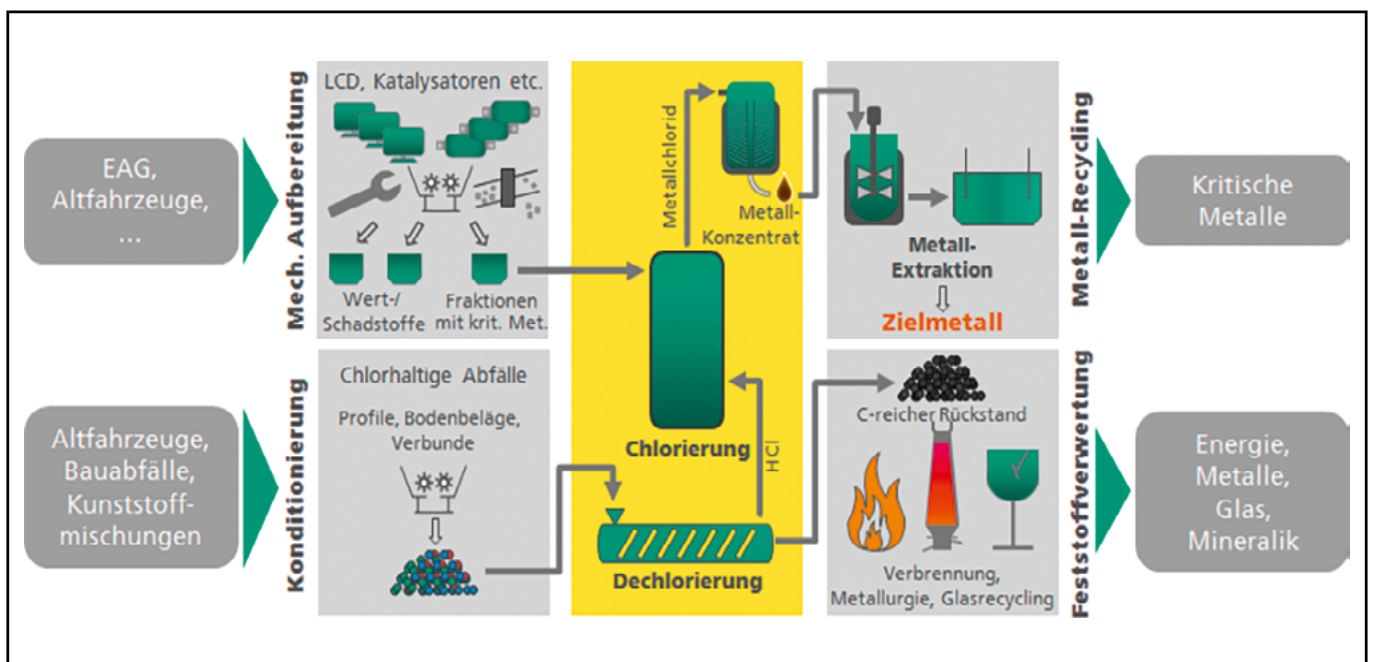


Abbildung 1: Lösungsansatz zur Verwertung von chlorhaltigen Kunststoffabfällen und Recycling kritischer Metalle.

3 Rückgewinnung von Indium aus LCD-Panels durch den Einsatz verschiedener chlorhaltiger Kunststoffabfälle

Für die Rückgewinnung von Indium aus LCD-Panels wurden zunächst drei verschiedene chlorhaltige Kunststoffabfälle zur Herstellung von HCl-haltigem Pyrolysedampf verwendet: Schredderrückstände aus der Aufbereitung von Elektro-/Elektronikaltgeräten (kurz „SR EAG“), Fußböden und PVC-Fensterprofile. Diese wurden in einer Schneidmühle auf $\lt; 10\text{ mm}$ Korngröße zerkleinert. Der Feinanteil $\lt; 1\text{ mm}$ wurde abgesiebt und nicht weiter behandelt. Das zerkleinerte Material wurde in sechs Chargen zu je 125 g in einem semikontinuierlichen Batch-Reaktor pyrolysiert. Hierbei wurden die Materialien bei zwei unterschiedlichen Temperaturen über 600 °C und über 300°C behandelt. Nach 30 min wurde der feste Rückstand aus dem Pyrolysereaktor in den Koksbehälter entleert, bevor eine neue Charge eingefüllt wurde. Der HCl-haltige Dampf wurde dabei zuerst über einen sogenannten Teer-cracker geleitet, um länger-kettige Verbindungen zu spalten und im Anschluss in den Kühlern zu kondensieren. Danach wird der HCl-haltige Dampf in einen sogenannten Halogenierungsreaktor geleitet, der mit ca. 2.100 g LCD-Panels gefüllt war und bei über 600 °C betrieben wurde. Das in Form von Indium-Zinn-Oxid vorliegende Indium reagiert unter diesen Bedingungen zu Indiumchlorid, welches aufgrund seines vergleichsweise geringen Siedepunkts verdampfen konnte. In einer nachgeschalteten Kühleinheit kondensierte das Metallkonzentrat aus. Überschüssiges HCl wird anschließend in destilliertem Wasser gelöst. Weitere Bestandteile wie HCN aus dem Dampf werden in zwei mit Natronlauge gefüllten Waschflaschen neutralisiert.

Mittransportierte Aerosole werden durch eine Waschflasche mit Watte entfernt, bevor der Dampf durch einen Aktivkohlefilter geleitet wird. Eine Anordnung des dazugehörigen Versuchsaufbaus ist in Abbildung 2 dargestellt. Da das kondensierte flüssige Metallkonzentrat noch stark mit organischen Bestandteilen aus der Zersetzung der Folien aus den LCD-Panels verunreinigt war, wurde das Indiumchlorid durch Mischen mit Wasser und einem organischen Lösungsmittel größtenteils in eine kohlenstoffarme, flüssige Phase überführt. Nach dem Verdampfen des Lösungsmittels kann das Indium aus der Lösung mittels Elektrolyse abgeschieden werden. Die von Indium sowie Organik befreiten LCD-Panels könnten für die Herstellung von neuen LCD-Panels verwendet werden. Das abgedampfte Lösungsmittel kann aufgereinigt und wiederverwendet werden. Die Proben wurden mittels energiedisperser Röntgenfluoreszenz (RFA) mit dem Röntgenspektrometer Epsilon 3XLE (PANalytical, Kassel) vermessen, das eine Analyse der Elemente Natrium bis Americium erlaubt. Die Auswertung der Daten wurde mit der Epsilon Benchtop Software desselben Herstellers durchgeführt.

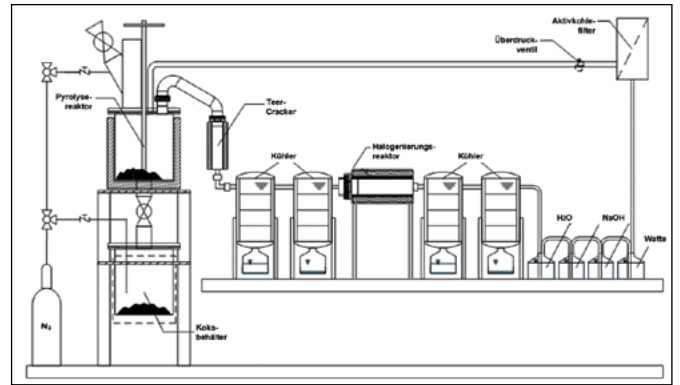


Abbildung 2: Anordnung des Versuchsaufbaus zur Verwertung von chlorhaltigen Kunststoffabfällen und Rückgewinnung von Indium aus LCD-Panels.

Tabelle 1: Ausbeute an Indium bei den unterschiedlichen Einsatzmaterialien und Pyrolysetemperaturen.

Chlorhaltige Abfälle	Pyrolysetemperatur	Indium im Metallkonzentrat
PVC-Fensterprofile	über 300 °C	47 %
PVC-Fensterprofile	über 600 °C	53 %
Fußboden	über 300 °C	36 %
Fußboden	über 600 °C	47 %
SR EAG	über 600 °C	30 %

4 Zusammenfassung und Ausblick

Folgende Schlussfolgerungen lassen die Versuche zur Rückgewinnung von Indiumchlorid aus LCD-Panels zu: Eine höhere Pyrolysetemperatur führt zu einer gesteigerten Rückgewinnungsrate von Indium aus den LCD-Panels. Dies könnte aufgrund des gleichen Kühlsystems und -mediums an einer höheren Temperatur des Pyrolysegases am Eintritt des Halogenierungsreaktors liegen und führt somit zu einer erhöhten Reaktivität des HCl. Durch einen anschließenden Extraktions- und Verdampfungsschritt kann das Indium aus dem Metallkonzentrat in eine Elektrolytlösung überführt werden, aus der eine Rückgewinnung des Metalls möglich ist. Durch den Einsatz weiterer chlorhaltiger Kunststoffabfälle wie Sortierresten oder Schredderleichtfraktionen können weitere potenziell nutzbare Abfallströme getestet werden. Ebenfalls werden weitere Abfälle mit anderen Hightech-Metallen wie Solarmodule genutzt, um diese mit diesem erfolversprechenden Ansatz zurückzugewinnen. Der skizzierte Ansatz ist vielversprechend, eine Kreislaufführung weiterer Hightech-Metalle und deren Abfallströme darzustellen.

Referenzen:

- [1] Europäische Kommission, 490 final, (2017, Sept. 13). Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der über die Liste kritischer Rohstoffe für die EU 2017. [Online]. Verfügbar: <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2017/DE/COM-2017-490-F1-DE-MAIN-PART-1.PDF>
- [2] R. Vostal, U. Singliar und P. Fröhlich. (2017, Jan. 16). Gewinnung von Indium aus extrem verdünnten Lösungen. Chemie Ingenieur Technik. [Online] S. 135 – 143. Verfügbar: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cite.201600117>
- [3] Conversio Market & Strategy GmbH (2018, Okt. 25): Analyse der PVC-Produktion, Verarbeitungs-, Abfall- und Verwertungsströme in Deutschland 2017. [Online] Verfügbar: https://newsroom.kunststoffverpackungen.de/wp-content/uploads/2018/10/PVC_Analyse_D_2017_Kurzfassung.pdf
- [4] K. S. Park, W. Sato, G. Grause, T. Kameda, T. Yoshioka (2009, März 19). Recovery of indium from In_2O_3 and liquid crystal display powder via a chloride volatilization process using polyvinyl chloride. Thermochemica Acta. [Online] S. 105 – 108. Verfügbar: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040603109001324>

Projektpartner:

Universität Regensburg, Regensburg
Fraunhofer UMSICHT Institutsteil Sulzbach-Rosenberg, Sulzbach-Rosenberg
SKH GmbH, Ortenburg

Fördergeber:

Die Autoren bedanken sich beim Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz für die Finanzierung des Projektes „Chlor-Plattform“ im Rahmen des Projektverbunds “ForCYCLE II”.



finanziert durch
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz



Kontakt:



Michael Peer, M.Sc.

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

m.peer@oth-aw.de



Prof. Dr.-Ing. Burkhard Berninger

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

b.berninger@oth-aw.de



Prof. Dr. Werner Kunz

Universität Regensburg
Institut für Physikalische und
Theoretische Chemie
Universitätsstraße 31
93053 Regensburg

werner.kunz@chemie.uni-regensburg.de

Johannes Turnwald, B.Sc.¹
Michael Gubitz, M.Eng.¹
Larissa Blümlein, M.Sc.¹
Finya Ketelsen, M.Sc.²
Sebastian Kuschowitz, B.Sc.²
Dr. rer. nat. Jakob Kreutner²
Dipl.-Ing. (FH) Gregor Schaefers²
Prof. Dr. Ralf Ringle¹

1) Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, Weiden
2) MR:comp GmbH, Gelsenkirchen

Entwicklung und Konzeption einer 3D-Druck-Sonden- halterung und eines hoch- präzisen 3D-Prüfstands zur Messung von HF-Feldern und Temperatur- Verteilungen

Zusammenfassung

Im Rahmen einer Prüfmethodeentwicklung von aktiven Implantaten nach ISO/TS 10974 Clause 8 [1] wurde ein hochpräziser 3D-Prüfstand entwickelt. Dieser dient der Messung von HF-Feldern und Temperatur-Verteilungen in der Umgebung von Elektroden aktiver Implantate. Hierzu befindet sich die jeweilige Elektrode in einem mit Saline (NaCl-Lösung) oder Hydroxyethyl Cellulose Gel (HEC Gel) gefüllten Zylinderphantom, welches innerhalb einer Spule eines Magnetresonanztomografen (MRT) platziert wird. Durch die eingebrachte Elektrode wird das von der Spule angelegte HF-Feld gestört und führt u.a. zur Erwärmung der Elektrode und des umliegenden Gewebes. Im Phantom wird hierbei die gewebeäquivalente Füllung erwärmt. Zur Messung des veränderten HF-Felds bzw. zur Bestimmung der Erwärmung im Phantom werden mittels des 3D-Prüfstandes mit verschiedenen Messsonden Messfahrten entlang der Elektroden durchgeführt. Hierfür ist die Präzision von 0,2 mm für die Messwerte mit einer Toleranz von 35 µm des 3D-Prüfstands essenziell, um eine exakte HF- und Temperaturverteilung zu erhalten. Der 3D-Prüfstand besteht aus einem robusten Aluminium-Profilgestell, einer Stahlzwischenplatte und einem Verschiebesystem mit vier Linearachsen. Die Ansteuerung der kugelumlaufspindel-getriebenen Linearschlitten, welche mit Closed-Loop-Schrittmotoren ausgestattet sind, erfolgt über Motordriver. Die für die Schrittmotoren verwendeten Treiber können über Pulse Input oder Modbus-RTU-Kommunikation mittels LabVIEW oder einem Arduino mit eigener C-Software angesteuert werden. Die Messsonden werden durch eigens entwickelte und im 3D-Druckverfahren hergestellte Sondenhalterungen in das System eingebunden. Bei der Konstruktion und Auswahl des 3D-Druckmaterials wurde darauf geachtet, dass das HF-Feld möglichst wenig beeinflusst wird und eine reproduzierbare Sondenpositionierung gewährleistet werden kann. Ein weiterer wichtiger Punkt für den Anwender ist die einfache Handhabung sowie ein schneller Sondentausch, der bei der Konstruktion und dem 3D-Druck der Sonden berücksichtigt wurde.

Abstract

A 3D high-precision testing device was developed in the project "Testing procedures of active medical implants" which adheres to the guidelines of ISO/TS 10974 Clause 8 [1]. With the test bench the RF field and the temperature distribution around the lead of an active medical implant can be measured. In the testing process the lead is fixed in the phantom. The cylindrical phantom is filled with saline or HEC and it's placed in the coil of an MRI Scanner. The lead and the human tissue gets warmer because the lead interferes with the RF field of the coil. To measure the RF field and the temperature of the phantom a 3D high-precision testing device was developed. By testing, the probe drives along the lead. To get the exact RF- and temperature distribution the test bench must have an accuracy of 0.2 mm with a tolerance of 35 µm. The 3D testing device includes an aluminium frame, a steel plate and a movement system with high precision linear slides. The motorized slides have a ball screw, linear guidance systems and closed loop stepper motors. The motor drivers can be programmed with pulse input or Modbus RTU. For this use case a C program with a microcontroller or a LabVIEW program with an RS 485 communication port by the pc is required. The RF field sensors are integrated in the testing device by 3D-printed probe holders. The design of the probe holders is specialized for the 3D printing process and the exact position in the probe. A material with a low RF interference was chosen for better testing results. An important component is the easy and fast way to change the sensors. All of these features can be implemented by using additive manufacturing.

1 Einleitung

Die immer innovativer werdende medizinische Versorgung und der demografische Wandel treiben die Zahl an MR-Untersuchungen von Patienten mit aktiven Implantaten (z. B. Herzschrittmacher) in die Höhe. Seit 2011 existieren aktive Medizinprodukte, welche als bedingt MR-sicher eingestuft wurden. Damit die aktiven Implantate eine Kennzeichnung als bedingt MR-sicher erhalten können, ist eine Vielzahl von vorgeschriebenen Prüfungen für die Zulassung des Produkts notwendig. Die wesentliche Wechselwirkung bei der MRT-Untersuchung mit dem aktiven Implantat ist die Erwärmung des Gewebes um das Implantat. Diese kann sowohl durch das geschaltete Gradientenfeld (dB/dt) als auch durch die applizierten HF-Pulse (Hochfrequenzpulse) erzeugt werden. Der hier vorgestellte Prüfstand dient speziell der Untersuchung der Erwärmung, welche durch HF-Pulse erzeugt werden. Eine Vielzahl von Prüfdienstleistern beschäftigen sich mit der Prüfung von aktiven Implantaten. Meist jedoch stößt die Messung von aktiven Implantaten schnell an ihre Grenzen. Wenn Implantate längere Elektroden (Leads) aufweisen, gestaltet sich der Messprozess besonders schwierig. So werden in der ISO/TS 10974 Clause 8 Methoden beschrieben, mit denen entsprechende Implantate getestet werden können. Ziel ist es daher, eine zukunftsorientierte Prüfmethode inklusive sämtlicher Hardwareaufbauten zu entwickeln, um nicht nur aktive Implantate mit relativ kurzen, sondern auch mit längeren Elektrodenkabeln prüfen zu können. Im Rahmen des Projekts wurde ein hochpräziser Prüfstand entwickelt, welcher eine Detektion HF-Feld induzierter thermischer Erwärmung von Elektrodenkabeln mit einer Länge größer 12 cm ermöglicht. Darüber hinaus ist es möglich, die Veränderung des HF-Feldes durch das eingebrachte Lead mittels einer E-Feld-Sonde zu bestimmen. Mit den gemessenen Daten kann die Übertragungsfunktion ermittelt werden. Aus dieser Funktion lässt sich die zu erwartende Erwärmung des Leads ebenfalls bestimmen.

2 Ausgangssituation

Zur Erzeugung eines globalen HF-Feldes eines MR-Tomografen wird eine sogenannte "Birdcage-Spule" verwendet. Die Birdcage dient der radiofrequenz-Anregung der Spins. Bis heute sind 1.5T MRTs gängiger Standard. Aus diesem Grund wird hierzu eine 64 MHz Spule (entspricht dem 1.5T MRT) verwendet. Für den Testaufbau wird die verwendete Birdcage so positioniert, dass der Spulenöffnungsvektor senkrecht zum Untergrund verläuft. Innerhalb dieser Spule wird ein Phantom platziert, welches mit der zu prüfenden Implantatelektrode bestückt wird (Abbildung 1). Das Phantom besteht aus einer zylindrischen Schale aus PMMA (Polymethylmethacrylat), welche primär mit einer NaCl-Lösung befüllt wird. Durch die Füllung mit einer NaCl-Lösung wird das menschliche

Gewebe simuliert. Des Weiteren kann ein spezielles Gel (HEC GEL) verwendet werden, welches eine reduzierte Konvektionseigenschaft besitzt. Die Elektroden werden entlang von Trajektorien platziert, welche durch eine vorausgehende virtuelle Simulation ermittelt wurden. Es werden dann die Trajektorien ausgewählt, die eine erhöhte Erwärmung der Elektrodenenden vermuten lassen. Mittels verschieden geeigneter Sonden wird die Erwärmung sowie das HF-Feld gemessen. Diese Sonden werden über den 3D-Prüfstand entlang der Elektroden verfahren, so dass die sensitiven Volumina der Sonden mit einer hohen Präzision relativ zur Elektrode ausgerichtet werden können. Da das Feld jedoch innerhalb des Phantoms mit einem Abstand von 5 – 10 mm zum Testobjekt rapide abfällt ist es wichtig möglichst nahe am Objekt zu messen, um ein aussagekräftiges Messergebnis aus der Prüfung zu erhalten. Aus diesem Grund ist eine hochpräzise Positionierung der Sonde als auch der Elektrode notwendig. Neben den erhöhten Anforderungen an die Positionierungsgenauigkeit bei der Messung, muss auch bei der Materialauswahl der Komponenten die HF-Kompatibilität der Materialien geachtet werden, um mögliche Wechselwirkungen ausschließen zu können. Eine starke Wechselwirkung der Komponenten könnte die Feldverteilung übermäßig verzerren und Messungen verfälschen. Im Folgenden wurden Komponenten innerhalb der Spule ausschließlich aus Kunststoffen gewählt, welche sich im Vorfeld als HF-kompatibel herausgestellt haben. Hierzu zählen unter anderem PMMA (Polymethylmethacrylat), PLA (Polylactide) und ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere).

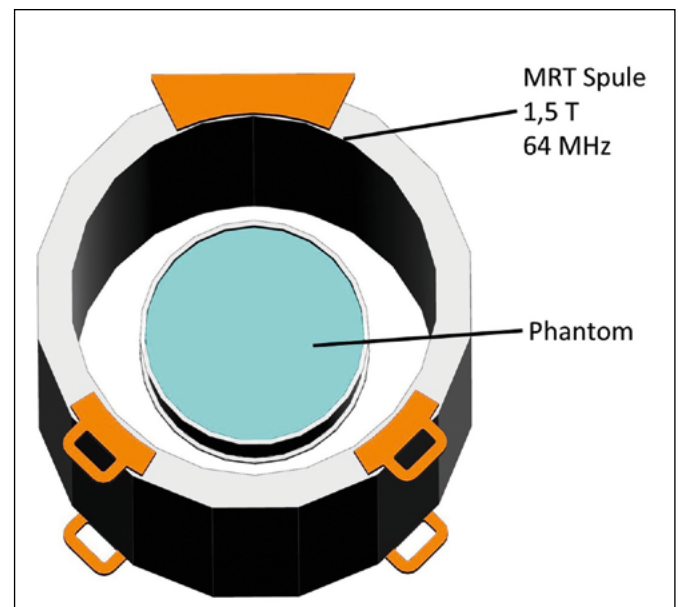


Abbildung 1: Birdcage-Spule mit Phantom

3 3D-Prüfstand

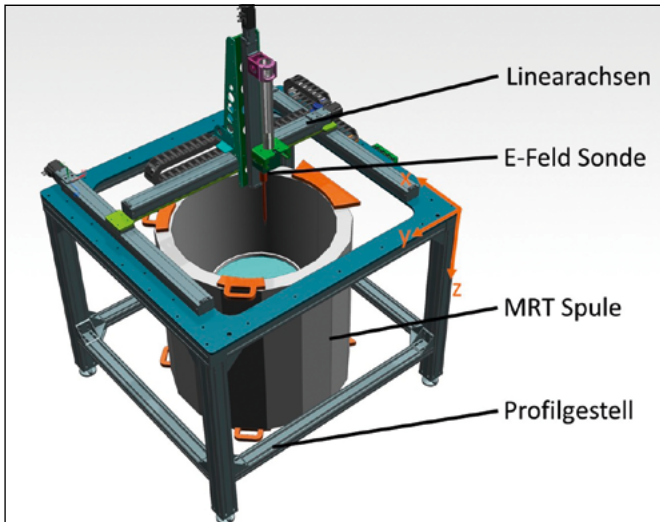


Abbildung 2: 3D-Prüfstand für Präzisionsmessungen

Der 3D-Prüfstand besteht aus einem eigens entwickeltem Raumportal, welches auf einem Profilgestell aus eloxiertem Aluminium und einer Stahlzwischenplatte montiert wird (Abbildung 2). Die Stahlplatte hat den Zweck Unebenheiten des Profilgerüsts auszugleichen und die seismische Masse des Aufbaus zu erhöhen. Zudem ermöglicht diese eine präzisere Montage der Linearachsen. Ausgleichsbleche im Bereich von 0,01 mm können gleichfalls einfacher eingelegt und befestigt werden. Neben der Grundgenauigkeit des 3D-Prüfstands erhöht sich durch die Stahlplatte auch die Gesamtsteifigkeit, welche bei bewegten Massen und dynamischen Messfahrten besonders wichtig ist. Aus demselben Grund wurden Profile mit einer Breite von 40 x 80 mm und 80 x 80 mm gewählt. Für die Linearbewegung wurden Linearschlitten der Firma Oriental Motor (Typ EZSM6Eo8oAZAK und EZSM3Eo6oAZMK) gewählt, da diese eine relativ hohe Wiederholgenauigkeit von $\pm 0,02$ mm bieten. Zudem wird eine Profilunebenheit von 0,03 mm der Linearachsen garantiert. Entlang der y-Achse finden zwei Linearachsen Anwendung, die parallel und synchron betrieben werden müssen, um einen möglichen Schubladeneffekt zu verhindern. Der x- und z-Achsenantrieb besteht aus jeweils einer Lineareinheit, wobei die z-Achse zusätzlich mit einer Motorbremse ausgestattet ist, um die Last von ca. 2,5 kg der Sondenhalterung incl. Sonde im unbestromten Zustand gewährleisten zu können und um die Gewichtskraft der Sondenbauteile zu kompensieren. Dies ist wichtig, da eine Kugelumlaufspindel besonders leichtgängig ist und somit keine Selbsthemmung vorliegt. Die fehlende Selbsthemmung würde zu einem Verschieben der Last aufgrund der Gewichtskraft führen. Alle Antriebe bestehen aus einer Kugelumlaufspindel mit einer Spindelsteigung von 6 mm, einer Linearführung und einem Closed-Loop-Schrittmotor. Der Closed-Loop-Schrittmotor verfügt in Verbindung mit den zugehörigen Motortreibern über ein Encoder-Feedback, wodurch eine automatische Positionsrückmeldung und -kontrolle vorhanden ist. Durch den Absolut-Encoder

ist die Position der Achse immer bekannt. Zudem gelten diese im Allgemeinen als laufruhiger, resonanzärmer und minimieren Einschwing- und Ausschwingzeiten. Wichtig hierbei ist zu erwähnen, dass diese Motoren sich im Betrieb sehr wenig erwärmen, was bei den Prüfungen von Vorteil ist. Die Anbindung der Sonden an das Portal erfolgt über eine Kunststoffverbindung (Abbildung 3 und 6) und einer modular aufgebauten Sondenhalterung (Abbildung 4 und 5). Die großzügige Wahl des Hubwegs ermöglicht eine Ansteuerung aller zugänglichen Messpunkte im Phantom und dient dem Erfassen des Feldes der ganzen X-Y Ebene in der MR-Spule. Durch Energieketten wird eine Belastung von Steuerleitungen vermieden und mögliche Störeinflüsse minimiert.

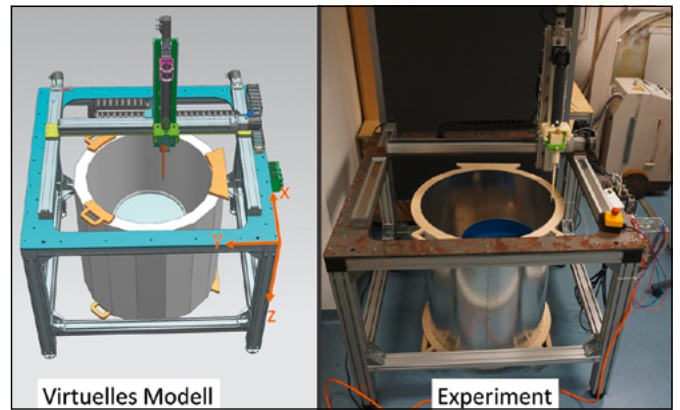


Abbildung 3: 3D-Prüfstand virtuell und in Realität

3.1 3D-Druck einer Modulare Sondenhalterung

Zur Ermittlung der thermischen Erwärmung gibt es zwei wesentliche Herangehensweisen. Einerseits kann diese direkt mittels Temperatursonden gemessen werden, andererseits ist dies auch indirekt rechnerisch über E-Feld-Sonden möglich. Nach dem aktuellen Stand werden zwei Sonden verwendet: eine Easy4-E-Feld-Sonde und eine TDS-Sonde der Firma Schmid & Partner Engineering AG, welche beide das E-Feld der Spule ausmessen können. Zu beiden Sondentypen wurde jeweils eine Kunststoff-Sondenhalterung entwickelt, welche im 3D-Druck-Fertigungsverfahren hergestellt wurde. Die Sondenhalterung wurde so konzipiert, dass die beiden E-Feld-Sonden austauschbar in einem C-Element (hellgrüne Halterung in Abbildung 4 und Abbildung 5) an den 3D-Prüfstand angebracht werden können. Die Sondenhalterung ist modular aufgebaut. Dies bedeutet, dass die Sonden durch individuelle Einsätze schnell und flexibel ausgetauscht werden können. Hierbei wurden die jeweiligen Funktionalitäten der Sonde mit berücksichtigt. Bei den Funktionalitäten handelt es sich um Besonderheiten der Sonde wie Messkabelführung, Zugang zum Ein-Aus-Schalter, Sichtbarkeit der Funktions-LED und Raum für den Akkuwechsel. Durch die konstruktive Funktionsintegration der verschiedenen Anforderungen konnte die Bauteilanzahl und somit auch das Gewicht der Halterung minimiert werden. Dies konnte

sehr effizient im 3D-Druck umgesetzt werden. Die geringe Stückzahl und die Materialauswahl Kunststoff aufgrund der HF-Kompatibilität prädestinieren die Bauteile für die additive Fertigung. Durch Kunststoffschrauben M8 wird eine steife Fixierung und eine reproduzierbare Positionierung ermöglicht. Dies geschieht durch ein Verspannen der Sondenhalterung mit den Schrauben mittels Anschlägen. Durch die Wahl, die Sondenhalterung im Stecksystem zu halten, ist es möglich, Anpassungen an der Aufhängung der Sonden auch unabhängig vom Messaufbau durchzuführen. Dies bietet damit eine leichte Handhabbarkeit und eine effizientere Weiterentwicklung der Sondenhalterungen.

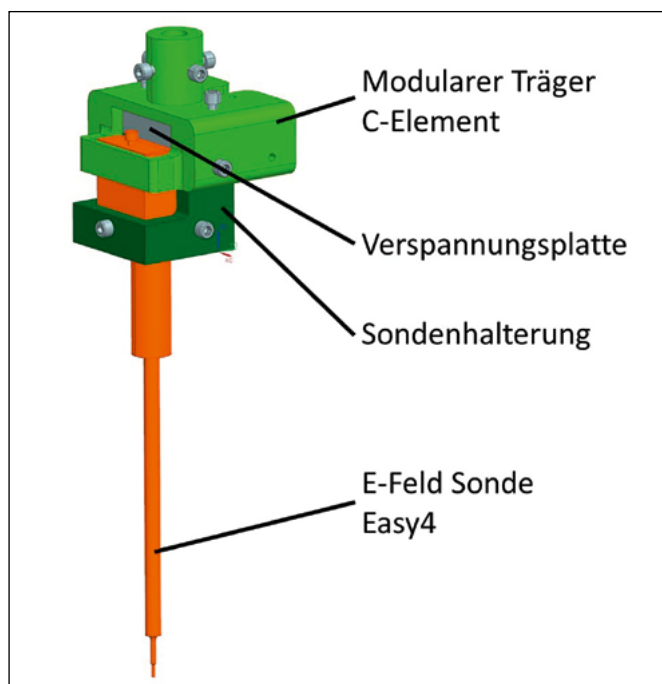


Abbildung 4: Modulare Sondenhalterung mit EASY4 Sonde

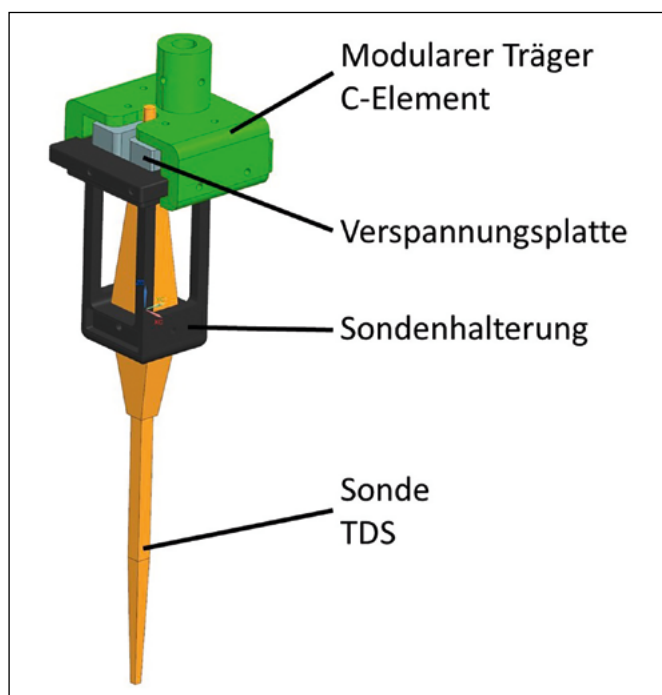


Abbildung 5: Modulare Sondenhalterung mit TDS Sonde

Um die Sondenhalterung möglichst HF-Kompatibel in die MRT-Spule einführen zu können, wurde eine Kunststoffverlängerung an der z-Achse entwickelt. Die konstruktive Anbindung (Abbildung 6) der Sondenhalterung ermöglicht, dass die Sonde in der X-Y-Ebene durch das Flächenträgheitsmoment in alle Richtungen gleich steif ist. Weiterhin ist durch diese Konstruktionsweise sichergestellt, dass alle Komponenten des 3D-Prüfstandes, die aus Metall bestehen, aus dem E-Feld und dem Inneren der Spule herausgehalten werden.

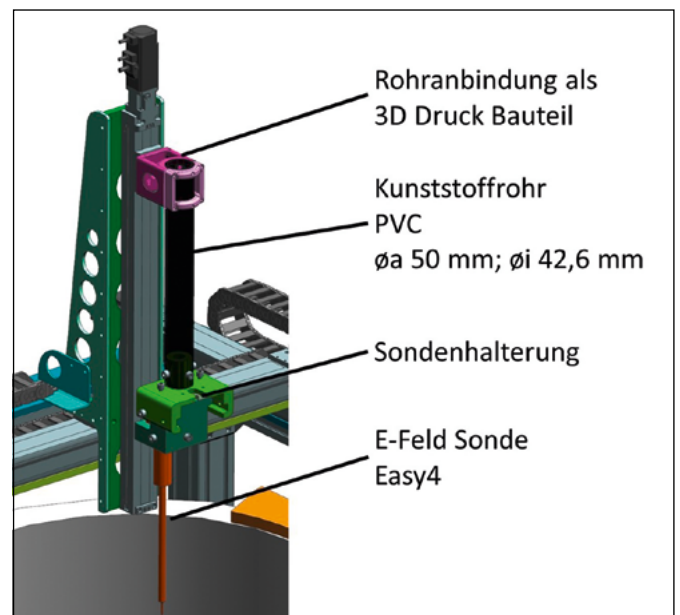


Abbildung 6: MRT-Kompatible Sondenanbindung an die z-Achse

3.2 Ansteuerung

Die Ansteuerung der Motoren erfolgt über die jeweiligen Treiber (Oriental Typ AZD-KX). Die Treiber können über eine RS485-Schnittstelle mittels Modbus RTU, Pulse Input, sowie über I/O-Kommunikation betrieben werden. Durch eine Verbindung der Treiber untereinander durch RS-485 und einem PC über den COM-Port kann somit eine Modbus-Client-Server-Architektur aufgebaut werden. Mittels Microcontroller können die Linearachsen auch per Pulse-Input über den COM-Port des PCs angesteuert werden. Für einfache Steuerungsaufgaben kann die Herstellersoftware MEXEo2™ von Oriental Motor dienen. Für die komplexen Trajektorien, die im Rahmen der Simulation berechnet wurden, die mittels des 3D-Prüfstandes abgefahren werden sollen, wird eine Ansteuerung mittels LabView™ oder ein C-Programm auf einem Arduino genutzt.

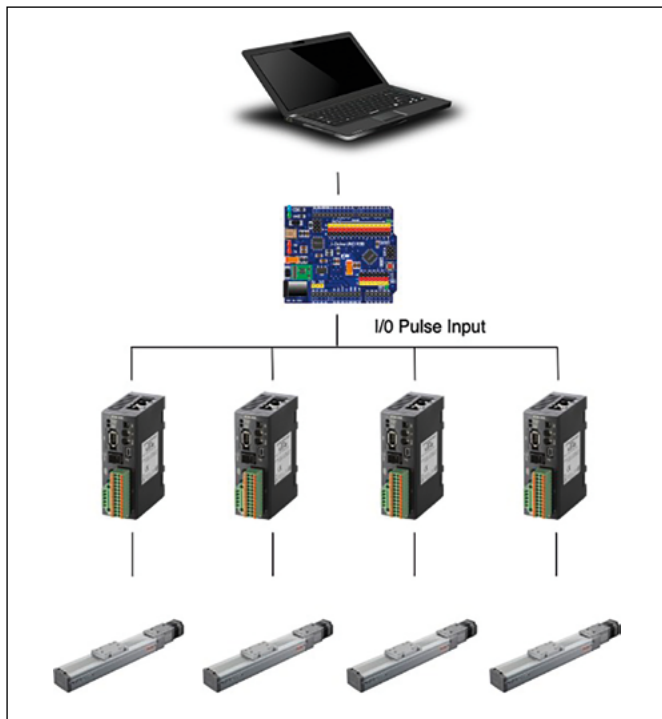


Abbildung 7: Ansteuerung der Linearachsen per Pulse-Input [2] [3] [4] [5]

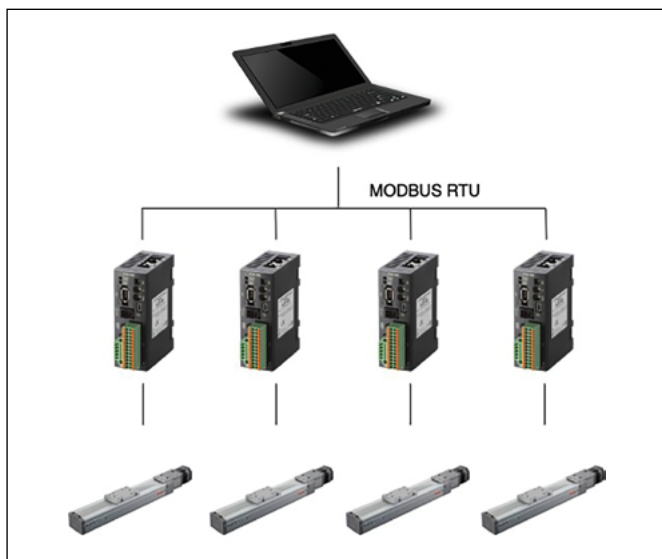


Abbildung 8: Steuerung der Linearachsen per MODBUS RTU [2] [3] [4] [5]

4 Diskussion

Um die geforderten Genauigkeiten der ISO-Norm mit den Herstellerangaben zu verifizieren, wird der 3D-Prüfstand in einem nächsten Schritt mit einem Lasermesssystem ausgemessen. Das Profilgestell in Verbindung mit der Stahlgrundplatte unterstützt eine präzise Positionierung durch Erhöhung der Gesamtsteifigkeit, Reduktion von Schwingung und exakter Ausrichtung der Teilkomponenten des Portalsystems. Zur Erhöhung der Präzision werden in einer nächsten Stufe die Stahlkomponenten des 3D-Prüfstandes noch überschleift. Mittels modularer Bauweise und des 3D-Druck-Verfahrens ist es einfach, neue und verschiedenste Sensoren zum Einsatz zu bringen. Der 3D-Druck ermöglicht eine flexible und einfache Handhabung und Einsatzmöglichkeit. Für die weitere Entwicklung ist eine automatisierte Erkennung der Position des Leads im Phantom in Planung. Diese ist nötig, um nach einer manuellen Einbringung die exakte Trajektorie der aktuellen Position des Leads automatisch anzupassen. Um eine Erhöhung der Anzahl von durchgeführten Tests für verschiedene Leads zu erreichen, müssen automatisierte Wechselsysteme für die Phantome entwickelt werden.

Referenzen:

- [1] International Organization for Standardization, ISO/TS 10974:2018(en) Assessment of the safety of magnetic resonance imaging for patients with an active implantable medical device, <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:65055:en>, 03.08.2020
- [2] Abbildung: Pixabay, <https://pixabay.com/de/vectors/laptop-notebook-mobil-computer-154091/>, 04.08.2020
- [3] Abbildung: Pixabay, <https://pixabay.com/de/vectors/iduino-uno-r3b-iduino-uno-iduino-1699990/>, 04.08.2020
- [4] Abbildung: ORIENTAL MOTOR USA CORP., <https://catalog.orientalmotor.com/item/all-categories/azd-stepper-motor-drivers-rs-485-pulse-input-dc/azd-kx>, 04.08.2020
- [5] Abbildung: ORIENTAL MOTOR USA CORP., <https://catalog.orientalmotor.com/item/ezs-straight-type-linear-slides-az-dc/ezs6-straight-type-linear-slides-az-dc/ezsm6eo8oazak>, 04.08.2020

Projektpartner:

MR:comp, Gelsenkirchen

Fördergeber:

ZIM-Forschungsprojekt – gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)
2018-2020 Prüfmethodeentwicklung zur Untersuchung von HF induzierter Erwärmung bei aktiven implantierbaren
Medizinprodukten.



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kontakt:



Prof. Dr. Ralf Ringler

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen
und Gesundheit
Medizintechnik/Medizinische Physik
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

r.ringler@oth-aw.de



Michael Gubitz, M.Eng.

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

mi.gubitz@oth-aw.de



Johannes Turnwald, B.Sc.

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

j.turnwald@oth-aw.de

Thomas Simson, M.Sc.¹
Jessica Schober, B.Eng.¹
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Koch¹
Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.²
Ing. Ivana Zetková, Ph.D.²

1) Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, Weiden
2) University of West Bohemia, Pilsen, CZ

Konferenzbeitrag COMAT 2020: Corrosion Resistance of 18Ni-300 Maraging Steel Manufactured by LPBF

Zusammenfassung

In diesem Artikel wird die Auswirkung des Korrosionsverhaltens auf LPBF-Teile aus MAR 300 (EN 1.2709) beschrieben. Um den Einfluss der Wärmebehandlung auf die Bauteileigenschaften zu vergleichen, wurden Versuchsteile im Wärmebehandlungszustand lösungsgeglüht und ausgelagert getestet. Aufgrund der für dieses Verfahren charakteristischen schichtweisen Herstellung von Bauteilen treten hohe Oberflächenrauheiten auf. Für viele Anwendungen und meist an funktionalen Oberflächen ist daher eine aufwendige Nachbearbeitung der Oberflächen notwendig. Der zuverlässige Einsatz dieser Bauteile erfordert die Kenntnis des spezifischen Einflusses der ausgewählten Nachbearbeitungsverfahren auf die Korrosionsbeständigkeit. Die Korrosionsuntersuchung erfolgt an verschiedenen Probenoberflächen, wie z. B. gefräst, gedreht, sandgestrahlt, unbehandelt, geschliffen und laserbearbeitet, aber auch an wärmebehandelten Proben. Es zeigt sich, dass kein Zusammenhang zwischen Oberflächenbehandlung und Korrosionsbeständigkeit besteht. Allerdings kann sowohl bei LPBF- als auch bei konventionell hergestellten Proben eine Abnahme der Korrosionsbeständigkeit durch Auslagerungseffekte beobachtet werden. Eine Laserbehandlung der ausgelagerten Proben konnte die Korrosionsbeständigkeit wieder auf das gleiche Niveau wie im lösungsgeglühten Zustand anheben. Die Untersuchung der Härte liefert für beide Varianten ähnliche Werte der Festigkeit.

Abstract

This paper composes the effect of corrosion behaviour on LPBF parts made of MAR 300 (EN 1.2709). In order to compare the influence of the heat treatment on the part's properties, some parts were in the state solution annealed and others age hardened tested. Due to the layered production of AM components, which is characteristic for this process, high surface roughness occurs. Therefore, for many applications and mostly on functional surfaces, complex post-processing of the surfaces is necessary. The reliable use of the manufactured components, demand knowledge of the specific influence of the selected post-processing methods on the corrosion resistance. The corrosion investigation takes place on different sample surfaces, such as milled, turned, sand-blasted, untreated, grinded and laser-machined, but also on heat treated samples. The results show that there is no correlation between surface treatment and corrosion resistance. However, a decrease in corrosion resistance due to age hardening of the material can be observed for both LPBF and conventionally produced samples. By laser treatment of the age hardened samples, the corrosion resistance of these parts could be increased again, to the same level as in the solution annealed state. The examination of the hardness delivers equivalent values of strength for both cases.

1 Introduction

The laser powder bed fusion (LPBF) process – as a part of additive manufacturing (AM) – belongs to the powder bed fusion technology. The advantages of AM processes are i.a. geometrical freedom, material flexibility, creating opportunities to fabricate innovative parts with enhanced functionality [1]. MAR 300 is a well-known maraging steel, which belongs to a special class of ultra-high strength steels, which differs from conventional steels by hardening via intermetallic precipitations without carbon. The quality of the powder feedstock used influences by its powder morphology, including particle size distribution and shape, the achievable properties of the final products. Therefore, for many applications and mostly on functional surfaces, complex post-processing of the surfaces is necessary. This is often carried out by conventional manufacturing and surface treatment techniques (e.g. grinding, milling, drilling, blasting, or lasing). For the reliable use of the manufactured components, it is necessary to know the specific influence of the selected post-processing methods on the corrosion resistance.

2 Experimental procedure

2.1 Materials and LPBF process

The material used for this investigation is martensitic steel MAR 300 (EN 1.2709) with the chemical composition shown in Table 1. The powder was bought by Electro Optical Systems (EOS) Finland Oy and produced using gas atomization resulting in spherical particles. According to the manufacturer the employed particle size was 30 µm. All test samples used to determine the corrosion resistance were produced by an EOS M290 direct metal laser sintering system in nitrogen atmosphere.

Table 1: Chemical composition of new MAR 300 powder.

Material	Fe	Co	Ni	Mo	Ti	Al
New	Balance	8.76	18.25	4.80	0.64	0.06

Cu	Cr	Mn	Si	C	P	S
0.03	0.12	0.06	0.02	0.01	<0.01	0.01

The laser scanning strategy was in zigzag pattern with 33.3° rotation between the superimposed layers. The process parameters used were laser power (P), scan speed (v), hatch spacing (h) and layer thickness (d), the values are shown in Table 2. Before starting the LPBF process, the base plate was preheated to 40°C by a heater placed inside the building platform, and the oxygen content in the process chamber was maintained below 0.04 % by pumping in continuous nitrogen. After

manufacturing process, the samples were first solution annealed at 820 °C for 1 h in Argon atmosphere and air-cooled down to room temperature, followed by aging at 490 °C for 6 h. For the solution annealing a gas-tight chamber furnace of the PKR 35/11 type from LAC is used. The aging is carried out using a chamber furnace from Linn High Therm GmbH with the type designation HK-70. The volume is 70 litres and the heating power 18 kW. The same cutting edge radius was used for surface preparing by turning and milling and the cutting conditions were optimized to obtain the same surface input properties. The surface modifications were performed using the ANCA MX7 grinding machine with the cutting conditions cutting speed (v_c) 50 m/s, feed rate (v_f) 100 mm/min and depth of cut (a_p) 0.01 mm. Milling was done with a DMU 40 and turning with a multitask turning center CTX BETA 1250TC. The cutting conditions were chosen to be the same for both machining with v_c 110 m/s, v_f 140 mm/min and depth of cut (a_p) 0.5 mm. A manual machine with a pressure of 4 bar and a Garnet 100 blasting abrasive was used for sandblasting. The laser treatment (LT) has been carried out by a diode-pumped fiber laser from IPG Photonics of the type YLR-150/1500-QCW-MM-AC. The processing parameters selected were P 93 W, v 125 mm/s, h 0.09 mm, the surfaces were remelted twice each with an angular offset of 90°. Before laser processing, the samples are grinded with silicon carbide abrasive paper with a grain size of P180 (75 µm), the achieved average surface roughness is about $R_z = 5 \sim 6$ µm.

Table 2: Process parameters for different pattern.

Pattern	Laser power (W)	Scan speed (mm/s)	Hatch spacing (mm)	Layer thickness (mm)
In Fill	285	960	0.11	0.04
UpDown	153	600	0.11	0.12
DownSkin	145	2400	0.11	0.16

2.2 Characterizations

The surface roughness of the samples was determined with the Perthometer H1 from Garant. This is integrated into the system (Perthometer Concept) of the company Mahr (Mahr M1 Perthometer). The R_z values were evaluated and logged using the MarSurf 20 XR 20 V1.40-3 (SP1) software, and determined by an average value from three measured points. The surface morphology was analyzed by a scanning electron microscope (SEM) Leo Stereo Scan 440 (Figure 2). The corrosion behaviour was investigated by using a potentiostatic measurement system, type Avesta Cell. The performed research work examined corrosion potentials for different surface structures of LPBF parts in comparison to conventionally

produced material. The parts for the corrosion investigations (diameter D 35 mm, thickness t 16 mm) were prepared to have different surface qualities, such as milled, turned, sandblasted, untreated (as-built), grinded and laser machined ones. The heat-treated samples were as-built state. The test set-up includes the potentiostat PGS 95 and the software CPC934s1 V 5.1 from Bank Elektronik. The reference electrode used was Ag/AgCl in a $1\text{N H}_2\text{SO}_4$ electrolyte. Experiments were carried out at $21\text{ }^\circ\text{C}$. In addition, a Haber-Luggin capillary is included in the structure. The samples were cathodically polarized at the beginning of the measurement at a potential ε_r (starting position negative of the potential) and driven with $d\varepsilon/dt$ from 0.2 mV/s to $\varepsilon_r \pm 200\text{ mV}$. The total measuring area of the individual samples is 0.28 cm^2 . The evaluation of the current density-potential curves was done with Microsoft Excel. In this case, current per area I/A (mA/cm^2) is plotted logarithmically against the normal hydrogen electrode (NHE). The corrosion current density (I_{corr}) was determined by the evaluation by means of Tafel plots.

The hardness of the samples was measured by using the hardness tester Micromet 5103 (0.49 N test load). The software (Omnimet MHT) is used to evaluate the hardness impressions. Within the laser treated area five hardness impressions are measured. From this, an arithmetic mean value and the standard deviation are calculated.

The determination of the microhardness (HV 0.05) was carried out on the microsections, within the remelted area and in the area of the basic structure. The evaluation of the remelting depth and the hardness was carried out on the cross-section (perpendicular to the building direction) using the BX60M reflected-light microscope from Olympus and the DMC2900 camera from Leica. For image processing the software IMS Client V17Q4 from Imagic was used.

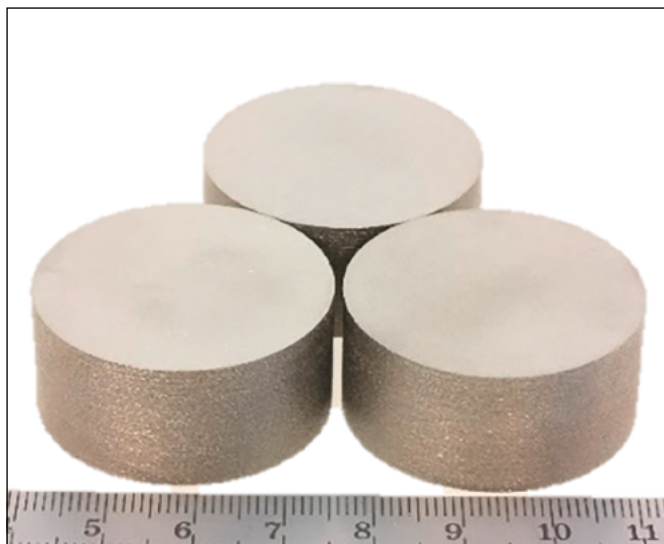


Figure 1: Test samples for corrosion.

3 Results and discussion

Figure 2 shows SEM micrographs of the top surface of different surface qualities such as milled, turned, sandblasted, as-built and grinded. It is clearly noticeable that different post-processes cause a very different surface structure. It can be stated that the technologies produce differences in the surface roughness. Therefore, it can be assumed that the results of the static and dynamic tests are different and the surface quality influences the material properties. The sandblasted surface has a significantly higher roughness of $11.78\text{ }\mu\text{m}$ than the initial state surface.

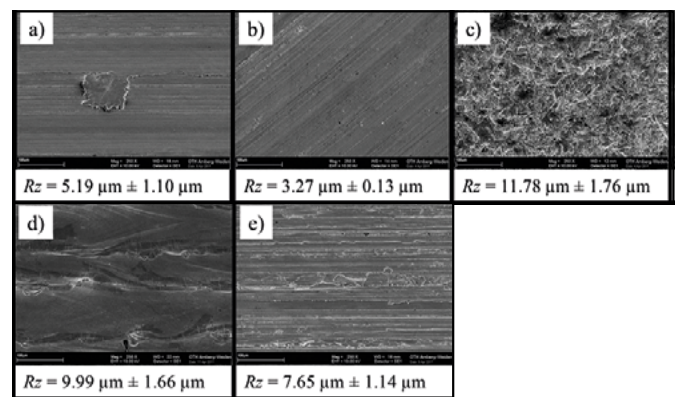


Figure 2: SEM micrographs 200-fold magnification with values of surface roughness (a) milled, (b) turned, (c) sandblasted, (d) as-build, (e) grinded.

Figure 3 displays an example of the microscope images of grinded and laser treated surfaces. These surfaces are produced and compared after heat treatment, solution annealing and aging. Figure a) shows the three areas used for corrosion measurement which are used for the calculation of the arithmetic mean value from the measurement results. b) shows a detailed image of the grinded surface with a roughness of $7.65 \pm 1.14\text{ }\mu\text{m}$. Figure c) shows a partial area of the laser treated surfaces with a roughness of $2.64 \pm 0.62\text{ }\mu\text{m}$, this was also examined metallographically to determine the melting depth. This examination is shown in d), with a melting depth d of $75\text{ }\mu\text{m}$, the heat-affected zone is $46\text{ }\mu\text{m}$.

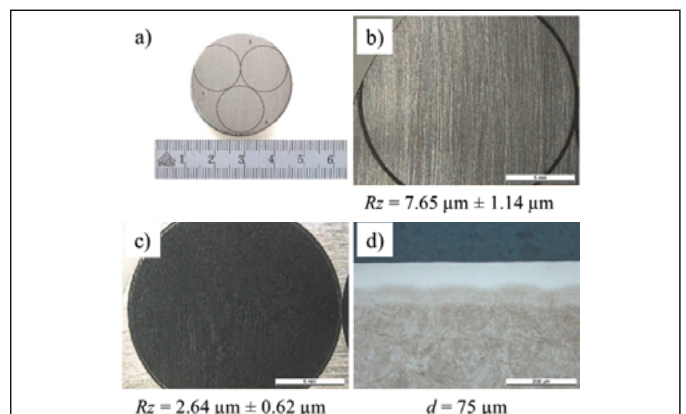


Figure 3: Micrographs with values of surface roughness (a) sample with markings, (b) grinded, (c) laser treated, (d) microsection of laser treatment.

Table 3: Average E_{corr} and I_{corr} of LPBF samples with different surface qualities and wrought material.

Surface treatment	Sample	Heat treatment	E_{corr} (mV _{NHE})	I_{corr} (mA/cm ²)
Milled	Additive	Solution annealed	-75 +/- 2	0.48 +/- 0.025
Turned	Additive	Solution annealed	-75 +/- 1.5	0.55 +/- 0.15
Sandblasted	Additive	Solution annealed	-78 +/- 0.5	0.70 +/- 0.1
As-build	Additive	Solution annealed	-74 +/- 1	0.38 +/- 0.025
Grinded	Additive	Solution annealed	-78 +/- 0.5	0.65 +/- 0.05
Grinded	Conventional	Solution annealed	-74 +/- 1	0.53 +/- 0.025
Grinded + LT	Additive	Solution annealed	-77 +/- 1.5	0.50 +/- 0.1
Grinded + LT	Conventional	Solution annealed	-81 +/- 2	0.70 +/- 0.05
As-Build	Additive	Age hardened	-79 +/- 3.5	1.25 +/- 0.05
Grinded	Additive	Age hardened	-73 +/- 2.5	1.20 +/- 0.15
Grinded	Conventional	Age hardened	-71 +/- 1.5	1.55 +/- 0.15
Grinded + LT	Additive	Age hardened	-78 +/- 0.5	0.4 +/- 0.05
Grinded + LT	Conventional	Age hardened	-79 +/- 0.5	0.5 +/- 0.05

The potentiodynamic polarisation parameters like corrosion potential (E_{corr}), corrosion current (I_{corr}), calculated from three Tafel plots are summarised in Table 3 for annealed and aged samples. The results of the corrosion measurements show that the E_{corr} are comparable for all tests. The surface roughness of the wrought material was adjusted by grinding prior the corrosion measurements. The corrosion results of the investigations are almost the same despite strongly different surface roughness. The results of the samples and the wrought material show that there is no correlation between the surface roughness and I_{corr} (see Table 3).

However, from the results of Tafel plots and I_{corr} shown in Table 3, it can be observed that the corrosion of the annealed samples is lower than that of the aged samples. The corrosion potentials E_{corr} for all samples are in the range of -81 ~ -71 mV (values related to the potential of the normal hydrogen electrode *NHE*).

The corrosion current densities of the solution annealed samples are in a range of $I_{corr} = 0.38 \sim 0.7$ mA/cm². The corrosion current densities of the aged samples vary between $I_{corr} = 1.2 \sim 1.55$ mA/cm², which corresponds to a factor of about two. The corrosion current density is directly proportional to the corrosion rate, which doubles in this case. This may be due to the fact that these samples are solution annealed and that this heat treatment results in a homogeneous microstructure. A single phase or homogeneous metal resisted the corrosion attack better than a multiphase or inhomogeneous metal [2].

In this condition, the samples contain a completely martensitic matrix consisting predominantly of iron and nickel. As a result, the corrosion behavior is comparable

to that of iron and nickel.

In the case of MAR 300, the precipitates formed during aging have been identified as complex of nickel-cobalt-molybdenum-titanium (Ni₃Mo and Ni₃Ti) [3] – [4]. These intermetallics have different compositions therefore their electrochemical behavior differs from the matrix [5] – [8]. Due to the different crystal structures and lattice parameters, stress fields formed around the precipitates. These composition differences lead to a lower corrosion resistance of aged samples due to the galvanic effect than the annealed ones [9] – [12]. The corrosion current densities of the aged and subsequently laser treated samples show a similar corrosion behaviour as the solution annealed states ($I_{corr} = 0.4 \sim 0.5$ mA/cm²). As a result of the laser treatment, the precipitates in the melted area of the microstructure dissolve again and thus increase the corrosion resistance of the material again. In principle, all corrosion attacks are uniform surface corrosion. As a result of laser treatment, the hardness in the melted layer decreases from 567 ~ 583 HVo.05 to approx. 360 HVo.05 and is thus comparable with the hardness of solution annealed samples (309 ~ 361 HVo.05).

4 Conclusion

The results demonstrated that the high-strength MAR 300 which was comparable to the wrought material could be produced by LPBF and subsequent solution annealing heat treatments.

- It can be observed that different surface qualities such as milled, turned, sandblasted, as-build and grinded have no significant influence on the corrosion resistance.

- However, the corrosion resistance of aged samples is lower than of annealed samples. The precipitates formed during aging lead to a lower corrosion resistance of aged samples due to the galvanic effect. For the solution annealed samples the corrosion current densities are in a range of $i_{corr} = 0.38 \sim 0.7 \text{ mA/cm}^2$. The aged samples show a lower corrosion resistance. Corrosion current densities approximately twice as high were measured for them, $i_{corr} = 1.2 \sim 1.55 \text{ mA/cm}^2$.
- By laser treatment, the precipitates could be dissolved in a thin surface layer of $75 \mu\text{m}$ and thus the corrosion rate decreases to the values of the solution annealed condition.
- The hardness of solution annealed and aged samples reached standard wrought level. After aging, the hardness increased from $309 \sim 361 \text{ HVo.05}$ to $567 \sim 583 \text{ HVo.05}$. Laser processing reduces the hardness of the surface layer to the level of the solution annealed samples (approx. 360 HVo.05).

The manufacturing method of the additive or conventional material samples has no measurable effect on the corrosion resistance. The investigations show that LPBF components show a similar corrosion behaviour as the conventionally produced samples.

Referenzen:

- [1] Rüßmann M, Lorenz M, Gerbert P, Waldner M, Justus J, Engel P and Harnisch M, 2015, Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries, Boston Consulting Group, Boston MA USA, Volume 9
- [2] Wadhwa V C, 1965, Corrosion behavior of heat treated 18 per cent nickel maraging steel
- [3] Floreen S, 1968, The physical metallurgy of maraging steels, Metallurgical Reviews, 13:1, pp 115 – 128
- [4] Tewari R, Mazumder S, Batra I S, Dey G K and Banerjee S, 2000, Precipitation in 18 wt% Ni maraging steel of grade 350, Acta Mater, 48(5), pp 1187 – 1200.
- [5] Shoesmith D W, 1992, Metals Handbook ASM International, 9th ed., volume 13
- [6] Sedriks A J, 1996, Corrosion of Stainless Steels Electrochemical Society, 2nd ed., New York, Wiley
- [7] Chan K and Tjong S, 2014, Effect of secondary phase precipitation on the corrosion behavior of duplex stainless steels Materials, 7(7), pp 5268 – 5304
- [8] Poornima T, Nayak J and Shetty A N, 2010, Corrosion of aged and annealed 18 Ni 250 grade maraging steel in phosphoric acid medium, Int. J. Electrochem. Sci, 5, pp 56 – 71
- [9] Kumar P and Shetty A N, 2013, Corrosion behaviour of 18% Ni M250 grade maraging steel under welded condition in hydrochloric acid medium, Portugaliae Electrochimica Acta, 31(1), pp 21 – 32
- [10] Ansell T Y, Ricks J P, Park C, Tipper C S and Luhrs C C, 2020, Mechanical Properties of 3D-Printed Maraging Steel Induced by Environmental Exposure, Metals, 10(2), 218.
- [11] Tan C, Zhou K, Kuang M, Ma W and Kuang T, 2018, Microstructural characterization and properties of selective laser melted maraging steel with different build directions, Science and Technology of Advanced Materials, 19(1), pp 746 – 758
- [12] Avelino A F, Araújo W S, Dias D F, dos Santos L P M, Correia A N and de Lima-Neto P, 2018, Corrosion investigation of the 18Ni 300 grade maraging steel in aqueous chloride medium containing H₂S and CO₂, Electrochimica Acta, 286, pp 339 – 349

Projektpartner:

University of West Bohemia, Pilsen, Czech Republic
Fraunhofer Institut UMSICHT, Sulzbach-Rosenberg
VŠB TU Ostrava, Ostrava-Poruba, Czech Republic

Fördergeber:

Das Projekt wurde durch die Bayerisch-Tschechische Agentur aus Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums der Finanzen und für Heimat gefördert.

**Kontakt:****Thomas Simson, M.Sc.**

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

t.simson@oth-aw.de

**Jessica Schober, B.Eng.**

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

j.schober@oth-aw.de

**Prof. Dr.-Ing. Jürgen Koch**

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

j.koch@oth-aw.de

Zusammenfassung

Im Automobilbau werden Formteile aus Polyurethanschaum (PUR) eingesetzt. Die Herstellung der Formteile erfolgt durch Reaktionsschaumgießen/Reaction Injection Molding (RIM). Anhand eines Versuchswerkzeugs wird erläutert, wie sich der Prozess im Rahmen der Finite-Elemente-Methode (FEM) abbilden lässt.

Abstract

The automotive industry uses plastic parts made of polyurethane foam (interior trim, head cushion, seat cushion, etc.). Reaction Injection Molding (RIM) is a low pressure, low temperature process used to mold polyurethane parts. Finite Element Method (FEM) is used to model the RIM process, numerical results are compared with test results.

1 Einleitung

Im Automobilbau werden Weichschäume aus Polyurethan (PUR) unter anderem in Kopfstützen, Sitzen und Armlehnen eingesetzt. Abbildung 1 zeigt eine Kopfstütze und das Formteil aus PUR-Schaum. Die mechanischen Eigenschaften des Schaums werden durch die Zellstruktur bestimmt, d. h. durch das verwendete Polymer (Gerüstbildner) und die Porenverteilung (Größe der Poren, offener oder geschlossenzelliger Struktur).

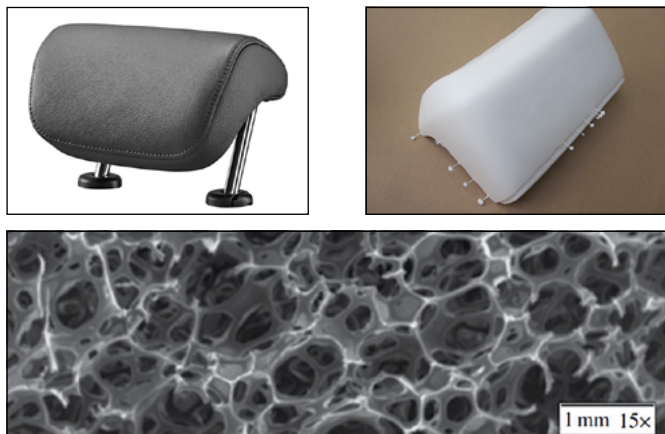


Abbildung 1: Kopfstütze, Formteil aus PUR-Schaum und Zellstruktur [2]

Die Herstellung des Formteils erfolgt durch Reaktionsschaumgießen im RIM-Verfahren (Reaction Injection Molding). Im Rahmen einer Masterarbeit [1] wurde der Prozess experimentell untersucht. Hierzu wurde ein Versuchswerkzeug konstruiert und mit Druck- und Temperatursensoren versehen. Die Arbeit wurde bei der Grammer AG von Herrn Dipl.-Ing. Kurz betreut. Die Bilder und die Versuchsdaten werden von der Grammer AG für diesen Beitrag zur Verfügung gestellt. Vielen Dank!

Im Folgenden wird die Simulation des Reaktionsschaumgießens im Rahmen der Finite-Elemente-Methode (FEM) behandelt. Zunächst wird der Prozess erläutert, anschließend wird die Reaktionskinetik betrachtet. Darauf aufbauend erfolgt die Beschreibung des Wärmehaushalts. Die thermo-mechanisch gekoppelte Berechnung erfolgt an einem Ersatzmodell. Der Vergleich mit den Versuchsdaten zeigt, dass die vorgestellte Methode den Prozess plausibel abbildet. Die Implementierung und die zugehörigen Simulationen wurden von Herrn Prof. Kammerdiener entwickelt/durchgeführt.

2 Reaction Injection Molding

Beim Reaktionsgießen erfolgt die Formbildung/das Schäumen in einem geschlossenen Werkzeug. Abbildung 2 zeigt den Prozess. Die angegebenen Prozesszeiten sind die Zeiten der durchgeführten Versuche. Vor dem Reaktionsgießen werden zunächst die Formhälften vorbereitet und ca. 20 Minuten temperiert. Zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ wird das flüssige Reaktionsgemisch aus Isocyanat, Polyol, Wasser und weiteren Bestandteilen eingebracht.

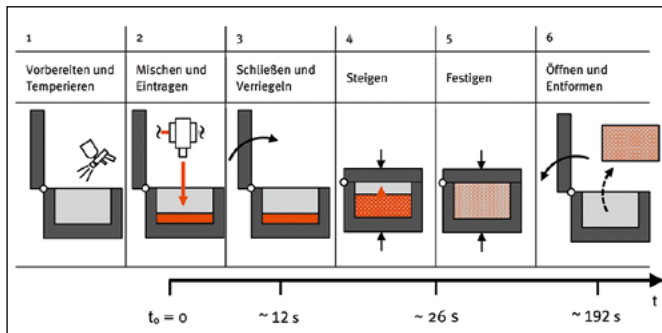


Abbildung 2: Reaction Injection Molding (RIM)

Bei der Reaktion von Isocyanat mit Wasser entsteht Kohlendioxid CO_2 , welches das Reaktionsgemisch auftreibt (chemisches Treiben). Während des Steigens entweicht CO_2 über Entlüftungsöffnungen an der Oberseite des Werkzeugs. Nach etwa 26 Sekunden ist das Steigen abgeschlossen, und die Entlüftungsöffnungen werden durch den aufsteigenden Schaum verschlossen. Durch weiteres CO_2 entsteht in der Form ein Überdruck. Nach etwa 192 Sekunden wird die Form geöffnet und das Formteil entnommen. Abbildung 3 zeigt das Versuchswerkzeug und die Messpunkte [1].

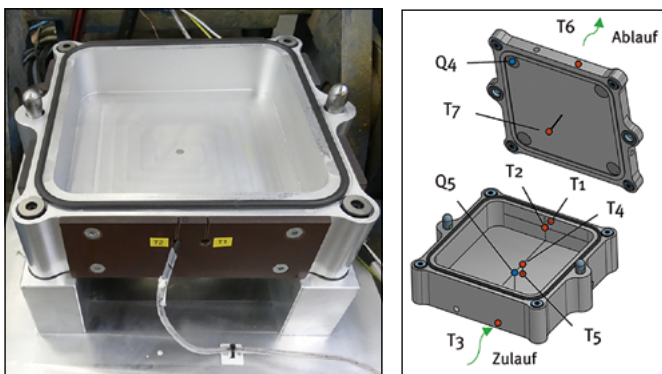


Abbildung 3: Versuchswerkzeug und Messpunkte [1]

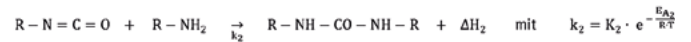
Während des Versuchs werden die Temperaturen T_1 und T_2 an der Seitenwand, die Temperaturen T_4 und T_5 in Bodenmitte sowie die Temperatur T_7 im Volumenzentrum des Reaktors gemessen. Zusätzlich wird die Temperatur des Temperierwassers am Zulauf T_3 und am Ablauf T_6 aufgezeichnet. An der Stelle Q_4 wird der Druck an der Entlüftungsöffnung, an der Stelle Q_5 der Druck in Bodenmitte gemessen.

3 Reaktionskinetik

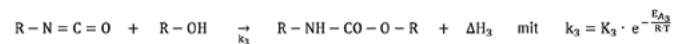
Zu Beginn des Prozesses wird das Isocyanat mit den übrigen Komponenten (Polyol, Wasser, Katalysatoren, Additive/Zusätze, ...) unter Hochdruck vermischt. Darauf setzen zahlreiche Reaktionen ein, von welchen drei Teilreaktionen betrachtet werden. Die erste Teilreaktion ist die Treibreaktion von Isocyanat (A) und Wasser (B) zu Amin (C) und Kohlendioxid (D).



Als Zwischenprodukt entsteht Amin (C), welches mit überschüssigem Isocyanat (A) zu Urea (E) reagiert.



Die dritte Teilreaktion ist die Reaktion von Isocyanat (A) und Polyol (F) zu Urethan (G).



Die betrachteten Teilreaktionen sind Reaktionen 2. Ordnung. Es folgt ein System von 7 gekoppelten Differentialgleichungen (DGL) zur Beschreibung der Phasenentwicklung. Beispielsweise gelten für die Zeitableitungen der Konzentrationen c_A und c_D die Differentialgleichungen

$$\dot{c}_A = -k_1 \cdot c_A \cdot c_B - k_2 \cdot c_A \cdot c_C - k_3 \cdot c_A \cdot c_F \quad \text{Abnahme des Edukts Isocyanat (A)}$$

$$\dot{c}_D = +k_1 \cdot c_A \cdot c_B \quad \text{Zunahme des Produkts Kohlendioxid (D)}$$

Im Rahmen der Finite-Elemente-Methode (FEM) werden 7 Zustandsvariablen für die Konzentrationen der 7 betrachteten Phasen des Gemisches eingeführt. Die Anfangskonzentrationen sind aus der Zusammensetzung des Reaktionsgemischs bekannt. Damit ergibt sich an jedem Integrationspunkt ein Anfangswertproblem (AWP), welches hier mit dem Standard-Runge-Kutta-Verfahren 4. Ordnung (numerisch) gelöst wird. Abbildung 4 zeigt exemplarisch die zeitliche Entwicklung der Zustandsvariablen bzw. Konzentrationen – zunächst für ein konstantes Volumen, eine konstante Temperatur sowie für frei gewählte Anfangswerte und Parameter.

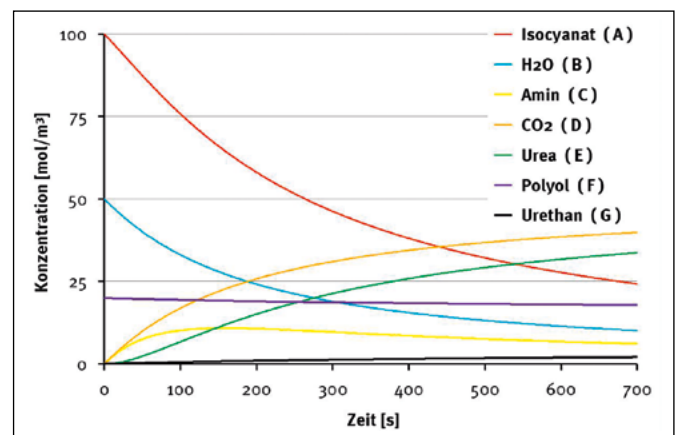


Abbildung 4: Verlauf der Konzentrationen c_i für konstantes Volumen und konstante Temperatur (exemplarisch)

4 Volumenzunahme und Wärmeleitung

In der Steigphase nimmt das Schaumvolumen zu. Infolge Volumendehnung nehmen die Konzentrationen der Phasen ab. Der Schaum wird hier als Festkörper/Kontinuum betrachtet, dessen Volumenzunahme über ein plastisches Volumenkriechen beschrieben wird. Es wird angenommen, dass die Steighöhe linear mit der Zeit t zunimmt. Die Abnahme der Konzentrationen infolge Volumendehnung wird in der Implementierung berücksichtigt.

Die betrachteten Teilreaktionen verlaufen exotherm. Bei jedem Formelumsatz wird die Energie ΔH_i frei. Die freigesetzte Wärme geht als volumetrische Wärmestromquelle \dot{q}_V in die thermo-mechanisch gekoppelte Berechnung ein. Mit steigender Temperatur T verlaufen die Reaktionen rascher. Der Einfluss der Temperatur T auf die Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten k_i berücksichtigt (Arrhenius-Gleichung). Anhaltswerte für die Energien ΔH_i , die Konstanten K_i und die Aktivierungsenergien E_{Ai} werden der Literatur [3] entnommen.

Infolge Konvektion und Strahlung treten an den Rändern Wärmeverluste auf. Das Temperaturfeld ist instationär und wird durch die Wärmeleitungsgleichung mit Quellterm \dot{q}_V beschrieben.

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \cdot \nabla^2 T = \dot{q}_V$$

Die Dichte ρ , die spezifische Wärmekapazität c und die Wärmeleitfähigkeit λ sind Materialkennwerte, welche aus Tabellenwerken entnommen werden. Für den Schaum sind die Werte abhängig von der momentanen Zusammensetzung des Gemischs und ergeben sich aus den Massenanteilen der einzelnen Phasen.

5 Simulation des Reaktionsgießens

Die Simulationen erfolgen an einem 2D-Ersatzmodell mit rotationssymmetrischen Elementen. Dieses entspricht dem Versuchswerkzeug in den wesentlichen Merkmalen, insbesondere die Größe von Schaumoberfläche und Schaumvolumen ist vergleichbar. Vergleichsrechnungen an einem 3D-Modell mit Volumenelementen belegen, dass das Ersatzmodell geeignet ist.

Vor dem Reaktionsgießen werden die Formhälften ca. 20 Minuten temperiert. Abbildung 5 zeigt die Entwicklung des Temperaturfeldes und den Verlauf der gemessenen/berechneten Temperaturen an der Stelle T2. Nach ca. 20 Minuten stellt sich im Werkzeug ein stationäres Temperaturfeld ein.

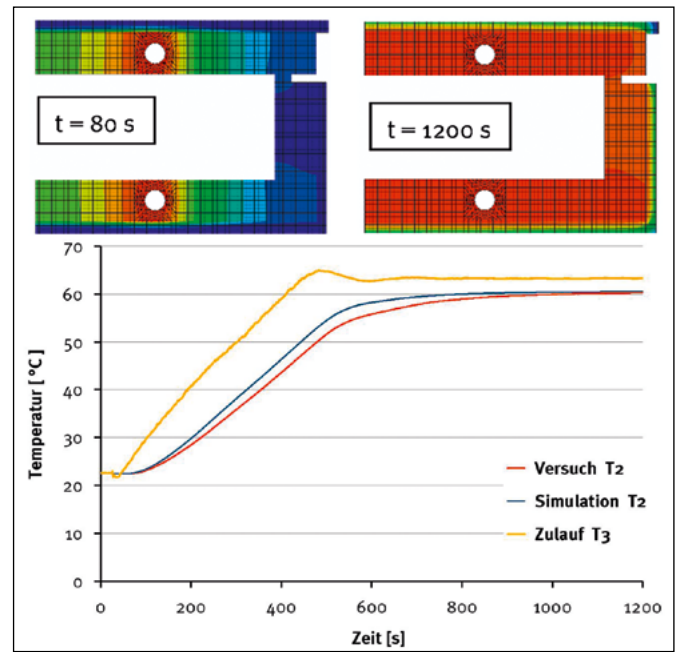


Abbildung 5: Temperieren des Werkzeugs

Zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ wird das flüssige Reaktionsgemisch mit einer Anfangstemperatur von 30 °C in das temperierte Werkzeug eingebracht. Darauf setzt die Treibreaktion ein, und das Schaumvolumen nimmt kontinuierlich zu. Nach 26 Sekunden ist die Steigphase abgeschlossen. Abbildung 6 zeigt die Entwicklung des Temperaturfeldes im Schaum und im Werkzeug sowie die gemessenen/berechneten Temperaturen/Drücke an den Stellen T7 und Q4.

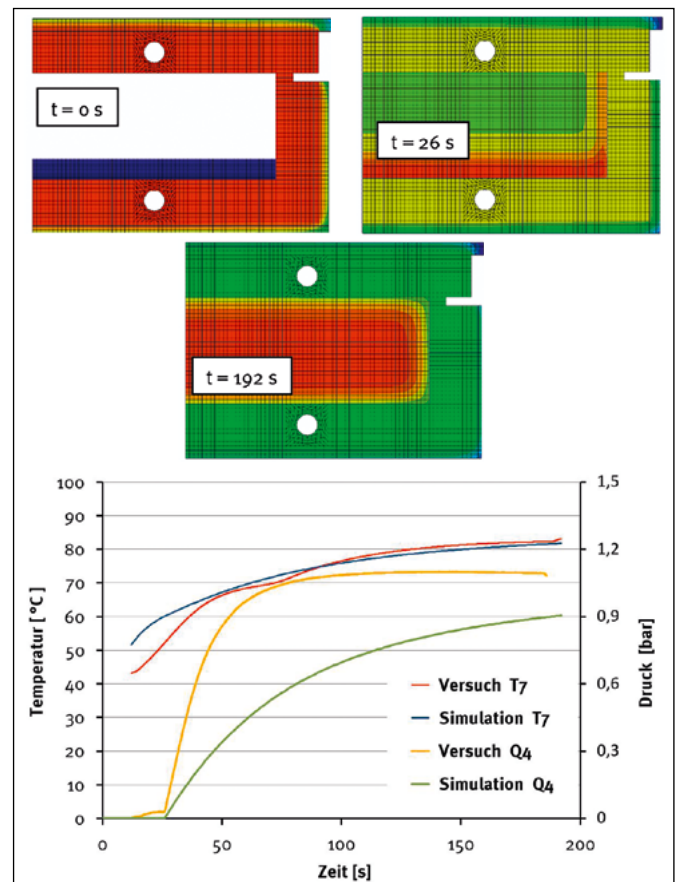


Abbildung 6: Reaktionsgießen des Formteils

Die (vielen) Parameter der Simulation werden iterativ so angepasst, dass der Verlauf der gemessenen Temperaturen möglichst gut getroffen wird. Der rechnerische Druck an der Stelle Q₄ folgt aus der Menge an Kohlendioxid CO₂ und der Temperatur (Zustandsgleichung des idealen Gases). Der Vergleich mit dem gemessenen Druck zeigt, dass die Simulation noch nicht alle Aspekte des Prozesses zufriedenstellend abbildet.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die durchgeführten Versuche tragen zum Verständnis des Reaktionsgießens bei. Die Simulation bildet den Prozess im Wesentlichen zutreffend ab. Die Implementierung könnte verbessert werden, indem weitere Phasen, Teilreaktionen, Partialdrücke, Einflüsse von Additiven berücksichtigt werden. Ergänzend wären Messungen zur Entwicklung der Phasen (IR Spektroskopie) und zur freigesetzten Wärme (Kalorimeter) hilfreich, um die Anzahl der unbekannt Parameter zu reduzieren.

Referenzen:

- [1] Hiermann M., Thermo-mechanische Beanspruchung der Formwerkzeuge beim Schäumen von PUR-Formteilen – Experiment und Finite-Elemente-Simulation, Masterarbeit 2020
- [2] Sonnenschein M. F., Polyurethanes Science, Technology, Markets, and Trends, John Wiley & Sons-Inc., 2015
- [3] Baser S. A., Khakhar D. V., Modeling of the Dynamics of Water and R-11 Blown Polyurethane Foam Formation, Polymer Engineering and Science, Vol. 34, No.8, April 1994

Kontakt:



Prof. Dr.-Ing. Heinrich Kammerdiener

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

h.kammerdiener@oth-aw.de



Manfred Hiermann, M.Eng.

Technische Hochschule Deggendorf (THD)
Technologie Campus Parsberg-Lupburg
Am Campus 1
92331 Parsberg

manfred.hiermann@th-deg.de



Dipl.-Ing. Helmut Kurz

Grammer AG
Senior Manager
Innovation Core Process Development
Wernher-von-Braun-Straße 6
92224 Amberg

helmut.kurz@grammer.com



Prof. Dr. Peter Kurzweil

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

p.kurzweil@oth-aw.de

Zusammenfassung

Für ebene, starre Körper wird eine modifizierte Methode zur Berechnung von Lagerreaktions- und Stabkräften vorgestellt. Diese basiert auf der Annahme, dass der parallele Versatz von Kräften ungebundene Momente erzeugt, durch die die Äquivalenz im Belastungsansatz aufrechterhalten wird. Diese Momente bewirken Kräftepaare und zentraler Kräftegruppen in den Lagerstellen. Durch Gleichgewichtsansätze in den Lagerstellen wird es möglich, die Lagerreaktionskräfte ohne einen weiteren expliziten Momentenansatz zu bestimmen.

Abstract

A modified method for calculating support reaction and bar forces is presented for flat, rigid bodies. This is based on the assumption that the parallel offset of forces creates unbound moments in the component, through which the equivalence in the loading approach is maintained. The moments cause pairs of forces and central groups of forces at the place of bearings. By using equilibrium approaches in the places of support it is possible to determine the support reaction forces without an explicit moment approach.

1 Einleitung

Die Berechnung von Lagerreaktionskräften für ebene, statisch bestimmte Tragwerke erfolgt überwiegend anhand von 3 Gleichgewichtsansätzen. Diese können, verschieden kombiniert, Kräfte- oder Momenten-Gleichgewichtsansätze sein. Die Wirkungen aller eingepprägten Kräfte und Momente werden, z. B. bei einer Fest-Los-Lagerung, jeweils in vertikaler bzw. horizontaler Orientierung durch Lager-Reaktionskräfte kompensiert. Kräftegleichgewichtsansätze erfolgen ohne offensichtlichen Ortsbezug für das jeweilige Tragwerk. Momentengleichgewichtsansätze beziehen sich dagegen auf einen quasi frei wählbaren aber konkreten Punkt. Für diese gilt, dass alle wirkenden Teilmomente in der Summe Null ergeben müssen.

Alternativ zu diesem Vorgehen wird im nachfolgenden Beitrag ein weiterer Ansatz, welcher hier als Kräfte-Versatzverfahren bezeichnet wird, zur Berechnung von Kräften an ebenen Tragwerken vorgestellt.

2 Das Körpermoment

Ein starrer Körper mit ebener Geometrie sei in einem Punkt A ohne Freiheitsgrade gelagert (Abbildung 1a). Die Wirkung einer in der Ebene beliebig angeordneten Kraft F mit zum Punkt A versetzter Wirkungslinie f_f wird durch Reaktionen im Lagerungspunkt vollständig kompensiert. Diese sind die **Lagerreaktionskraft** F_A und das **Lagerreaktionsmoment** M_A (Abbildung 1b). Der Körper befindet sich durch die Wirkung der beiden Lagerreaktionen im Gleichgewicht.

Das Gleichgewicht bleibt ebenfalls erhalten, wenn die Kraft F von der Wirkungslinie f_f parallel auf die Wirkungslinie f_A versetzt und ein Versatzmoment M_f hinzugefügt wird (Bild 1c). Das Moment M_f repräsentiert die Drehwirkung der nach f_A versetzten Kraft F . Der Betrag des Moments M_f ist das Produkt aus Kraft F mal Versatzabstand h_f .

Der parallele Versatz einer Kraft und der drehsinnorientierte Ansatz eines Versatzmoments sind äquivalent in ihrer Wirkung zur Einzelkraft in der Ausgangsposition. Das Versatzmoment entsteht aus dem Kräftepaar von

wirkender Kraft und zugehöriger Reaktionskraft, in Abbildung 1b sind dies das Kräftepaar F und F_A . Bekannterweise sind Momente infolge von Kräftepaaren nicht ortsgebunden. Sie haben keine Bindung an eine feste Achse bzw. an ein Lager. Es handelt sich hier also stets um eine freie, allgemeine, ungebundene Momentenwirkung, welche in diesem Beitrag als Körpermoment M_K bezeichnet wird. Ein Ortsbezug entsteht nicht durch das Körpermoment M_K , sondern durch das in seiner Position definierte Reaktionsmoment M_A . Abbildung 1c zeigt und verdeutlicht die voneinander unabhängige Existenz von Kräfte- und Momentengleichgewichtsansätzen für allgemeine Kräftegruppen, wie dies u. a. von BALKE [1] mit Bezug auf EULER und ARCHIMEDES hervor gehoben wird.

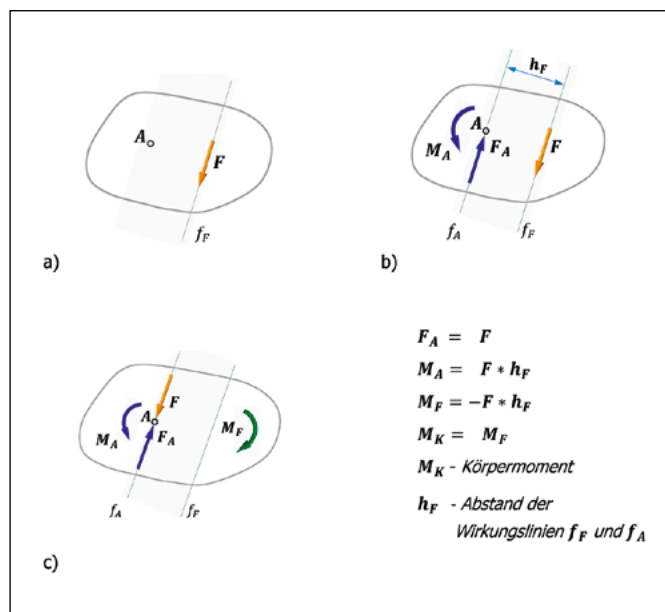


Abbildung 1: Allgemeine Kraftwirkung an einem ebenen, starren Körper (Bild: Autor)

3 Lagerkräfte an ebenen, statisch bestimmt gelagerten Tragwerken am Beispiel einer Fest-Los-Lagerung

Für den Fall, dass Lager A (Abbildung 2a) einen rotatorischen Freiheitsgrad besitzt (A als Festlager), würde die Kraft F den Träger um die senkrechte Achse durch den Punkt A in Drehung versetzen. Dies verhindert der zweite Lagerungspunkt, Lager B, welcher die Abstützung des Trägers gegen Verdrehung übernimmt. Lager B (Loslager) sichert hier das statische Gleichgewicht.

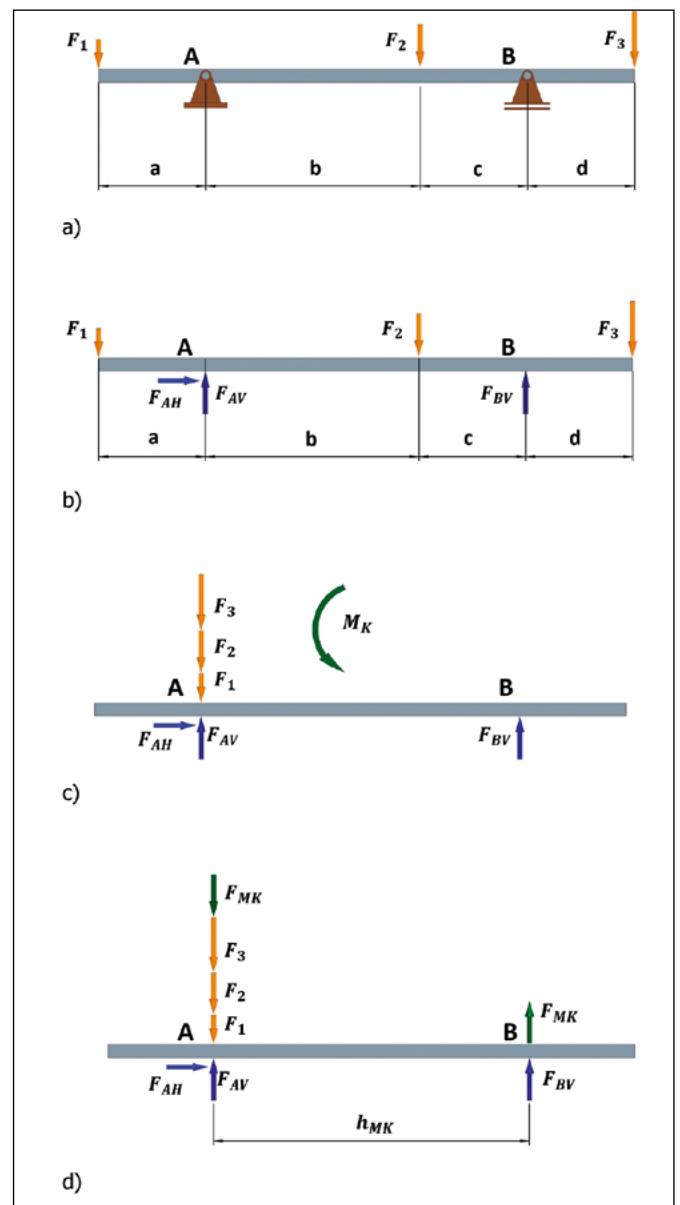


Abbildung 2: Träger mit Körpermoment M_K , Kräftepaar F_{MK} und Stützabstand h_{MK} (Bild: Autor)

Das unter Punkt 2 beschriebene Körpermoment M_K , welches durch Versatz der Kräfte F_1 , F_2 und F_3 auf Lager A entsteht, wird durch die Lager A und B abgestützt (Abbildung 2c) und wirkt als Kräftepaar mit seinen beiden entgegengesetzt orientierten Kräften F_{MK} auf die Lager A und B (Abbildung 2d).

Die Abstützung eines Körpermomentes M_K erfolgt unabhängig von dessen Entstehung. Ein allgemeines Körpermoment hat seine Ursache in durch beliebig in Position und Richtung auf einen Körper einwirkenden Kräften und sonstigen eingprägten Momenten. Das Moment M_K geht als Kräftepaar mit seinen Kräften F_{MK} in die zentralen Kraftansätze an den Lagern A und B ein.

In Bezug auf Abbildung 2 können für allgemeine Kraft- und Momentenansätze zur Berechnung der Lagerreaktionen an horizontalen Trägern die Gleichungen (1) bis (8) aufgestellt werden.

Die Berechnung des Körpermoments M_K erfolgt drehrichtungsorientiert aus den Momentenanteilen der versetzten Kräfte F_i , der Versatzabstände h_{Fi} und eventuell weiterer eingepprägter Momente M_i (Gleichung 1). Die positive Drehrichtung folgt der 2. Rechten-Hand-Regel.

Die Kräfte F_{MK} des Kräftepaars aus dem Körpermoment M_K werden mittels des wirksamen Stützabstandes h_{MK} zwischen den Lagern A und B (Abbildung 2d) nach Gleichung 2 ermittelt.

Die Berechnung der Lagerkräfte in den Lagerstellen erfolgt durch horizontale und vertikale Gleichgewichtsansätze an den Lagern entsprechend den Gleichungen (3) bis (8). Diese Gleichgewichtsansätze werden nur für das jeweils betreffende Lager und nicht für das gesamte Tragwerk aufgestellt.

$$M_K = \sum_{i=1}^n F_i * h_i + \sum_{i=1}^m M_i \quad (1)$$

$$F_{MK} = \frac{M_K}{h_{MK}} \quad (2)$$

$$\rightarrow A: F_{AH} + \sum_{i=1}^{n1} F_{Hi} = 0 \quad (3)$$

$$F_{AH} = - \sum_{i=1}^{n1} F_{Hi} \quad (4)$$

$$\uparrow A: F_{AV} - F_{MK} + \sum_{i=1}^{n2} F_{Vi} = 0 \quad (5)$$

$$F_{AV} = F_{MK} - \sum_{i=1}^{n2} F_{Vi} \quad (6)$$

$$\uparrow B: F_{BV} + F_{MK} = 0 \quad (7)$$

$$F_{BV} = - F_{MK} \quad (8)$$

4 Beispiele zur Berechnung von Lager- und Stabkräften nach dem Kräfte-Versatzverfahren

4.1 Lagerkräfte an einem abgewinkelten Träger

Beim abgewinkelten Träger nach Beispiel 2 (Abbildung 3a) wird Lager B (Loslager) am rechten oberen Ende angeordnet. Die eingepprägten Kräfte F_1 und F_2 werden nach Lager A, dem Festlager, versetzt. Das Kräftepaar des Körpermoments M_K orientiert sich in diesem Beispiel an der vorgegebenen Lage der Wirkungslinie f_{BH} des Lagers B und dem Abstand h_{MK} der Wirkungslinie f_{AH} von f_{BH} (Abbildung 3b).

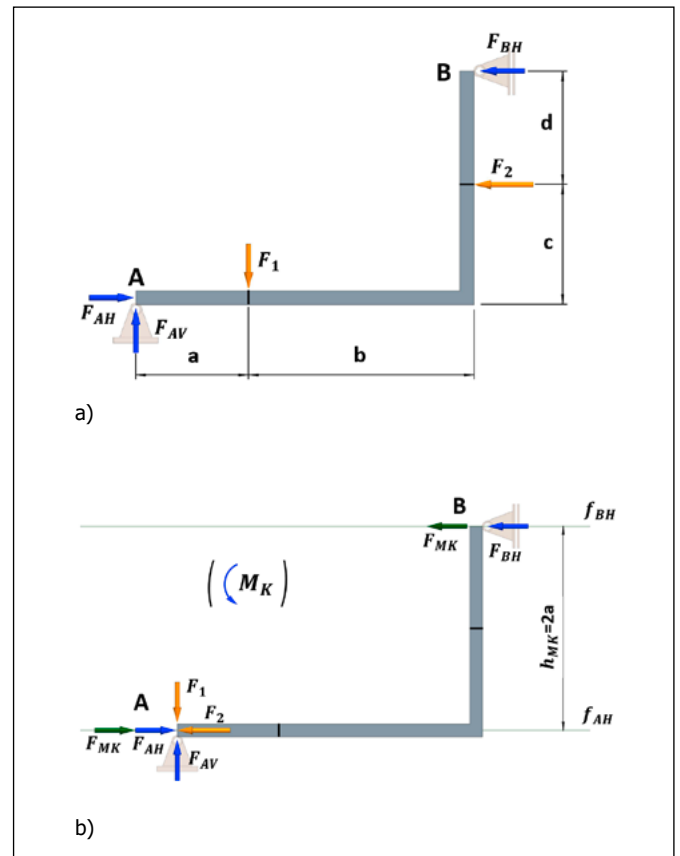


Abbildung 3: Abgewinkelter Träger mit einer vertikalen und einer horizontalen Kraft (Bild: Autor)

Kräfte F_1 und F_2 nach Lager A versetzt ($F_1 = 1F$; $F_2 = 2F$)

Die Berechnung der Lagerkräfte erfolgt analog zu den Gleichungen (1) bis (8):

$$M_K = -F_1 * a + F_2 * c = 1Fa \quad F_{MK} = \frac{M_K}{h_{MK}} = \frac{1Fa}{2a} = 0,5F$$

$$\rightarrow A: F_{AH} + F_{MK} - F_2 = 0 \quad F_{AH} = -F_{MK} + F_2 = 1,5F$$

$$\uparrow A: F_{AV} - F_1 = 0 \quad F_{AV} = F_1 = 1F$$

$$\rightarrow B: F_{BH} + F_{MK} = 0 \quad F_{BH} = -F_{MK} = -0,5F$$

4.2 Stabkräfte an einer Scheibe

Eine durch drei Stäbe abgestützte Scheibe zeigt Abbildung 4a. Eingepprägte Beanspruchungen seien die Kräfte F_1 , F_2 und das Moment M_1 . Der Schnittpunkt SP der nicht parallelen Wirkungslinien der Stabkräfte F_{S1} und F_{S2} tritt an die Stelle eines Lagers mit unbestimmter Lagerkraftorientierung (analog dem Festlager). Auf diesen Punkt werden die Kräfte F_1 und F_2 versetzt und das Körpermoment M_K zusammen mit M_1 bestimmt. Den Stützabstand h_{MK} bildet der Abstand des Schnittpunktes SP zur Wirkungslinie f_{FS3} (Bild 4c). Der Ansatz des Kräftepaars F_{MK} ergibt für den Punkt C direkt die Stabkraft F_{S3} . Im Schnittpunkt SP entsteht eine zentrale Kräftegruppe mit den gesuchten Stabkräften F_{S1} und F_{S2} .

5 Zusammenfassung

Im Beitrag wird für ebene, starre Körper mit Fest-Los-Lagerung die Anwendung des Kräfte-Versatzverfahrens vorgestellt. Das beschriebene Vorgehen löst sich von dem üblichen Ansatz der drei Gleichgewichtsbedingungen. Eingeprägte Kräfte sowie Momentenwirkungen durch diese und sonstige eingeprägte Momente werden in zentrale Kräftegruppen an geeigneten Lagerstellen des Körpers überführt. Die so entstehenden Kräfteanordnungen an den Lagern lassen sich meist ohne ein Gleichungssystem nach den gesuchten Lagerreaktionen auflösen. Das vorgestellte Verfahren bewahrt in allen Teilschritten die Äquivalenz zu den jeweiligen Ausgangsansätzen und kann somit als weitere und sichere Möglichkeit zur Bestimmung von Lagerreaktions- und Stabkräften angesehen werden. Ebenso eignet sich der vorgestellte Ansatz für die Lösung einer Vielzahl weiterer Grundaufgaben der Statik, wie z. B. zur Berechnung von Kräften an mehrteiligen Tragwerken und am Dreigelenkbogen, von Stabkräften an Fachwerken, von Gelenkkräften an Mechanismen und Schnittgrößen.

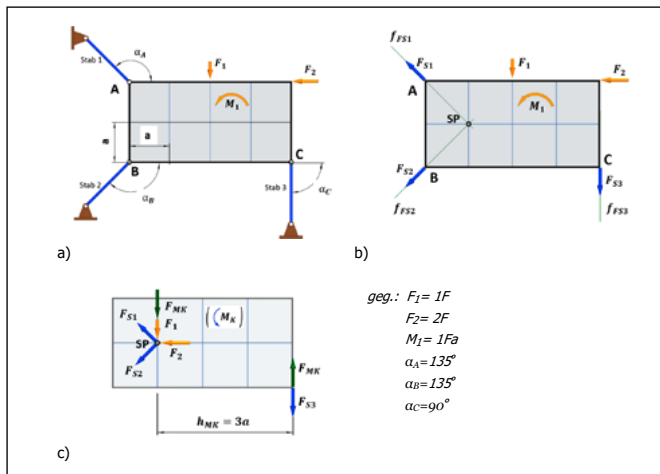


Abbildung 4: Berechnung der Stabkräfte F_{S1} , F_{S2} und F_{S3} (Bild: Autor)

Die Berechnung der Stabkräfte aus Abbildung 4 erfolgt analog zu den Gleichungen (1) bis (8):

$$M_K = -F_1 \cdot a + F_2 \cdot a + M_1 = 2Fa \quad F_{MK} = \frac{M_K}{h_{MK}} = \frac{2Fa}{3a} = \frac{2}{3}F$$

$$\rightarrow SP: \quad -F_{S1H} - F_{S2H} - F_2 = 0 \quad F_{S1} = -0,24F$$

$$\uparrow SP: \quad F_{S1V} - F_{S2V} - F_1 - F_{MK} = 0 \quad F_{S2} = -2,59F$$

$$\uparrow B: \quad -F_{S3} + F_{MK} = 0 \quad F_{S3} = F_{MK} = \frac{2}{3}F$$

Referenzen:

- [1] Balke, H.: Einführung in die Technischen Mechanik – Statik. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010

Kontakt:



Prof. Dr.-Ing. Andreas Holfeld

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

a.holfeld@oth-aw.de

20 Jahre angewandte Forschung am *Prüfstand für Druckluftantriebe und -technik (PDLT)* an der OTH Amberg-Weiden

Jan Mišák, B.Eng.
Dipl.-Ing. (FH) Harald Wirth
Prof. Dr.-Ing. Andreas P. Weiß

Zusammenfassung

Der *PDLT* wurde vor 20 Jahren konzipiert und aufgebaut, um Lehre, angewandte Forschung und Technologietransfer im Arbeitsgebiet der energieeffizienten Drucklufttechnik zu betreiben und die OTH Amberg-Weiden hier als Kompetenzstelle zu etablieren. Wie anhand einiger Projekte aufgezeigt, ist dies gelungen. Nicht zuletzt aufgrund der hochmodernen und stetig weiterentwickelten technischen Ausstattung des *PDLT*, deren Hauptkomponenten und Möglichkeiten kurz beschrieben werden. In der zweiten Dekade seiner Geschichte konnte der *PDLT* in verschiedenen Drittmittel-Forschungsprojekten zur Abwärmenutzung mittels Mikroexpansionsturbinen eingesetzt werden. Wie dargestellt, ist es dank des *PDLT* relativ einfach und unproblematisch möglich, neue Turbinenkonzepte mittels Druckluft zu untersuchen, bevor diese dann mit einem organischen Arbeitsmittel (Alkohole, Kohlenwasserstoffe, Siloxane) zum Einsatz kommen. Die Ausführungen werden durch zwei kurze Filmbeiträge (QR-Code) ergänzt.

Abstract

The *PDLT* was conceived and built up 20 years ago in order to serve for teaching, applied research and technology transfer purposes in the field of energy-efficient compressed air technology and to establish the OTH Amberg-Weiden as a center of expertise. As shown by some conducted projects, this goal has been achieved. Not least because of the *PDLT*'s ultra-modern and continuously developed technical equipment, whose main components and possibilities are briefly described. In the second decade of its history, the *PDLT* was used in various third-party funded research projects on waste heat recovery applying micro-expansion turbines. As described above, the *PDLT* simplifies the investigation of new turbine concepts using compressed air, before they are applied with an organic working medium (alcohols, hydrocarbons, siloxanes). The explanations are supplemented by two short film contributions (QR-Code).

1 Motivation, Zielsetzung und herausragende Projekte

Mit der Berufung auf das Lehrgebiet „Strömungsmaschinen und Thermische Maschinen“ zum Sommersemester 2000 übernahm Prof. Dr.-Ing. Andreas P. Weiß auch die Laborleitung für das Labor „Hydraulische Maschinen“ (Gebäude D, Raum B82 – heute „Strömungsmaschinen“). Zusammen mit Laboringenieur Dipl.-Ing. (FH) Harald Wirth musste die ca. 240 m² große Laborhalle mit Versuchsständen für die Laborpraktika, aber auch mit Versuchseinrichtungen für die angewandte Forschung und den Technologietransfer ausgestattet werden. Bei den beiden letztgenannten Punkten stellte

sich für Prof. Weiß die Frage, welche Themengebiete er neben der Lehre bearbeiten sollte. Diese Überlegungen wurden bereits im Frühjahr 2000 durch eine Anfrage des Amberger Unternehmens DEPRAG SCHULZ GMBH u. CO. nach fachlicher Unterstützung in eine konkrete Richtung gelenkt. Die DEPRAG hatte die Entwicklung eines Druckluft-Turbinenschleifers begonnen, und Prof. Weiß unterstützte diese fortan durch seine einschlägige Expertise. Bereits im Herbst stand ein erster Turbinenprototyp zur Messung an. Es fehlte nur ein Prüfstand, auf dem das Kennfeld der Druckluftturbine vermessen werden konnte: *Der Prüfstand für Druckluftantriebe und -technik (PDLT)*.

Im Rahmen einiger Abschlussarbeiten wurde der *PDLT* und dessen Herzstück – die Wirbelstrombremse – aufgebaut, so dass die Druckluft-Turbine stetig weiterentwickelt werden konnte und 2006 im DEPRAG-Turbinenschleifer in den Markt ging [1]. Die DEPRAG unterstützte den Aufbau des *PDLT* mit Sach- und Geldspenden und mit ihrem Ingenieurs-Know-how aus dem Sondermaschinenbau. Den *PDLT* in der Schallschutzkabine im Labor „Strömungsmaschinen“ zeigt Abbildung 1. Mittlerweile treiben Druckluftturbinen verschiedene Werkzeuge der DEPRAG an, die fortlaufend mithilfe des *PDLT* weiterentwickelt werden. Aufbauend auf dem Know-how und der Erfahrung aus der Druckluftturbinenentwicklung, entstand bei der DEPRAG, unterstützt durch Prof. Weiß und sein Team, sogar ein völlig neuer Produktzweig – die Green Energy Turbine (GET®). Mittels dieser neu entwickelten Turbine kann industrielle Abwärme nachverstromt werden.



Filmbeitrag: Green Energy Turbine (GET®)

Natürlich nutzen auch andere Industriepartner die Möglichkeiten des *PDLT* und die Expertise von Prof. A. P. Weiß und Dipl.-Ing. (FH) H. Wirth. Exemplarisch sei hier die Beauftragung durch die Firma E.A.R.S.-Deutschland für eine Untersuchung des „Exhaust Air Recovery System (E.A.R.S.)“ genannt. Bei diesem System wird die Abluft der Druckluftwerkzeuge und -anwendungen zum Kompressor zurückgeführt, so dass dessen Liefermenge erhöht und ein Potenzial zur Erhöhung des Wirkungsgrades des Druckluft-Gesamtsystems geschaffen wird. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden in einem Fachmagazin veröffentlicht [2].

Durch die Zusammenarbeit mit verschiedenen Firmen der Druckluftbranche wurde Prof. Weiß klar, dass die Drucklufttechnik eine wichtige Querschnittstechnologie ist, die in nahezu allen fertigen Betrieben zur Anwendung kommt, aber dennoch kaum in Ingenieurstudiengängen an Hochschulen vermittelt wird. Deshalb erarbeitete er eine Vorlesung „Energieeffiziente Drucklufttechnik“ für den Wahlbereich und führt regelmäßig studentische Projekte und Abschlussarbeiten zum Thema „Optimierung der Druckluftsysteme in Industriebetrieben“ durch. Die im *PDLT* und in diesen Projekten erarbeitete Erfahrung floss in verschiedene Druckluft-Workshops- und Seminare beim OTTI (Ostbayerisches Technologie Transfer Institut) -Kollef/ Regensburg, Haus der Technik Essen, IHK-Regensburg und auch bei einigen Industriepartnern ein. Als Mitglied des Programmkomitees der vom VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer), Fachabteilung „Kompressoren-, Druckluft- und Vakuumtechnik“ veranstalteten Konferenz „3rd International Rotating Equipment Conference – Compressors Users International Forum 2016“ konnte er einen weiteren Beitrag leisten und sich auch international in der Drucklufttechnik vernetzen. So wurde die Zielsetzung, die OTH Amberg-Weiden als kompetente Anlaufstelle für die energieeffiziente Drucklufttechnik in angewandter Forschung und Lehre zu etablieren, vollumfänglich erreicht – vor allem auch Dank des *PDLT*.

Der *PDLT* ermöglicht es, für Druckluftantriebe mit einer Antriebsleistung von wenigen Watt bis zu 6 kW Kennlinien bezüglich Drehzahl, Drehmoment, Leistung, (Druck-)Luftverbrauch und Wirkungsgrad zu ermitteln. Mithilfe hochgenauer Drucksensoren kann die Verteilung des Drucks in verschiedenen Bereichen der Turbinen oder Druckluftmotoren gemessen und so eine Optimierung der Antriebe durchgeführt werden. Es ist aber auch möglich, starre Bauteile wie Kupplungen, Filter oder Rohreinbauten auf Druckverluste und maximale Durchflussmengen zu untersuchen und somit eventuell vorhandene Schwachstellen zu finden. Mit der hochgenauen Messtechnik, die zum

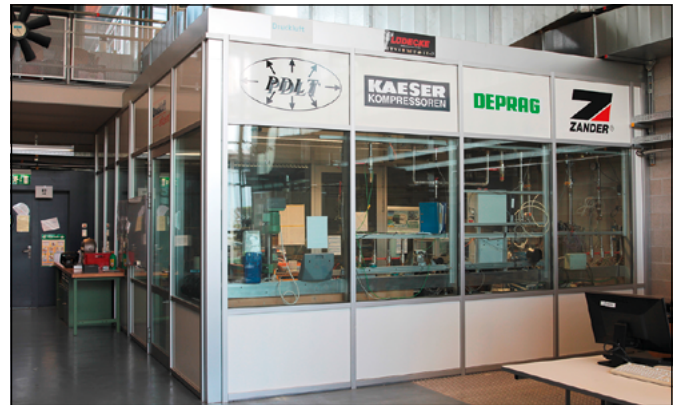


Abbildung 1: Der *PDLT* in der Schallschutzkabine im Labor für Strömungsmaschinen (B82)

Abschließend in diesem Rückblick möchten wir die großzügige Unterstützung der Druckluftaktivitäten an der OTH Amberg-Weiden durch die Firma KAESER KOMPRESSOREN SE /Coburg erwähnen. Sowohl die Erstausrüstung des *PDLT* mit Kompressoren und Kältetrocknern als auch deren Ersatz im Jahr 2014 wurde von der Firma KAESER als Sachspende im insgesamt hohen fünfstelligen Eurobereich geleistet.

2 Der Prüfstand für Druckluftantriebe und -technik (*PDLT*)

Seit 2000 ist der Prüfstand für Druckluftantriebe und -technik (*PDLT*) in Betrieb und wurde seither ständig erweitert und modernisiert. Um den Umfang nicht zu sprengen, kann in diesem Bericht nur auf die Kernkomponenten und die Kernfunktion eingegangen werden.

2.1 Aufgaben und Funktion

Der *PDLT* ermöglicht es, für Druckluftantriebe mit einer Antriebsleistung von wenigen Watt bis zu 6 kW Kennlinien bezüglich Drehzahl, Drehmoment, Leistung, (Druck-)Luftverbrauch und Wirkungsgrad zu ermitteln. Mithilfe hochgenauer Drucksensoren kann die Verteilung des Drucks in verschiedenen Bereichen der Turbinen oder Druckluftmotoren gemessen und so eine Optimierung der Antriebe durchgeführt werden. Es ist aber auch möglich, starre Bauteile wie Kupplungen, Filter oder Rohreinbauten auf Druckverluste und maximale Durchflussmengen zu untersuchen und somit eventuell vorhandene Schwachstellen zu finden. Mit der hochgenauen Messtechnik, die zum

Teil durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt geprüft worden ist, können auch Messaufbauten von Drittfirmen oder anderen Laboren gegengemessen und verifiziert werden. Folgender Ablaufplan stellt die Grundbausteine und den Aufbau des *PDLT* schematisch dar.

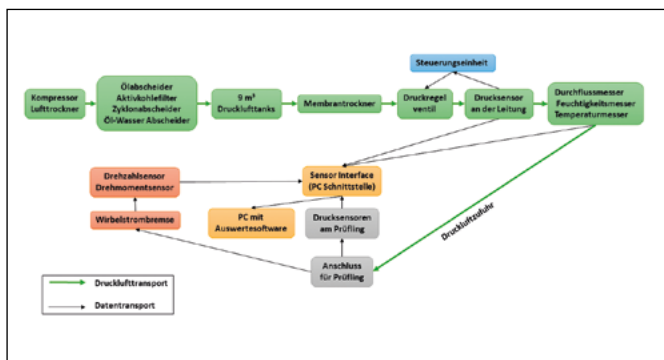


Abbildung 2: Bausteine und Aufbau des *PDLT*

2.2 Druckluftversorgung und Aufbereitung

Zwei Schraubenkompressoren KAESER SK 25 (Position 1, Abbildung 3) mit einer Leistung von je 15 kW erzeugen die für die Versuche benötigte Druckluft und versorgen zudem den gesamten Campus Amberg der OTH Amberg-Weiden. Ein Kältetrockner KAESER TB 26 (Position 3) je Kompressor trocknet die vorher durch einen Zyklonabscheider (Position 2) grob gereinigte Druckluft. Mit einer Microfilter-Aktivkohle-Kombination (KAESER FFG 28, Position 4) wird Druckluft so aufbereitet, dass diese annähernd dem Standard in der Pharmaindustrie entspricht.

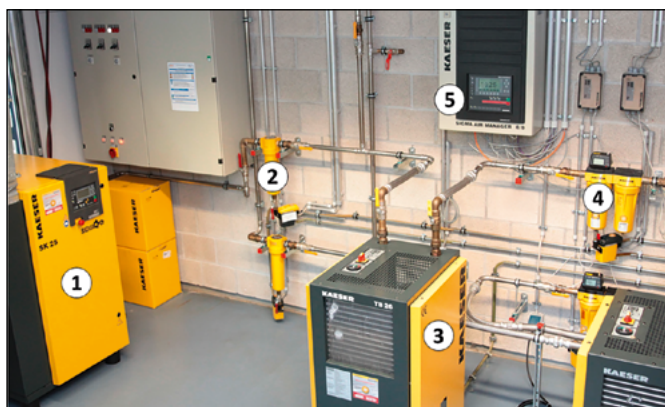


Abbildung 3: Kompressorenraum der OTH Amberg-Weiden, Campus Amberg

Um Vereisung an den Turbinenschaufeln zu vermeiden, kann der Drucktaupunkt optional durch einen Membrantrockner (KAESER KMM8) auf -40 °C gesenkt werden. Die nicht verbrauchte Druckluft wird in neun Druckluftbehältern mit einem Volumen von je 1 m^3 gespeichert, so dass für Messungen kurzzeitig auch ein Vielfaches der Liefermenge der Kompressorenanlage bereitgestellt werden kann. Die Geräte zur Druckluftherzeugung und Aufbereitung sind in der Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Geräte zur Druckluftherzeugung und Aufbereitung

Position	Bezeichnung	Funktion	Parameter
1	KAESER SK 25	Kompressor, Druckluftherzeugung	$1,72\text{ m}^3/\text{min}$ Druckluft bei 14 barü
2	KAESER ZK 02	Zyklonabscheider, Abscheidung von Flüssigkondensat	$2,11\text{ m}^3/\text{min}$ bei 11 barü
3	KAESER TB 26	Trocknung der Druckluft	Durchfluss bis $5\text{ m}^3/\text{min}$ bei 10 barü
4	KAESER FFG 28	Microfilter-Aktivkohle-FILTER, feine Reinigung	Drucktaupunkt $+3\text{ °C}$
5	KAESER Sigma Air Manager 8/8	Steuerung der Kompressoranlagen	Durchsatz $2,83\text{ m}^3/\text{min}$
Nicht im Bild	KAESER Aquamat 4	Öl-Wasser-Abscheider, Kondensataufbereitung	Ansteuerung von bis zu 8 Kompressoren
Nicht im Bild	KAESER KMM8	Membrantrockner, Trocknung der Druckluft	Max. 20 mg/l restlichen Kohlenwasserstoffe im Kondensat
Nicht im Bild	KAESER KMM8	Membrantrockner, Trocknung der Druckluft	Drucktaupunkt -40 °C

2.3 Messaufbau und Messtechnik

Am *PDLT* sind in dem aktuellen Ausbaustand die in der nachfolgenden Tabelle 2 aufgeführten Messgeräte verbaut. Die Leistung des Prüflings wird über eine Wirbelstrombremse (Position 1a in Abbildung 4) in Wärme umgewandelt und über den hauseigenen Kühlkreislauf abgeführt. Die Wirbelstrombremse und deren Erreger-einheit (Position 1a) werden vom Controller (Position 1b) angesteuert, der auch Drehzahl und Drehmoment der Bremse erfasst und an den Datenerfassungs-PC (Position 2) weitergibt. Über sieben Einzeldrucksensoren (Position 3) werden Ein- und Austrittsdruck und ggf. der interne Druckverlauf bestimmt. Das Druckregelventil (Position 4a) zusammen mit seiner elektronischen Steuer- und Regelungseinheit (4b) stellen sicher, dass der gewünschte Turbineneintrittsdruck in einem Bereich von $\pm 0,05\text{ bar}$ eingehalten wird. Zwei unterschiedlich auflösende Durchflussmessgeräte (Position 5a) bestimmen einzeln oder parallelgeschaltet den Massenstrom durch den Prüfling. Die Feuchte der Druckluft und ihre Temperatur werden mit (6) und (7) bestimmt. Alle Messdaten werden über den AD-Wandler (Position 8) auf den Datenerfassungs-PC übertragen, der sie mittels einer in LabVIEW (Version 19.0) [3] erstellten Software erfasst wo sie zur späteren Auswertung gespeichert werden.

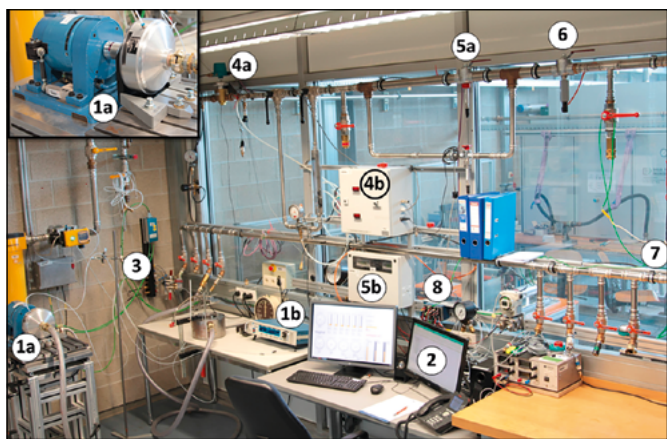


Abbildung 4: Der Messaufbau des PDLT

Beispielhaft zeigt Abbildung 5 die Auswertung einer Messung an einer aktuellen Versuchsturbine [4]. Hauptzielgröße ist im Allgemeinen der isentrope Expansionswirkungsgrad, der sich aus dem Quotient der mit der

Wirbelstrombremse ermittelten mechanischen Leistung und der errechneten isentropen Expansionsarbeit pro Zeit des Druckluftmassenstroms ergibt. Zusätzlich ist der durch die Projektarbeit von Jan Mišák [5] ermittelte Messfehler eingezeichnet.

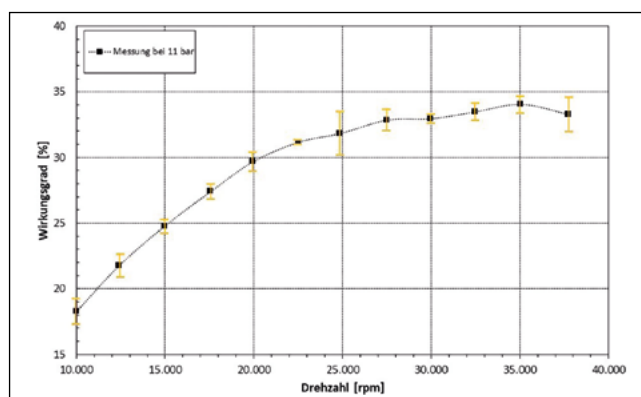


Abbildung 5: Beispiel einer Wirkungsgradbestimmung inklusive Messfehler an einer aktuellen Versuchsturbine [4] im PDLT

Tabelle 2: Messtechnik des PDLT

Position	Parameter	Bezeichnung	Funktion	Messbereich	Messgenauigkeit
1a	Drehmoment Drehzahl	Magtrol Wirbelstrombremse WB/PB 65	Drehmoment - und Drehzahlermittlung	Bremsleistung 6 kW, Max. Drehmoment 10 Nm, Max. 60.000 rpm	± 0,3 bis 0,5 % vom Endwert bei Bremsleistung
-		Kistler 4503A		Max. Drehmoment 0,2 Nm, Max. 50.000 rpm	Genauigkeitsklasse 0,2
1b		Magtrol DSP 7001	Programmierbarer Regler, Auswerteeinheit der Bremse	Max. Drehmoment 99,99 Nm, Max. Drehzahl 199.999 rpm	± 0,02 % Bei der Ermittlung von Drehmoment ± 0,01 % bei der Ermittlung von Drehzahl
2	Messdaten	Dell PC	Verarbeitung & Speicherung der digitalisierten Daten	-	64 Bit
3	Druck (7 Stück)	Drucksensor HBM P8AP (Absolutdruck)	Druckermittlung	0 – 10 bar, resp. 0 – 20 bar, abs.	Genauigkeitsklasse 0,3 (bezogen auf den Endmesswert)
4a	Druck	TESCOM Präzisionsregler ER3000	Einstellbare Druckreduktion	0 – 2,5 bar 0 – 10 bar	0,5 % vom Messbereich
4b		Steuerungseinheit & Regelungseinheit	Steuerung und Regelung des Druckreglers	-	-
5a	Volumenstrom	Postberg Druckluftzähler ZE FMP 206	Volumenstromermittlung Massenstromermittlung	DN 20: 0,57 bis 223 Nm ³ /h DN 40: 2,26 bis 904 Nm ³ /h	± 2,5 % vom Messwert + 0,15 % Endwert
5b		Auswerteeinheiten der Druckluftzähler			-
6	Feuchte	Taupunktmessgerät EE 371	Ermittlung der Luftfeuchtigkeit	-60 °C bis 60 °C 20 bis 200.000 ppm	5 ppm +9 % vom Messwert
7	Temperatur	Thermoelement Typ K	Temperaturmessung	-200 °C bis 1250 °C	± 0,5 % des Messwertes, mindestens aber 1 °C
8	AD-Wandlung	Interface National Instruments cDAQ-9178	Schnittstelle zwischen Messgeräten und PC	Je nach Kanal	16 bis 32 Bit

3 Aktuelle Projekte und zukünftige Ausrichtung

Die Entwicklung von schnelllaufenden Druckluftturbinen zum Antrieb von Werkzeugen führte aufgrund vieler Anfragen aus der Industrie und der Wirtschaft zum heutigen Arbeitsschwerpunkt von Prof. Weiß und seinem Team: „Mikroexpansionsturbinen für die Abwärmeverstromung und die Energiespeicherung“. Hierbei wird die Turbine mit einem High-Speed-Generator kombiniert und kann in der Industrie die Restenergie in den anfallenden Abgasen oder Abdämpfen zum Teil rückverstromen. Ein solcher Aufbau wurde am BHKW (=Blockheizkraftwerk) der OTH Amberg-Weiden bereits erfolgreich getestet [6]. Fallen, wie häufig, diese Abgase und Abdämpfe nur auf Atmosphärendruck an, ist es notwendig, einen Dampfkraftprozess (ORC = Organic Rankine Cycle) zwischenschalten, der das notwendige Druckgefälle für die Turbine erzeugt. Aufgrund der geringen Temperaturen der Abwärme werden als Arbeitsmittel nicht Wasserdampf, sondern Alkohole, Kohlenwasserstoffe oder Siloxane eingesetzt.

Beispielhaft sei hier das KoKWK (Kompetenzzentrum für Kraft-Wärme-Kopplung)-Projekt „Mikroexpansionsturbinen mit schnelllaufenden Generatoren zur Verstromung von Abwärme in der Kraft-Wärme-Kopplung oder anderen industriellen Prozessen“ genannt, im Rahmen dessen eine neue Turbinenarchitektur ausgelegt und zunächst in verkleinerter Ausführung mit Druckluft im *PDLT* betrieben und optimiert wurde [7], bevor sie in größerem Maßstab in der ORC-Versuchsanlage am Zentrum für Energietechnik (ZET) der Universität Bayreuth mit dem Arbeitsmittel Hexamethyldisiloxan erfolgreich getestet wurde [8]. Im aktuellen Anschlussprojekt (Bayerische Forschungsförderung, BFS) „*TurboSmart* – adaptive Mikroexpansionsturbine zur Energierückgewinnung“ wird diese Turbine mit ursprünglich starrer Geometrie zu einer Turbine mit variabler Geometrie zur Anpassung ihrer Schluckfähigkeit weiterentwickelt. Auch hier wird das Grundkonzept zunächst mit einem Demonstrator für Druckluft im *PDLT* überprüft [9], bevor die Technologie in der Versuchsturbine mit Hexamethyldisiloxan am ZET zum Einsatz kommt. Die Abbildung 6 zeigt beispielhaft den Vergleich von Messergebnissen aus dem *PDLT* mit Ergebnissen der 3D-Strömungssimulation für den ANH-Demonstrator (ANH = Adjustable Nozzle Height).

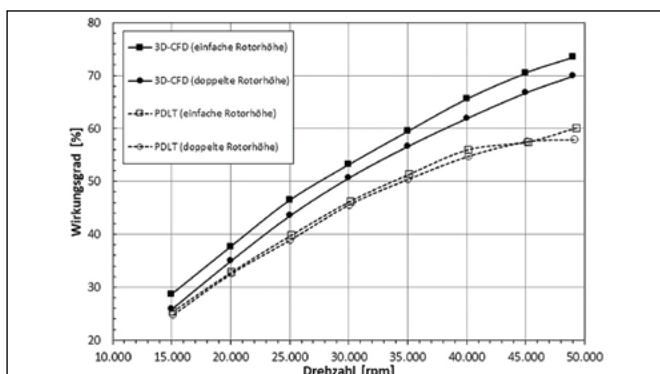


Abbildung 6: Vergleich vom gemessenen (*PDLT*) zum gerechneten (3D-CFD) Wirkungsgrad für den ANH-Demonstrator [9]

In einem weiteren internationalen Kooperationsprojekt mit dem Titel „Low cost turboexpanders for decentralized energy applications – possibilities of 3D print manufacturing from modern plastic materials“ nutzen derzeit Kollegen (Abbildung 7) von der Technischen Universität in Prag intensiv den *PDLT*, um die gemeinsam mit Prof. Weiß ausgelegten Mikroturbinen zu testen. Diese sehr kleinen Turbinen (< 1kW) sollen für die Nutzung von Niedertemperaturabwärme mittels Absorptionsprozessen eingesetzt werden und können aufgrund der geringen Temperatur aus Kunststoff 3D-gedruckt werden, um die Kosten zu reduzieren [10], [11].

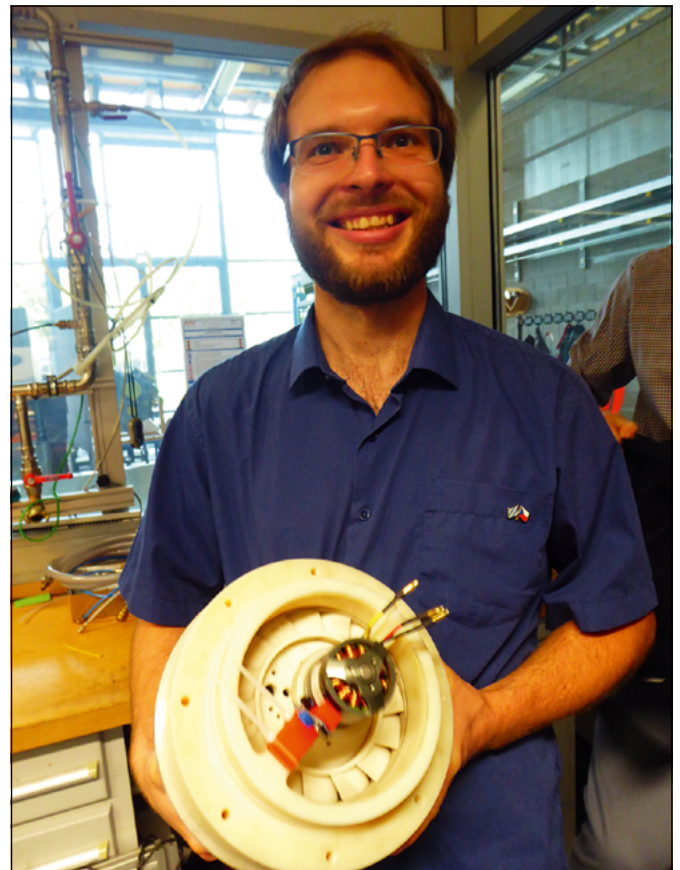


Abbildung 7: Doktorand Ing. Václav Novotný von UCEEB (University Centre of Energy Efficient Buildings) / Technische Universität in Prag mit der 3D gedruckten Kunststoffturbine im *PDLT*

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der Prüfstand für Druckluftantriebe und -technik (*PDLT*) wird nun seit 20 Jahren erfolgreich in der Lehre, der angewandten Forschung und für den Technologietransfer in unterschiedlichen Projekten eingesetzt und hat sich als sehr wertvolles und breit einsetzbares Werkzeug erwiesen. Ursprünglich nur für die Entwicklung von Druckluftantrieben und -komponenten konzipiert und gebaut, dient er nun regelmäßig für Vor- und Prinzipuntersuchungen an neuen Turbinen und deren Komponenten im Rahmen von F&E-Projekten für die Zukunftstechnologien „Wärmerückgewinnung und Energiespeicherung“. Unter dem symbolischen Dach des KoKWK arbeiten Prof. Weiß und sein Team schon an den zukünftigen Projekten, wie z. B. „TeSeLA – Thermische Speicherung elektrischer Energie mittels Absorption“.



Filmbeitrag: Mikroexpansionsturbinen für die Abwärmeverstromung

Referenzen:

- [1] A. P. Weiß, R. Pfeiffer, „Druckluftwerkzeuge: Turbo statt Lamellenmotor“, *Technik in Bayern* 1/2007, S. 14 – 15.
- [2] A. P. Weiß, „Höhere Energieeffizienz – Theoretische Überlegungen zu einem idealen Druckluftsystem mit geschlossenem Luftkreislauf“, *O+P Fluidtechnik* 5/2009, S. 2 – 6.
- [3] LabVIEW. 19.0. National Instruments. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ni.com/pdf/manuals/375395e.html>
- [4] A. P. Weiß, P. Streit, T. Popp, P. Shoemaker, T. Hildebrandt, V. Novotny, J. Spale, „Uncommon turbine architectures for distributed power generation – development of a small velocity compounded radial re-entry turbine: Paper submitted for publication (peer reviewed) in Archives of Thermodynamics, Polish Academy of Sciences“, 2020.
- [5] J. Mišák, „Projektarbeit zum Thema Messtechnik, Fehlerrechnung & Design of Experiments anhand des *PDLT* Prüfstands – Teil 1“. Projektarbeit, OTH Amberg-Weiden, 2020.
- [6] N. O'Connell, R. Lechner, A. P. Weiß und M. Brautsch, „„Proof of Concept“ eines innovativen Abgasturbinensystems“, *BWK, Das Energiemagazin* 9/2018, S. 10 – 13.
- [7] A. P. Weiß, G. Zinn, „Micro turbine generators for waste heat recovery and compressed air energy storage: 15th conference on Power System Engineering, Thermodynamics & Fluid Flow – ES 2016 June 09 – 10, 2016, Pilsen, Czech Republic“, 2016.
- [8] A. P. Weiß et al., „Experimental characterization and comparison of an axial and a cantilever micro-turbine for small-scale Organic Rankine Cycle“, 2018, *Applied Thermal Engineering* 140 (2018) 235 – 244, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.05.033.
- [9] P. Streit, T. Popp, J. Winkler, R. Scharf, A. P. Weiß, „Numerical and Experimental Investigation of Different Technologies for Adjusting the Swallowing Capacity of a Cantilever ORC Turbine: Paper submitted for presentation on 19th Conference on Power System Engineering, Thermodynamics & Fluid Flow: ES 2020, 9 – 10 September 2019, UWB Pilsen“, 2019.
- [10] A. P. Weiß et al., „Customized ORC micro turbo-expanders – From 1D design to modular construction kit and prospects of additive manufacturing“, 2020, *Energy* 209 (2020) 118407, doi: 10.1016/j.energy.2020.118407.
- [11] J. Spale, V. Novotny, V. Mares und A. P. Weiß, „3D Printed Radial Impulse Cantilever MicroTurboexpander for Preliminary Air Testing: Paper submitted for presentation on 19th Conference on Power System Engineering, Thermodynamics & Fluid Flow: ES 2020, 9-10 September 2019, UWB Pilsen“, 2020.

Projektpartner:

DEPRAG SCHULZ GMBH u. CO., Amberg

University Centre for Energy Efficient Buildings of Czech Technical University in Prague, Buřtřhrad, Czech Republic

Universität Bayreuth, Zentrum für Energietechnik (ZET), Bayreuth

Fördergeber:

Bayerisches Staatsministerium für
Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst



Bayerisch-Tschechische
Hochschulagentur



Česko-bavorská
vysokořkolská agentura



Bayerische
Forschungsstiftung

Kontakt:



Jan Miřák, B.Eng.

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

j.misak@oth-aw.de



Dipl.-Ing. (FH) Harald Wirth

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

h.wirth@oth-aw.de



Prof. Dr.-Ing. Andreas P. Weiß

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

a.weiss@oth-aw.de

Simon Hofmann¹
Dr.-Ing. Philipp Ritt²
Michael Mark, B.Eng.¹
Prof. Dr. Ralf Ringler¹

1) Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, Weiden
2) Nuklearmedizinische Klinik, Universitätsklinikum Erlangen, Erlangen

Entwicklung eines Verfahrens zur Inbetrieb- nahme und Kalibrierung von Thermolumineszenz- detektoren mittels eines Cs-137- Prüfstrahlers

Zusammenfassung

Die größte Herausforderung der Messung von Strahlungsdosis im oder am menschlichen Körper, bzw. allgemein *in vivo*, ist die Größe der Dosismesskammer. Thermolumineszenzdetektoren (TLDs) bieten hier den Vorteil, dass aufgrund der Größe sowohl *in vivo* als auch *in vitro* Messungen ermöglicht werden. TLDs vom Typ MCP können eine Dosis von wenigen μGy detektieren und zeigen eine gute Gewebeäquivalenz. Um die Detektoren in Betrieb nehmen zu können, müssen diese vorerst stabilisiert und kalibriert werden. Mittels eines Cs-137 Prüfstrahlers kann die benötigte Stabilisierung der TLDs vorgenommen werden. Aufgrund der geringen Dosisleistung des Prüfstrahlers ist die Kalibrierung der Detektoren ein aufwendiges Verfahren.

Abstract

The greatest challenge in measuring radiation doses in or on the human body, or in general *in vivo*, is the size of the dose measuring chamber. Thermoluminescence detectors (TLDs) offer the advantage that, due to their size, both *in vivo* and *in vitro* measurements are possible. TLDs of the MCP type can detect a dose of a few μGy and show good tissue equivalence. Before the detectors can be put into operation, they must first be stabilized and calibrated. The TLDs can be stabilized using a Cs-137 test source. The calibration of the detectors is a complex process due to the low dose rate of the test source.

1 Einleitung

Zur Dosisbestimmung gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Messgeräten, welche sich durch ihre Wirkungsprinzipien unterscheiden. Je nach Messgerät lassen sich die Dosiswerte *in vitro* (an Phantomen, Experimenten etc.) oder auch *in vivo* (im/am menschlichen Körper) ermitteln. Letzterem sind allerdings einige Limitationen gesetzt, weshalb nicht jedes Messgerät für diesen Zweck geeignet ist. Ein entscheidender Faktor dabei ist unter anderem die Größe der Messkammern. Viele Detektoren sind schlichtweg zu groß oder unhandlich, um Messungen am Menschen durchführen zu können. Für *in vivo* Untersuchungen werden hauptsächlich kleine, gewebeverträgliche Detektoren benötigt, welche zudem leicht am Körper platziert werden können. Diese Vorteile bieten sogenannte „Thermolumineszenzdetektoren“ (TLD). Sie weisen eine Größe von wenigen Millimetern auf und benötigen zur Aufnahme der Dosis keine weitere Elektronik, was das Handling stark

vereinfacht. Mit den TLDs sind daher sowohl *in vitro* als auch *in vivo* Messungen möglich. Bei den TLDs handelt es sich um ein „Naturprodukt“, d. h. einen Kristall, welcher mit verschiedenen Elementen gezielt verunreinigt wird, um die gewünschten Eigenschaften zu erhalten. Demzufolge ist kein TLD identisch mit einem anderen, sondern es gibt immer minimale Unterschiede beispielsweise in der Masse oder der Oberflächenbeschaffenheit der Detektoren. Selbst kleinste Verunreinigungen an der Oberfläche können die Empfindlichkeit der TLDs beeinträchtigen. Diese Faktoren wiederum haben Auswirkungen auf das Messverhalten der einzelnen TLDs, weshalb eine individuelle Kalibrierung jedes einzelnen Detektors notwendig ist. In diesem Artikel wird ein Verfahren zur Inbetriebnahme und Kalibrierung von 39 Thermolumineszenzdetektoren mittels eines Cs-137 Prüfstrahlers vorgestellt. Vor der Kalibrierung werden die Detektoren einer Stabilisierung unterzogen, wobei die TLDs mehrmals mit dem Cs-137 Prüfstrahler bestrahlt und anschließend wieder ausgeheizt werden.

2 Inbetriebnahme der TLDs

Um die TLDs auswerten zu können, sind vor allem eine Ausleseeinheit (Reader) und ein spezieller Ofen für das Annealing – Ausheizen der TLDs zum Löschen der gespeicherten Dosis – und Pre-Annealing – Tempern der TLDs auf niedriger Temperatur zum Auslöschen niederenergetischer Peaks in der Glühkurve – notwendig. Des Weiteren wird eine Vakuumpinzette für das Handling der TLDs verwendet. Dadurch wird vermieden, dass die Detektoren durch Berührungen mit der Hand verunreinigt werden und somit die Empfindlichkeit nicht beeinträchtigt wird. Die Aufbewahrung erfolgt in einer beschrifteten Box, wobei jedes TLD seinen festen Platz hat. Dies ist notwendig, da die Detektoren einzeln kalibriert werden und unterschiedliche Kalibrierungsfaktoren haben. Bei neuen Detektoren muss vor der Kalibrierung eine mehrmalige Bestrahlung, welche die Stabilität der TLDs gewährleistet, vorgenommen werden.

2.1 Anwendung und Charakterisierung von MCP-Material

TLD-100H ist ein mit Magnesium, Kupfer und Phosphor dotiertes Lithiumfluorid (LiF:Mg,Cu,P), weshalb es häufig den Namen MCP (**M**agnesium, **C**opper, **P**hosphorus) trägt. Es kann in Form von Plättchen, Scheibchen, Stäbchen oder als Pulver gefertigt werden. Die MCP-Detektoren sind bis zu einer Dosis von zwei Sievert mit zwei-prozentiger Abweichung linear. Darüber hinaus liegt die Abweichung der Linearität bis zehn Sievert bei fünf Prozent und bis 20 Sievert bei zehn Prozent. Des Weiteren hat die Dosisleistung der verwendeten Strahlung keinen Einfluss auf die Messung. Das thermische Fading von MCP ist bei Raumtemperatur kleiner als fünf Prozent in sechs Monaten. Das Maximum des Emissionsspektrums weist eine Wellenlänge von 350 bis 400 nm auf [1]. Die Energieabhängigkeit der Photonen von MTS-Material im Energiebereich von 30 keV bis 1,3 MeV ist mit weniger als 20 % beim MCP Material gegeben [2].

Der große Vorteil der MCP-Detektoren ist die sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber ionisierender Strahlung im Vergleich zu anderen Materialien [3]. Bei LiF:Mg,Cu,P können dementsprechend schon Dosen von $< 1 \mu\text{Gy}$ erfasst werden [2]. Diese Schwelle ist jedoch stark von der Hintergrundstrahlung (Background) abhängig und kann leicht variieren [4].

2.2 Stabilisierung der TLDs

Vor der Verwendung und Kalibrierung der TLDs müssen diese „warm gestrahlt“ werden. Darunter wird das wiederholte Bestrahlen und Ausheizen (Annealing) der Detektoren verstanden. Hierdurch wird die Stabilität der Ergebnisse sichergestellt, d. h. die applizierte Dosis muss mit der gemessenen Dosis bzw. der erhaltenen Lichtmenge übereinstimmen. Die Stabilität für jedes TLD ist dadurch

erkennbar, dass die Anzahl der Counts (Integral der Glühkurve über die Auslesedauer) bei gleicher applizierter Dosis eine ähnliche Größe zeigt; d. h. es liegt eine gewisse Wiederholgenauigkeit bei den TLDs vor.

Zur Bestrahlung wird ein Cs-137-Prüfstrahler verwendet. In der gewählten Versuchsanordnung (siehe Abbildung 1) variiert die Dosisleistung, welche auf die TLDs einwirkt, leicht, da der Prüfstrahler nur auf einer Kugeloberfläche eine konstante Dosisleistung aufweist (isotrop). Im Versuchsaufbau befinden sich die Detektoren direkt vor dem Prüfstrahler, wodurch sich für die TLDs kleine Schwankungen der Dosis ergeben. Dieser Fehler nimmt mit zunehmender Bestrahlungsdauer ab und kann somit minimiert werden. Bei fest definiertem Abstand und gleichbleibender Bestrahlungszeit können demzufolge die TLDs mit einer relativ konstanten Dosis bestrahlt werden.

Mit einer Aktivität von ca. 3,04 MBq des Strahlers (Stand März 2020) und einer selbst entwickelten Bestrahlungskonstruktion (siehe Abbildung 1) ergibt sich eine Dosisleistung von ca. 25,9 $\mu\text{Gy/h}$ für den Anteil, welcher bei den TLDs ankommt. Der Abstand zwischen TLDs und Strahlungsquelle beträgt dabei drei Zentimeter.

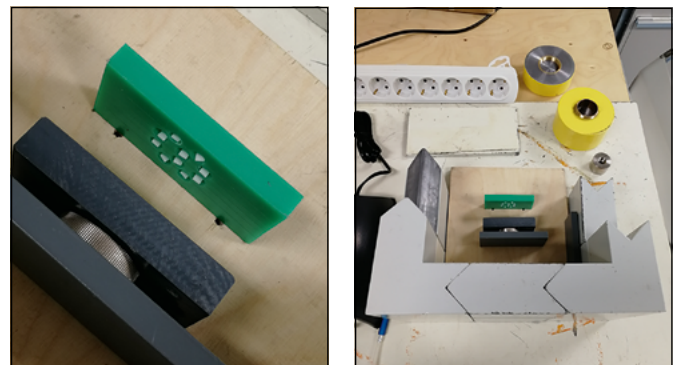


Abbildung 1: Konstruktion zur Bestrahlung der TLDs mit einer Cs-137-Quelle; linkes Bild, von unten nach oben: Bleiplatte zum Strahlenschutz, eingeschraubter Prüfstrahler, graue Kunststoffplatte mit Gewinde für Prüfstrahler, grüne Kunststoffplatte mit Bohrungen für TLDs; rechtes Bild: Bleiburg mit Konstruktion

Neben der Dosisleistung ist die Bestrahlungsdauer der zweite entscheidende Parameter für die Dosisbestimmung. Die Dosis und somit die Zeit der Bestrahlung muss groß genug sein, um sich aus dem Bereich der Hintergrundstrahlung (Background) hervorzuheben. Die TLDs werden für 20 Minuten bestrahlt, was rechnerisch eine Dosis von ca. 8,63 μGy ergibt und sich die Peaks infolgedessen von der Hintergrundstrahlung abheben.

Zur Stabilisierung der TLDs werden diese zehn Bestrahlungszyklen unterzogen und jeweils nach dem fünften und zehnten Zyklus ausgelesen. Diese Bestrahlungen werden vorerst ohne Pre-Annealing vor dem Auslesen durchgeführt. Beim elften Zyklus wird ein entsprechendes Pre-Annealing hinzugefügt und beim Zwölften die Heizrate beim Auslesen der TLDs von 10 K/s auf 25 K/s erhöht.

3 Kalibrierung der TLDs

Zur Vorbereitung der eigentlichen Kalibrierung der TLDs müssen gewisse Parameter ermittelt werden, welche die Eigenschaften eines jeden Thermolumineszenzdetektors darstellen. Darunter zählen die „Zero Counts“, die „Device Sensitivity“ und die „Crystal Sensitivity“. Alle drei Kenngrößen können direkt mit der Ausleseeinheit „lexsysmart“ gemessen werden und haben Einfluss auf die spätere Kalibrierung.

Im ersten Schritt müssen die Zero Counts ermittelt werden. Dabei werden die TLDs mittels Annealing ausgeheizt, um alle noch gespeicherten Informationen bzw. die Dosis zu „löschen“. Die Elektronen in den Traps werden in das Valenzband zurückgeführt. Anschließend werden die counts per channel (cpc) der leeren TLDs gemessen und dieser Wert als Zero Counts gespeichert. Daraus lässt sich ein Mittelwert mit Standardabweichung bilden. Die cpc der Zero Counts eines TLDs werden bei jeder Messung mit dem TLD vom Ergebnis subtrahiert.

Für die Device Sensitivity und die Crystal Sensitivity werden jeweils bestrahlte TLDs verwendet. Die Device Sensitivity beschreibt die Empfindlichkeit der Thermolumineszenzdetektoren gegenüber einer lokalen Strahlungsquelle. Dabei werden die Detektoren mit einer bestimmten Dosis bestrahlt, anschließend mit dem Reader ausgelesen und die daraus resultierenden cpc gespeichert. Auch hierfür werden Mittelwert und Standardabweichung berechnet, welche für die Kalibrierung weiterer TLDs verwendet werden können.

Die Crystal Sensitivity gibt Auskunft über die Empfindlichkeit des Detektorkristalls. Hierbei gibt es eine Varianz von Detektor zu Detektor um wenige Prozent. Zur Ermittlung dieser Kenngröße werden die TLDs ebenfalls bestrahlt. Die Dosis muss dabei mit der Dosis der Device Sensitivity möglichst genau übereinstimmen. Beim darauffolgenden Auslesen werden wiederum die cpc-Daten gespeichert und mit denen der Device Sensitivity verglichen. Daraus resultiert der Crystal Sensitivity-Faktor, welcher im Bereich um den Wert 1,0 liegen soll (+/- 10 %). Dieser wird bei Messungen von kalibrierten TLDs aufgeschlagen und somit die Kristallempfindlichkeit in das Ergebnis einbezogen.

Zur Ermittlung dieser Kennwerte werden die 39 TLDs ebenfalls für 20 min mit dem Cs-137-Prüfstrahler bestrahlt.

4 Ergebnisse und Beurteilung der Stabilisierung der Thermolumineszenzdetektoren

Bei der Stabilitätsbestrahlung der TLDs werden zum einen die Counts der einzelnen TLDs nach jedem Zyklus

miteinander verglichen, zum anderen wird durch eine Kreuzkorrelation geprüft, in welchem Maße sich die Kurvenform nach einer definierten Anzahl an Bestrahlungen verändert. Betrachtet werden die Werte nach fünf Zyklen, nach zehn Zyklen, dem elften Zyklus mit Pre-Annealing und dem zwölften Zyklus mit neuer Heizrate. Jedes TLD wird dabei einzeln ausgewertet. Zur Auswertung werden der arithmetische Mittelwert und der Standardfehler als Streumaß über alle $n = 39$ Detektoren herangezogen, welche in Tabelle 1 aufgeführt werden.

Tabelle 1: Mittelwerte und Standardfehler der Korrelationskoeffizienten aller 39 TLDs

Mittelwerte	5 Zyklen	10 Zyklen	mit PreAnneal	neue Heizrate
5 Zyklen	1,00	0,96	0,96	0,24
10 Zyklen		1,00	0,96	0,23
mit PreAnneal			1,00	0,24
neue Heizrate				1,00
Standardfehler	5 Zyklen	10 Zyklen	mit PreAnneal	neue Heizrate
5 Zyklen		0,00	0,01	0,01
10 Zyklen			0,00	0,01
mit PreAnneal				0,01
neue Heizrate				

Die Mittelwerte der Kreuzkorrelationskoeffizienten des fünften, zehnten und elften Zyklus zeigen einen gleich hohen Wert von $r = 0,96$, was bedeutet, dass es zu keiner Formveränderung der Glühkurve kommt. Allerdings zeigt sich bei der zwölften Bestrahlung mit der Erhöhung der Heizrate eine starke Verringerung der Korrelationskoeffizienten auf einen Wert von $r < 0,25$, was darauf hindeutet, dass sich die Form der Kurve durch die neue Heizrate ändert.

Bei der Auswertung der Counts werden die sich beim fünften bzw. zehnten Bestrahlungszyklus ergebenden Counts mit denen der zehnten bzw. elften Bestrahlung verglichen und dabei der prozentuale Anstieg ermittelt. Die TLDs werden hierbei in fünf unterschiedliche Gruppen klassifiziert. Der Farbcode ist in Tabelle 2 zu sehen.

Tabelle 2: Prozentualer Anstieg der Counts nach Zyklus fünf, zehn und elf; Klassifizierung der TLDs anhand des Anstiegs

%-Anstieg	Zyklus 5 zu 10	Zyklus 10 zu 11	TLD 21	Zyklus 5 zu 10	Zyklus 10 zu 11		%f.-10%
TLD 1	0,03	0,47	TLD 21	0,25	-0,18	ok	
TLD 2	-0,03	0,04	TLD 22	-0,10	0,03	leicht +	>10%
TLD 3	0,31	-0,01	TLD 23	0,30	-0,38	stark +	>15%
TLD 4	0,10	0,12	TLD 24	0,01	-0,12	leicht -	<-10%
TLD 5	-0,08	-0,13	TLD 25	0,04	0,17	stark -	<-15%
TLD 6	0,05	-0,04	TLD 26	0,25	-0,25		
TLD 7	-0,01	0,02	TLD 27	-0,01	-0,25		
TLD 8	-0,15	0,02	TLD 28	-0,09	-0,18		
TLD 9	0,21	-0,12	TLD 29	0,47	-0,33		
TLD 10	0,11	-0,28	TLD 30	0,07	-0,25		
TLD 11	-0,04	0,14	TLD 31	0,10	-0,15		
TLD 12	-0,05	-0,07	TLD 32	-0,05	-0,20		
TLD 13	-0,04	-0,06	TLD 33	-0,03	-0,20		
TLD 14	-0,33	0,03	TLD 34	-0,14	-0,12		
TLD 15	-0,41	0,08	TLD 35	0,02	-0,27		
TLD 16	0,09	0,30	TLD 36	0,08	-0,09		
TLD 17	-0,21	0,17	TLD 37	0,11	-0,23		
TLD 18	-0,08	0,00	TLD 38	-0,09	-0,06		
TLD 19	-0,04	-0,22	TLD 39	0,07	-0,15		
TLD 20	0,34	-0,30					

Auffällig ist der häufig auftretende negative Anstieg der integralen Countzahl von Zyklus zehn zu Zyklus 11 (blau/dunkelblau). Begründet ist dieser durch das Hinzufügen eines Pre-Annealing bei der elften Bestrahlung, wodurch

ungewollte niederenergetische Peaks reduziert werden und sich somit auch die Countanzahl leicht verringert. Da bei der Durchführung der Stabilitätsbestrahlung eine recht niedrige Dosis (ca. 8,63 µGy) verwendet wird, kommt es zu höheren Schwankungen der Countanzahl eines TLDs bei gleicher Bestrahlung. Durch die Erhöhung der Dosis in den mGy-Bereich können diese Schwankungen minimiert werden. Infolgedessen liefert die Stabilitätsbestrahlung der TLDs akzeptable Werte und es kann daher die Kalibrierung durchgeführt werden.

5 Ergebnisse und Beurteilung der Kalibrierung der Thermolumineszenzdetektoren

Für die Device Sensitivity der einzelnen TLDs unter den zuvor aufgeführten Bestrahlungsbedingungen ergibt sich ein Durchschnittswert von 429.576 Counts mit einer Standardabweichung von 13,67 % über alle 39 Detektoren.

Durch anschließendes erneutes Ausheizen und Bestrahlen mit gleicher Dosis können die Crystal Sensitivity bzw. der Crystal-Sensitivity-Faktor bestimmt werden. Es ergibt sich dabei ein Mittelwert von 350.294 Counts. Die Standardabweichung beträgt dabei 14,65 %. In Tabelle 3 ist zu erkennen, dass die Crystal-Sensitivity-Faktoren teilweise deutlich über bzw. unter dem optimalen Wert von 1,0 liegen (z. B. 2,6 bei TLD 18).

Aufgrund der sehr geringen Dosisleistung und Dosis, welche durch den Cs-137-Prüfstrahler auf die TLDs appliziert worden ist, kommt es zu hohen Schwankungen der integralen Countzahl und folglich zu bedingt nutzbaren Crystal-Sensitivity-Faktoren. Dadurch ist die Ermittlung der für die Kalibrierung notwendigen Kenngrößen anhand des Prüfstrahlers mit der geringen Dosis von wenigen µGy schwer möglich. Abhilfe schafft eine deutlich längere Bestrahlungsdauer, um die integrale Dosis der TLDs zu erhöhen und stabilere Crystal-Sensitivity-Faktoren zu erhalten.

Tabelle 3: Auszug der gemessenen Counts der Crystal-Sensitivity und der daraus resultierende Crystal-Sensitivity-Faktoren (rote Markierung) der TLDs 1 bis 25

Name	Measured crystal counts	Crystal sensitivity
MCP1	430366.00	0.96891
MCP2	419347.00	0.95134
MCP3	361301.00	1.34097
MCP4	394553.00	1.03180
MCP5	325261.00	1.30864
MCP6	350638.00	1.51926
MCP7	381740.00	1.22484
MCP8	308597.00	1.78231
MCP9	262258.00	2.10825
MCP10	302576.00	1.76809
MCP11	332009.00	1.79650
MCP12	409142.00	1.02891
MCP13	311379.00	1.69507
MCP14	340606.00	1.60386
MCP15	367408.00	1.30181
MCP16	300872.00	1.38883
MCP17	421565.00	0.94258
MCP18	290888.00	2.60540
MCP19	349283.00	1.42397
MCP20	325913.00	1.61206
MCP21	305532.00	1.73255
MCP22	276215.00	1.54873
MCP23	373445.00	1.17228
MCP24	372139.00	1.28224
MCP25	359217.00	1.52472

6 Ausblick

Eine Stabilisierung der TLDs mittels des Cs-137-Prüfstrahler ist möglich, wenngleich ein zeitlich aufwendiges Verfahren. Verbessert werden kann das Verfahren zur Stabilitätsbestrahlung durch die Erhöhung der Dosisleistung. Für die Kalibrierung ist der Strahler aufgrund der niedrigen Dosisleistung nur dann geeignet, wenn eine zeitlich lang andauernde Bestrahlung erfolgt, um eine entsprechend ausreichend hohe Dosis zu erreichen. Hier sollte auf andere Strahlungsquellen zurückgegriffen werden, um eine ausreichende Dosis auf die TLDs zu applizieren.

Im weiteren Verlauf der Kalibrierung der TLDs wird daher ein C-Bogen und ein mit Tc-99m gefülltes Wasser-Phantom zur weiteren Kalibrierung der TLDs verwendet, um die beiden Methoden miteinander vergleichen zu können.

Referenzen:

- [1] TLD Radcard: Specification for Thermoluminescent Detectors MCP type. Krakow, 2013, S. 2 – 4
- [2] RadPro International GmbH: Thermoluminescent Detektors. Wermelsbirchen, S. 2
- [3] McKeever, S.W.S.: Thermoluminescence of solids. Cambridge: Cambridge University Press, 1985, S. 225
- [4] McKeever, S.W.S.: Thermoluminescence of solids. Cambridge: Cambridge University Press, 1985, S. 207

Projektpartner:

Nuklearmedizinische Klinik, Universitätsklinikum Erlangen, Erlangen

Kontakt:



Simon Hofmann

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

s.hofmann@oth-aw.de



Michael Mark, B.Eng.

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen
und Gesundheit
Medizintechnik/Medizinische Physik
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

m.mark@oth-aw.de



Prof. Dr. Ralf Ringler

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen
und Gesundheit
Medizintechnik/Medizinische Physik
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

r.ringler@oth-aw.de



**Verein der Amberger Freunde
der Ostbayerischen Technischen
Hochschule Amberg-Weiden**



Seit 1995 unterstützt der Verein die Entwicklung der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden durch ideelle und finanzielle Beiträge, die durch das Budget nicht abgedeckt sind. Für Prämien besonderer Leistungen der Studierenden, für Zuschüsse bei Forschungsprojekten, für die Realisierung des Technologiecampus.

Mit Ihrem Beitritt als Unternehmen oder Privatperson leisten Sie einen wichtigen Beitrag zur regionalen Stärkung des Standortfaktors Bildung und Ausbildung.

**Besuchen Sie unsere Homepage über
www.oth-aw.de/forschen-und-kooperieren/partner-netzwerke**

Sie wollen Mitglied werden? Kontaktieren Sie uns.

Dipl.-Ing. (FH) Franz Mende, 1. Vorsitzender
Briefadresse: Siemens AG
Leiter Gerätewerk Amberg
Werner-von-Siemens-Straße 48
92224 Amberg

Telefon +49 (172) 2659863
Sekretariat +49 (172) 1591724
E-Mail: freunde.oth-amberg@oth-aw.de

**Unsere aktuellen Öffnungszeiten:
Immer - Überall.**




Online-Banking



VR-BankingApp



Über 17.600
Geldautomaten



Sicher online
bezahlen



Persönliche
Beratung vor Ort



Weltweit
bezahlen

Jeder Mensch hat etwas, das ihn antreibt.

Wir machen den Weg frei.

**Sie wollen unabhängig und flexibel sein?
Dann sollte es auch Ihre Kontoverbindung sein!**

**Regeln Sie Ihre Bankangelegenheiten wie
und wann immer Sie möchten. Ob im Internet,
per Smartphone, in Ihrer Filiale vor Ort oder
am Geldautomaten - so viel Freiheit muss sein!**

Telefon: 09621/479-0
info@vr-amberg.de
www.vr-amberg.de



**Wir machen keine Werbung,
sondern **Weiterbildung.****

Kurse, Zertifikate und
Studiengänge für
Berufstätige



oth-professional.de

Zusammenfassung

Im Rahmen einer Doktorarbeit wurde ein neuartiges coulometrisches Prinzip für die pH-Messung mit Platinmetalloxiden entwickelt. Der Sensor eignet sich für wässrige, supersaure und organische Flüssigkeiten. Anwendungen öffnen sich in der Mikrosensorik, wo die konventionelle Glaselektrode limitiert ist.

Abstract

Within the scope of a doctoral thesis, a novel coulometric principle for the pH measurement using platinum group metal oxides was developed. The sensor is suitable for aqueous, superacidic, and organic liquids. Applications are opened up in microsensor technology, where the use of the conventional glass electrode is limited.

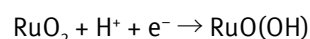
1 Von der Glaselektrode zum Metalloxid

Laborübliche pH-Wert-Messungen werden mithilfe von Farbindikatoren oder der Glaselektrode durchgeführt [1]. Potentiometrische Methoden an Glasmembranen sind genau und sprechen schnell an, sind jedoch schlecht miniaturisierbar und scheitern in supersauren, superbasischen und organischen Medien [2].

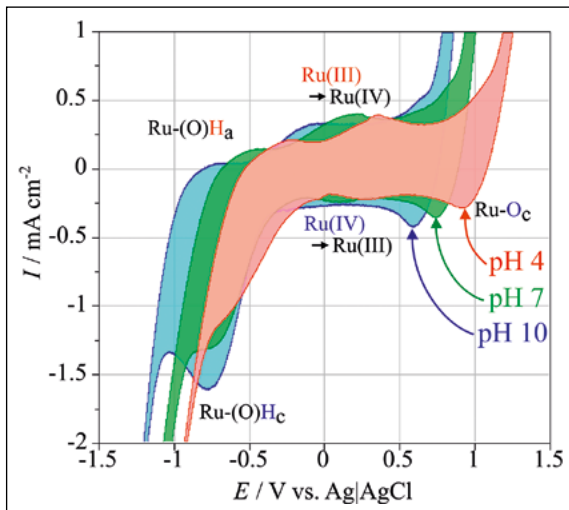
Als Alternative für miniaturisierte Sensoren eignen sich Platinmetalloxide, die auf metallische oder keramische Substrate aufgetragen und mit einer Referenzelektrode kombiniert werden [3]. Die ionenaustauschende Oberfläche von Rutheniumdioxid (RuO_2) kopiert das elektrochemische Verhalten der Glaselektrode, zeigt aber Nachteile hinsichtlich Hysterese und Drift-Verhalten [4].

Absolute pH-Werte sind unbekannt, weshalb eine Methode die Protonen „zählt“ futuristisch klingt. Unser Ansatz beobachtet die Umsetzung von Protonen in Redoxreaktionen durch transiente Techniken wie der Cyclovoltammetrie [5]. Die Elektrode wird mit einer Dreiecksspannungsrampe beaufschlagt und die zeitabhängige Stromantwort der Fest-Flüssig-Grenzfläche gemessen. Das erhaltene Voltogramm zeigt charakteristische Signalspitzen, deren Spannungslagen, Ströme und elektrische Ladungen im Hinblick auf die Protonenaktivität der Lösung ausgewertet werden.

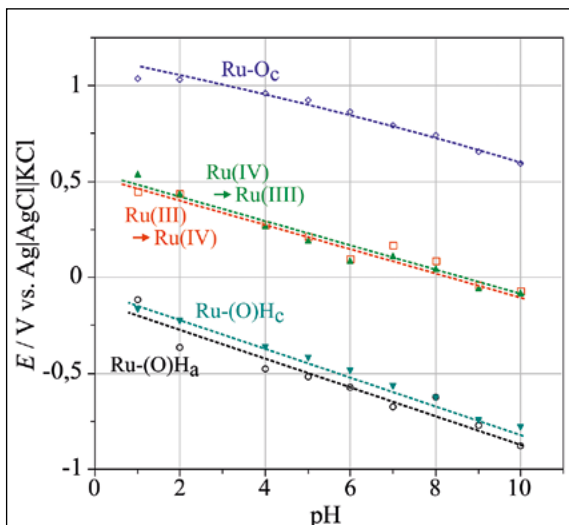
Die RuO_2 -Oberfläche steht mit der umgebenden Lösung im elektrochemischen Gleichgewicht. An Wasser gebundene Protonen diffundieren in die poröse Struktur, wobei Ruthenium die elektrochemische Wertigkeit ändert [5]. Für das Ruhepotenzial gilt:



Messungen in Pufferlösungen bestätigen eine pH-Abhängigkeit des Elektrodenpotenzials nach NERNST, d. h. mit der theoretischen Sensitivität von 59 mV/pH (Abbildung 1). Nach Kalibration werden pH-Werte in handelsüblichen Getränken (Milch, Cola, Bier) korrekt angezeigt. Zur Glaselektrode bestehen marginale Differenzen von 0,1 bis 0,2 pH-Stufen. Das anodische und kathodische Peakpotenzial des Redoxvorgang $\text{Ru}(\text{III})/\text{Ru}(\text{IV})$ bei etwa 0,5 V sind über den gesamten pH-Bereich ohne Überlagerungen von störenden Peaks nutzbar. Geeignet für die pH-Messung sind auch die kathodische Wasserstoffsorption und die anodische Wasserstoffoxidation unterhalb von 0 V. Ebenso zeigt die Sauerstoffreduktion nahe 0,8 V eine pH-Abhängigkeit. Die Sensitivitäten um 70 mV/pH weichen allerdings vom Nernst-Verhalten ab.

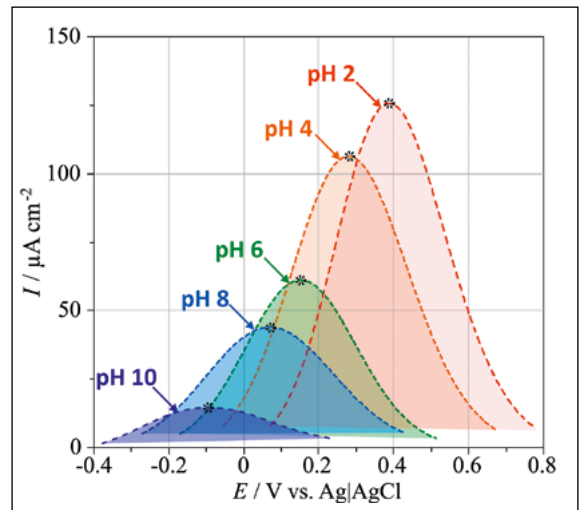


a)

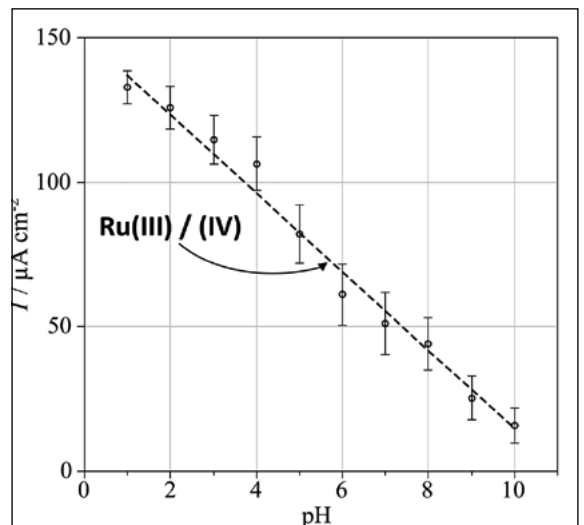


b)

Abbildung 1: RuO₂-Elektrode in Pufferlösungen: a) Cyclovoltammogramme mit Platin-Gegenelektrode, b) Potenzialverschiebung der Redoxreaktionen: Ru(III/IV) 59 mV/pH; Ru(IV/III) 68 mV/pH; Ru-O 65 mV/pH.



a)



b)

Abbildung 2: RuO₂-Elektrode in Pufferlösungen: a) Ru(III/IV)-Redoxstrom, um den Doppelschichtladestrom korrigiert. b) pH-Abhängigkeit: 9 μA/pH, 32 μC/pH, 43 μF/pH.

2 Voltammetrische pH-Messung

Unser neuartiges Sensorprinzip verfolgt das Proton in der Redoxgleichung – misst es durch die fließenden Elektronen, die zur Umladung der Elektrodenoberfläche gebraucht werden [7, 8]. Die numerische Integration der Peakfläche gibt die elektrische Ladung $Q = C U$, die ein „Zählen von Protonen“ ermöglicht. Der Strom im Cyclovoltammogramm setzt sich jedoch aus einem kapazitiven Strom zum Aufladen der Doppelschicht und dem FARADAY'schen Strom der Redoxreaktion zusammen. Um das Proton aus der Reaktion Ru(III)/(IV) gezielt zu erfassen, ist eine Trennung von Nutzsignal und Grundstrom notwendig, was numerisch gelingt [9]. Die dem Reaktionsstrom Ru(III)/(IV) vor- und nachgelagerte Mulde eignet sich zur Basislinienkorrektur. Die korrigierten Redoxströme, Ladungen und Kapazitäten sind pH-abhängig, was in Pufferlösungen gut funktioniert (Abbildung 2). Die lineare Abhängigkeit von Peakstrom und pH lässt sich aus der Randles-Sevcik-Gleichung ableiten [10]. Die Sensitivität hängt von der elektrochemisch aktiven Fläche, Spannungsvorschub, Temperatur, Beschichtungsmasse und Ionenstärke der Lösung ab.

3 Königsdisziplin: supersaure Medien

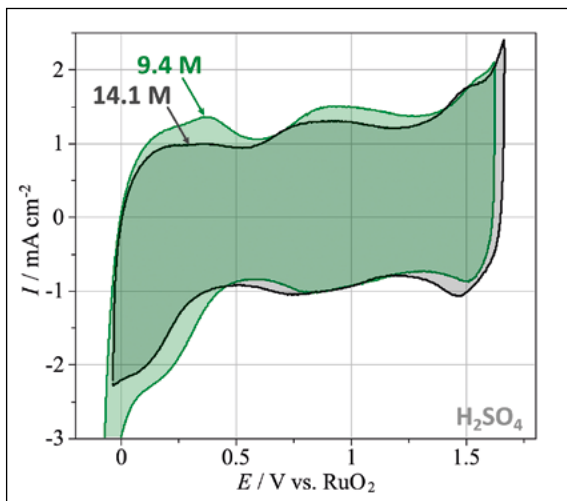
Die Glaselektrode arbeitet zwischen pH 0 bis 14 und zeigt an den Rändern des Messbereichs einen Säure- und Alkalifehler. In supersauren und organischen Medien mit hoher Ionenstärke gilt die klassische pH-Skala nicht mehr. Theoretische Modelle von BROMLEY, PITZER und DEBYE-HÜCKEL [11, 12] versagen in supersauren Medien, weil die Aktivitätskoeffizienten unbekannt sind. Doch Platinmetalloxide tauschen auch in supersaurer Lösung unterhalb pH 0 Ionen mit der umgebenden Lösung aus, wie die Säure-Base-Titration verschieden starker Säuren (H₂SO₄, HNO₃, HCl) und schwacher Säuren (H₃PO₄, C₆H₈O₇, CH₃COOH) belegt.

Das Messsignal $I \sim \lg [\alpha \gamma c(\text{H}^+)]$ bildet indirekt den Dissoziationsgrad α der Säure und den Aktivitätskoeffizienten γ des Protons ab. RuO₂ bildet selbst in 14,7-molarer Schwefelsäure ein stabiles Cyclovoltammogramm aus (Abbildung 3). Der potenzialbestimmende Redoxpeak Ru(III/IV) kann für die coulometrische pH-Bestimmung verwendet werden, ohne dass eine Referenzelektrode

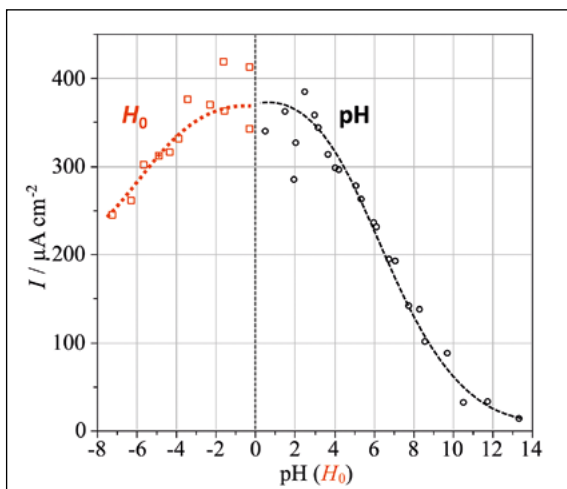
wie Ag|AgCl notwendig ist. RuO₂ als Quasiwasserstoffelektrode ist selbst ein Referenzsystem.

Bei der Säure-Base-Titration von 1-molarer Schwefelsäure mit 1-molarer Natronlauge sinken die Peakströme der Reaktion Ru(III/IV) mit steigendem pH-Wert. Bei pH 0 wird das Maximum der Protonenumsetzung am Sensor erreicht. Mit zunehmender Säurekonzentration treten die Ionen im Elektrolyt in starke Wechselwirkung, wodurch der Aktivitätskoeffizient stark von 1 abweicht. Zum praktischen Vergleich der um den kapazitiven Grundstrom korrigierten Peakströme steht in supersauren Medien statt dem pH die HAMMET-Säurefunktion H_0 [13].

Der entwickelte, neuartige Sensor zeigt die Protonenaktivität in gefärbten und aggressiven Medien an, wo Farbindikatoren versagen (Abbildung 4). Kleinste Probenmengen genügen und eine pH-unempfindliche Referenzelektrode ist verzichtbar. Über wegweisende Anwendungen in der Geologie, Chemie und Medizin kann gegenwärtig nur spekuliert werden.

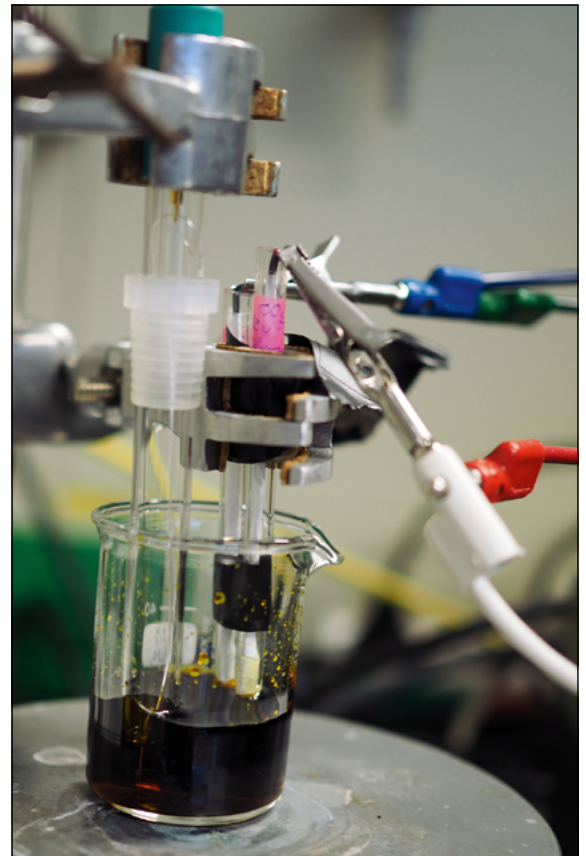


a)



b)

Abbildung 3: RuO₂ in konzentrierter Schwefelsäure
 a) Cyclovoltogramme mit RuO₂-Referenz und Platin-Gegenelektrode.
 b) Faraday'scher Peakstrom Ru(III/IV) bei der Säure-Base-Titration und im Supersauren.



a)



b)

Abbildung 4: Supersaure Lösung geologischer Herkunft:
 a) RuO₂-pH-Sensor mit Platindraht-Gegenelektrode.
 b) pH-Farbindikatoren außerhalb des messbaren Bereichs.

Referenzen:

- [1] P. Kurzweil, S. Chalupczok, H. Hartmann, Protonenleitende Metalloxide für die Wasseranalytik: Stand der Technik und neuartige Messkonzepte, OTH Forschungsbericht 2017, S. 150 – 154.
- [2] P. Kurzweil, Metal Oxides and Ion-Exchanging Surfaces as pH Sensors in Liquids: State-of-the-Art and Outlook, *Sensors* 9 (2009) 4955 – 4985.
- [3] J. Schottenbauer, S. Chalupczok, Ch. Schell, P. Kurzweil, Geschützte Referenzelektroden für pH-Sensoren mit Metalloxiden, OTH-Forschungsbericht 2019, S. 169 – 172.
- [4] S. Chalupczok, P. Kurzweil, J. Schottenbauer, Ch. Schell, A. Lechner, M. Pöppel, A capacitive pH sensor based on ruthenium dioxide: Manufacture and testing of the interdigital structure, Proceedings and Poster Session, OTH Cluster-Conference, Weiden, 12. April 2018, pp. 159 – 165.
- [5] S. Chalupczok, P. Kurzweil, J. Schottenbauer, Ch. Schell, pH Sensitivity of Screen-Printed Sensors based on amorphous and Crystalline RuO₂ and the Impact of Conducting and inert Binders, *International Journal of Science and Research* 7:11 (2018) 419 – 427.
- [6] H. Hartmann, S. Chalupczok, P. Kurzweil, Prototypenentwicklung eines pH-Sensors auf Basis protonenleitender Metalloxide, OTH-Forschungsbericht 2018, S. 162 – 166.
- [7] S. Chalupczok, P. Kurzweil, H. Hartmann, Ch. Schell, The Redox Chemistry of Ruthenium Dioxide: A Cyclic Voltammetry Study, Review and Revision, *International Journal of Electrochemistry* (2018), doi.org/10.1155/2018/1273768.
- [8] S. Chalupczok, P. Kurzweil, H. Hartmann, Impact of Various Acids and Bases on the Voltammetric Response of Platinum Group Metal Oxides, *International Journal of Electrochemistry* (2018), doi.org/10.1155/2018/1697956.
- [9] J. Schottenbauer, S. Chalupczok, Ch. Schell, P. Kurzweil, Numerical analysis of cyclic voltammetry measurements in electrochemical sensor applications, OTH-Forschungsbericht 2020, S. 151 – 154.
- [10] A.J. Bard, L.R. Faulkner, *Electrochemical methods. Fundamentals and applications*, Wiley: Hoboken, NJ, 2001.
- [11] M. Luckas, J. Krissmann, *Thermodynamik der Elektrolytlösungen*, Springer: Berlin, 2001.
- [12] K.S. Pitzer, *Activity coefficients in electrolyte solutions*, CRC Press: Boca Raton, 1991.
- [13] H.S. Harned, W.J. Hamer, The Thermodynamics of Aqueous Sulfuric Acid Solutions from Electromotive Force Measurements, *J. Am. Chem. Soc.* 57 (1935) 27 – 33.

Kontakt:



Sebastian Chalupczok, M.Eng.

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

s.chalupczok@oth-aw.de



Prof. Dr. Peter Kurzweil

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

p.kurzweil@oth-aw.de

Leitfähige Polymere: Ein Polyanilinsensor für die Ammoniak- und Ammonium- bestimmung

Zusammenfassung

Elektronisch leitfähige Polymere bieten großes Potenzial für die Medizintechnik und Bioanalytik. Durch Elektropolymerisation einer Anilinlösung auf Silber-Palladium-Interdigitalstrukturen haben wir einen kapazitiven Ammoniaksensor hergestellt, spektroskopisch charakterisiert und in praktischen Proben getestet. Da Polyanilin in Ammoniakatmosphäre seine Farbe ändert, kann der elektrochemische Sensor auch als optischer Indikator eingesetzt werden.

Abstract

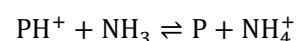
Electronically conductive polymers offer great potential for medical engineering and bioanalysis. By electro polymerization of aniline solution onto silver-palladium interdigital supports, we have fabricated a capacitive ammonia sensor, which was characterized by spectroscopy and tested in practical samples. Polyaniline changes its color in ammonia atmosphere so that the electrochemical sensor can as well be applied as an optical indicator.

1 Vom Molekül zum Sensor

Die Messung von Ammoniak, nicht nur in der Biogastech-
nik, greift auf spektroskopische, elektroanalytische und
nasschemische Methoden zurück. Eine pH-Glaselektrode
kann durch eine permeable Membran dringende Am-
moniakmoleküle über die Veränderung des Elektroden-
potenzials bestimmen, aber Wartung und Kalibrierung
sind aufwändig und teuer. Sensoren aus stromleitenden
Kunststofffolien könnten Abhilfe schaffen.

Die metallähnliche Leitfähigkeit spezieller Polymere
entsteht durch Dotierung der Polymerkette im Zuge von
Redoxprozessen. Durch elektrochemisch eingebrachte
Überschusselektronen oder Ladungslöcher wird das
Makromolekül zu einer Art polymerem Salz, das einer
riesigen Elektronenwolke gleicht. Je nach Dotierungs-
niveau ändert sich die Leitfähigkeit [1]. Polyanilin besitzt
Heteroatombrücken zwischen den Benzolringen. Die
Dotierung des nicht leitenden, ungeladenen Polymers
mit H^+ durch eine Säure des Typs HA – wie Salzsäure –
bildet das leitfähige, grüne Emeraldin-Salz (Abbildung
1) [2]. Kommt Ammoniak in Kontakt mit dem p-dotierten
Polymer, zieht es das Proton ab und bildet Ammonium.

Das Emeraldin-Salz geht in die nichtleitende blaue Eme-
raldin-Base P über [3].



Der Widerstand der aktiven Schicht wächst in Abhängig-
keit der Ammoniakkonzentration in der Umgebung.

Als Substrat für Polyanilin-Sensoren haben wir eine Interdi-
gitalstruktur aus Silber-Palladium-Leiterbahnen auf einem
Glasobjektträger gewählt [4]. Aus einem Gemisch aus 7,5
mL salzsaurer Anilinlösung (1 mol/L HCl + 0,1 mol/L Anilin)
und 2,5 mL $FeCl_3$ -Lösung (10 %) wurde durch zwanzig
Cyclovoltammetrie-Zyklen im Spannungsbereich 0,2 V bis
2,2 V mit Spannungsvorschub 20 mV/s elektrochemisch
Polyanilin abgeschieden. Als Gegenelektrode wurde ein
Titanblech eingesetzt. Die entstandene Schicht wird vor-
sichtig mit destilliertem Wasser abgespült und an der Luft
getrocknet [5]. Unter dem Mikroskop offenbart sich der
typisch blaugrüne Schimmer der Aktivschicht (Abbildung
2). Das Infrarotspektrum in Abbildung 3 belegt die gesuch-
te chemische Struktur mit ausgedehnten benzolartigen
und chinoiden Strukturen, die in Mesomerie miteinander
stehen. Tabelle 1 erklärt die Banden [6].

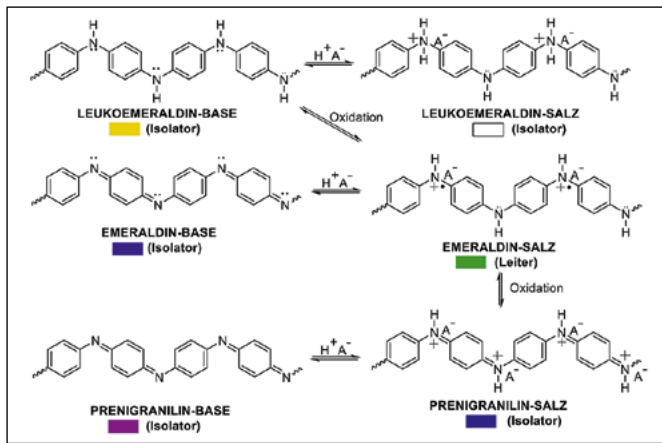


Abbildung 1: Polyanilin: Farben und Leitfähigkeit nach [2]

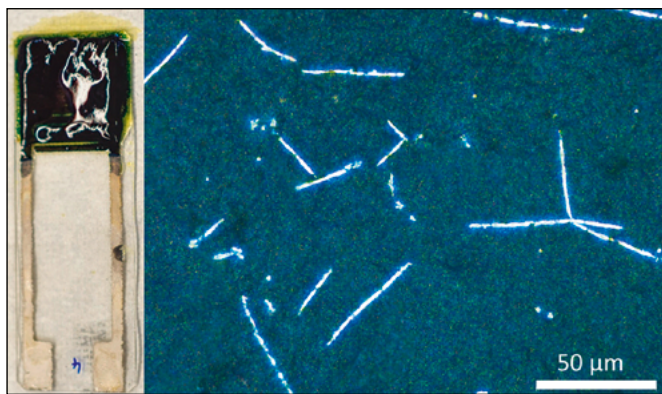


Abbildung 2: Polyanilin auf Interdigitalstruktur, 500-fache Vergrößerung.

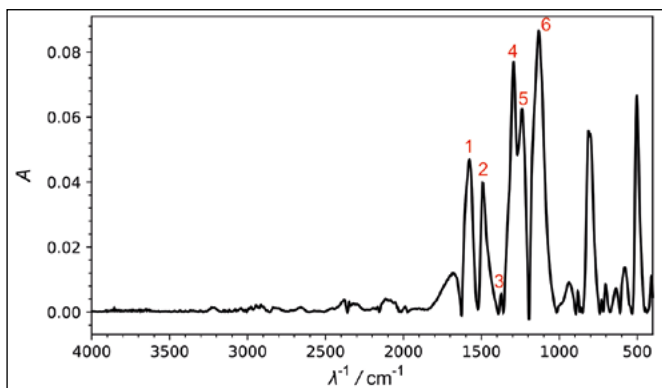


Abbildung 3: Infrarotspektrum der Polyanilinschicht

Tabelle 1: IR-Banden von Polyanilin: Q = chinoid, B = Benzolring, v Streckschwingung

#	$\lambda^{-1} / \text{cm}^{-1}$	Molekülschwingung
1	1571	v Chinoidsystem
2	1491	v Benzolring
3	1373	v(C-N) QBQ-Einheiten
4	1295	v(C-N) sekundäres aromatisches Amin
5	1242	v(C-N) BBB-Einheit oder v(C-N•+) Polaronengitter
6	1127	Chlor am aromatischen Ring

2 Praxistest

In einem verschließbaren Gefäß wurde Ammoniumchloridlösung vorgelegt und im Deckel fixiert, der Polyanilinsensor im Dampfraum angebracht (Abbildung 4). Durch Zusatz von Natronlauge entsteht eine definierte Ammoniakkonzentration, das Ammoniak-Ammonium-Gleichgewicht wird auf die Ammoniakseite verschoben: $\text{NH}_4\text{Cl} + \text{NaOH} \rightarrow \text{NH}_3 + \text{NaCl}$. Beim Rühren der Lösung stellt sich nach einigen Minuten ein Gleichgewicht zwischen Flüssigkeit und Gasphase ein.

Mit einer Reihe von Ammoniumchlorid-Standards von 0,0001 mol/L bis 0,01 mol/L wurde die Sensorantwort mittels Impedanzspektroskopie gemessen (Amplitude 0,1 V, Integrationszeit: 10 s). Vor Beginn der Messreihe wurde der Sensor in destilliertem Wasser konditioniert. Die Pseudokapazität des Sensors $C = \text{Im } Y/\omega$ im Frequenzbereich von 10 kHz bis 0,1 Hz, über die Zeit aufgetragen, zeigt die größte Sensitivität bei kleinen Frequenzen. Die stationären Gleichgewichtswerte für jede Analytkonzentration wurden als Kalibrierpunkte verwendet (Abbildung 5). Die Kalibriergerade zeigt für $C(0,1 \text{ Hz})$ die beste Übereinstimmung mit einer Geraden ($R^2 = 99,84\%$). Höhere Frequenzen sind weniger geeignet, was bedeutet, dass der Messeffekt auf einer diffusionsbestimmten Redoxreaktion beruht. Der Widerstand der Polyanilinschicht nimmt bei höheren Ammoniakkonzentrationen zu. Dadurch agiert der Interdigitalsensor immer mehr wie ein Kondensator mit Polyanilin als Dielektrikum.

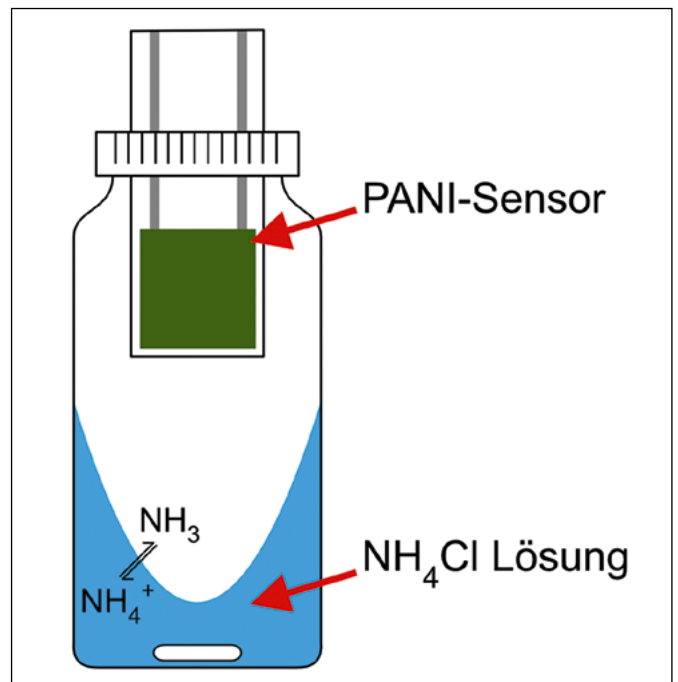


Abbildung 4: Messaufbau mit Ammoniaksensor

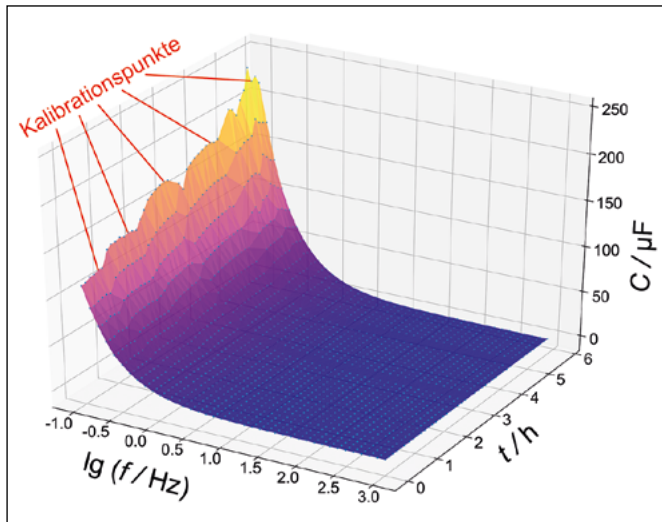


Abbildung 5: Polyanilin-Sensor: Frequenzabhängige Kapazität in Standardlösungen in Abhängigkeit der Titrationszeit.

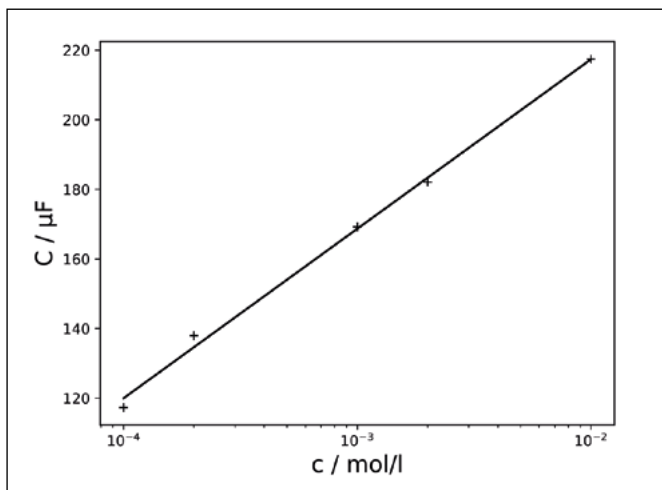


Abbildung 6: Kapazitive Kalibriergerade für Ammonium bei 0,1 Hz: $C = 48,71 \cdot \lg c + 314,8$ für c in mol/L und C in μF .

3 Farbnachweis

Bei Exposition mit Ammoniak geht das Emeraldin-Salz in die Emeraldin-Base über. Das intakte benzoid-leitfähige Polyanilin ist grün und das nicht leitfähige Chinoidsystem erscheint blau (Abbildung 1). Der Farbwechsel lässt sich am Sensor ablesen (Abbildung 7). Polyanilin kann somit auch als Farbindikator zur Ammoniakdetektion eingesetzt werden.

Über die Ammoniak-/Ammonium-Messung hinaus können Polymerelektroden auch den pH-Wert anzeigen [7]. Großes Potenzial für Biosensoren bietet die Immobilisierung von Enzymen auf dem Polymer, um beispielsweise elektrochemisch Zucker- oder Ethanol sensorik zu betreiben [1].

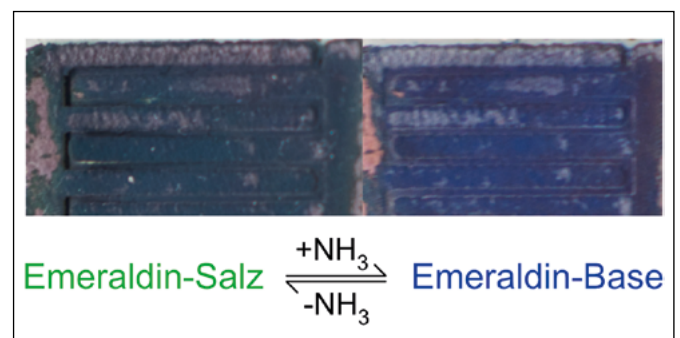


Abbildung 7: Farbwechsel von Polyanilin in Ammoniakatmosphäre

Referenzen:

- [1] G. Bidan, Electroconducting conjugated polymers: new sensitive matrices to build up chemical or electrochemical sensors, A review, *Sensors and Actuators B* 6 (1992) 45 – 56.
- [2] I. N. R. Enríquez. Elektrochemische Abscheidung und Charakterisierung von Polymeren auf FTO beschichteten Gläsern, *Dissertation*, Bergische Universität Wuppertal, 2016.
- [3] A. L. Kukla, Y. M. Shirshov, S. A. Piletsky, Ammonia sensors based on sensitive polyaniline films, *Sensors and Actuators B* 37 (1996) 135 – 140.
- [4] H. Hartmann, S. Chalupczok, P. Kurzweil, Prototypenentwicklung eines pH-Sensors auf Basis protonenleitender Metalloxide. *OTH Forschungsbericht* 2018, 162 – 166.
- [5] Y.-C. Luo, J.-S. Do, Amperometric ammonium ion sensor based on polyaniline-poly (styrene sulfonate-co-maleic acid) composite conducting polymeric electrode, *Sensors and Actuators B* 115 (2006) 102 – 108.
- [6] M. Trchová, J. Stejskal, Polyaniline: The infrared spectroscopy of conducting polymer nanotubes, *Pure and Applied Chemistry* 83 (2011) 1803 – 1817.
- [7] T. Kurzenknabe, Mikrostrukturierte Sensoren für die pH-Wert-Bestimmung auf Basis von dünnen, intrinsisch leitfähigen Polyanilinschichten, *Dissertation*, Universität Kassel, 2003.

Kontakt:



Josef Schottenbauer, M.Eng.

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

jo.schottenbauer@oth-aw.de



Dipl.-Phys. Christian Schell

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

ch.schell@oth-aw.de



Niklas Zell, B.Eng.

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

ni.zell@oth-aw.de



Prof. Dr. Peter Kurzweil

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

p.kurzweil@oth-aw.de

Zusammenfassung

Mit instrumentell-analytischen Methoden haben wir die Langzeitbeständigkeit von Konstruktionsmaterialien im Zusammenspiel mit technischen Flüssigkeiten untersucht. Biokraftstoffe, ORC-Turbinenfluide und Transformatoröle greifen Metalle, Dichtungen, Rohrleitungen, Isoliermaterialien, Lote und Filter in unterschiedlicher Weise an. Unser Labor gibt praktische Antworten, welche Legierungen und Kunststoffe für die Standzeit und den Wartungsaufwand technischer Anlagen abträglich sind.

Abstract

Using instrumental-analytical methods, we have investigated the long-term stability of construction materials interacting with technical liquids. Biofuels, ORC turbine fluids, and transformer oils corrode metals, seals, pipelines, insulation materials, solders, and filters in various ways. Our laboratory provides practical answers which alloys and polymers are detrimental to the service life and maintenance costs of technical facilities.

1 Wozu instrumentelle Analytik?

Sind Konstruktion und Aufbau einer Versuchsanlage erledigt, treten im praktischen Betrieb oftmals unvorhergesehene Störungen durch Korrosionsereignisse und Verunreinigungen auf.

Vor dem Materialeinsatz ist es ratsam, Verträglichkeitsstudien durchzuführen, um zu kritische Komponenten frühzeitig zu erkennen. Metallische Bauteile korrodieren und Dichtungen setzen flüchtige Stoffe in die Umgebung frei. In komplexen Systemen mit einer Vielzahl verbauter Materialien kann ein unscheinbares Teil die Lebensdauer der gesamten Anlage beeinträchtigen.

Instrumentelle Analytik geht über mechanische Festigkeitsmessungen hinaus und fragt nach Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Stoffen: Wie vertragen sich neuartige ORC-Fluide für den Organic-Rankine-Cycle in Dampfturbinen mit Loten, Rohr- und Dichtungsmaterialien? Wie aggressiv wirken alternative Kraftstoffe auf die Komponenten des Kraftstoffsystems eines Verbrennungsmotors? Welchen Nutzen haben umweltfreundliche Esteröle für Transformatoren und die Lebensdauer des Kraftpapiers zwischen den Spulen?

2 Methodeninventar

Begleitend zu Standzeittest im Realbetrieb finden im Labor beschleunigte Lebensdaueruntersuchungen unter scharfen Umgebungsbedingungen statt, die mit tatsächlichen Schadensereignissen verglichen werden (Abbildung 1). Am Anfang steht die Charakterisierung im unbelasteten Zustand, ehe die Proben zur beschleunigten Alterung in Wärme- und Klimaschränken ausgelagert und in festgelegten Zeitintervallen überprüft werden. Chemische Alterungsstudien im Mikromaßstab verfolgen stoffliche Veränderungen von Materialien in aggressiven Medien, bei hohen Temperaturen, erhöhten Drücken und wechselnden Umgebungsbedingungen (Abbildung 2). Das technische Fluid und die Dampfatmosfera über jeder exponierten Materialprobe werden im Zeitverlauf über mehrere Monate hinweg chromatografisch untersucht. Die Proben werden regelmäßig gewogen, optisch und spektroskopisch begutachtet.

Am Ende der Studie werden Materialveränderungen mit den Eingangsmessungen verglichen, um Schadensmechanismen nachzuweisen und zu dokumentieren. Die technischen Fluide werden mittels Gaschromatografie und Massenspektrometrie (GC/MS) analysiert, um Spu-

ren von Verunreinigungen im Eluat festzustellen, die von den ausgelaugten Testbauteilen stammen.

Spektroskopische Methoden der Oberflächenanalytik dokumentieren molekulare Veränderungen, Deckschichten und Korrosionsspuren. Auffällige, aber auch für das Auge nicht sichtbare Veränderungen der Materialien decken Methoden wie die Infrarotspektroskopie (FTIR), Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA). Röntgenbeugung (XRD) und Emissionsspektroskopie (ICP-OES) auf. Polymerproben lassen sich mit Differenzialkalorimetrie (DSC) und Thermogravimetrie (TGA) vergleichend charakterisieren. Es interessieren thermochemische Eigenschaften, das Erweich- und Brandverhalten, Zersetzungsprodukte, Wasser- und Weichmachergehalt. Organische und anorganische Rückstände werden auf krebserzeugende Fasern, bekannte Schadstoffe und unerlaubte Beimengungen untersucht.

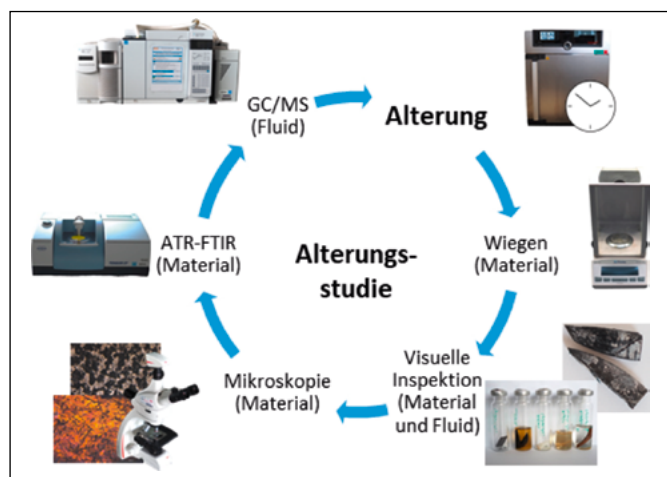


Abbildung 1: Schematisches Vorgehen bei Alterungsstudien.

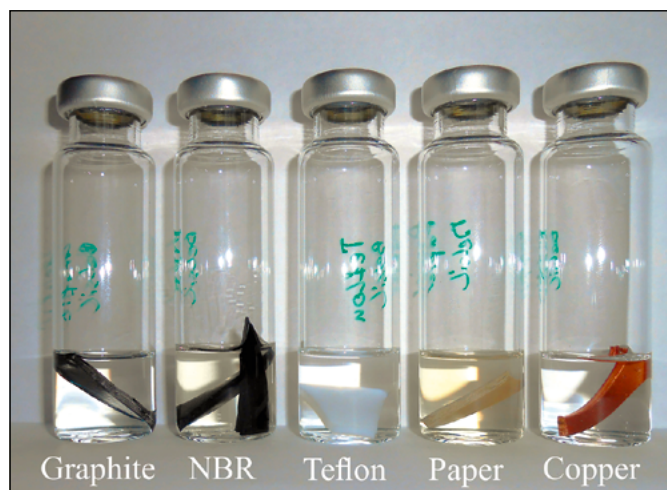


Abbildung 2: Beschleunigte Alterung von Dichtungsmaterialien in Headspace-Gläschen.

3 Praxisbeispiele

Mit der Analysenwaage lassen sich Massenänderungen an definiert getrockneten Proben auf $\pm 0,5$ mg genau feststellen. Eine Gewichtsabnahme deutet auf Korrosion oder

das Herauslösen von Bestandteilen durch das Fluid hin. Eine Gewichtszunahme ist ein Hinweis auf Oxidationsprozesse. Das perfekte Material hält seine Masse im Laufe der Alterung konstant. Aus den Massenänderungen werden Abtragsraten bezogen auf Jahreszeiträume berechnet. Das Beispiel in Tabelle 1 zeigt Massenänderungen von Materialproben in dem wasserunlöslichen ORC-Fluid Hexamethyldisiloxan $[(CH_3)_3Si]_2O$, das bei $100^\circ C$ siedet, nach mehr als einem Jahr. Dichtungsmaterialien fallen durch eine deutliche Massenzunahme auf, weil sie im Fluid aufquellen. Kupfer und galvanisch verzinkte Rohre bilden Passivierungsschichten, die sich als Massenzunahme äußern.

Tabelle 1: Abtragsstudie in ORC-Fluid (Hexamethyldisiloxan) bei $60^\circ C$ über 14 Monate.

	Material	Start m_1/g	Ende m_2/g	Δm
Dichtungen	Graphit	0,6172	0,6671	0,0499
	NBR	0,7633	0,7795	0,0162
	Teflon	0,7676	0,7693	0,0017
	Papier	0,6639	0,6767	0,0128
	Kupfer	1,6127	1,6134	0,0007
Rohre	galvanisiert	3,8475	3,8485	0,0010
	feuerverzinkt	1,0751	1,0756	0,0005
	S235 Stahl	2,2929	2,3473	0,0003
	1.4571 Stahl	2,3469	2,3473	0,0004
	1.4301 Stahl	1,9641	1,9645	0,0004
	Kupfer	2,6923	2,6919	0,0004
Lote	CuP8	1,6006	1,6004	-0,0002
	CuP279	2,3120	2,3091	-0,0029
	Ag145 SF452	1,7764	1,7769	0,0005

Visuelle Inspektion

Oberflächige Veränderungen und Verfärbungen im Lauf der beschleunigten Alterung werden mikroskopisch dokumentiert. Der fotografische Vergleich in Abbildung 3 zeigt O-Ring-Dichtungen aus dem Kraftstoffsystem eines Verbrennungsmotors, die in neuartigen OME-Kraftstoffen stark aufquellen. Der Durchmesser nimmt um bis zu 30% zu. Nach fünf Monaten bei $60^\circ C$ erschienen deutlich erkennbare Blasen auf der Materialoberfläche. Braune Verfärbungen bilden sich auf dem metallischen Teil der Dichtung. Unter dem Mikroskop sehen die Oberflächen rau und zerklüftet aus, denn sie werden vom Kraftstoff

chemisch angegriffen. Die farblose Kraftstoffphase färbt sich im Lauf des Langzeittests dunkel, weil Bestandteile des Dichtungsmaterials in Lösung gehen. Auffällige Materialveränderungen und die gelösten Stoffe im Fluid werden spektroskopisch eingehend weiter untersucht.

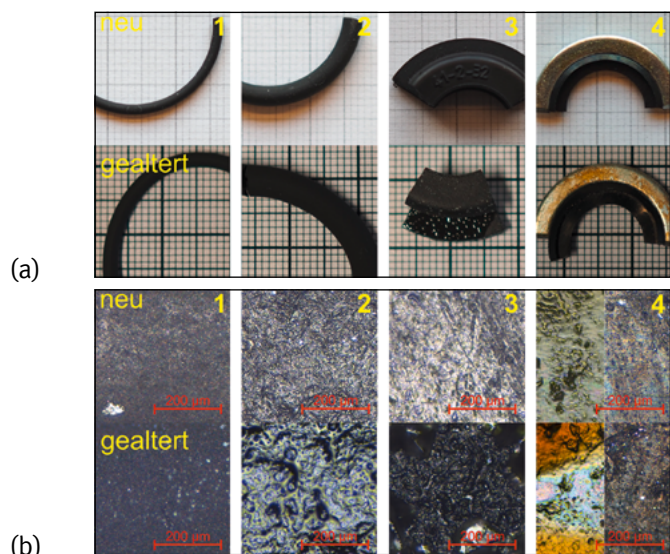


Abbildung 3: Dichtungen vor und nach der Alterung in OME-Kraftstoff: (a) Visueller und (b) mikroskopischer Eindruck.

FTIR-Analyse

Ablagerungen, Verunreinigungen und chemische Veränderungen von Polymermaterialien können mit Infrarotspektroskopie zeitnah aufgeklärt werden. Dichtungen aus Butylkautschuk (Abbildung 4) bilden bei der Lagerung in Cyclopentan einen weißen Belag aus, der aus Zinkstearat besteht. Das organische Zinksalz wird als Stabilisator in Emulsionen und Trennmittel in der Kautschukindustrie verwendet. Im technischen Lösemittelkreislauf sind lösliche Substanzen unerwünscht, weil sie sich an kritischen Stellen ablagern und mechanische Funktionsteile beeinträchtigen. Die untersuchte Dichtung ist für die spezielle Anwendung also ungeeignet.

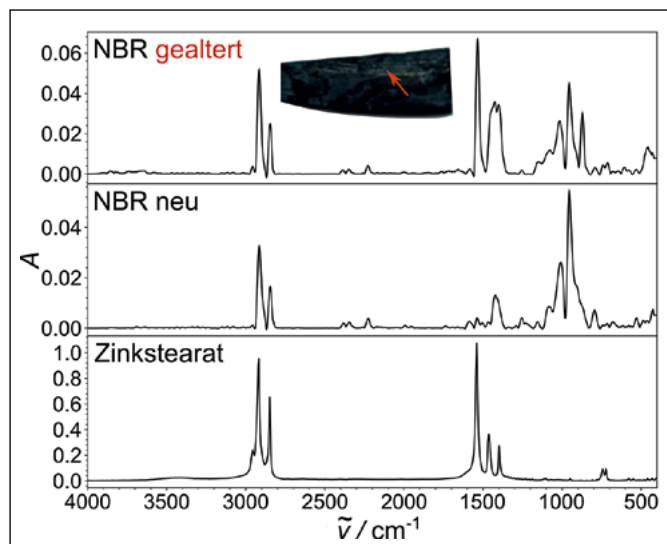


Abbildung 4: IR-Spektren von NBR-Dichtungen.

GC/MS-Screening

Viele Bauteile setzen beim Erwärmen oder durch Kontakt mit Lösemitteln unerwünschte Substanzen frei. Den Abschluss der Alterungsversuche bildet die GC/MS-Analyse der Eluate, d. h. der flüssigen Phasen, die gegenüber den Materialien als Extraktionsmittel gewirkt haben. Welche Substanzen aus den Prüflingen herausgelöst werden, hängt von der chemischen Natur des Lösemittels und äußeren Alterungsbedingungen (Temperatur, Druck, Zeit) ab. Das Untersuchungsergebnis in Abbildung 5 überführt Amide und Ester wie Ameisensäure-n-butylester, die vom synthetischen Kraftstoff Polyoxymethyldimethylether (OME), $H[CH_2O]_nCH_3$, im Lauf mehrerer Monate aus der Dichtung eines Kraftstofffilters herausgelöst werden. Ein O-Ring hingegen gab im Lauf der beschleunigten Alterung keine löslichen Bestandteile in den Kraftstoff frei. Im Hinblick auf die Lebensdauer in der technischen Anwendung im Motor ist es daher ratsam, über ein alternatives Dichtungsmaterial nachzudenken.

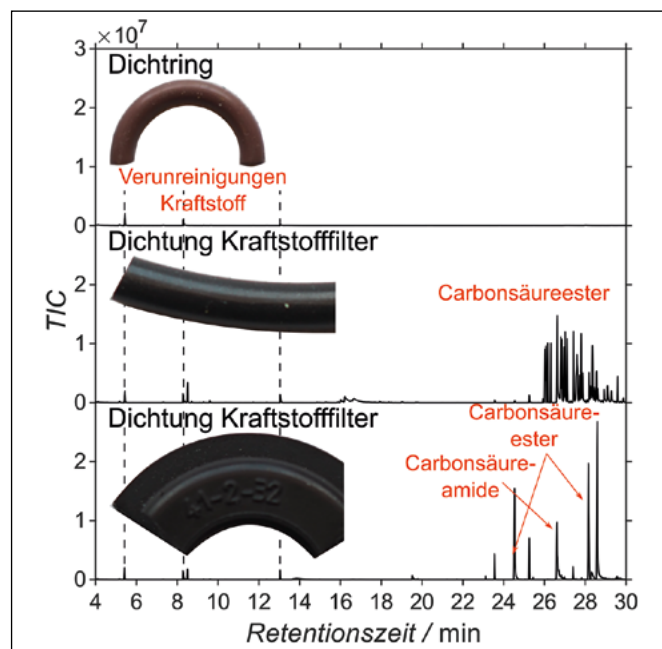


Abbildung 5: GC/MS-Analyse eines OME-Kraftstoffeluates aus Dichtungsmaterialien.

Röntgenanalytik

Für den schnellen Nachweis der chemischen Elemente in festen und flüssigen Proben eignet sich die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA), bei der Elektronen im Atom durch energiereiche Strahlung angeregt werden. Rostigbraune Verunreinigungen aus einem Kühlkreislauf, der mit einem Ammoniak-Wasser-Gemisch betrieben wurde, zeigen einen legierten Stahl als Verursacher (Tabelle 2). Die Zusammensetzung der Verunreinigung wird mit einer frischen Stahllegierung oder einer unversehrten Stelle des Bauteils verglichen. Außerdem weisen oberflächige Fremdelemente wie Kupfer auf weitere Korrosionsherde im System hin.

Die Röntgendiffraktometrie (XRD) führt zum Gitteraufbau und der genauen chemischen Zusammensetzung von kristallinen Proben. Das XRD-Ergebnis in Abbildung 6 legt nahe, dass die braunen Flecken aus Eisenoxiden (Rost) zusammengesetzt sind. Die Kristallreflexe zeigen Übereinstimmung mit dem Diffraktogramm von Magnetit (Fe_3O_4). Kupferverunreinigungen scheiden als Grund für die gefundene Verfärbung aus.

Tabelle 2: Elementanalyse einer Rohrprobe

Element	Stahl mg/kg	Belag mg/kg
Cr	1720	7530
Mo	390	790
Mn	11650	11000
Fe	982900	966000
Ni	3440	10100
Cu	–	4480

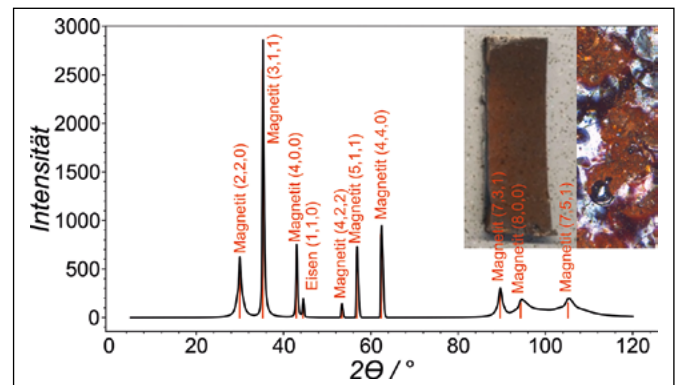


Abbildung 6: XRD-Messung einer Metallprobe aus einem alkalischen Kühlkreislauf.

Projektpartner:

UAS Messtechnik GmbH, Viechtach
AGO AG Energie + Anlagen, Kulmbach
Starkstrom-Gerätebau GmbH, Regensburg

Fördergeber:



Kontakt:



Dipl.-Phys. Christian Schell

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

ch.schell@oth-aw.de



Josef Schottenbauer, M.Eng.

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

jo.schottenbauer@oth-aw.de



Prof. Dr. Peter Kurzweil

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

p.kurzweil@oth-aw.de

The "Electrochemical Nose" – An Experimental Approach towards Automated Ammonium Determination

Niklas Zell, B.Eng.
Dipl.-Phys. Christian Schell
Josef Schottenbauer, M.Eng.
Marc Herden, B.Eng.
Prof. Dr. Peter Kurzweil

Zusammenfassung

Ammonium, das allgegenwärtige Kation, dringt beim Abbau stickstoffhaltiger Verbindungen aus Düngemitteln und Gärrückständen aus Biogasanlagen in Ökosysteme ein. Herkömmliche Analysemethoden wie Fotometrie und Kjeldahl-Destillation erfordern aufwändige Probenvorbereitung und teure Laborausstattung. Inspiriert durch die menschliche Nase haben wir einen preiswerten und verlässlichen elektrochemischen Sensor für die Ammoniumanalytik in komplexen Medien validiert.

Abstract

Ammonium, the ubiquitous cation, penetrates ecosystems by the decomposition of nitrogen compounds in fertilizers and fermentation residues from biogas plants. Conventional analytical methods such as photometry and Kjeldahl distillation require laborious preparation procedures and expensive equipment. Inspired by the human nose, we have validated a both inexpensive and reliable electrochemical sensor for the ammonium analysis in complex samples.

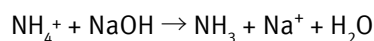
1 Ammonia – the silent threat

Agricultural wastes such as liquid and solid manure and fermentation residues from biogas plants are the major sources of the harmful ammonium load in the environment [1–4]. Ammonia occurs as the major decomposition product of proteins, amino acids, urea and nucleic acids in the nutrient cycles of all the terrestrial and aquatic ecosystems. Although beneficial in fertilizers that enrich the nitrogen content of soil, the growing availability of nitrogen is becoming more and more disastrous. Plant species, which have adapted to terrestrial nitrogen shortage since the Silurian period about 420 million years ago, cannot compete with nitrophilous plants, resulting in a dramatic loss of biodiversity. As well the more tolerant plants suffer from weaker plant tissues in nitrogen-rich environments, which make them vulnerable to pests, diseases and periods of drought. Ammonium forms soluble salts, which are easily leached out of the upper layers of soil by rainwater. Ammonium contaminating groundwater and surface water is converted into toxic nitrite and nitrate. In the human body, nitrate from drinking water is reduced to nitrite, which blocks the oxygen transport in blood.

When analysing the ammonium content of fertilizers and biogenic residues, the complex composition requires intense sample preparation. Photometric and titration methods are often impracticable and time-consuming. Therefore, we employed an electrochemical sensor, which is able to “smell” ammonium. In this way, an electric signal is induced, comparable to the reaction of the olfactory cells in the nose to fragrances. A processing unit converts the amplified signal into qualitative and quantitative information about the scent, just as the human brain does. However, the real electronic nose is still at the very beginning of research.

2 The ammonia sensor

An ammonia-sensitive electrode consists of a gas-permeable membrane, through which ammonia diffuses and penetrates the inner electrolyte surrounding of a pH glass electrode. As its name suggests, the electrode reacts selectively to ammonia (NH_3) but not to ammonium (NH_4^+). Therefore, the ammonium contained in the sample is converted into ammonia by the help of sodium hydroxide solution (NaOH) [7, 8]:



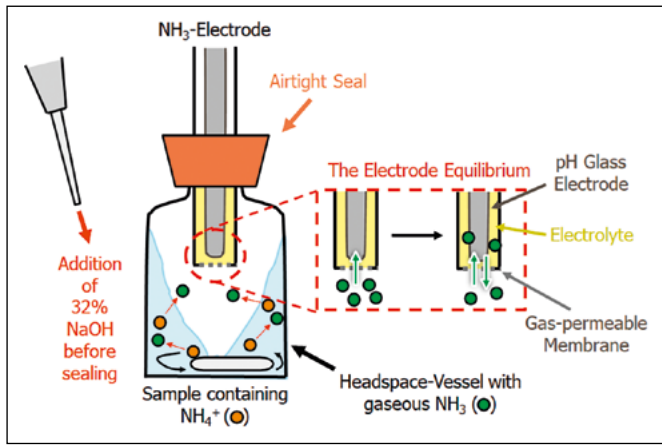


Figure 1: Setup of the electrochemical nose (modified after [6])

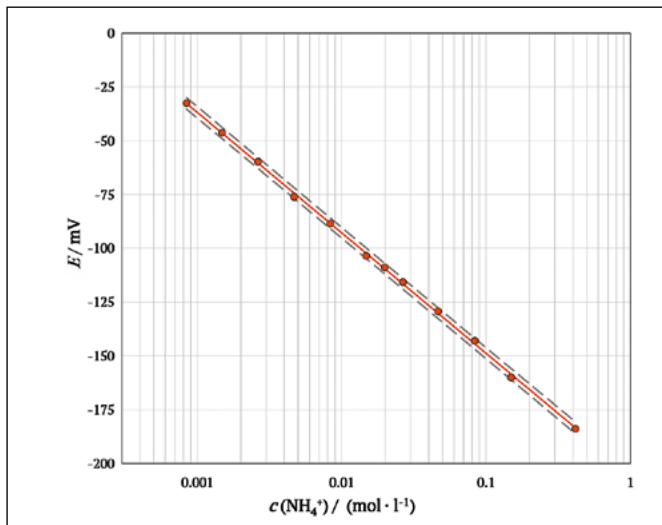
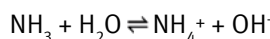


Figure 2: Calibration curve in aqueous ammonium chloride solutions: 95 % prediction interval (dashed).

Once a pH value above 12 is reached by the addition of concentrated NaOH solution, ammonia is formed quantitatively. Dissolved gaseous ammonia obeys Henry's law, $p = H \cdot c$. Inside the sealed vessel shown schematically in Figure 1, an equilibrium is established between the ammonia concentration c in the sample and the partial pressure of ammonia p in the headspace above the liquid, where the electrode is located. When gaseous ammonia diffuses through the electrode's membrane, the sensor "inhales" the ammonia. Thereby the pH-value in the electrode's electrolyte increases due to the hydrolysis equilibrium of ammonia, until a state of equilibrium is reached.



This increase of pH is measured by the potential drop ΔE of the glass electrode according to the Nernst equation, wherein the slope $S = dE/d(\lg c)$ is the sensitivity (theoretically 59.2 mV per decade at 25°C), $c(\text{NH}_4^+)$ is the sample's ammonium concentration visible across the membrane, and a is the intercept of the calibration curve [6, 8].

$$E = -S \cdot \lg c(\text{NH}_4^+) + a$$

The calibration curve for ammonium chloride solutions in Figure 2 proves the underlying theory. The slope $S = 56.0$ mV/decade and the intercept $a = 204.8$ mV were found with excellent fit quality of 99.95 %.

3 The smell of biogenic samples

Due to undefined colours and suspended particles, complex biogenic samples and technical residues pose a challenge for both the photometric and the wet-chemical analysis of ammonium. The ammonia-selective electrode is far less affected by the sample's unknown composition thanks to its non-optical principle and the fact that the analysis takes place in ammonia-enriched air. However, in complex media, Henry's constant of ammonia changes in an unpredictable manner, which makes the aqueous calibration unusable. We met this problem using the standard addition method [3], by which known amounts of ammonium $c_s V_s$ are given to the sample P containing the unknown concentration c_x in the test volume V_p .

$$E_s - E_p = -S \lg \frac{c_x V_p + c_s V_s}{V_p + V_s} + S \lg c_x$$

This difference of the measured electrode responses ($E_s - E_p$) is linearized according to a Gran-transformation [5]. The plot of $c_s V_s$ against $(V_s + V_p) \cdot 10^{-(E_s - E_p)/S}$ should be linear with an intercept of $(-c_x V_p)$. Furthermore the added sodium hydroxide volume is corrected. Then, the unknown ammonium concentration of the sample is given by the slope c_x of the calibration line.

$$X = \frac{c_s V_s}{V_p} = c_x \left(10^{\frac{-(E_s - E_p)}{S}} \cdot \frac{V_s + V_p + V_L}{V_p + V_L} - 1 \right) = c_x \cdot Y$$

c molar concentration, V volume of added ammonium chloride standard (S), sample (P) and NaOH (L),
 E electrode potential, S sensitivity.

The recovery ratio was determined for complex samples with known ammonia content and compared with a standard UV/Vis cuvette test (Table 1 and Figure 3). A synthetic fermentation residue was prepared by mixing ammonium with sodium lignosulfonate (25 g/L), sucrose (25 g/L), sodium hydrogen carbonate (10 g/L), sodium acetate (1.4 g/L), sodium phosphate (1.7 g/L), magnesium sulfate (2.5 g/L), calcium chloride (0.8 g/L) and potassium chloride (9.5 g/L), which was finally diluted 1 : 10. Moreover, glycine (162 mg) was digested in a Kjeldahl apparatus using concentrated sulfuric acid and a Missouri catalyst (potassium sulfate/copper sulfate). Distillation could be omitted because the electronic nose saves time. With classical Kjeldahl titration after distillation of ammonia into a receiver flask filled with boric acid, 98 % of the glycine-nitrogen were found. The colorimetric UV/Vis method failed in strong sulfuric acid. The relative error of the electrochemical method was found to be less than 6 % despite the complex matrices.

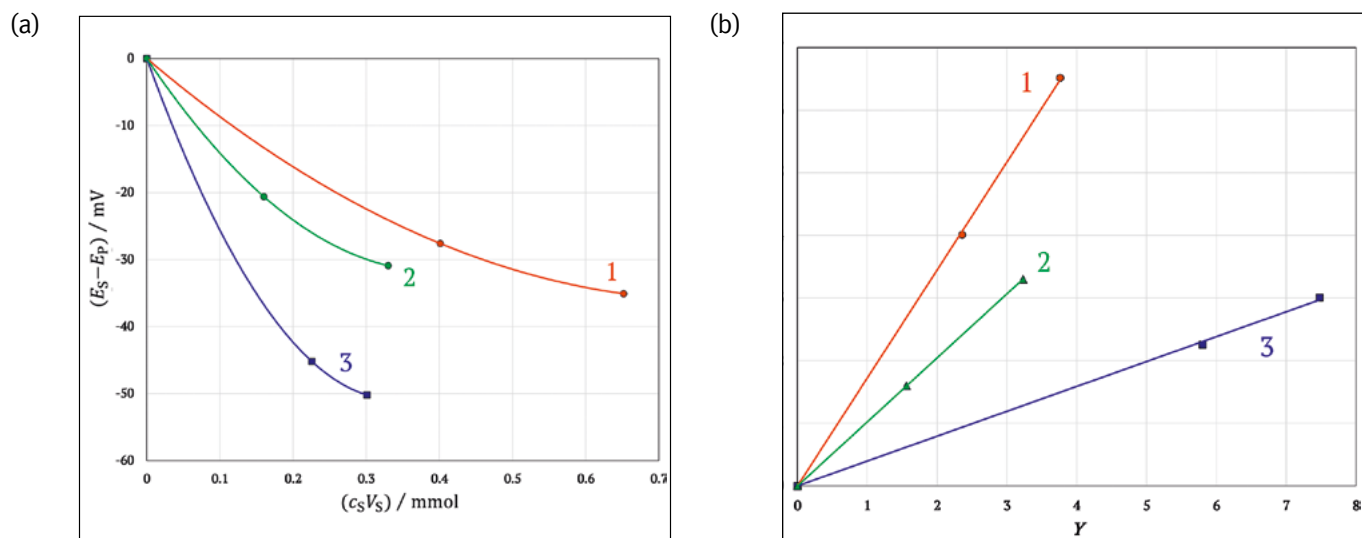


Figure 3: Standard addition method in three complex samples: (a) as measured, (b) Gran plot: 1 fermentation residue, 2 glycine, 3 ammonium chloride in sugar

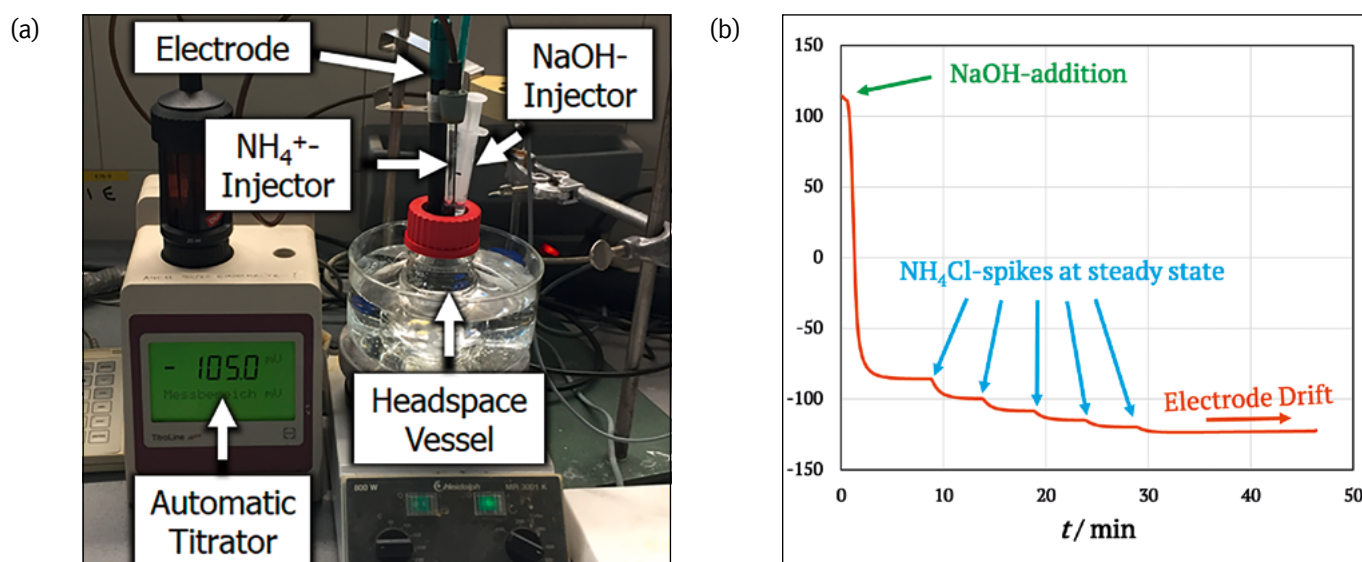


Figure 4: (a) Automated headspace titrator for ammonium determination. (b) Potential–time curve during standard additions to a sucrose solution containing 72 mg/L NH_4^+ .

Table 1: Ammonium concentration obtained by the standard addition method

Sample	Added		Found by sensor				Found by UV/Vis		
	mol/L	mg/L	mol/L	mg/L	R ²	Error	mol/L	mg/L	Error
1) Fermentation residue	0.167	3000	0.172	3110	99.99 %	+3.0 %	0.176	3160	+5.3%
2) Kjeldahl-digested glycine	0.011	194	0.010	184	100.0 %	-5.2 %	failed		
3) Sucrose matrix	0.0040	72	0.0040	72	99.97 %	-0.8 %	0.0043	77	+6.9%

4 Automated electrochemical nose

The electrochemical method works reliably for ammonium determination within 20 to 30 minutes per sample, but it is still time-consuming. Therefore, we applied an automatic titration unit (Figure 4). This electrochemical “headspace titrator” records a standard addition-time curve. For the ammonium sample in sugar solution in Figure 3, $c(\text{NH}_4^+) = 71 \text{ mg/L}$ were confirmed with 2.3 % relative error. The lifetime of the membrane was six weeks. The wide linear range of quantification from 0.01 to 1.4 g/L seldom requires dilution steps.

5 Summary

The prototype of an automatic ammonia sensitive “electrochemical nose” was designed by the help of a membrane electrode. The headspace method was shown to accurately determine the ammonium-concentration in complex inorganic and organic matrices. The electrode is never in direct contact with the biogenic sample, which extends the lifetime of the cell components. The method can be applied to ammonia, ammonium, and volatile amines without the risk of incorrect findings. Our recent developments aim at a miniaturized version of the apparatus. One day, our lab-on-a-chip might determine ammonium concentrations in field applications and enable a real-time monitoring of ammonium-loads entering the environment.

References:

- [1] Bayerisches Landesamt für Umwelt, UmweltWissen – Schadstoffe: Ammoniak und Ammonium, 2018. URL: https://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw_6_ammoniak_ammonium.pdf
- [2] K. CAMMANN, H. GALSTER, Das Arbeiten mit ionenselektiven Elektroden, Springer, Berlin 1996.
- [3] M. H. GEY, Instrumentelle Analytik und Bioanalytik, Springer Spektrum, Heidelberg, 2015.
- [4] M. DÖRING, Vorlesungsskript Naturschutzbiologie, HSWT Triesdorf, 2016.
- [5] L. HENG, Improvement of Gran's Plot Method in Standard Addition and Subtraction Methods by a New Plot Method, Analytical Letters, 24:3 (1991) 473-483.
- [6] D. A. LUZURIAGA et al. Automated Headspace Ammonia Analysis of Shrimp, Journal of Aquatic Food Product Technology, 6:3 (1997) 29-52.
- [7] METROHM, Handbuch ionenselektive Elektroden, brochure.
- [8] METROHM, Handbuch NH₃-selektive Elektroden, brochure.

Fördergeber:

Bayerisches Staatsministerium für
Wissenschaft und Kunst



Kontakt:



Niklas Zell, B.Eng.

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

ni.zell@oth-aw.de



Dipl.-Phys. Christian Schell

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

ch.schell@oth-aw.de



Josef Schottenbauer, M.Eng.

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

jo.schottenbauer@oth-aw.de



Marc Herden, B.Eng.

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

ma.herden@oth-aw.de



Prof. Dr. Peter Kurzweil

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

p.kurzweil@oth-aw.de

Zusammenfassung

Nasschemische und chromatografische Ionenanalytik sind leistungsfähige und unverzichtbare Werkzeuge für die Umweltüberwachung, Lebensmittelchemie und Schadensfallanalyse. Jedoch ist der Arbeitsaufwand erheblich. Daher haben wir die Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie (FTIR) als schnelle und einfache Methode für die semiquantitative Analytik angepasst. Die computergestützte Interpretation und chemometrische Spektrenauswertung übernimmt ein Python-Programm.

Abstract

Wet-chemical and chromatographic ion analysis are powerful and essential tools for environmental monitoring, food chemistry and damage studies. However, the workload is significant. Therefore we have adapted Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) as a rapid and simple method for semi-quantitative analysis. For the computer-based interpretation and chemometric evaluation of the spectra, a Python program was employed.

1 Von der Absorptionsbande zum Analysenbefund

Das Lab-on-a-Chip erschließt moderne Analytik für Jedermann. Doch ehe eine neue Analysenmethode in die Hand unerfahrener Anwender wechseln kann, müssen fundamentale Zusammenhänge aufgeklärt und ein verständliches Expertensystem etabliert werden. Die seit dem 18. Jahrhundert bekannten Gesetze von Beer, Bouguer und Lambert sind Grundlage für die spektroskopische Quantifizierung von Substanzen mit sichtbarem und ultraviolettem Licht. UV/Vis-Banden sind wenig stoffspezifisch. Bei trüben und gefärbten Proben treten spektrale Überlagerungen auf, die beispielsweise die Abwasseranalytik erschweren.

Infrarotes Licht regt die chemischen Bindungen in Molekülen zu charakteristischen Schwingungen und Rotationen an. Bandenlage und Intensität lassen Rückschlüsse auf den Molekülbau zu [1]. Unbekannte organische Substanzen können mithilfe von Spektrendatenbanken identifiziert werden. Bei Stoffgemischen und Lösungen liefern Datenbanktreffer jedoch überwiegend falsche Aussagen. Reale Proben bergen zudem vielfältige Verunreinigungen,

die störende Überlagerungen oder Matrixeffekte hervorrufen. Für eine qualifizierte Analyse ist der chemisch versierte Fachmann nach wie vor unverzichtbar. Kann diese Aufgabe in ferner Zukunft eine künstliche Intelligenz erledigen? Unsere Messungen legen den Grundstein für ein Expertensystem.

Im Fall wässriger Lösungen sind die Banden durch Wasserstoffbrückenbindungen verbreitert (Abbildung 1). Wasser überlagert die Absorptionsmaxima (Peaks) des Analyten. Die Peakflächen sagen nichts über die enthaltenen Ionen aus. Aus diesem Grund muss das Spektrum reproduzierbar korrigiert werden. Ein Python-Programm führt die Arbeitsschritte interaktiv aus. Die Peaks des Analyten werden sichtbar, wenn im ersten Schritt das Spektrum von Reinstwasser subtrahiert wird. Dabei ist es wichtig, das Wasserspektrum mit einem Faktor zu beaufschlagen, um keine negativen Absorptionswerte zu erzeugen. Die nachfolgende Grundlinienkorrektur nach dem Asymmetric-Least-Squares-Algorithmus von Peng et al. [2] bereinigt das Spektrum von Hintergrundeffekten und Artefakten der Wasserkorrektur. Im dritten Schritt entfernt eine Glättung nach dem Penalized-Least-Squares-Algorithmus von Whittaker das Messrauschen der Kurve [3, 4].

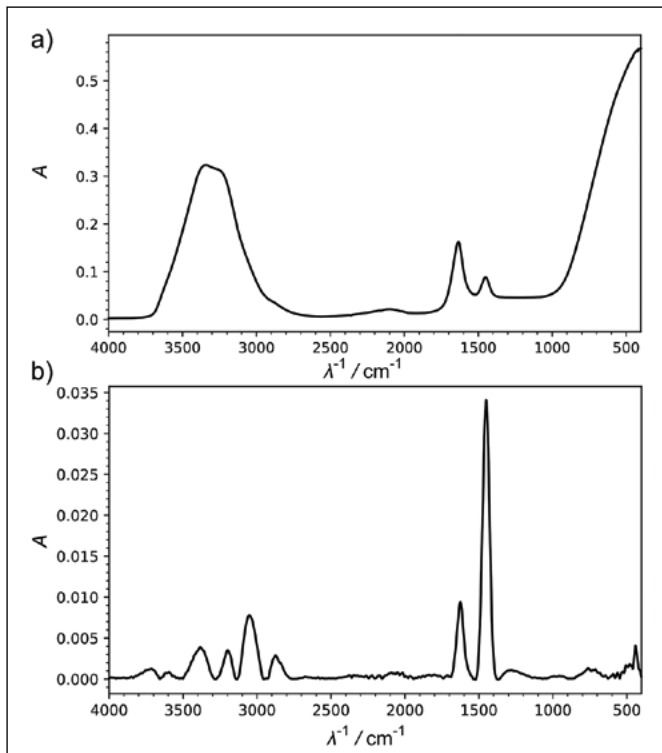


Abbildung 1: (a) Infrarotspektrum von Reinstwasser mit einer Spur Ammoniumchlorid. (b) Subtraktion von Wasser, Basislinienkorrektur und Glättung.

2 Peakerkennung und Flächenberechnung

Die einfachste Methode zur automatischen Erkennung der einzelnen Absorptionsmaxima im Spektrum ist die relative Höhenberechnung zur Grundlinie (topographic prominence) mit der Programmbibliothek „Scipy“ in Python [5]. Bei stark überlagerten Banden versagt die Methode jedoch. Als Ausweg bietet sich die Peaksuche durch Wavelet-Transformation an [6]. Sind die richtigen Absorptionsmaxima gefunden, folgt eine Berechnung der Flächen. Um Überlagerungen auszuschließen, werden die Banden durch statistische Verteilungsfunktionen angenähert mit der Python-Bibliothek von Neville *et. al.* [7]. Absorptionsbanden folgen einer Voigt-Funktion, eine Faltung der Lorentz- und Gaußverteilung.

Die unbekannte Konzentration eines Analyten in einem Gemisch wird mithilfe des Lambert-Beer-Gesetzes ermittelt. Die gemessene Extinktion A hängt bei vorgegebener Wellenlänge λ und Lichtweglänge d direkt von der Stoffkonzentration c ab.

$$A(\lambda) = \varepsilon(\lambda) \cdot c \cdot d$$

Der molare Extinktionskoeffizient ε muss nicht bekannt sein, weil im Labor mit Lösungen bekannter Konzentration eine Kalibriergerade $A = m \cdot c + t$ erstellt wird. Für eine möglichst genaue Kalibrierung wird die Peakfläche statt der Peakhöhe verwendet [1]. Die Peakfläche ergibt sich durch Integration von $A(\lambda)$ mit der Trapezregel (Abbildung 3).

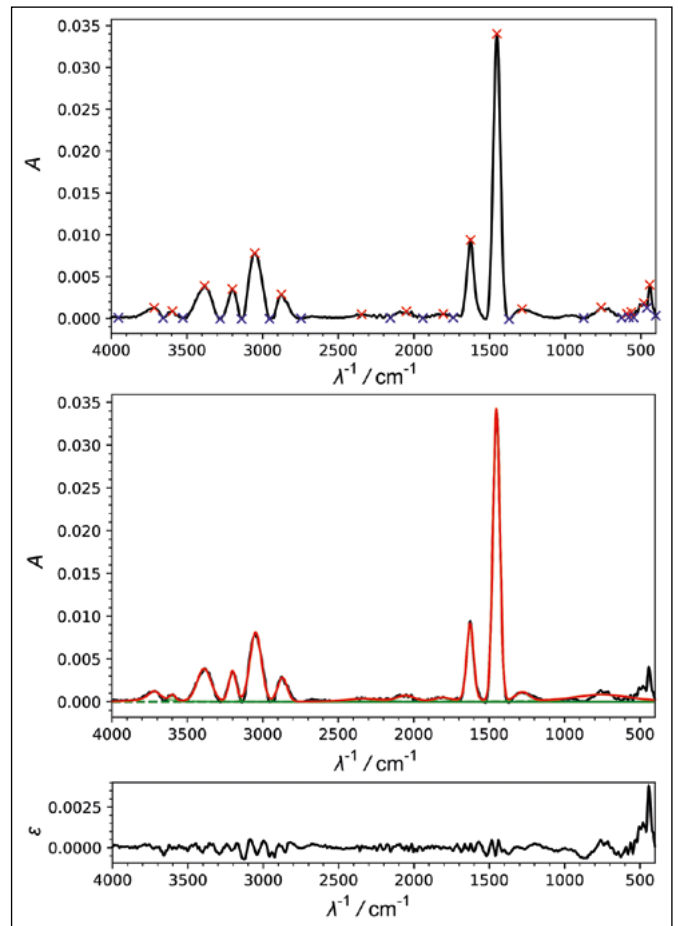


Abbildung 2: Oben: Peaksuche: Rot = Bandenmaxima, blau = Basislinienpunkte. Mitte: Anpassung von Voigt-Funktionen. Unten: Absolute Abweichung ε von Fit und Messdaten.

3 Praktische Ionanalytik

Ammonium, Nitrat, Phosphat, Sulfat – das FTIR-Spektrum unterscheidet wichtige umwelttechnische Ionen deutlich (Abbildung 3). Für die quantitative Bestimmung anorganischer Ionen in Wasserproben wurden Kalibriergeraden für verschiedene infrarotaktive Ionen aufgenommen. Die Standardlösungen bestanden aus abgewogenen Mengen NH_4Cl , NaNO_3 , Na_3PO_4 und Na_2SO_4 in entionisiertem Wasser. Tabelle 1 zeigt die exzellente Regression der durch Voigt-Funktionen angenäherten Peakfläche bei Messungen, hier mit dem ATR-FTIR-Spektrometer Bruker Tensor 27 aufgenommen. In realen Proben spielen Matrixeffekte eine Rolle, die durch den beschriebenen Algorithmus jedoch gut zerlegt werden. Bei einigen Ionen tritt, zu hohen Konzentrationen hin, eine Verschiebung des Absorptionsmaximums zu kleineren Wellenzahlen auf [8]. Was für die händische Analytik ungenau und aufwändig ist, erledigt die numerische Peakflächenbestimmung zuverlässig und schnell.

Die mathematische Zerlegung der Absorptionsmaxima eignet sich auch für organische Substanzen. Zum Beispiel geben C–H- und C–C-Schwingungsbanden Hinweise auf die Struktur und Kettenlänge von Kunststoffen und Polysacchariden.

Tabelle 1: Kalibrationspeaks für anorganische Ionen

Ion	Wellenzahl (cm ⁻¹)	Steigung	Achsenabschnitt	Regression
NH ₄ ⁺	1440 – 1460	2.1387	-0.0046	99.98 %
NO ₃ ⁻	1340 – 1345	6.4594	1.1005	99.18 %
NO ₂ ⁻	1390 – 1395	2.9933	0.7312	98.04 %
PO ₄ ³⁻	997 – 1005	71.4053	0.1417	99.90 %
SO ₄ ²⁻	1092 – 1101	25.6040	0.8372	99.73 %

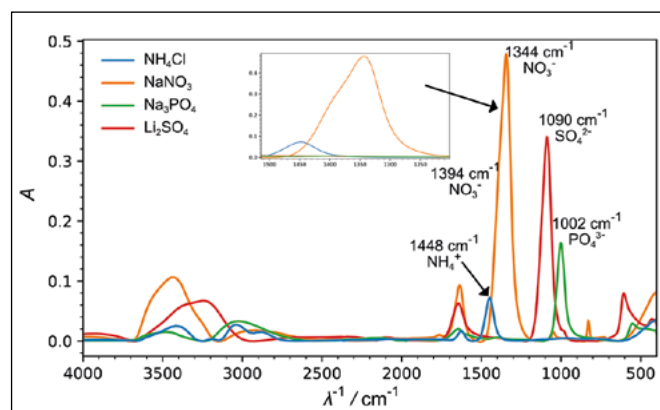


Abbildung 3: FTIR-Spektren von anorganischen Ionen

Referenzen:

- [1] H. Hug, P. Kurzweil. Tabellenbuch der analytischen Chemie, Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel, 2017.
- [2] J. Peng, S. Peng, A. Jiang, J. Wei, C. Li, J. Tan. Asymmetric least squares for multiple spectra baseline correction, *Analytica Chimica Acta* 683 (2010) 63 – 68.
- [3] P. H. C. Eilers. A Perfect Smoother, *Analytical Chemistry* 75 (2003) 3631 – 3636.
- [4] P. H. C. Eilers. Parametric Time Warping, *Analytical Chemistry* 76 (2004) 404 – 411.
- [5] E. Jones, E. Oliphant, P. Peterson, et al. SciPy: Open Source Scientific Tools for Python. 2001. URL: <https://www.scipy.org/>.
- [6] J. Schottenbauer, S. Chalupczok, C. Schell, P. Kurzweil. Numerical analysis of cyclic voltammetry measurements in electrochemical sensor applications. *OTH Forschungsbericht* 2020, 151 – 155.
- [7] M. Newville, T. Stensitzki, D. B. Allen, A. Ingargiola. LMFIT: Non-Linear Least-Square Minimization and Curve-Fitting for Python. Zenodo, 2014. URL: <http://doi.org/10.5281/zenodo.11813>.
- [8] U. Bär, P. Kurzweil, Anionen-Screening mit Infrarotspektroskopie, *GIT Labor-Fachzeitschrift* 51:11 (2007) 944 – 947.

Kontakt:



Josef Schottenbauer, M.Eng.

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

jo.schottenbauer@oth-aw.de



Niklas Zell, B.Eng.

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

ni.zell@oth-aw.de



Dipl.-Phys. Christian Schell

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

ch.schell@oth-aw.de



Prof. Dr. Peter Kurzweil

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

p.kurzweil@oth-aw.de

Technologiestrategische Optionen etablierter Unternehmen bei diskontinuierlichen Technologie- übergängen

Zusammenfassung

Etablierten Unternehmen stehen bei diskontinuierlichen Technologieübergängen verschiedene technologiestrategische Optionen zur Verfügung. Erstens die offensive Race-Strategie, die mit einem wettbewerbsintensivierenden Leistungswettrennen der alten gegen die neue Technologie einhergeht. Zweitens die defensiv angelegte Retreat-Strategie des bewussten Rückzugs auf verteidigbares und weiterhin profitables Marktterrain, die auf Wettbewerbsvermeidung setzt. Sie untergliedert sich in die Retrench-Strategie, die die Fokussierung auf eine Nische im bisherigen Markt beinhaltet und die Relocate-Strategie, die mit der Umsiedelung in einen anderen, besser geeigneten Markt einhergeht. Falls zukünftig nicht mehr die alte Technologie die Grundlage der Leistungserstellung bilden soll, kann drittens mit der Switch-Strategie ein Wechsel auf die neue Technologie erfolgen oder viertens mit der Leapfrogging-Strategie der Sprung auf die übernächste Technologie unternommen werden. Die fünfte Option sind Hybrid-Strategien. Bei diesen wird gleichzeitig sowohl die alte als auch die neue Technologie eingesetzt, oder die alte Technologie wird mit der neuen Technologie verknüpft. In der Praxis erfahren Hybrid-Strategien mit deutlichem Abstand den größten Zuspruch. Es zeigte sich, dass etablierte Unternehmen auf diesem Weg ihre Marktposition sichern oder wiedererlangen können.

Abstract

Incumbent companies have different technology strategic options available for discontinuous technology transitions. First, the offensive race strategy, which goes hand in hand with a competition intensifying performance race between the old and the new technology. Second, the defensive retreat strategy of deliberately retreating to defensible and still profitable market territory, which focuses on avoiding competition. This option is subdivided into the retrench strategy, which includes focusing on a niche in the previous market, and the relocate strategy, which is associated with moving to another, more suitable market. If the old technology should no longer form the basis of the company's performance in the future, thirdly, the switch strategy can be used to migrate to the new technology, or fourthly, the leapfrogging strategy can be applied to jump to the next but one technology. The fifth option are hybrid strategies. Incumbent companies use both old and new technology at the same time, or the old technology is combined with the new technology. In practice, hybrid strategies are the most popular by far. It was shown that incumbent companies can secure or regain their market position in this way.

1 Einleitung

Makroökonomische Analysen zeigen, dass früher oder später quasi jede Branche aufgrund prinzipieller technologischer Veränderungen einem grundlegenden Wandel unterworfen ist. Der Prozess der schöpferischen Zerstörung führt dazu, dass bis dato bestehende Marktstrukturen auflöst werden und sich gleichzeitig fundamental

veränderte Strukturen oder ganz neue Branchen herausbilden. Obwohl technologischer Wandel nicht per se positiv oder negativ ist und zudem ein immenses ökonomisches Potenzial in sich birgt, stellen Technologiesprünge für etablierte Unternehmen eine besondere Herausforderung dar, da sie durch diese Gefahr laufen, ihre bisherige, gefestigte Wettbewerbsposition zu verlieren oder im Extremfall ganz unterzugehen.

2 Methodische Vorgehensweise

Die durchgeführte Studie soll daher einen Beitrag dazu leisten im oben genannten Kontext, die konzeptionellen Grundlagen für technologiestrategische Entscheidungen bei etablierten Unternehmen zu verbessern. Zu diesem Zweck wurde zuerst das Phänomen der diskontinuierlichen Technologieübergänge mithilfe eines leistungsbezogenen S-Kurven-Modells theoretisch erfasst und veranschaulicht. Vor diesem Hintergrund wurde dann die Ausgangssituation beschrieben, in der sich etablierte Unternehmen befinden und deren technologiestrategischer Optionenraum systematisiert. Für jede der identifizierten strategischen Optionen wurden deren jeweilige spezifischen Kerninhalte herausgearbeitet und praktische Beispiele geliefert. Im Rahmen des letzten Schritts wurde schließlich anhand von empirischen Studien überprüft, inwieweit die vorher dargestellten Strategien praktische Relevanz haben und in der Unternehmenswirklichkeit Anwendung finden.

3 Der technologiestrategische Optionenraum etablierter Unternehmen

Neben der Exit-Strategie existieren drei grundlegende strategische Entscheidungspfade, die im Rahmen der Studie genauer ausdifferenziert und stringent miteinander in Beziehung gesetzt wurden. Abbildung 1 veranschaulicht die erarbeitete Systematik.



Abbildung 1: Der technologiestrategische Optionenraum etablierter Unternehmen

3.1 Exit-Strategie

Die Exit-Strategie beinhaltet als Reaktion auf die Wahrnehmung, dass die eigene Technologie durch eine neue Technologie ersetzt zu werden droht, sowohl das Verlassen des bisher bearbeiteten Marktes als auch die Aufgabe der Aktivitäten im Bereich der alten Technologie. Sie ist damit die strategische Option, die für das etablierte Unternehmen die grundlegendsten und weitreichendsten Auswirkungen hat. Diese Strategie ist angezeigt, wenn die Analyse der Ist-Situation das Ergebnis liefert, dass sich das etablierte Unternehmen nicht mehr in der Lage sieht, unter den durch das Auftauchen der neuen Technologie hervorgerufen, veränderten Markt- und Wettbewerbsbedingungen, noch kompetitiv agieren, überleben oder nach den eigenen Zielkriterien ausreichend wirtschaftlich erfolgreich sein zu können.

3.2 Strategien auf Basis der alten Technologie

Die Entscheidung beim Auftreten von technologischen Diskontinuitäten weiterhin ausschließlich auf die alte Technologie zu setzen, bildet die Grundlage der folgenden drei Strategien: Erstens der **Race-**, zweitens der **Retrench-** und drittens der **Relocate-**Strategie. Die zweite und dritte Strategie bauen auf Rückzug und werden als **Retreat-Strategien** klassifiziert. Sie sind defensiv angelegt und haben gemein, dass sie primär kunden- bzw. marktseitig ansetzen und versuchen, Nachfrageheterogenitäten zu nutzen. Die Race-Strategie ist dagegen offensiv ausgerichtet und setzt auf Leistungswettbewerb.

Im Rahmen der **Race-Strategie** bearbeitet das etablierte Unternehmen weiterhin seinen gesamten angestammten Markt mit der alten Technologie und versucht, dort im direkten Wettbewerb mit der neuen Technologie konkurrenzfähig oder überlegen zu bleiben. Dazu stehen die folgenden zwei Ansätze, die auch kombiniert werden können, zur Verfügung. Erstens kann das etablierte Unternehmen seine ihm zur Verfügung stehenden Ressourcen gezielt und massiv dafür einsetzen, die Leistungsfähigkeit der alten Technologie so stark weiterzuentwickeln, dass diese weiterhin auf einem höheren Niveau als die der neuen Technologie liegt. Zweitens kann das etablierte Unternehmen Anstrengungen unternehmen, die Weiterentwicklung der Leistungsfähigkeit der neuen Technologie oder deren Einsatz zu behindern, um auch weiterhin wettbewerbsfähig zu bleiben, selbst wenn nur geringe Leistungsfortschritte bei der alten Technologie erzielt werden können.

Die beiden **Retreat-Strategien** zielen daher darauf ab, dass dem Aufstieg einer neuen Technologie mit einer proaktiven nachfrageorientierten Repositionierung der alten Technologie begegnet wird. Es handelt sich also nicht um ein passives „Verdrängt werden“, sondern um einen bewusst herbeigeführten, geordneten Rückzug auf vorteilhafteres Territorium. Die alte Technologie soll auf Kundengruppen ausgerichtet werden, für die ihre spezifischen Eigenschaften und Leistungsmerkmale besonders nutzenstiftend sind und die diese daher auch besonders wertschätzen bzw. nachfragen. Bei der **Retrench-Strategie** zieht sich das etablierte Unternehmen mit der alten Technologie in eine Nische des bisherigen Marktes zurück. Der Großteil des angestammten Marktes wird der neuen Technologie überlassen und die Aktivitäten werden auf ein kleines Marktsegment eingeschränkt, das verteidigbar und weiterhin profitabel ist.

Häufig befinden sich die Rückzugsgebiete für die alte Technologie am oberen Ende oder unteren Ende des angestammten Marktes. Als Ergänzung oder als Alternative (insbesondere falls es im angestammten Markt keine ausreichend große Nische mehr gibt) zur Retrench-Strategie steht die Relocate-Strategie zur Verfügung. Diese

beinhaltet die aktive, rechtzeitige Umsiedlung mit der alten Technologie auf neue Märkte, indem für sie andere als ihre bisherigen Anwendungsgebiete gesucht und adressiert werden.

3.3 Strategien auf Basis neuer Technologien

Etablierten Unternehmen, die im Rahmen einer technologischen Diskontinuität die von ihnen bisher verwendete Technologie durch eine neue Technologie substituieren möchten, stehen zwei unterschiedliche Strategien zu Verfügung. Zum einen die **Switch-** und zum anderen die **Leapfrogging-Strategie**. Im Rahmen der Switch-Strategie bleibt das etablierte Unternehmen in seinem angestammten Markt, gibt die bisher von ihm verwendete Technologie auf und wechselt gleichzeitig bzw. zeitnah auf die prinzipiell neue Technologie. Da nun die Entwicklung, Fertigung und Vermarktung neuer Produkte, Dienstleistungen und/oder Verfahren auf Basis der neuen Technologie erfolgt, bringt dies einen umfassenden Anpassungsbedarf sowie eine Veränderung bzw. Modernisierung des Leistungsangebots mit sich. Nach herrschender Lehre sollte aufgrund des Gesetzes des abnehmenden Grenzertrages im letzten Drittel der S-Kurve der Umstieg von der alten auf die neue Technologie erfolgen, wobei die Herausforderung darin besteht, die Überbrückung der Lücke zwischen den beiden Kurven erfolgreich zu managen. Die zweite Option, um auf eine neue Technologie zu wechseln, stellt die Leapfrogging-Strategie dar. Im Technologiemanagement bezeichnet anbieterseitiges Leapfrogging die bewusste Entscheidung eines Unternehmens, die Entwicklung bzw. Nutzung der nächsten Technologie auszulassen und sich direkt auf die übernächste Technologie zu konzentrieren. Die Leapfrogging-Strategie setzt somit auf „Überholen ohne Einzuholen“ und ist eine Option, falls direkte Mitbewerber bereits auf die neue Technologie gewechselt sind und dort schon solche Leistungsfortschritte erreicht haben, dass diese nicht mehr eingeholt werden können. Einem etablierten Unternehmen kann es mit dieser Strategie gelingen, sich langfristig wieder einen Vorsprung vor seinen Konkurrenten zu verschaffen, indem es Zukunftsprodukte früher als diese verwirklicht und dann wieder als Pionier bzw. First seine frühere Marktposition zurückerobert.

3.4 Hybrid-Strategien

Hybrid-Strategien stellen Kombinationen aus den vorher dargestellten Strategien auf Basis der alten und einer prinzipiell neuen Technologie dar. Aus technologischer Perspektive bedeutet dies, dass ein etabliertes Unternehmen weiterhin die alte Technologie beibehält und gleichzeitig auch eine prinzipiell neue Technologie einsetzt oder dass es die alte Technologie mit der prinzipiell neuen Technologie verknüpft. Dadurch erweitert es sein bestehendes Technologie-Portfolio und gegebenenfalls

auch sein Produkt- und Leistungsspektrum. Aus marktlicher Perspektive können der gesamte angestammte Markt, einzelne Segmente in diesem und/oder neue Märkte bearbeitet werden. Zur Ausgestaltung der Hybrid-Strategie können mit explorativen Hybriden, optimierenden Hybriden, Brücken-Hybriden, Nischen-Hybriden, blockierenden Hybriden, Flaschenhals-Hybriden und Hochleistungs-Hybriden sieben verschiedene Hybrid-Typen zum Einsatz kommen.

4 Erkenntnisse aus empirischen Studien

Im letzten Schritt wurden vier empirische Studien zum technologiestrategischen Verhalten etablierter Unternehmen im Kontext diskontinuierlicher Technologieübergänge ausgewertet, deren Kernergebnisse zusammengefasst und in den Kontext des technologiestrategischen Optionenraums eingeordnet.

Die erste Studie stammt von **Cooper und Smith**. Die beiden Autoren analysieren die strategischen Reaktionen von 27 etablierten, marktführenden Unternehmen aus acht verschiedenen Branchen des Konsum- und Industriegüterbereichs, als diese sich mit einer Bedrohung durch eine neue Substitutionstechnologie konfrontiert sahen. Dabei stellen Cooper und Smith fest, dass alle der untersuchten Unternehmen auch im neuen Technologiefeld aktiv wurden. Die meisten etablierten Unternehmen erweiterten ihr Leistungsspektrum um neue Produkte auf Basis der neuen Technologie und produzierten aber auch weiterhin Produkte auf Basis der alten Technologie. Es wurden somit durchgängig Hybrid-Strategien verfolgt. Kein Unternehmen verließ den Markt (Exit-Strategie) oder wählte eine Strategie, die rein auf der alten Technologie basierte (Race-, Retrench- oder Relocate-Strategie). Die zweite Studie liefern **Sakamoto und Fujimura**, die der Frage nachgehen, wie etablierte Unternehmen nach einer technologischen Diskontinuität wieder ihre marktführende Position erlangen können. Dazu analysieren die Autoren im Rahmen einer in der Akkumulatoren-Industrie angesiedelten Fallstudie, den etablierten Anbieter Sanyo, der dort nach einem prinzipiellen Technologiewechsel wieder zu alter Stärke fand. Sie vergleichen ihn dabei mit dem Newcomer Sony und den ebenfalls etablierten Unternehmen Matsushita, das sich allerdings von dem Technologiebruch nicht wieder erholte. Im Ergebnis plädieren Sakamoto und Fujimura damit für eine langfristig angelegte Hybrid- und Switch-Strategie. Die dritte Studie zum Einsatz verschiedener Technologiestrategien etablierter Unternehmen legen **Schewe, Liesenkötter und Richter** vor. Für ihre Untersuchung in der Automobilindustrie wurden über die Onlineplattform XING nach einem zweistufigen Selektionsverfahren insgesamt 2021 einschlägige Personen kontaktiert. Von den 513 Personen, die sich bereit erklärten, einen Fragebogen auszufüllen, schlossen diesen 205 vollständig ab. Die Antworten auf die

Frage nach der strategischen Reaktion auf die Bedrohung durch eine neue Technologie verteilen sich wie folgt: Nur 2,9 % gaben an, dass ihr Unternehmen den Markt verlässt (Exit-Strategie). 20,2 % entwickeln die alte Technologie weiter, ohne auf die neue zu wechseln, wogegen lediglich 6,8 % ihre Aktivitäten bei der alten Technologie einstellen und stattdessen die neue Technologie verfolgen (Switch-Strategie). Mit 70,2 % der Rückmeldungen erfuhren gemischte Strategien (Hybrid-Strategien) mit weitem Abstand den größten Zuspruch. Die vierte Studie stammt von **Borgstedt, Neyer und Schewe** und ist ebenfalls in der Automobilindustrie angesiedelt. Sie untersucht, wie sich der technologiestrategische Fokus der zehn im Jahr 2013 umsatzstärksten Automobilhersteller bezüglich der technischen Weiterentwicklungen von konventionellen Verbrennungsmotoren und alternativen elektrischen Antriebsarten seit 1990 entwickelt hat. Zu diesem Zweck wurden 24.920 Einzelartikel der Fachzeitschrift ‚Automotive News‘ aus dem Zeitraum 1990 bis 2013 auf technische Innovationen in den oben genannten Technologiegebieten untersucht. Als wichtige Erkenntnis kommen Borgstedt et al. durch ihre Untersuchungen zu dem Resultat, dass alle betrachteten Automobilproduzenten Mischformen aus den beiden reinen Strategien „Switch“ und „Race“ nutzen. Dies bedeutet, dass faktisch nur Hybrid-Strategien zu beobachten waren.

5 Fazit

Beim Auftreten eines diskontinuierlichen Technologieübergangs steht einem etablierten Unternehmen ein breites Spektrum an technologiestrategischen Optionen zur Verfügung, um sein Überleben zu sichern. Bei den Strategien rein auf Basis der alten Technologie ist zwischen zwei Grundausrichtungen unterschieden.

Auf der einen Seite die offensive Ausrichtung, die mit einem wettbewerbsintensivierenden Leistungswettrennen (Race-Strategie) gegen die neue Technologie einhergeht. Diese wird in der Praxis eher selten gewählt und ist meist nicht von Erfolg gekrönt. Auf der anderen Seite die defensiv angelegte Variante des bewussten Rückzugs (Retreat-Strategien) auf verteidigbares und weiterhin profitables Marktterrain, die auf Wettbewerbsvermeidung setzt. Sie untergliedert sich ihrerseits in die Fokussierung auf eine Nische im bisherigen Markt (Retrench-Strategie) und die Umsiedelung in einen anderen, besser geeigneten Markt (Relocate-Strategie). Die Praxis zeigt, dass mit den Retreat-Strategien zwar kein Wachstum, aber zumindest das vorläufige Überleben von etablierten Unternehmen erreicht werden kann. Falls zukünftig eine andere als die alte Technologie die Grundlage der Leistungserstellung und der Wettbewerbsfähigkeit bilden soll, so kann dies durch einen Wechsel auf die neue Technologie (Switch-Strategie) oder durch den Sprung auf die übernächste Technologie (Leapfrogging-Strategie) erfolgen. Die betrachteten empirischen Studien haben gezeigt, dass die reine Substitution der alten durch eine neue Technologie eher die Ausnahme als die Regel ist. Mit deutlichem Abstand erfahren Hybrid-Strategien den größten Zuspruch in der Praxis. Im Rahmen von Hybrid-Strategien werden von etablierten Unternehmen gleichzeitig sowohl die alte als auch die neue Technologie eingesetzt, oder die alte Technologie wird mit der neuen Technologie verknüpft. Dabei können in Abhängigkeit von der unternehmensspezifischen Zielsetzung und dem bereits erreichten Entwicklungsgrad der neuen Technologie unterschiedliche Hybrid-Typen zur Ausgestaltung der Strategie herangezogen werden. Auf diesem Weg kann ein etabliertes Unternehmen seine Marktposition sichern oder wiedererlangen.

Referenzen:

Tiefel, T.: Technologiestrategische Optionen etablierter Unternehmen bei diskontinuierlichen Technologieübergängen, Paper-Reihe „Schnittstellen des Technologie- und Innovationsmanagements“, Paper Nr. 5, Amberg, 15.03.2020.

Diese ausführliche Version der Studie enthält ein Verzeichnis mit allen 82, im Rahmen der Untersuchung herangezogenen Quellen. Sie kann unter folgendem Link kostenlos heruntergeladen werden:

https://www.oth-aw.de/files/oth-aw/Professoren/Tiefel/Tiefel_Grundlegende_strategische_Optionen_geschuetzt.pdf

Kontakt:



Prof. Dr. Thomas Tiefel

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

t.tiefel@oth-aw.de

Innovation – machbar ohne Labor? Kreatives und kollaboratives Arbeiten in Corona-Zeiten

Dr. Matthias Schöberl
Marina Dötterl, M.Eng.
Christine Katharina Raps, M.Sc.
Karina Schuller, M.Sc.
Lisa Strigl, M.Sc.
Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

Zusammenfassung

Der direkte Austausch über Ideen und Probleme, das assoziative und kollaborative Arbeiten ist Grundvoraussetzung für kreative Prozesse und die Entwicklung von Innovationen. Das *machbar Innovationslabor* ist daher durch die bestehenden Kontaktbeschränkungen und Hygienemaßnahmen aufgrund der Pandemie besonders herausgefordert.

Abstract

The face-to-face exchange concerning ideas and problems, associative and collaborative work are basic requirements for creative processes and the development of innovations. The *machbar Innovation Laboratory* is challenged by the existing contact restrictions and infection control measures due to the Corona-pandemic.

1 Einleitung

Die „Corona-Situation“ zwingt Hochschulen und Wirtschaft zu verstärkten Anstrengungen hinsichtlich der Digitalisierung. Ein Innovationsschub, der Deutschland ins „Neuland“ [1] transformiert? Oder handelt es sich eher um das Gleichziehen mit einem bisher nicht erreichten Standard? Das *machbar Innovationslabor* (www.oth-aw.de/machbar), das im Rahmen des Projektes TRIO der Förderinitiative Innovative Hochschule [2] betrieben wird, ist durch die Pandemie sowie die damit verbundenen Infektionsschutzmaßnahmenverordnungen und daraus resultierende Kontakt-Einschränkungen stark herausgefordert.

Der Lockdown brachte alle drei Säulen der Hochschulen für Angewandte Wissenschaften – Lehre, Forschung und Transfer – ins Wanken. Während die Digitalisierung der Lehre und die Kommunikation in Projekten dank außerordentlicher Anstrengungen recht schnell und mit gutem Ergebnis realisiert werden konnten, bleibt die Arbeit des *machbar Innovationslabor* weiterhin beeinträchtigt. Dabei sind verständlicherweise das physische Labor im WTC Weiden sowie das mobile Labor in stärkerem Maße betroffen als die virtuelle Variante.

Dazu tragen verschiedene Faktoren bei: Methoden wie Design Thinking, Lego Serious Play, Scrum, Kanban, TRIZ usw. sowie erprobte Formate, wie die Design Thinking Days oder Hackathons, sind auf Gruppen ausgerichtet, die direkt interagieren. Relativ große Gruppen teilen sich in Untergruppen auf, kommen wieder zusammen, teilen ihre Ergebnisse. Nähe ist hier gewünscht, das gemeinsame Arbeiten auf derselben Oberfläche (vom Flipchart bis zum Touchscreen) Standard.



Der Name ist Programm: *machbar Innovationslabor*.

Während also das physische und das mobile Labor negativ betroffen sind, entsteht für das virtuelle Labor ein besonderer Schub, hier bieten sich viele Möglichkeiten (vgl. unten). Allerdings gibt es auch hierfür einschränkende Bedingungen. Immer noch sind Unternehmen, Kommunen oder Organisationen der Zivilgesellschaft vorrangig damit beschäftigt, die grundständige Arbeit aufrecht zu

erhalten. Mitarbeiter*innen arbeiten im Homeoffice, alle Kapazitäten fließen in die Organisation des Workflows und die Aufrechterhaltung der digitalen Infrastruktur.

Sollen die Ziele des Projektes – Aufbau von effektiven Netzwerken zur Etablierung von Transfer- und Innovationsstrukturen, Erprobung von Methoden und Formaten für Innovationsprozesse, niedrigschwelliges Angebot vom Kennenlernen neuester technologischer Entwicklungen (Digitalisierung zum Anfassen) über Erlernen und Anwenden kreativer Techniken bis zum Verständnis der drei Dimensionen des Innovationsprozesses – auch unter Corona-Bedingungen erreicht werden, muss die virtuelle Variante des *machbar Innovationslabor* schneller als geplant fertiggestellt und in Arbeit gebracht werden.

Im Folgenden werden also vorrangig grundsätzliche Fragen sowie die besonderen Herausforderungen für das virtuelle Labor betrachtet.

2 Keine Kurzschlüsse ziehen

Weil der Digitalisierungsschub allerorten deutlich zu spüren ist, weil sich die Prozesse einspielen und die Methodenkompetenz der Mitarbeiter*innen sowie der Organisationen wächst, könnte sich der Eindruck einstellen (und tut es in vielen Fällen auch), es fände derzeit ein echter Innovationsschub statt. Dies aber wäre kurzgeschlossen. Dass nun moderne Mittel angewandt werden, die längst zur Verfügung standen, aber aus Bequemlichkeit, Bürokratismus oder Kurzsichtigkeit bisher nicht zum Einsatz kamen, belegt genau das Gegenteil von Innovationskraft. Ein illustrierendes Beispiel: Eine Hochschule entschließt sich anno 2020, einen Auftritt auf einer Social Media-Plattform aufzubauen, um mehr Studierende zu werben. Quod erat demonstrandum. Die Gefahr besteht darin, sich vom gefühlten Schub echte Innovationskraft vorgaukeln zu lassen.

Wie aber kommen unter den gegenwärtigen Bedingungen Innovationen in Unternehmen und Organisationen? Welche Rolle können physische Innovationslabore dabei spielen? Die Kurzstudie [3] "Future Innovation Labs" des Fraunhofer-Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO widmet sich genau dieser Frage. Die Autoren beschreiben verschiedene Aspekte und Herangehensweisen anhand von sechs Fallbeispielen und diskutieren zukünftige Entwicklungen für solche Innovationsräume.

Auch wenn die beispielhaft betrachteten Räume zum Teil anders ausgerichtet sind als das *machbar Innovationslabor*, eignen sich die Ergebnisse, die Reflexion über den aktuellen Stand des Projektes anzuregen.

3 Die Hemmnisse [4]

Konkret treten zunächst technische und regulatorische / juristische Herausforderungen auf. Für innovative Formate muss man sich verschiedener digitaler kollaborativer Tools bedienen. Doch die Anforderungen des Datenschutzes schränken die tatsächlich unkritisch einsetzbaren Tools erheblich ein. Wie kann den Nutzern des Innovationslabors, die sich ja nicht in der IT-Umwelt der Hochschule bewegen, ein variables Tooling innerhalb einer vertretbaren Bandbreite angeboten werden?

Zu den methodischen Herausforderungen zählt die emotionale Hürde. Gerade für introvertierte Menschen bietet die virtuelle Präsenz eine hervorragende Rückzugsmöglichkeit. Wie kann es gelingen, die Bedürfnisse und Emotionen der Nutzer anzusprechen? Wie kann die beispielsweise in Design Thinking-Prozessen vorgesehene Iteration genutzt werden, um Menschen abzuholen? Gleichzeitig wirkt das Iterieren im digitalen Prozess oft ermüdend – wie kann dem entgegengewirkt werden?

Grundsätzlich steht fest, dass virtuelle Meetings das, was im persönlichen Austausch entsteht, nicht generieren können. Dennoch werden sie aus Nützlichkeits-erwägungen heraus oder wegen allgemein gewünschter strengerer Hygieneregeln weiter eine wichtige Rolle spielen. Welche hybriden Veranstaltungsformen sind für die verschiedenen Formate des Innovationslabors auch auf Dauer möglich? Wie können Risikogruppen auch in der „nach Corona“-Grippezeit auf Distanz eingebunden werden?

Wie können Hygieneregeln eingehalten und in den dauerhaften Betrieb des physischen wie mobilen Labors implementiert werden?

4 Die Chancen

Digitale Formate werden flexibler gehandhabt als Präsenzveranstaltungen. Unternehmen müssen auf Mitarbeiter*innen im Idealfall nicht einen ganzen Tag (oder Tage) lang verzichten, lange Anfahrten entfallen. Dies dürfte den „Vertrieb“ der entwickelten digitalen Formate unterstützen.

Grundsätzlich werden mehr Nutzer offen gegenüber den im Innovationslabor angewandten Methoden sein als „vor Corona“. Der Workflow der Formate dürfte sich verbessern, eventuell können Formate in konzentrierterer Gestalt angeboten werden.

Hybride Formate, also das Ermöglichen virtueller Zugänge und digitaler Beteiligung zu Präsenzveranstaltungen (oder auch umgekehrt), bieten die Möglichkeit im größeren Rahmen zusammenzuarbeiten. Lokale Gruppen können überregional zusammenarbeiten.

Die Covid 19-Pandemie hat die Mängel in unserer Art des Wirtschaftens deutlich gemacht. Durch die globale Arbeitsteilung sind zum Teil Kompetenzen verloren gegangen, weil Produkte und Dienstleistungen verstärkt von außen eingekauft werden. Zum Teil macht dies unsere Volkswirtschaft anfälliger gegen Krisen. Beispielhaft sei die nahezu vollständige Abhängigkeit von der Arzneimittelproduktion in China und Indien genannt. Zum Teil haben sich Produktionstechniken und -prozesse so verändert, dass die früheren Zustände nicht mehr sinnvoll herstellbar sind. In beiden Fällen besteht ein verstärkter Bedarf, neu zu denken. Gerade die Hochschulen für Angewandte Wissenschaften sind als Bewahrer grundsätzlichen Wissens und an der praktischen Umsetzung orientierte Berater prädestiniert, die deutsche Wirtschaft auf dem Weg zu mehr Resilienz zu unterstützen. Von diesem Innovationsbedarf kann auch das *machbar Innovationslabor* profitieren.

Auch die Kommunen oder Organisationen der Zivilgesellschaft müssen neue Wege finden, um dauerhaft einzuhaltende Umgangs- und Hygieneregeln mit dem Wunsch nach pulsierenden Innenstädten, lebendigen Vereinen und bürgerschaftlichem Miteinander in Einklang zu bringen. Das *machbar Innovationslabor* kann sein Portfolio erweitern, um dem verstärkten Bedarf dieser Player gerecht zu werden.



Szenen aus dem *machbar*-Video und aus einer anderen Zeit: Aktuell ist das physische Labor am Standort Weiden – wie im letzten Bild – leer. Die Mitarbeiter*innen realisieren das virtuelle Labor.

5 Fazit und Ausblick

Gegenüber der ursprünglichen Gewichtung im Projektplan gewinnt die virtuelle Variante des Innovationslabors deutlich an Gewicht. Was als Add-On avisiert wurde, entwickelt sich nun zum zweiten Standbein. Für alle Einsatzmöglichkeiten werden die virtuellen Komponenten einen bedeutenden Mehrwert bieten, die Akzeptanz erhöhen und die Vermarktung des Labors positiv unterstützen. Insofern bildet das *machbar Innovationslabor* den bereits angerissenen Wandel hin zu forcierter und tiefergehenden Digitalisierung idealtypisch ab. Mehr noch, es kann Unternehmen und Organisationen bei diesen Prozessen stärker als geplant unterstützen und selbst Anschauungsobjekt für diese Transformation sein.

Der besondere Wert von Netzwerken zeigt sich gerade in der Überwindung der Krise. Daher veranstaltete das *machbar Innovationslabor* im Herbst 2020 eine virtuelle Konferenz unter dem Titel „netzWERKstatt“, bei welcher sich Partner der Hochschule, die selbst wiederum als Netzwerker tätig sind, über die geschilderten und weitere Herausforderungen austauschten und gemeinsam gangbare Lösungen erarbeiteten.

Die virtuelle Variante des *machbar Innovationslabor* soll eine Plattform für Wissensmanagement und Wissenstransfer sein. Sie erfährt durch die Learnings in der Corona-Situation eine Konkretisierung in bestimmten Angeboten sowie eine Justierung in der gesamten Ausrichtung. Neben dem Crowdfunding und Crowdsourcing-Charakter tritt der Aspekt einer Plattform für konkrete Veranstaltungen und Formate stärker in den Vordergrund.

Dabei können viele Elemente, die beispielsweise in der digitalen Lehre sowie und insbesondere auch beim virtuellen Studieninformationstag der Hochschule zum Einsatz kamen, im virtuellen Labor ebenfalls genutzt werden: Workshops via Software für virtuelle Konferenzen und digitaler Workspaces, „Stammtisch“ zum Netzwerken, Innovationslotsen (erweitertes Umfrage-Formular: passende Methode wird anhand der Antworten ausgewertet und automatisch generiert), Chatfunktion / Sprechstunde, Blog, Online-Konferenzen und virtuelle Info-Stände auch für externe Teilnehmer, Macherpedia, ...

Die ersten Erfahrungen mit einzelnen Formaten und Methoden konnten bereits während des Sommers 2020 gesammelt werden. Im Herbst fanden mehrere größere Konferenzen statt. In etwa einem Jahr kann das virtuelle Labor auch als Plattform einsatzfähig sein.

Referenzen:

- [1] Bundeskanzlerin Angela Merkels Satz vom Internet, das Neuland ist, wird seit bereits sieben Jahren zitiert. Die Langlebigkeit des Zitats mag im beschleunigten „Internetzeitalter“ (ein ebensolcher Anachronismus) erstaunen, beleuchtet aber auch den tatsächlichen Fortschritt der Digitalisierung. Das gesamte Zitat lautet: „Das Internet ist für uns alle Neuland, und es ermöglicht auch Feinden und Gegnern unserer demokratischen Grundordnung natürlich, mit völlig neuen Möglichkeiten und völlig neuen Herangehensweisen unsere Art zu leben in Gefahr zu bringen.“ (Pressekonferenz am 19. Juni 2013; <https://www.bundestkanzlerin.de/bkin-de/aktuelles/pressekonferenz-von-bundestkanzlerin-merkel-und-us-praesident-obama-844776>).
- [2] <https://www.transfer-und-innovation-ostbayern.de/>
- [3] <https://www.digital.iao.fraunhofer.de/de/publikationen/FutureInnovationLabs.html>
- [4] Da hier ein Diskussions- und Arbeitsstand wiedergegeben wird, werden beispielhaft einige Fragen aufgeworfen und nur zum Teil beantwortet.

Fördergeber:



Kontakt:



Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen
und Gesundheit
Dekan
Leitung Institut für Medizintechnik (IfMZ)
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

c.bulitta@oth-aw.de



Prof. Dr. Wolfgang Weber

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Leitung Grundsatzangelegenheiten
und Hochschulentwicklung
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

w.weber@oth-aw.de



Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

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

a.hoess@oth-aw.de



Marina Dötterl, M.Eng.

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Hochschulverbund Transfer und
Innovation Ostbayern (TRIO)
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

m.doetterl@oth-aw.de



Anna Hautmann, M.Sc.

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Hochschulverbund Transfer und
Innovation Ostbayern (TRIO)
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

a.hautmann@oth-aw.de



Christine Katharina Raps, M.Sc.

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Hochschulverbund Transfer und
Innovation Ostbayern (TRIO)
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

c.raps@oth-aw.de



Lisa Strigl, M.Sc.

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Hochschulverbund Transfer und
Innovation Ostbayern (TRIO)
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

l.strigl@oth-aw.de



Karina Schuller, M.Sc.

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Hochschulverbund Transfer und
Innovation Ostbayern (TRIO)
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

k.schuller@oth-aw.de



Dr. Matthias Schöberl

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Hochschulverbund Transfer und
Innovation Ostbayern (TRIO)
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

m.schoeberl@oth-aw.de

Standortaufbau in Manila/ Philippinen im Rahmen einer globalen Markterschlie- ßungsstrategie für B2B-IT-Services eines mittelständischen IT-Unternehmens

Zusammenfassung

Die hier beschriebenen Erkenntnisse wurden im Rahmen eines Praxissemesterprojektes im Wintersemester 2019/2020 an der OTH Amberg-Weiden gewonnen. Daten wurden in Form freier Interviews sowie mit einem beobachtenden Ansatz vor Ort in Manila im Dezember 2019 erhoben.

Das Partnerunternehmen VALEO IT mit Unternehmenszentrale in Luhe-Wildenau als Untersuchungs- und Gestaltungsobjekt verfolgt eine globale Markterschließungsstrategie im Bereich von B2B IT-Services. Das Unternehmen bietet IT-Dienstleistungen auf unterschiedlichen Komplexitätsgraden an, die von einfachen Helpdesk-Anwendungen (sog. "First Level-Support") bis zu komplexeren IT-Themen ("Second Level Service", "Third Level Service", "System-Operations" und "Onsite-Betreuung") reichen.

Als Zielmarkt bearbeitet VALEO IT Großunternehmen mit teils globaler Marktpräsenz, die von ihrem IT-Dienstleister entsprechend ebenfalls eine weltweite Betreuung „rund um die Uhr“ erwarten. Da VALEO IT in diesem Marktsegment weiterwachsen möchte, stellte sich die Erschließung des „APAC“-Raumes mit einem eigenen Standort als strategische Herausforderung, nachdem Europa und der amerikanische Kontinent mit jeweils mehreren Standorten in Deutschland, Rumänien und Mexiko bereits erschlossen sind.

Dieser Beitrag behandelt dazu ausgewählte Aspekte der Standortwahl und der Aufnahme der operativen Geschäftstätigkeit.

Abstract

The findings described here were gained during a practical semester project in winter semester 2019/2020 at the OTH Amberg-Weiden. Data were collected in the form of free interviews and with an observational approach on site in Manila in December 2019.

The partner company VALEO IT with its headquarters in Luhe-Wildenau as the object of investigation pursues a global market development strategy in the field of B2B IT services. The company offers IT services at different levels of complexity, ranging from simple helpdesk applications (so-called "first level support") to more complex IT topics ("second level service", "third level service", "system operations" and "on-site support").

VALEO IT's target market is large companies, some of which have a global market presence, who also expect their IT service provider to deliver worldwide support "around the clock". Since VALEO IT would like to grow further in this market segment, the development of the "APAC" area with its own location posed a strategic challenge, after Europe and the American continent with several locations each in Germany, Romania and Mexico have already been developed.

This article deals with selected aspects of the choice of location and the start of operations.

1 Standortwahl

Bei der Suche nach einem geeigneten Standort in Asien sind für das Unternehmen als Dienstleistungsunternehmen zunächst Fragen der vor Ort verfügbaren *Personalressourcen* relevant. Hierbei sind im Arbeitsmarkt breit verfügbare IT-Kenntnisse, Sprachkenntnisse, insbesondere in Englisch, Japanisch und in Mandarin sowie das allgemeine Lohnniveau bedeutsam.

Auf die tatsächlichen Lohnkosten wirken ferner eine Passung von *Zeitzone*n des Ortes der Leistungserstellung im Vergleich zu den räumlichen Orten der Nachfrage. Liegt eine weitgehende Passung vor, lassen sich in der Kundennachfrage frequenzstarke Hauptgeschäftszeiten tagsüber mit üblichen Arbeitszeiten (Tagschichten) der Mitarbeiter abbilden. Damit können z. B. kostenintensive Nachtzuschläge in Verbindung mit hinsichtlich der Arbeitsbedingungen wenig attraktiven Nachtschichten weitgehend vermieden werden. Im gegebenen Beispiel befinden sich zahlreiche Kundenstandorte in China und in benachbarten Ländern in Südostasien, so dass ein Standort in Fernost hinsichtlich dieser Zeitzonenthematik räumlich geeignet erscheint. So ist beispielweise die Zeitzone in China und den Philippinen identisch.

Im Bereich der *politisch-rechtlichen Rahmenbedingungen* sind stabile und möglichst kalkulierbare politische Verhältnisse sowie ein für ausländische Investoren freundliches Investitionsklima von Bedeutung.

Im gegebenen Geschäftsmodell empfiehlt sich ferner eine räumliche Nähe zu *zentralen Kunden* im Zielgebiet, was die Kundenkommunikation erfahrungsgemäß erleichtern kann und sich auch für die Akquise von ergänzenden Aufträgen seitens der lokalen Geschäftsstellen der Kunden als günstig erweist.

In der Abwägung dieser Argumente fiel die Wahl für einen zu gründenden asiatischen VALEO-IT-Standort auf die Philippinen und dort speziell auf den Großraum Manila, wobei folgende Argumente zielführend waren:

Die Philippinen verfügen über 106 Mio. Einwohner, davon ca. 13 Mio. in „Metro Manila“, dem Großraum Manila, der aus einer Mehrzahl von zu einer zusammenhängenden Stadtlandschaft zusammengewachsenen Einzelstädten besteht, wie z. B. Makati oder Bonifacio Global City (BGC). Diese verfügen jeweils über mehrere hunderttausend Einwohner.

Das BIP je Einwohner (KKP) beträgt im Jahr 2018 ca. 8.900 USD (118.) und liegt damit deutlich hinter einem ähnlichen Schwellenland wie z. B. Mexiko (20.600 USD). [1] Entsprechend günstig ist aus zentraleuropäischer Perspektive das durchschnittliche Lohnniveau.

Es besteht eine exportorientierte Wirtschaft mit Schwerpunkten in Textil- und Elektronikindustrie sowie einem starken Dienstleistungssektor mit besonderem Schwerpunkt im IT-Sektor.

Durch die historische Kolonialzeit mit speziell spanischen und US-amerikanischen Einflüssen entstand eine Prägung im Land, die auch heute noch vielfältige Auswirkungen hat. So stellt sich das Rechtssystem als Mischung von romanischen (diesem ist auch das deutsche Rechtssystem zuzuordnen) und angloamerikanischen juristischen Prinzipien dar. Elemente des romanischen Rechtssystems finden sich z. B. im Zivilrecht, Strafrecht, Familien- und Erbrecht, während das Gesellschafts- und Steuerrecht stärker am angloamerikanischen Rechtssystem orientiert ist [2].

Die Vorgängerregierungen sowie die aktuelle Regierung fördern seit mehreren Jahrzehnten die Gründung von Unternehmen, die von Non-Residents getragen sind. Dies wird beispielsweise deutlich am „Foreign Investments Act of 1991“, dem „Omnibus Investments Code of 1987“ sowie dem „Corporate Code“. Ferner bestehen für Geschäftsmodelle des IT-Business Process Outsourcing (IT-BPO) spezielle Gesetze und erleichternde Rahmenbedingungen.

Besondere Erleichterungen bürokratischer Art und hinsichtlich der Mindestkapitalisierung einer lokalen Niederlassung bestehen ferner im Fall reiner Exportdienstleistungen ohne nationale Marktbearbeitung bzw. ohne lokale Kunden.

Da VALEO IT eine dauerhafte Tätigkeit im Land anstrebt, wurde als Rechtsform eine Gesellschaft als „Incorporation“ (Inc.) gegründet. Dies ist in etwa vergleichbar mit einer deutschen GmbH.

Da in der Gründungsphase nur Exportdienstleistungen erbracht wurden, wurde auf die Erleichterung bei der Mindestkapitalisierung zurückgegriffen. Mittlerweile werden auch lokale Kunden adressiert, so dass auf diese Erleichterung inzwischen verzichtet wird und eine Kapitalerhöhung erfolgte.

Durch das wie dargestellt vergleichsweise freundliche Umfeld für IT-Unternehmen, finden sich im Land vielfältige multinationale IT-Konzerne und Dienstleister mit großen Standorten im Großraum Manila, wie z. B. Google und Accenture mit Main-Offices im Stadtteil Bonifacio-Global-City (BGC). Unternehmen aller sozialer Netzwerke wie Facebook, Twitter oder YouTube verfügen im Großraum Manila über große Standorte mit zehntausenden Mitarbeitern, welche als Content Moderatoren die hochgeladenen Inhalte der Nutzer prüfen und gegebenenfalls löschen.

Ein Grund für die dynamische Entwicklung und Präsenz der großen globalen IT-Unternehmen liegt ferner in den guten englischen Sprachkenntnissen der qualifizierteren Bevölkerungsteile (englisch ist zweite Amtssprache), der durch den starken US-amerikanischen Einfluss der letzten Jahrzehnte im Land begründet ist. Der Großraum Manila ist dabei besonders beliebt auch für IT-nahe Call-center-Aufgaben für amerikanische Unternehmen wegen einer „weitgehend akzentfreien“ Aussprache der lokalen Arbeitskräfte. Manila präsentiert sich dabei in seinen zentralen Geschäftsvierteln dem Betrachter dementsprechend als kosmopolitische Großstadt ohne ausgeprägten „asiatischen“ Charakter.

Ferner findet man gerade im Großraum Manila ausreichend Mitarbeiter mit Sprachkenntnissen in Mandarin, um auch Services für chinesische Standorte in Muttersprache und räumlich aus den Philippinen anbieten zu können.

Der Großraum Manila verfügt dabei über diverse Hochschulen mit entsprechender fachlicher Orientierung. Typischerweise adressiert VALEO IT qualifizierte Mitarbeiter mit Hochschulabschluss und einschlägiger Berufserfahrung.

Der Autor hatte die Möglichkeit vor Ort im Stadtteil Makati der Ateneo de Manila University – Graduate School of Business (private Hochschule) einen Kurzbesuch abzustatten und einen direkten Eindruck über Lernumgebung und Lehrangebote zu gewinnen. Im zusammenfassenden Eindruck entsprechen die Überschriften der Lehrangebote weitgehend internationalen Standards und passen zu typischen Berufsanforderungen. Andererseits scheinen sich die didaktischen Konzepte und die Lernumgebung doch etwas von einem zentraleuropäischen Standard zu unterscheiden. Die praktische Erfahrung mit Absolventen philippinischer Hochschulen im fachlichen Austausch bei VALEO IT zeigen eine durchaus brauchbare fachliche Grundqualifikation, jedoch tendenziell ein niedrigeres Level z. B. bei der systematischen Vermittlung von Softskills. So sind z. B. interaktive Lehrmethoden offenbar eher selten, es dominiert der Frontalunterricht. Die Machtdistanz zwischen Dozierenden und Studierenden ist im Vergleich tendenziell hoch.

Als weiterer Punkt der Standortentscheidung wurde oben die Nähe zu aktuellen und potenziellen Zielkunden angesprochen. Tatsächlich verfügt VALEO IT bereits in der Gründungsphase über vorhandene globale Kunden mit relevanten Standorten auch im Großraum Manila. Bereits kurz nach der Aufnahme der Geschäftstätigkeit ergaben sich Ausschreibungen für IT-Bedarfe dieser Kundenstandorte vor Ort auf den Philippinen, so dass sich dieses Argument als im Nachgang tatsächlich sehr relevant herausgestellt hat.

2 Standortaufbau

Nach der rechtlichen Gründung des Unternehmens wurde ein erster Bürostandort in einem Full-Serviced-Bürohochhaus („Rufini-Tower“) im Stadtteil Makati eröffnet. Dieses hat den Vorteil einer Komplexitätsreduktion gerade in der Gründungsphase durch das Angebot diverser ergänzender Dienstleistungen wie z. B. zentrales Sekretariat, Security und Schließdienst, Internet und Telefoninfrastruktur etc. Auch erhöht sich durch diese Entscheidung die unternehmerische Flexibilität durch die Möglichkeit, einen veränderten Flächenbedarf vergleichsweise flexibel anpassen zu können.



Abbildung 1: Rufini Tower, Makati City, Bürostandort der VALEO IT Services Inc., Philippinen



Abbildung 2: Beispiel Bürosituation, VALEO IT Inc., Rufini Tower, Makati

Im September 2020 verfügt VALEO IT mittlerweile über eine mittlere zweistellige Mitarbeiterzahl, so dass weitere Räumlichkeiten in einer kostengünstigeren Struktur implementiert wurden.

Mit dem inzwischen größeren Team vor Ort rücken Führungsfragen und Unterschiede in der kulturellen Prägung stärker in den Fokus der Gestaltung.

Mit Bezugnahme auf das bekannte Analyseraster von HOFSTEDE [3] zur Ermittlung kultureller Unterschiede fallen im Vergleich Deutschland und Philippinen besonders Unterschiede in den Bereichen Machtdistanz und Langfristorientierung mit hohen Punktedifferenzen auf. Der Autor hatte die Möglichkeit vor Ort, mehreren Bewerbungsgesprächen für Führungskräfte beizuwohnen und Interviews mit vorhandenen Mitarbeitern zu führen. Die gewonnenen Eindrücke bestätigen die Ergebnisse im dargestellten Analyseraster.



Abbildung 3: Kulturdimensionen nach HOFSTEDE, Vergleich Deutschland und Philippinen

Die hoch eingeschätzte *Machtdistanz* zeigt sich auf der Ebene der Mitarbeiter in einer tendenziell abwartenden Haltung auf klare Vorgaben des Managements. Ferner wird dem Management mit hohem Respekt begegnet, und eine eigene Meinungsäußerung insbesondere zu „kritischen“ Themen ist in der Ausgangslage kaum zu beobachten. Mit Blick auf „deutsche“ Unternehmenskultur und der Business Development Situation sind diese Eigenschaften differenziert zu betrachten.

VALEO IT arbeitet im Wertschöpfungsprozess teilweise mit Standardprozessen, die in allen globalen Standorten mehr oder weniger unverändert angewendet werden. Dies entspricht auch den häufig vorliegenden Service-Level-Agreements mit den Kunden, welche einen weltweit einheitlichen Serviceumfang erwarten. Diese Standardprozesse wurden auch auf den Standort in Manila übertragen; die hohe kulturelle Machtdistanz erleichtert dabei die grundsätzliche Akzeptanz dieser „Vorgaben“ aus der Unternehmenszentrale. Auf der anderen Seite führt die in der Natur der Sache liegende Instabilität in der Business-

Development-Phase zu erforderlichen kurzfristigen Adaptions- und Anpassungsbedarfen, welche sich oft erst in der operativen Umsetzung zeigen. Derartige Herausforderungen zu erkennen und zu gestalten liegt nun auch beim lokalen Management, insbesondere auch unter Berücksichtigung der 10.000 km Entfernung, welche zwischen der Unternehmenszentrale in Deutschland und Manila liegen. Diese räumliche Distanz erschwert eine „hands-on“-Führung durch die Unternehmenszentrale, die aktuelle Corona-Krise mit den Reiserestriktionen erhöht noch die Bedeutung dieses Themas. Insofern liegt ein Schwerpunkt der aktuellen Gestaltung des Führungsmodells und begleitender Führungskräfteentwicklungsmaßnahmen in einer Ertüchtigung der lokalen Führungskräfte zu einem selbstbewussten, aktiven Managementhandeln vor Ort. Solche Entwicklungsmaßnahmen benötigen Zeit. Sie gehen mit einem wechselseitigen Vertrauensaufbau Hand in Hand, dass auch inhaltlich „kritische“ Kommentare für den betreffenden Mitarbeiter „sanktionsfrei“ geäußert werden dürfen. Umgekehrt braucht es auch eine kommunikative Transparenz in Richtung des lokalen Managements zur Vermittlung relevanter Ziele und Strategien, damit eine „Eigenverantwortung“ vor Ort auch geeignete Ziele und Richtungen findet.

Auch die kulturell bedingte wenig ausgeprägte *Langfristorientierung* bildet eine Herausforderung für das Management. Die Philippinen generell weisen hier eine ausgeprägte Kurzfristorientierung auf, welche sich beispielweise in einem geringen Ausmaß strategischen Denkens und einer starken Orientierung auf das heutige Tagesgeschäft äußert. Langfristig angelegte Projektpläne und deren Verfolgung, langfristige Budgetplanung und -verfolgung, systematische Projektschritte, langfristige Terminverbindlichkeit und frühzeitiges Antizipieren von erfolgskritischen Entwicklungen sind kulturell bedingt weniger ausgeprägte Fähigkeiten in einer durchschnittlichen Mitarbeiterschaft. Hieraus entsteht für die Unternehmenszentrale ein Spannungsfeld. So ist ein „deutsch“ geprägtes Management im internationalen Vergleich gerade in dieser Dimension der Langfristorientierung stark. Auch liegt in diesen Fähigkeiten häufig ein Erfolgsfaktor in einem systematischen Roll-Out eines Geschäftsmodells auf globaler Ebene. Gleichzeitig denkt ein lokales Management vor Ort eher in kurzfristig umsetzbaren Themen und vernachlässigt die langfristigen Linien für die Geschäftsentwicklung. Daraus könnten auch auf menschlicher Ebene Spannungen wechselseitig kulturell bedingter Missverständnisse liegen. Daraus ergibt sich für die Unternehmenszentrale die Erkenntnis, dass gerade die Verfolgung der langfristig ausgelegten Themen und Projekte mit einem deutlichen Input und einem spürbaren Controlling aus der Unternehmenszentrale begleitet werden sollte.

Referenzen:

- [1]: vgl. Wikipedia, Schlagwort Philippinen
- [2]: vgl. Dr. Marian Majer, Fa. Roedl Philippines Inc., Makati City, Metro Manila, Interview am 10.12.2019
- [3]: <https://www.hofstede-insights.com/country-comparison;>
<https://www.ikud.de/glossar/kulturdimensionen-geert-hofstede.html>

Projektpartner:

VALEO IT Services Inc., 1226 Makati City, Metro Manila, Philippines

Kontakt:

Prof. Dr. Frank Schäfer

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

f.schaefer@oth-aw.de

Digitale Strategien entwickeln – von der Idee zur Roadmap

Prof. Dr. Johann Strassl¹
Prof. Dr. Günter Schicker²

1) Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, Weiden Business School, Hetzenrichter Weg 15, 92637 Weiden, Mail: j.strassl@oth-aw.de
2) Institut für systemisches Management und Organisation ISMO GmbH, Science Park C4, Paul-Engel-Straße 1, 92729 Weiherhammer, Mail: guenter.schicker@ismogmbh.de

Zusammenfassung

Das Phänomen der Digitalisierung verändert unsere Produkte und Dienstleistungen. Während sie früher aus mechanischen und elektrischen Komponenten bestanden, sind aus Produkten heute komplexe Systeme geworden, die Hardware, Sensoren, Datenspeicher, Mikroprozessoren, Software und Vernetzung in vielfältiger Weise miteinander verbinden. Die vernetzten Produkte zwingen Unternehmen, ihre Geschäftsmodelle und Branchen zu überdenken - ihre Strategie, die Beziehungen zu Kunden und Lieferanten, Prozesse und Strukturen. Ziel dieser Publikation ist es, einen Ausgangspunkt für die Entwicklung einer digitalen Strategie zu liefern. Das Endergebnis dieser Methode ist ein Vorschlag für einen vierphasigen Ansatz:

- 1) Erfassung der externen Realität,
- 2) Definition der internen Realität,
- 3) Schaffung des digitalen Lösungsraums und
- 4) Entwicklung der Roadmap.

Die Phasen werden in Bezug auf ihre Ziele, Aktivitäten und Werkzeuge erläutert.

Schlüsselwörter: Digitale Strategie, Digitalisierung, Innovation, Designtheorie

JEL: L21, L86, M14, M15, M53

Abstract

The phenomenon of digitalization is changing our products and services. While they used to consist of mechanical and electrical components, products have now become complex systems that combine hardware, sensors, data storage, microprocessors, software and networking in a variety of ways. The networked products force companies to rethink their business models and industries – their strategy, relationships with customers and suppliers, processes and structures. The aim of this publication is to provide a starting point for developing a digital strategy. The final result of this method is a proposal for a four-phase approach:

- 1) capturing external reality,
- 2) defining internal reality,
- 3) creating the digital solution space, and
- 4) developing the roadmap.

The phases are explained in terms of their objectives, activities and tools.

Keywords: Digital strategy, digitalization, innovation, design theory

JEL:L21, L86, M14, M15, M53

Der vollständige Beitrag steht zum Download auf unserer Homepage unter:

Weidener Diskussionspapiere Nr. 73

<https://www.oth-aw.de/informieren-und-entdecken/aktuelles/veroeffentlichungen/weidener-diskussionspapiere/>

Derivate im Zinsmanagement: Eine Analyse der Hedging- Qualität von Bund Future Kontrakten und deren Einsatzmöglichkeiten in Theorie und Praxis

Zusammenfassung

Im Zuge der Niedrigzinspolitik der EZB sind die Marktzinsen stark gefallen. Gleichzeitig sind die Immobilienpreise deutlich angestiegen. Die vorliegende Arbeit untersucht die Hedging Qualität von Bund Future Kontrakten für die Absicherung von Zinssätzen. Als Praxisbeispiel dient die Einsatzfähigkeit zur Absicherung des Zinsniveaus für zukünftige Investitionen in Immobilien. Die Korrelation zwischen dem Bund Future Kurs und den Zinsen für Immobiliendarlehen lag über einen Beobachtungszeitraum von zehn Jahren bei $-0,982$, für kurze Beobachtungszeiträume liegt sie allerdings teilweise deutlich darunter. Insofern eignen sich Bund Future Kontrakte nur bedingt zur Sicherung des Zinsniveaus. Im Vergleich zu der in der Praxis üblichen Verwendung von Forward-Darlehen entstehen für Investoren unter Umständen aber finanzielle Vorteile. Neben der Problematik der nicht zu allen Zeiträumen ausreichenden Korrelation führen das tägliche Cash Settlement der Future-Kontrakte und die Volatilität der Kurse zu einem erhöhten Liquiditätsbedarf.

Schlüsselwörter: Zinsmanagement, Hedge, Bund Future, Forward-Darlehen

JEL:E43, G21, G24

Abstract

As interest rates have been falling for years, asset prices and in particular real estate prices in Europe and especially in Germany have risen sharply. This paper examines the hedging quality of Bund futures contracts for hedging interest rates. As a practical example, the adequacy for hedging the interest rate level for future investments in real estate is examined. The correlation between the development of the Bund Future price and the development of the interest rate level for real estate loans was -0.982 over an observation period of ten years, but for short observation periods this correlation often declines drastically. Therefore, Bund Future contracts are only suitable to a limited extent to hedge the interest rate level for future investments. However, and compared to the usual use of forward loans in practice, financial advantages may arise for investors under certain circumstances. In addition to the problem of the correlation not being sufficient for all periods, the daily cash settlement of future contracts and the high price volatility lead to increased liquidity needs for investors.

Der vollständige Beitrag steht zum Download auf unserer Homepage unter:

Weidener Diskussionspapiere Nr. 74

<https://www.oth-aw.de/informieren-und-entdecken/aktuelles/veroeffentlichungen/weidener-diskussionspapiere/>

Steigerung der Kundenzufriedenheit durch Gestaltung von Artikeldetailseiten am Beispiel von WITT WEIDEN

Laura Graser¹
Prof. Dr. Marco Nirschl²

1) Josef Witt GmbH, Schillerstraße 4-12, 92637 Weiden
Mail: laura.graser@witt-gruppe.eu

2) Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, Weiden Business School,
Hetzenrichter Weg 15, 92637 Weiden, Mail: m.nirschl@oth-aw.de

Zusammenfassung

Artikeldetailseiten von Onlineshops bieten die Möglichkeit zur Steigerung der Kundenzufriedenheit. Um zu analysieren mit welchen Features dies erreicht wird, kann die Kano-Methode eingesetzt werden. Durch diese kundenorientierte Untersuchungsmethode können zielgruppenspezifische Verbesserungspotenziale identifiziert werden, um dadurch Wettbewerbsvorteile zu erreichen und eine Differenzierungsmöglichkeit zu schaffen.

Als Praxisbeispiel dafür dient der Onlineshop www.witt-weiden.de. Im Rahmen einer Online-Befragung wurden 1096 Kundinnen und Kunden des Onlineshops befragt. Als Ergebnis wird aufgezeigt, dass das Angebot eines Merkzettels, die Darstellung eines Größenvorschlags und die Produktbeschreibung mithilfe von Bullet Points die größte Priorität für www.witt-weiden.de haben sollten, um die Artikeldetailseite zu verbessern und die Kundenzufriedenheit zu steigern.

Schüsselwörter: Kano-Modell, Kundenzufriedenheit, Onlineshop, Artikeldetailseite

JEL: L81, L86, M31, M15

Abstract

Product detail pages in online shops provide the opportunity to increase the customer satisfaction. In order to analyze, which features help to achieve this enhancement, the Kano method can be applied. This customer-oriented research method allows to find out target group specific improvement potentials in order to identify competitive advantages and differentiation possibilities.

The onlineshop www.witt-weiden.de serves as practical example. By means of an online survey, the opinion of 1096 customers of the online shop were analyzed. The outcome of the research is, that the offering of a digital wish list, the proposal of a proper size and the description of products by means of bullet points have to be prioritized on the website www.witt-weiden.de to improve the product detail page and increase customer satisfaction.

Der vollständige Beitrag steht zum Download auf unserer Homepage unter:

Weidener Diskussionspapiere Nr. 75

<https://www.oth-aw.de/informieren-und-entdecken/aktuelles/veroeffentlichungen/weidener-diskussionspapiere/>

André Schulte, M.Sc¹
Ágnes Wörster, M.A²

1) André Schulte, Hugo-Mense-Straße 3, 33378 Rheda-Wiedenbrück
Mail: andreschulte89@t-online.de
2) Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden,
Hetzenrichter Weg 15, 92637 Weiden

Werkvertrags- arbeitnehmerinnen und -arbeitnehmer in der Fleischindustrie

Zusammenfassung

Das vorliegende Paper thematisiert die Rolle der Werkvertragstätigen in der Fleischindustrie aus wirtschaftsethischer Sicht. Auf die Vorstellung mehrerer Handlungsfelder folgen 1. die Analyse regionaler wie überregionaler Parameter, 2. die rechtliche Situation in Verknüpfung mit Politik und Gesellschaft; abschließend werden Überlegungen zur Werkvertragssituation entworfen. Als Ausgangsbasis dient die Reflexion v. a. des Zeitraums Mai bis September 2020 (Gesetzeslage, Beispielunternehmen, Hintergründe).

Schlüsselwörter: Wirtschaftsethik, Unternehmensethik, Subunternehmen, Werkvertragsarbeitende, Internationalisierung des Marktes, Integration, Bildung

JEL: L 22, M 14, O 13

Abstract

The paper is about temporary workers in the German meat industry. The authors give a summary of the current situation by basing their text on concrete examples, which happened from May to September 2020. Within the business ethics analysis, Schulte and Wörster pay special attention on the international and intercultural consequences which are given by the temporary workers-system in Germany and the EU. The paper considers economical questions, but also education, politics, and social circumstances.

Der vollständige Beitrag steht zum Download auf unserer Homepage unter:

Weidener Diskussionspapiere Nr. 76

<https://www.oth-aw.de/informieren-und-entdecken/aktuelles/veroeffentlichungen/weidener-diskussionspapiere/>

How to avoid fracture of the locking screw in modular revision arthroplasty of the hip using the MRP Titan Revision System

Theresa Semmelmann, M.Sc.¹
Prof. Dr. med. habil. Alexander Schuh²
Prof. Dr. Horst Rottmann^{3,4}
Reinhard Schröder⁵
Christopher Fleischmann, M.Sc.¹
Prof. Dr. med. habil. Stefan Sesselmann¹

¹) Institut für Medizintechnik, Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden, Hetzenrichter Weg 15, 92637 Weiden
²) Klinikum Neumarkt, Abteilung für Muskuloskeletale Forschung, Nürnberger Str. 12, 92318 Neumarkt
³) Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden, Weiden Business School, Hetzenrichter Weg 15, 92637 Weiden
⁴) ifo Institut – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München e.V.
⁵) Peter Brehm GmbH, Am Mühlberg 30, 91085 Weisendorf

Zusammenfassung

Die Verwendung modularer Hüftendoprothesen bei der Primär- und Revisionsendoprothetik der Hüfte ist in den letzten zehn Jahren sehr populär geworden. Allerdings schafft die Modularität neue potenzielle Risiken wie Abreibung, Spalt- und galvanische Korrosion, Lockerung der Komponenten, Dissoziation und Bruch der Endoprothesen. Kürzlich trat ein Bruch einer Verriegelungsschraube beim Prothesenschaft der MRP-TITAN® (Peter Brehm GmbH, Weisendorf, Deutschland) auf.

Ziel dieser Studie ist es, den Einfluss der Oberflächenverunreinigung in Bezug auf den Bruchmechanismus zu bewerten. Um einen Bruch der M6-Schraube des MRP-TITAN®-Systems zu vermeiden, empfehlen wir, das Innengewinde der Morsekegelverbindung mit Kochsalzlösung zu reinigen, bevor die Verbindung mit der Schraube und dem Drehmomentschlüssel befestigt wird.

Abstract

The use of modular femoral stems in primary and revision arthroplasty of the hip has become popular within the last decade. On the other hand modularity creates new potential problems like fretting, crevice and galvanic corrosion, component loosening, dissociation and fracture of modular prostheses. Recently a problem of fracture of a locking screw in revision arthroplasty of the hip using the MRP Titan Stem (Peter Brehm GmbH, Weisendorf, Germany) appeared.

The aim of this study is to evaluate the meaning of surface contamination in respect to fracture mechanism. To avoid fracture of the screw M6 of the MRP Titan System we recommend cleaning the inner thread of the morse taper junction with saline solution before junction is fixed with the screw and the torque wrench.

Keywords: MRP Titan, Fracture, Hip, Modular Stem, Locking Screw

Der vollständige Beitrag steht zum Download auf unserer Homepage unter:

Weidener Diskussionspapiere Nr. 77

<https://www.oth-aw.de/informieren-und-entdecken/aktuelles/veroeffentlichungen/weidener-diskussionspapiere/>

Zusammenfassung

Wir zeigen, dass die gängige These, Bargeld würde wegen des zunehmenden Einsatzes elektronischer Zahlungsmittel generell immer stärker an Bedeutung verlieren, sowohl im weltweiten Maßstab als auch in den Emissionsländern der international nachgefragten Sorten (USD, EUR, CHF, GBP und JPY) als klar widerlegt angesehen werden kann. Besonderes Augenmerk legen wir dabei auf die Entwicklung der Bargeldnachfrage in Krisenphasen. Hier unterscheiden wir zwischen drei verschiedenen Typen von Krisen (technologische Krisen, Finanzmarktkrisen, Naturkatastrophen) und untersuchen jeweils die krisenbedingte Nachfrage nach großen und kleinen Denominationen von Banknoten seit 1990. Dabei zeigt sich als generelles Krisen-Charakteristikum, dass in derartigen unsicheren Zeiten die Bargeldnachfrage unabhängig von der speziellen Art der Krise immer ansteigt. Dahinter stehen sowohl Transaktions- als auch Hortungsmotive. Die völlig elastische Befriedigung dieser Nachfrage durch die Zentralbanken hilft die jeweilige Situation zu beruhigen und die Unsicherheit zu reduzieren. Vor diesem Hintergrund sind Forderungen nach der Abschaffung von Bargeld äußerst kritisch zu sehen.

Schlüsselwörter: Bargeld, Banknoten, Krisen, Corona

JEL: E41, E51, E58

Abstract

Despite the increasing use of cashless payment instruments, the notion that cash loses importance over time can be unambiguously refuted. In contrast, we show that cash demand increased steeply over the past 30 years. This is not only true on a global scale, but also for the most important currencies in advanced countries (USD, EUR, CHF, GBP and JPY). In this paper, we focus especially on the role of different crises (technological crises, financial market crises, natural disasters) and analyse the demand for small and large banknote denominations since the 1990's in an international perspective. It is evident that cash demand always increases in times of crises, independent of the nature of the crisis itself. The driving forces are transaction and store-of-value motives. In general, there is evidence of a shift from transaction balances to other motives for holding cash. And the larger denominations grew stronger than the smaller ones. The perfectly elastic provision of cash by central banks helped stabilizing the situation after crises and led to a reduction in overall uncertainty. Against this background, claims of abolishing physical cash have to be assessed very critically.

Keywords: Cash, banknotes, crises, Corona

JEL: E41, E51, E58

Der vollständige Beitrag steht zum Download auf unserer Homepage unter:

Weidener Diskussionspapiere Nr. 78

<https://www.oth-aw.de/informieren-und-entdecken/aktuelles/veroeffentlichungen/weidener-diskussionspapiere/>

Monte-Carlo-Evaluation von Instrumenten- variablen-schätzern

Univ.-Prof. Dr. Benjamin R. Auer¹
Prof. Dr. Horst Rottmann²

1) Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Fakultät Wirtschaft,
Recht und Gesellschaft, Postfach 10 13 44, 03013 Cottbus, Mail: auer@b-tu.de
CESifo München

2) Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden, Fakultät Weiden Business School,
Hetzenrichter Weg 15, 92637 Weiden, Mail: h.rottmann@oth-aw.de
CESifo München

Zusammenfassung

Dieser Beitrag illustriert mittels Monte-Carlo-Simulation die Eigenschaften des OLS- und des IV-Schätzers, wenn die erklärende Variable im einfachen linearen Regressionsmodell endogen, d. h. mit dem Störterm des Modells korreliert ist. Insbesondere werden dabei die Verzerrung des OLS-Schätzers und die Konsistenz des IV-Schätzers aufgezeigt sowie der Einfluss schwacher Instrumente verdeutlicht.

Schlüsselwörter : Monte-Carlo-Simulation, OLS-Schätzung, IV-Schätzung, Endogenität, schwache Instrumente.

Abstract

This paper uses Monte Carlo simulation to illustrate the features of the OLS and IV estimators when the explanatory variable in the linear regression model is endogenous, i.e. correlated with the model's disturbance term. Especially the bias of the OLS estimator and the consistency of the IV estimator is pointed out and the influence of weak instruments is illustrated.

Der vollständige Beitrag steht zum Download auf unserer Homepage unter:

Weidener Diskussionspapiere Nr. 79
<https://www.oth-aw.de/informieren-und-entdecken/aktuelles/veroeffentlichungen/weidener-diskussionspapiere/>

WITRON Logistik + Informatik GmbH.....	44
Förderverein der OTH Weiden e.V.	98
PSZ electronic GmbH	98
Volksbank Raiffeisenbank Nordoberpfalz eG	98
IGZ Die SAP Ingenieure	122
HORN Glass Industries AG	122
Gebrüder Dorfner GmbH + Co. Kaolin- und Kristallquarzsand Werke KG	138
Amberger Freunde der OTH Amberg-Weiden e.V.....	186
Volksbank-Raiffeisenbank Amberg eG	186
OTH Professional.....	186
BHS Corrugated Maschinen- und Anlagenbau GmbH	U4

U = Umschlagseite

Impressum

Herausgeber:

Präsidentin
Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Prof. Dr. Andrea Klug

Redaktion:

Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Institut für Angewandte Forschung IAF
Andrea Breitschaft

Titelgestaltung:

Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Institut für Angewandte Forschung IAF
Titelbild: stock.adobe.com

Inhalt/Bildmaterial/Copyright:

Die Verantwortung für Inhalt und Bildmaterial der Beiträge
sowie das Copyright liegt bei den jeweiligen Autoren.

Gesamtherstellung:

Verlag Druckerei Ebner, Schauflinger Straße 15, 94469 Deggendorf

Erscheinungstermin:

März 2021

ISSN-Nummer:

2365-1997



Ostbayerische Technische Hochschule
Amberg-Weiden

Standort Amberg:

Kaiser-Wilhelm-Ring 23
92224 Amberg
Tel.: 09621/482-0
Mail: amberg@oth-aw.de
www.oth-aw.de



Ostbayerische Technische Hochschule
Amberg-Weiden

Standort Weiden:

Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden
Tel.: 0961/382-0
Mail: weiden@oth-aw.de
www.oth-aw.de

Die Onlineversion des Forschungsberichtes finden Sie unter: www.oth-aw.de/forschungsbericht

TEAMPLAYERS WELCOME

Aktuelle Ausbildungs- und Karriereperspektiven finden Sie auf unserer Homepage unter www.bhs-world.com/karriere



BHS Corrugated Maschinen- und Anlagenbau GmbH

Kompetenz, Innovation und Leidenschaft haben uns zum weltweit führenden Lieferanten für Wellpappenanlagen gemacht. Die rund 2.500 Mitarbeiter von BHS Corrugated sorgen dafür, dass wir unsere Kunden auch in Zukunft mit richtungsweisenden Ideen und exzellenten Leistungen begeistern können.

Kontakt Personalabteilung Kristina Zeitler

Tel.: 09605-919-663

E-Mail: kzeitler@bhs-world.com