

Forschungsbericht

2023



Liebe Leserin, lieber Leser,

die OTH Amberg-Weiden gehört zu den Hochschulen für angewandte Wissenschaften (und heute als Technische Hochschule), die Mitte der 1990-er Jahre in den ländlichen Räumen Bayerns gegründet wurden. Unser Auftrag: Impulse zu setzen, wohnortnahes Studium zu ermöglichen, innovatives Wissen in die Regionalentwicklung einzubringen und so im Strukturwandel zu unterstützen. Blickt man auf unsere Hochschulregion, so darf man diese zu den Aufsteigern der letzten Jahrzehnte zählen.

Die OTH Amberg-Weiden will den selbstgesetzten Anspruch erfüllen, mehr zu sein als ein Know-how-Dienstleister. Die nördliche und mittlere Oberpfalz ist uns nicht nur Standort, sondern Heimat und damit „der Ort, an welchem mir nicht egal ist, was passiert“. Deswegen kooperieren wir, wo immer es geht, wir arbeiten mit Unternehmen jeder Größe zusammen, mit Schulen, mit Verbänden, Landkreisen, Kommunen und selbstverständlich mit anderen Hochschulen – ganz im Sinne einer Mitmach-Hochschule. So wächst ein immer leistungsfähigeres und auch internationales Netzwerk. Was in Forschung und Entwicklung im letzten Jahr entstanden ist, stellt dieser Forschungsbericht vor.

Die anwendungsbezogene Forschung ist ein Markenzeichen der OTH Amberg-Weiden. Das zeigt sich daran, dass aktuell rund 10 Millionen € an Drittmitteln pro Jahr eingeworben werden. Gelder, die von öffentlichen oder privaten Stellen zusätzlich zum regulären Haushalt an die Hochschule gegeben werden, um die F&E und auch den wissenschaftlichen Nachwuchs zu fördern.

Das neue Bayerische Hochschulinnovationsgesetz erweitert die Möglichkeiten für unsere zukünftige Entwicklung, sei dies in exzellenter angewandter Forschung, in einem attraktiven Studienangebot, in der Weiterbildung oder dem Gründungsgeschehen und damit insgesamt im Wissens- und Technologietransfer. Hierzu gehört

Dear Reader,

OTH Amberg-Weiden is one of the Universities of Applied Sciences (and since 2013 a Technical University) that were founded in Bavaria's rural areas in the mid-1990s. Our mission: To provide impulses, to make it possible to study close to home, to contribute innovative knowledge to regional development and thus to support structural change. A look at our university region shows that it is among the rising stars of the last two decades.

OTH Amberg-Weiden wants to fulfil the self-imposed claim of being more than just a know-how service provider. The Upper Palatinate is not only our location, but also our home cluster and thus "the place where I care what happens". That's why we cooperate wherever possible, we work with companies of all sizes, with schools, with associations, districts, municipalities and, of course, with other universities – all in the spirit of a participatory university. This is how an increasingly efficient and also international network is growing. This research report presents what has been achieved in research and development over the past year.

Application-oriented research is a trademark of OTH Amberg-Weiden. This is reflected in the fact that currently around € 10 million in third-party funding are acquired per year. Money that is given to the university by public or private bodies in addition to the regular budget in order to promote R&D and also our scientists including the younger ones.

The new Bavarian University Innovation Law expands the possibilities for our future development, be it in excellent applied research, in an attractive range of studies, in continuing education or start-up activities and thus overall in knowledge and technology transfer. This also includes the prospect of an independent right to award doctoral degrees in research-intensive fields.

auch die Perspektive eines eigenständigen Promotionsrechts in forschungsstarken Feldern.

In welchen F&E-Bereichen die OTH Amberg-Weiden erneut erfolgreich war, zeigen die Kernthemen dieses Forschungsberichtes: Digitalisierung, Energie und Mobilität, Information und Kommunikation, Lebenswissenschaften und Ethik, Produktion und Systeme sowie Sensorik. Es werden fast 40 Projekte vorgestellt, welche die Bandbreite von Forschung und Entwicklung an unserer Technischen Hochschule abbilden.

Den Forscherinnen und Forschern an unserer Hochschule sowie allen Partnern, die nicht nur in den Projekten mit uns kooperieren, sondern auch durch ihre erneute finanzielle Unterstützung die Herausgabe des vorliegenden Forschungsberichtes ermöglichten, sagen wir „Vergelt's Gott“! Ihnen allen wünschen wir eine informative und spannende Lektüre des Forschungsberichtes 2023 der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden!

The R&D areas in which OTH Amberg-Weiden was again successful are shown in the core topics of this research report: Digitalisation, Energy and Mobility, Information and Communication, Life Sciences and Ethics, Production and Systems, and Sensor Technology. Almost 40 projects are presented, which reflect the range of research and development at our Technical University.

We express our best thanks to the researchers at our university and to all partners who not only cooperate with us in projects, but also made the publication of this report possible through their financial support! We wish you an informative and exciting read of the Research Report 2023 of the East Bavarian Technical University of Applied Sciences Amberg-Weiden!

Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

Präsident der Ostbayerischen Technischen Hochschule (OTH) Amberg-Weiden

Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Weber

Vizepräsident Forschung und Entwicklung,
Transfer der Ostbayerischen Technischen Hochschule (OTH) Amberg-Weiden

Vorwort/Preface.....	1	Digital gestütztes forschendes Lernen anhand realer komplexer Probleme – Konzeption und Durchführung einer Befragung zur Technologieakzeptanz von SeniorInnen	37
Digitalisierung		Prof. Dr. rer. pol. habil. Mandy Hommel	
Entwicklung einer Smart Factory an der OTH Amberg-Weiden	6	Energie und Mobilität	
Prof. Dr.-Ing. Matthias Wenk		Hocheffiziente Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung für Industrie und Gewerbe	44
Experimentelle Cloud-Steuerung des Industrie-4.0-Demonstrators und Visualisierung in einem 3D-Modell 12		Andreas Röhl, M.Eng.	
Stefan Ries, B.Eng.		Dipl.-Ing. Christian Wuschig	
Johannes Halbritter, B.Eng.		Dr.-Ing. Manuel Riepl	
Franz Ruidisch, B.Eng.		Prof. Dr. Raphael Lechner	
Lukas Giestl, B.Eng.		Methanemissionen und ihr Einfluss auf die Treibhausgasbilanz von Erdgas-Blockheizkraftwerken	49
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmidt		Regina Trötsch, M.Eng.	
Parametrisierte Rechenmodelle zur Optimierung von Herstellungsprozessen für Halbleitermaterialien mit ANSYS Workbench.....	16	Max Becker, M.Eng.	
Magdalena Lang		Prof. Dr. Raphael Lechner	
Antonia Wörsing		Prof Dr.-Ing. Markus Brautsch	
Shiva Krishna Tangedipelli, M.Sc.		Europäische Klimaschutzinitiative – EUKI Erstes grenzüberschreitendes tschechisch-deutsches Energieeffizienznetzwerk	54
Prof. Dr.-Ing. Marc Hainke		Laura Weber, M.Eng.	
Herausforderungen bei der Einführung von Digital Twins und Auswirkungen auf die Datenanalyse.....	20	Online Map Matching for Navigation.....	60
Prof. Dr.-Ing. Michael Möhring		Martin Fischer, M.Sc.	
Digitalisierungs-Cluster für Geschäftsprozesse – Prozessinnovationen, Forschungsdiskurse und praktische Relevanz.....	26	Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß	
Prof. Dr. Matthias Lederer		Ein teilautomatisierter Datenlabelingprozess für Deep Learning für radarbasierte Automobilanwendungen	65
Didaktik über Grenzen – Wir unterrichten gemeinsam für die Zukunft	31	Daniel Scharf, M.Sc.	
Prof. Dr. Dieter Meiller		Seifeddine Saadani, M.Eng.	
Stephan Prettner, B.Eng.		Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß	
Dipl.-Betw. Melanie Steiner, M.Sc.		Heike Lepke, M.Eng.	
Veit Stephan, M.Eng.			

AUTBUS – Implementierung einer V2X-Kommunikation für automatisiertes Fahren im ländlichen Raum.....72

Roman Babl, M.Sc.
Fabian Zeitler, M.Sc.
André Baldermann, M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

Repräsentativer Trainingsdatensatz für KI-gestützte Energieverbrauchsvorhersage für Elektrofahrzeuge..... 78

Katharina Lutter, M.Eng.
Moritz Schaffenroth, M.Sc.
Heike Lepke, M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

Information und Kommunikation

Threat Modelling for Internet of Things Devices 86

Simon Liebl, M.Eng.

Security für eingebettete Systeme in kritischen Infrastrukturen: Ergebnisse und Erkenntnisse.....91

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

Zertifizierung von zeitkritischer Kommunikation in der Industrieautomatisierung 96

Sebastian Zach, M.Sc.
Johannes Hilburger
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmidt

Kennzahlen für eine robuste Kommunikation im industriellen Umfeld.....100

Sebastian Schaffenroth, M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmidt
Maximilian Bauer, M.Sc.

Lebenswissenschaften und Ethik

Hygiene und Medizintechnik – Untersuchungen zur Wirksamkeit neu entwickelter Desinfektionsmethoden 104

Dr. rer. nat. Sebastian Buhl
Alexander Stich, M.Sc.
Fabian Wickert, B.Eng.
Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

5G-Ausleuchtung im Klinikum St. Georg in Leipzig 110

Prof. Dr. rer. pol. Steffen Hamm
Nico Humig, M.Sc.
Philip Bertelshofer, M.Sc.
Maximilian Amm, M.Sc.
Michael Mark, M.Sc.
Anna-Lena Dahmen, approb. Tierärztin
Juliana Hartig, M.A.
Sabrina Richtmann, M.A.
Ann-Christin Schleser, B.Eng.

Ermittlung der Strahlenexposition des Personals bei nuklearmedizinischen Therapien mit Lu-177-markierten Radiopharmaka mittels Thermolumineszenzdosimetrie 116

Sophia Krottenthaler, B.Eng.
Agnes Pöllmann, M.Sc.
Dr. rer. nat. Daniel Schmidt
Prof. Dr. Ralf Ringler

Prüfung kommerziell erhältlicher Filamente zur Fertigung von knochenäquivalenten Phantomen mittels additiver Fertigung für röntgendiagnostische Untersuchungen 120

Noel Jander
Agnes Pöllmann, M.Sc.
Stefan Ziegler, M.A.
Prof. Dr. Ralf Ringler

Evaluierung der Eigenschaften eines Carbonfaser-verstärkten Kunststofffilaments für die additive Fertigung von Zubehörteilen für die Medizintechnik ..124

Niklas Lang, B.Eng.
Stefan Ziegler, M.A.
Agnes Pöllmann, M.Sc.
Prof. Dr. Ralf Ringler

Innovativ mit „Open Space“ – Methode im Projekt „SDG Transformation SPACE“ 130

Prof. Dr. Christiane Hellbach
Prof. Dr. Lisa Ranisch
Doc. Dipl.-Ing. Dita Hommerová, Ph.D., MBA
Dr. Alexander Herzner
Georg Klampfl, M.Eng.

Regionale Lebensqualität als Standortfaktor: Ansätze zur empirischen Messung und kommunale Fallbeispiele im ländlichen Raum 135

Prof. Dr. Wolfgang Weber
Ingrid Ulrich, B.A.

Produktion und Systeme

Recycling von Indium mithilfe von chlorhaltigen Abfällen 141

Michael Peer, M.Sc.
Prof. Dr. Werner Kunz
Prof. Dr.-Ing. Burkhard Berninger

Aufbau eines Hydraulischen Luftkompressors als Demonstrationsanlage im Labor für Strömungsmaschinen 145

Michael Bäuml
Manuel Dill
Sebastian Weber
Dipl.-Ing. (FH) Harald Wirth
Prof. Dr.-Ing. Andreas P. Weiß

Einfluss von Prozessparametern auf die Exopolysaccharid- Produktion von *Arthrospira platensis*..... 150

Prof. Dr.-Ing. Christoph Lindenberger
Sun-Hwa Jung, M.Sc.
Fabian Boßle, M.Sc.
Niklas Zell, M.Eng.

Characterisation of an airlift photobioreactor for microalgae cultivation..... 155

Prof. Dr.-Ing. Christoph Lindenberger
Sun-Hwa Jung, M.Sc.
Fabian Boßle, M.Sc.
Niklas Zell, M.Eng.
Ina Jakobi, M.Eng.

Energiebasierte Methode als eine vielversprechende Option zur Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit von additiv gefertigten $AlSi10Mg$ 159

Katharina Dimke, M.Eng.
Prof. Dr. Jakob Rosenthal
Dr. Jan Papuga
Martin Matusu, M.Sc.

Kriechen und Relaxieren – Theorie und Numerik der linearen Viskoelastizität166

Prof. Dr.-Ing. Heinrich Kammerdiener

Ammonium removal from nutrient rich wastewaters with a microporous-hydrophobic membrane process.. 172

Marc Herden, M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Franz Bischof

Sensorik

Klärschlammanalytik mit instrumentellen Methoden: GC/MS-Analytik mit Einzelionen-Monitoring..... 178

Dipl.-Phys. Christian Schell
Josef Schottenbauer, M.Eng.
Prof. Dr. Peter Kurzweil

Nanoelektrochemie: Ein Airbrush-Sprühbeschichtungs- verfahren zur Herstellung von RuO_2 -Elektroden für elektrochemische Sensoren183

Josef Schottenbauer, M.Eng.
Prof. Dr. Peter Kurzweil
Christof Dinkelbach, B.Eng.

Hydraulic characterisation of membrane modules via a newly developed colour analysis method187

Marc Herden, M.Eng.
Niklas Zell, M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Franz Bischof
Prof. Dr.-Ing. Christoph Lindenberger
Prof. Dr.-Ing. Werner Prell

State-of-health Diagnosis of Lithium-Ion Batteries using Electrochemical Methods and Differential Capacity194

Prof. Dr. Peter Kurzweil
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Frenzel
Dipl.-Phys. Christian Schell
Josef Schottenbauer, M.Eng.

Ein „drogenfreier“ Universalpuffer für elektrochemische Hochdurchsatzexperimente..... 201

Josef Schottenbauer, M.Eng.
Prof. Dr. Peter Kurzweil
Christof Dinkelbach, B.Eng.

Untersuchungen zur direkten digitalen Synthese in mobilen EIS-Anwendungen205

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Frenzel
Prof. Dr. Peter Kurzweil

Das Geheimnis der Platinelektrode: Untersuchung von Zündkerzen im Wasserstoffmotor .. 210

Prof. Dr. Peter Kurzweil
Prof. Dr.-Ing. Marco Taschek
Dipl.-Phys. Christian Schell
Sebastian Söhnlein, M. Eng.

Inserentenverzeichnis 215

Impressum..... 216

Zusammenfassung

Im Rahmen eines aktuellen Forschungsprojektes werden die Grundlagen für die Realisierung einer Smart Factory an der OTH Amberg-Weiden geschaffen. Die Smart Factory basiert auf selbst entwickelten Funktionsmodulen, die zu wandlungsfähigen und hochflexiblen Produktionsstrukturen kombiniert werden können. Damit soll ein wichtiger Beitrag zur Steigerung der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit moderner Produktionssysteme geleistet werden.

Abstract

As part of a current research project, the foundations are being laid for the realization of a Smart Factory at OTH Amberg-Weiden. The Smart Factory is based on self-developed functional modules that can be combined to adaptable and highly flexible production structures. This is intended to make an important contribution to increasing the flexibility and adaptability of modern production systems.

1 Einleitung

Heutige Wertschöpfungsnetzwerke in der Produktion sind dadurch gekennzeichnet, dass sie Produkte in hohen Stückzahlen kosteneffizient und qualitativ hochwertig, allerdings in geringer Varianz, produzieren. Durch vielfältige Anstrengungen wurde die Effizienz der Produktionssysteme stetig verbessert. Hinsichtlich der Steigerung der Produktivität bieten Produktionssysteme nur noch wenig Potential. Optimiert für die Massenproduktion, sind heutige Produktionssysteme meist als starre, verkettete Produktionslinien aufgebaut (Abbildung 1).

Die Verkettung der Funktionsmodule erfolgt über interne Materialflusssysteme oder über die Anbindung der Funktionsmodule an einen externen Materialfluss. Meist sind die Funktionsmodule, wie in Abbildung 1 oben dargestellt, in einer Linientopologie angeordnet. Teils existieren auch Verzweigungstopologien mit parallelen Modulen, um die Produktivität zu steigern. Die Modulfunktionalität ist stark werkstückgeprägt. Somit wird die Flexibilität und damit die Anzahl der Produktvarianten, die auf einer derartigen Linie produziert werden können, durch die starre Produktionsstruktur zwangsläufig begrenzt.

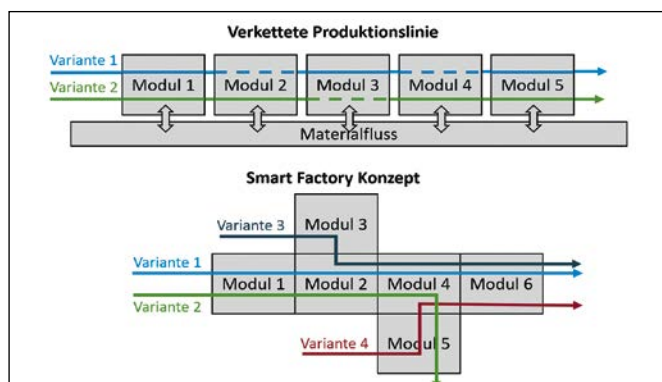


Abbildung 1: Gegenüberstellung der Materialflusskonzepte

Die Nutzung von Skaleneffekten wird selbstverständlich auch in Zukunft die Produktionslandschaft prägen. Unsere Welt verändert sich jedoch durch die Digitalisierung, Individualisierung und der stärkeren Betonung des Klimaschutzes in einer noch nie dagewesenen Geschwindigkeit. Vor allem das Kaufverhalten ändert sich hin zu individuellen Trendprodukten mit kürzeren Produktlebenszyklen. Die Folge ist ein Produktmix mit geringen Stückzahlen und hoher Diversität. Der Kunde möchte im Optimalfall seine (Individual-)Produkte selbst konfigurieren können, sofort bestellen und den Weg der Produktion bis zum Erhalt der Ware verfolgen können.

Dies hat auch Auswirkungen auf die industrielle Produktion. Sie muss sich diesen Herausforderungen stellen und die Produktionstechnologien wettbewerbsfähig weiterentwickeln. Die zunehmende Individualisierung von Produkten und kürzere Produkteinführungszeiten stellen deutlich höhere Anforderungen an die Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen [1]. Somit wird es zukünftig immer weniger rentabel sein, teure Produktionsanlagen aufzubauen, die nur wenige Produktvarianten beherrschen und bei denen die Umstellung auf neue Produkte nur mit hohen Kosten realisierbar ist. Um diesem Problem zu begegnen, werden Produktvarianten, die nicht auf den hochautomatisierten Anlagen produziert werden können, heute meist manuell hergestellt. Der zunehmende Fachkräftemangel, hervorgerufen durch den demografischen Wandel, erschwert dies jedoch zunehmend.

Stattdessen muss die Produktionsorganisation weiterentwickelt werden, um die Flexibilitätsanforderungen an eine moderne Produktion umsetzen zu können. Zukünftige Produktionsstrukturen (Abbildung 1 unten) sollten aus autonom agierenden Funktionsmodulen aufgebaut werden, welche je nach Bedarf flexibel zur Produktionsstruktur hinzugefügt oder entfernt werden können. Dadurch kann der Produktionsablauf schneller geändert und auf neue Produktvarianten reagiert werden.

Die Funktionsmodule basieren auf dem intelligenten Einsatz autonomer cyber-physischer Systeme [2]. Sie sind zukünftig imstande sich selbständig an neue Aufgaben anzupassen. Der Materialfluss wird von Robotersystemen übernommen, um nicht an eine starre Verkettung gebunden zu sein. Austauschbare Wertschöpfungsmodule, die an die Materialflussmodule angeflanscht werden, ergänzen diese flexibel um spezifische Wertschöpfungsfunktionalitäten.

An der Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik wurde Anfang Oktober 2021 das Forschungsprojekt „Flexibilitätssteigerung und Wandlungsfähigkeit von Produktionsstrukturen am Beispiel der Kleinteilemontage“ unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Matthias Wenk gestartet. Das Drittmittelprojekt wird vom bayerischen Metall- und Elektroarbeitgeberverband bayme vbm finanziert. In Zusammenarbeit mit neun Industriepartnern werden die Forschungsarbeiten zunächst an einem Digitalen Zwilling durchgeführt. Aufbauend auf den Forschungsergebnissen, soll parallel eine reale Smart Factory im Kompetenzzentrum Digitaler Campus der OTH realisiert werden, der von der Hightech Agenda Bayern (HTA) gefördert wird. Die hochmoderne Smart Factory soll für eine anwendungsorientierte Ausbildung unserer Studierenden, als Forschungsplattform für weitere Projekte in den Themenfeldern Industrie 4.0 und KI/ML und als Demonstrator für den Technologietransfer in die regionale Wirtschaft genutzt und weiterentwickelt werden.

2 Umsetzungskonzept und konstruktiver Aufbau der Funktionsmodule

Im Rahmen des oben genannten Forschungsprojektes, wurde als erstes Arbeitspaket das Umsetzungskonzept zum mechanischen Aufbau einer Smart Factory [3] für die Kleinteilemontage entwickelt. Im Fokus stand dabei die Entwicklung einer möglichst flexiblen Produktionsstruktur, die es ermöglicht unterschiedliche Varianten eines Produktes und/oder unterschiedliche Produkte wirtschaftlich zu produzieren.

Generell wurde dazu ein modularer Ansatz gewählt. Die Produktionsstruktur wird aus modularen Funktionsmodulen gebildet, die in geeigneter Art und Weise räumlich angeordnet und mechanisch, elektrisch und datentechnisch miteinander verbunden werden. In Abhängigkeit der durchzuführenden Produktionsaufträge soll die Produktionsstruktur durch Austausch oder Wegnahme bestehender Module oder der Ergänzung neuer Module umgerüstet werden können.

Aufgrund der angestrebten hohen Variantenflexibilität sind klassische Linienstrukturen, wie sie heute in automatisierten Montagelinien überwiegend zum Einsatz kommen, oft nicht vorteilhaft. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Reihenfolge der Wertschöpfungsprozesse variantenabhängig ist. Dies hat gravierende Auswirkungen auf das Materialflusskonzept der Produktionsstruktur. Die Produktionsstruktur muss einen flexiblen Materialfluss der Werkstücke auf beliebigen Wegen ermöglichen. Dies schließt auch einen bidirektionalen Materialfluss zwischen den Funktionsmodulen ein. Klassische Förderer ermöglichen in der Regel nur eine unidirektionale Förderrichtung (z. B. Förderer, Rundschalttische). Um einen möglichst hohen Flexibilitätsgrad auch im Materialflussverhalten zu ermöglichen, wurde ein neuartiger Ansatz gewählt: In der wandlungsfähigen Fabrik der Zukunft wird der Materialfluss durch Roboter gehandhabt. Aufgrund der geometrischen Variantenvielfalt der Werkstücke können die Werkstücke jedoch nicht direkt von einem Roboter gehandhabt werden. Dies würde eine Vielzahl unterschiedlicher Greifwerkzeuge erfordern. Stattdessen werden die Werkstücke in Formnestern auf Werkstückträgern transportiert.

Der Materialfluss durch die Produktionsstruktur erfolgt durch die Handhabung der Werkstückträger. Dazu wurde als erstes Funktionsmodul ein roboterbasiertes Materialflussmodul entwickelt (Abbildung 2). Da die Materialflusswege die Aufbaustruktur einer Produktionsstruktur definieren, wird der topologische Aufbau einer wandlungsfähigen Fabrik durch die Anordnung dieser Materialflussmodule bestimmt. Sie bilden damit, im übertragenem Sinne, das Rückgrat der Produktionsstruktur.

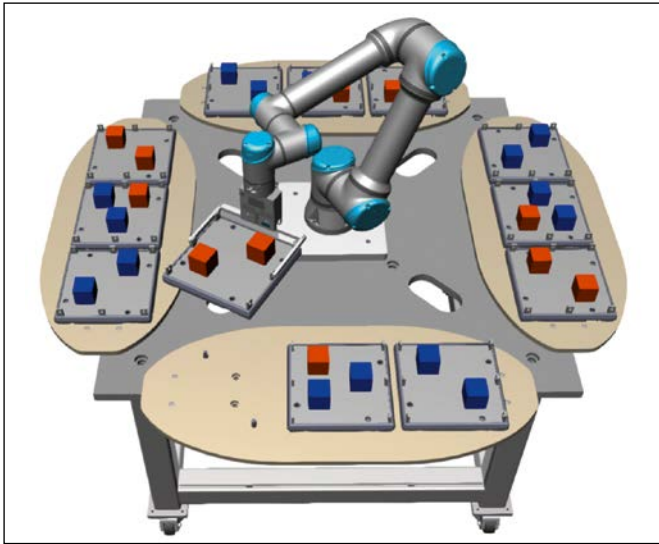


Abbildung 2: Konstruktive Umsetzung eines Materialflussmoduls

Für den Transport der Werkstückträger, außerhalb der Produktionsstruktur, wurde ein Transportmodul (Abbildung 3) entwickelt. Das Transportmodul kann eine bestimmte Anzahl von Werkstückträgern aufnehmen. Es kann manuell mithilfe eines Handhubwagens oder automatisch mit Hilfe eines Autonomous Mobile Robots (AMR) bewegt werden. Die Aufgabe eines Transportmoduls in der wandlungsfähigen Fabrik ist es, Werkstückträger zwischen einem Logistiksystem und der Produktionsstruktur zu transportieren. Es kann aber auch dazu verwendet werden, Werkstückträger aus der Produktionsstruktur auszuschleusen und diese an einer anderen Stelle derselben oder einer weiteren Produktionsstruktur wieder zu integrieren. Dadurch soll der interne Materialfluss eines Produktionssystems entlastet bzw. ein Materialfluss zwischen Produktionsstrukturen ermöglicht werden.

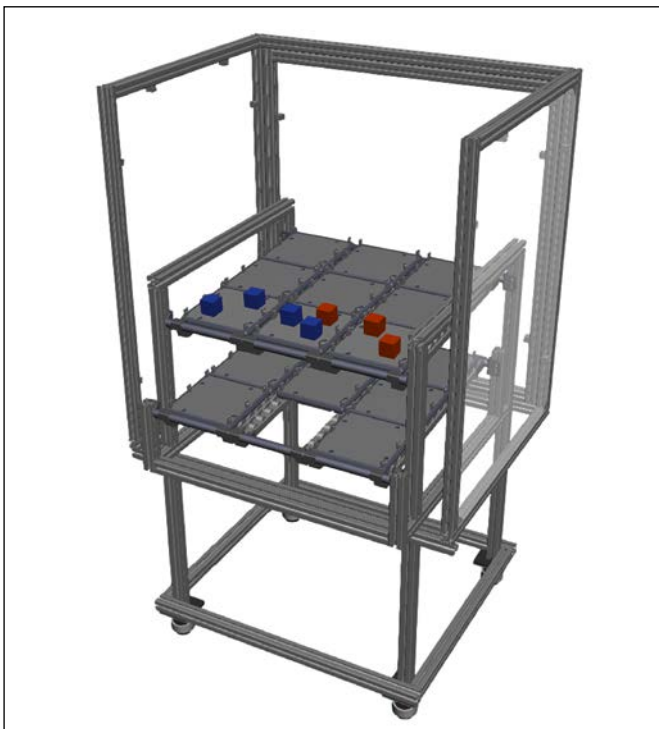


Abbildung 3: Konstruktive Umsetzung eines Transportmoduls

Die wertschöpfenden Produktionsprozesse sollen ausschließlich in geeigneten Wertschöpfungsmodulen stattfinden (Abbildung 4). Die Wertschöpfungsmodule werden an die Materialflussmodule angedockt. Die Handhabungsroboter der Materialflussmodule übergeben Werkstückträger an ein Wertschöpfungsmodul und entnehmen diese auch wieder. In Abhängigkeit der Produktionsaufträge können Wertschöpfungsmodule flexibel in die Produktionsstruktur integriert oder aus ihr entfernt werden. Bei der Entwicklung der Wertschöpfungsmodule sollen die jeweiligen Wertschöpfungsprozesse möglichst abstrakt umgesetzt werden. Das bedeutet, dass diese nicht auf ein einzelnes Werkstück zugeschnitten werden, sondern unterschiedliche Werkstücke einer Produktfamilie oder im Einzelfall auch unterschiedliche Produkte verarbeiten können. Dazu ist eine flexible Positionierung von Bearbeitungs- und Fügwerkzeugen erforderlich. Dies soll durch geeignete Kinematiken (z. B. Raumportal, Kleinroboter) ermöglicht werden.

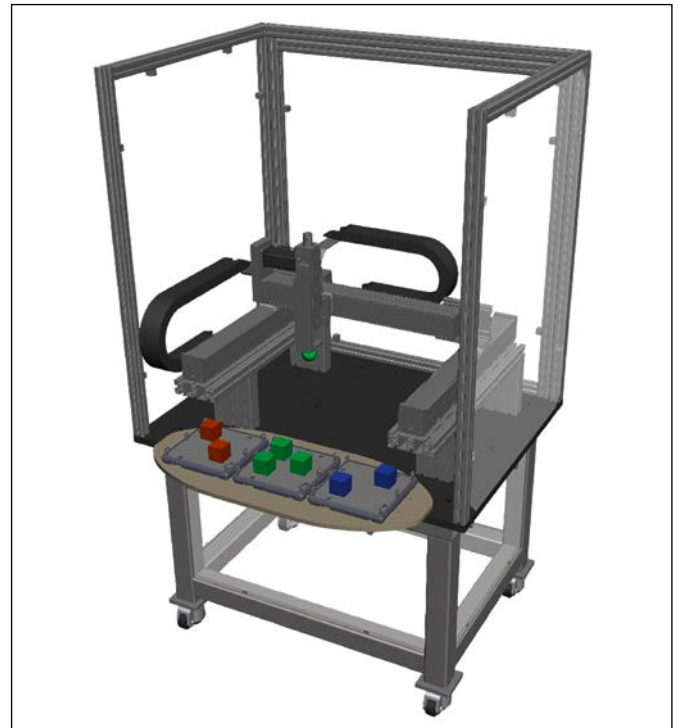


Abbildung 4: Beispielhafte konstruktive Umsetzung eines Wertschöpfungsmoduls

Prozesse, die nur schwer oder nicht wirtschaftlich automatisiert werden können, werden in manuellen Wertschöpfungsmodulen von einem Menschen durchgeführt. Diese Werkermodule werden, wie die automatisierten Wertschöpfungsmodule, an die Materialflussmodule angedockt.

Zusammen mit den Industriepartnern wurden als Modellprodukte für die wandlungsfähige Smart Factory Schnellverschlusskupplungen der Firma Lüdecke, Amberg, ausgewählt. Diese zeichnen sich durch eine hohe Variantenvielfalt aus, mit der die Variantenflexibilität der wandlungsfähigen Produktionsstruktur untersucht werden soll.

3 Modellierung Digitaler Zwillinge der Funktionsmodule

Auf der Grundlage des mechanischen Umsetzungskonzeptes des ersten Arbeitspaketes, werden im zweiten Arbeitspaket echtzeitfähige Digitale Zwillinge [4] der Funktionsmodule in einem Simulationstool modelliert. Auf Basis der Digitalen Zwillinge kann eine virtuelle Inbetriebnahme der Steuerungssoftware durchgeführt werden.

Bei der Modellierung von Digitalen Zwillingen wird grundsätzlich zwischen den drei Modellteilen Verhaltens-, Materialfluss- und Geometriemodell unterschieden. Das Verhaltensmodell beschreibt das zeitliche, kinematische und mathematisch-logische Verhalten des digitalen Zwillinges und besitzt ein realistisches Ansteuer- und Rückmeldeverhalten gegenüber der angeschlossenen Steuerlogik. Dabei kann das Verhaltensmodell entweder durch eine physische Steuerung (Hardware-in-the-Loop), eine emulierte Steuerung (Software-in-the-Loop) oder einen implementierten Steueralgorithmus (Model-in-the-Loop) gesteuert werden. Das Verhaltensmodell ist zeitlich deterministisch, wodurch alle Ereignisse in der Simulation durch Vorbedingungen festgelegt sind und berechnet werden können. Optional kann ein integriertes Bedienpanel zur Visualisierung und dem Forcen von Steuersignalen des Verhaltensmodells genutzt werden.

Das Materialflussmodell dient der Modellierung des Materialflusses in einer Simulationsumgebung. Indem Materialfluss-Elemente aus programmeigenen Bibliotheken in die Modellieroberfläche eingefügt werden, können das Werkstück als Material und dessen Transport- und Bearbeitungsvorgänge abgebildet werden. Der Materialfluss ist durch rudimentäre Hüllkörper-Geometrien abstrahiert, meist physikbasiert, und wird unabhängig vom Verhaltensmodell nur mit den stärksten Realitätsfaktoren, wie Kollision, Reibung und Schwerkraft, zyklisch berechnet.

Im Geometriemodell, welches die Visualisierung des Simulationstools darstellt, werden die CAD-Geometrien

der Anlage importiert. Diese überlagern die Hüllkörper-Geometrien der Materialfluss-Elemente und bilden diese realitätsnäher ab. Mithilfe des Geometriemodells werden Bewegungen von Komponenten und Bearbeitungsprozesse in der simulierten Anlage visualisiert. Für die Modellierung des Geometriemodells muss ein Kompromiss im Hinblick auf den Abstraktionsgrad der visuellen Darstellungen gefunden werden (realitätsnahe Darstellung vs. Rechenleistung).

Aus den drei Modellteilen Verhaltens-, Materialfluss- und Geometriemodell wird ein Digitaler Zwilling modelliert. In einem modernen Simulationstool werden dazu nicht drei getrennte Datenmodelle verwendet, sondern ein integriertes Datenmodell gebildet, das als mechatronische Komponente bezeichnet wird. Die mechatronischen Komponenten werden in einer Komponentenbibliothek abgelegt und können in anderen Modellen wiederverwendet werden.

Bei der Modellierung einer Produktionsstruktur werden die mechatronischen Komponenten aus der Komponentenbibliothek durch Drag & Drop in die Simulationsumgebung übertragen. Über Docking Ports können die Komponenten einfach geometrisch miteinander verbunden werden (Abbildung 5).

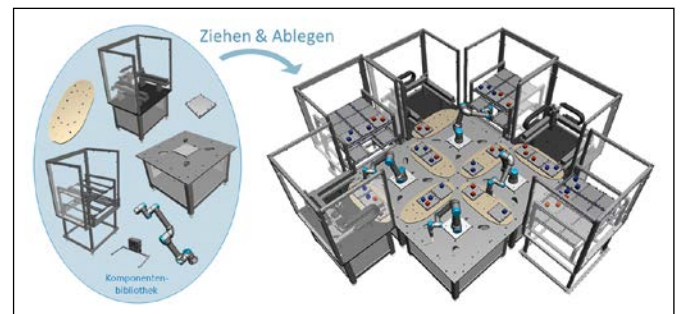


Abbildung 5: Modellierung aus der Komponentenbibliothek

Die Verknüpfungen bzw. die Beziehungen der einzelnen Komponenten zueinander werden beim Zusammenbauen automatisch im zentralen Blockschaltbild des Verhaltensmodells erzeugt (Abbildung 6).

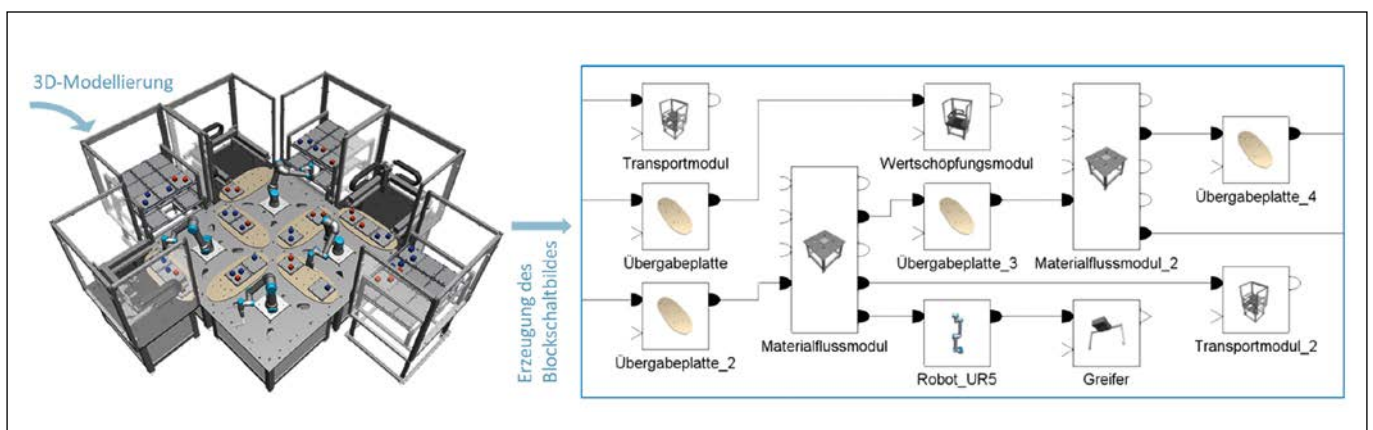


Abbildung 6: Automatische Erzeugung des Blockschaltbildes

4 Ausblick

Auf dem Weg zur Realisierung einer Smart Factory an der OTH Amberg-Weiden wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes bisher ein Umsetzungskonzept entwickelt und erste Funktionsmodule konstruiert. Die Funktionsmodule wurden in einer Simulationsumgebung zu mechatronischen Komponenten erweitert und in eine Komponentenbibliothek integriert. Dieses Vorgehen ermöglicht es, die Konfiguration einer Smart Factory für die Kleinteilemontage durch Drag & Drop-Operationen grafisch zu modellieren und damit aufwandsminimal einen Digitalen Zwilling zu generieren.

In den nächsten Arbeitspaketen sollen ein Steuerungskonzept und ein Materialflusskonzept entwickelt werden. Diese sollen anschließend mithilfe des Digitalen Zwillings validiert werden.

Mit den Ergebnissen aus diesem Forschungsprojekt werden dem Anwender wertvolle digitale Hilfsmittel zur Verfügung stehen, um eine flexible, wandlungsfähige Smart Factory und neue digitale Geschäftsmodelle umsetzen zu können. Dies stellt im Zeitalter der zunehmenden Individualisierung einen entscheidenden Vorteil für den bayerischen Mittelstand dar und trägt dazu bei, dessen Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit im internationalen Wettbewerb zu stärken.

Referenzen:

- [1] W. Huber, „Industrie 4.0 kompakt – Wie Technologien unsere Wirtschaft und unsere Unternehmen verändern“, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2018
- [2] G. Reinhart (Hrsg.), „Handbuch Industrie 4.0“, Carl Hanser Verlag München, 2017
- [3] S. Weyer, F. Quint, S. Fischer, D. Gorecky, D. Zühlke, „Die Smart Factory für individualisierte Kleinserienfertigung“, in Reinhart (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik, München, Hanser Verlag, 2017, S. 691–707
- [4] R. Stark, C. Fresemann, K. Lindowa, “Development and operation of Digital Twins for technical systems and services”, in CIRP Annals 2019, Volume 68, Issue 1, pp. 129–132

Projektpartner:

Baumann Automation GmbH, Amberg
Continental Automotive GmbH, Regensburg
DEHN SE, Neumarkt
Lüdecke GmbH, Amberg
PIA Automation GmbH, Amberg
RIBE Anlagentechnik GmbH, Schwabach
Siemens AG, Amberg und Nürnberg
SPANGLER GmbH, Dietfurt/Töging
Stäubli Tec-Systems GmbH, Bayreuth

Fördergeber:

KME – Kompetenzzentrum Mittelstand GmbH, Garching

**Kontakt:**

Prof. Dr.-Ing. Matthias Wenk

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

m.wenk@oth-aw.de

Experimentelle Cloud-Steuerung des Industrie-4.0-Demonstrators und Visualisierung in einem 3D-Modell

Stefan Ries, B.Eng.
Johannes Halbritter, B.Eng.
Franz Ruidisch, B.Eng.
Lukas Giestl, B.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmidt

Zusammenfassung

Im Labor Anlagentechnik werden im Rahmen der Digitalen Modellfabrik "AUT Small Smart Factory" verschiedene I4.0 Technologien untersucht. Anhand der AUT Small Smart Factory wurde experimentell untersucht, inwieweit Steuerung und Visualisierung nahtlos in einer Cloud-Umgebung erfolgen können, wenn Industrie 4.0 Kommunikationsprotokolle eingesetzt werden.

Für die Kommunikation wurde ein Informationsmodell anhand des Industriestandards OPC UA entworfen, das neben der Cloud-Steuerung auch die traditionelle Steuerung über Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) ermöglicht. Für die Cloud-Anbindung der Visualisierung wurde das Informationsmodell in Kopplung mit dem I4.0 Protokoll MQTT eingesetzt. Die 3D-Visualisierung erfolgte plattformunabhängig mit der Game Engine "Unity". Für die Realisierung des IT/OT Gateways und der Cloud-Steuerung wurden Einplatinencomputer verwendet.

Abstract

In the plant-engineering laboratory, various I4.0 technologies are investigated as part of the digital model factory "AUT Small Smart Factory". The AUT Small Smart Factory was used to experimentally investigate the extent to which control and visualisation can take place seamlessly in a cloud environment when Industry 4.0 communication protocols are used.

For communication, an information model was designed based on the industry standard OPC UA, which enables traditional control via programmable logic controllers (PLCs) in addition to cloud control. For the cloud connection of the visualisation, the information model was used in coupling with the I4.0 protocol MQTT. The 3D visualisation was carried out platform-independently with the game engine "Unity". Single-board computers were used to realise the IT/OT gateway and the cloud control.

1 Einleitung

Die "AUT Small Smart Factory" [1] besteht aus einzelnen Produktionszellen, die jeweils mit einer SPS ausgestattet sind. Diese Zellen können flexibel kombiniert werden, um so dynamisch bestimmte Produktionsaufgaben erfüllen zu können. Ziel ist es unter anderem, neuartige Steuerungskonzepte, robuste Datenübertragung oder Low-Cost-Elemente zu entwickeln und auf ihre Praxistauglichkeit hin erproben zu können.

Im Rahmen dieses Projektes wurde die Anlage für ein Szenario aus der Qualitätskontrolle aufgebaut. Hier werden 6 Zellen verwendet, die über Förderbänder verfügen, welche jeweils mit Abstandssensoren ausgestattet sind.

Eine Zelle verfügt zusätzlich noch über eine Kamera mit Bilderkennung. Ergänzt wird der ganze Aufbau durch 2 Roboter, die das Auflegen und Abnehmen von Werkstücken übernehmen.

Da die einzelnen Zellen außer der Bilderkennung nur über relativ simple Sensoren und Aktoren verfügen und einfache Aufgaben ausführen, kann die Auslagerung von Steuerungsfunktionalität in die Cloud einfach untersucht werden.

Außerdem können die Steuerungsinformationen so an einer zentralen Stelle zusammengeführt werden, um für weitere Funktionalitäten abrufbar zu sein. Im Rahmen dieses Projekts werden die Daten aus der Cloud hier ver-

wendet, um den Live-Zustand der Anlage in einem 3D-Modell zu visualisieren.



Abbildung 1: AUT Small Smart Factory

2 Kommunikationsstruktur

2.1 Technologien

Bei der Kommunikationsstruktur wurden die Protokollarten Open Platform Communication Unified Automation (OPC UA) [2] und Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) [3] verwendet. Über OPC UA konnte die Machine-to-Machine-Kommunikation zwischen Steuerprogramm auf der Cloud und der realen Anlage realisiert werden. Die Daten für die 3D-Visualisierung in Unity wurden über einen MQTT-Broker übertragen. Durch die leichtgewichtige MQTT-Schnittstelle kann eine Vielzahl von Synchronisationsabläufen performant übertragen werden.

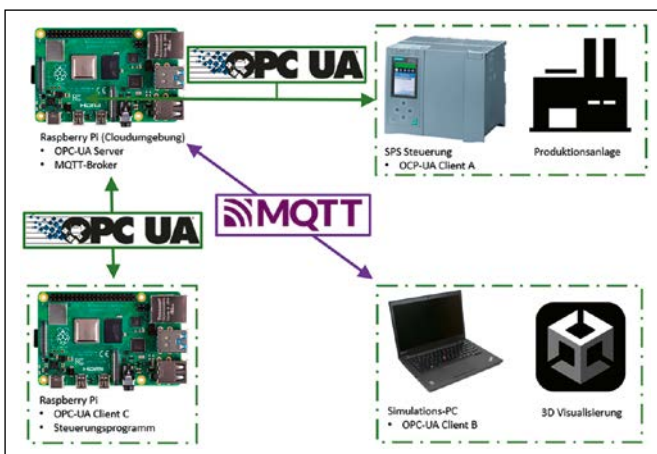


Abbildung 2: Aufbau Kommunikationsstruktur

2.2 Umsetzung OPC UA

Für die Umsetzung der Kommunikationsschnittstellen wurde zunächst ein OPC UA Server auf einem Raspberry Pi angelegt. Diese Hardware agiert im Projekt als Cloud und beinhaltet neben dem Server für OPC UA auch den Broker für MQTT.

Um den OPC UA Server zu konfigurieren, wird ein Informationsmodell als XML-Datei importiert und ein Endpoint, auf dem der Server läuft, angegeben. Der anlagenspezifische Aufbau im Informationsmodell kann über die Erstellung von hierarchischen Objekten, den sogenannten Knoten, modelliert werden. Als Tool für die Erstellung wurde die Anwendung „SIOME“ verwendet.

Nach der Konfiguration und dem Starten des Servers kann sowohl das Steuerprogramm als auch die SPS nach einer Schnittstellendefinition auf die Knotenstruktur lesend bzw. schreibend zugreifen.

Für die Kommunikation mit MQTT wird der Open Source Broker „Mosquitto“ verwendet. Dabei werden Protokolle mit Daten über einen Publisher in die hierarchische Struktur des Brokers versandt. Die Struktur im Broker wird durch sogenannte Topics vorgegeben. Im Anwendungsfall der Projektarbeit wurden nur die steuerprogrammrelevanten Daten als Topic umgesetzt. Dadurch konnte die Performance hoch und der Konfigurationsaufwand gering gehalten werden. Die gespeicherten Daten im Broker können anschließend von einer beliebigen Anzahl von Subscribern abonniert werden. Im Projektumfeld war dies die Unity-Simulation mit einer vordefinierten Bibliothek zum Empfang von MQTT-Topics.

Um die Anlageneinrichtung zu vereinfachen, wurde das Steuerprogramm der Anlage und das Eventhandling für MQTT in einem Script realisiert und die Unterprozesse jeweils asynchron aufgerufen.

3 Cloud-Steuerung

Die Steuerung der Anlage sowie die Verwaltung des OPC-UA-Servers geschahen auf einem Raspberry Pi 4 (Pi). Um die Umsetzung hierbei möglichst einfach zu halten, wurde als Programmiersprache Python ausgewählt. Dies erscheint auf den ersten Blick ungünstig, da Python als Interpretersprache im Vergleich zu C bzw. C++ wenig geeignet ist. Aufgrund der im Vergleich zur Befehlsabarbeitung im Pi eher langsamen Fördervorgänge in der Demonstrator-Anlage, hatte dies jedoch keine Auswirkungen auf die Funktionalität. Gleichzeitig bietet Python einige entscheidende Vorteile. Ein erster ist die Portierbarkeit der Skripte zwischen Windows- und Linux-Systemen. So konnte die Implementierung der Cloud-Steuerung für erste Versuche auf einem Windows-PC erfolgen und später ohne große Anpassungen auf einem Raspberry-Pi verschoben werden. Für die Ablaufsteuerung wurden für alle Sensor- und Aktor-Nodes Objekte mit deren Handles im Python-Skript angelegt.

Nach einer Initialisierung bei dem Hochfahren des Servers geht die Ablaufsteuerung in ihren Hauptzyklus über. Durch die Organisation aller Nodes in Objekten kann ein Zyklus einfach als Iteration durch alle Zellen mittels einer

Schleife erfolgen. Dabei ist für jedes Förderband eine Funktion realisiert, welche jeweils das aktuell gewählte Förderband und das in der realen Anlage in Förderrichtung liegende nächste Förderband als Parameter aufnimmt. Anhand einer Zustandsnummer in den jeweiligen Förderband-Objekten und dessen Aktor- und Sensor-Zuständen wird sodann ein für alle Bänder gleiches GRAPHCET-Ablaufdiagramm durchlaufen. Jedes Förderband kann dabei gerade ein Bauteil halten, welches unter entsprechenden Bedingungen von Band zu Band, also von einem Conveyor-Objekt zum nächsten, im Sinne einer Zustandsänderung weitergegeben wird.

4 3D-Visualisierung

4.1 REST-API

Zur Übertragung der für den digitalen Zwilling relevanten Anlagendaten wurde eine ausgelagerte Kommunikationsschnittstelle in Python implementiert. Diese ermittelt in einer Initialisierungsroutine dynamisch alle für das 3D-Modell relevanten Node-Namen und IDs aus der XML-Datei des Informationsmodells und legt sie in einer mit dem Datenformat JavaScript Object Notation (JSON) kompatiblen Struktur ab.

Anschließend werden wahlweise zyklisch die korrespondierenden Node-Werte über OPC UA vom Server abgefragt oder durch Abonnieren der entsprechenden Topics des in Abschnitt 2 beschriebenen MQTT-Brokers ermittelt.

Im nächsten Schritt werden die empfangenen Anlagendaten dem Unity-Modell über eine REST-API zur Verfügung gestellt. Da die Interaktion mit REST-APIs durch GET- beziehungsweise POST-Requests einfach durch die in Unity enthaltenen Bibliotheken realisierbar ist, konnte durch die Entwicklung einer ausgelagerten Kommunikationsschnittstelle auf die Verwendung von Fremdbibliotheken im Unity-Modell selbst verzichtet und so maximale Plattformunabhängigkeit sichergestellt werden. Dies wäre über eine direkte Datenabfrage aus Unity über MQTT oder OPC UA – mit den im Rahmen des Projektes zur Verfügung stehenden Ressourcen – nicht möglich gewesen.

4.2 Unity-Modell

Die 3D-Visualisierung des Industrie-4.0-Demonstrators wurde mit der Game-Engine Unity [4] realisiert. Dafür konnte auf bereits fertige 3D-Modelle aus einem anderen Projekt zurückgegriffen werden. Unity bietet weiterhin die Möglichkeit, 3D-Objekte mit Quellcode zu versehen, wodurch deren Verhalten tiefergehend gesteuert werden kann. Als Programmiersprache wurde hier C# gewählt.

Die 3D-Objekte wurden analog zum Informationsmodell hierarchisch gruppiert. So besteht das 3D-Objekt Anlage aus einer endlichen Anzahl von Zellen, diese wiederum aus 3 bis 5 Förderbändern, diese aus deren realen Einzelteilen usw. Ebenso wurde jedes relevante 3D-Objekt mit einem C#-Skript versehen und auch diese entsprechend genau gleich hierarchisch untergliedert.

Eine Steuerung der realen Anlage ist ebenfalls über das 3D-Modell möglich. So wurde die Funktion Ein- bzw. Ausschalten durch UI-Elemente für jede Zelle realisiert. Eine Betätigung Drücken löst hier einen POST-Request an die REST-API aus, was eine entsprechende Benachrichtigung an die Cloud-Steuerung zur Folge hat. Bei Drücken des Not-Aus-Schalters wird die Anlage gestoppt und ein Alarmton ausgegeben.

5 Durchgeführte Untersuchungen und Ergebnisse

Bei der praktischen Erprobung der Steuerung an der realen Anlage zeigte sich, dass eine Zykluszeit von etwa 25 ms die untere Grenze für die hier eingesetzten OPC UA-Clients darstellt. Noch geringere Zykluszeiten führten zu einer Überlastung des OPC-UA-Servers, da dieser die Vielzahl an Anfragen nicht mehr verarbeiten konnte.

Das 3D-Modell wurde mittels Zeitmessungen validiert. Hierbei wurden über einen längeren Zeitraum die Latenz und der Jitter gemessen, die sich von einem Sensorsignal der realen Anlage bis zur vollständigen Aktualisierung des Modells ergeben. Die gemessenen Zeiten lagen hier zwischen 28 Millisekunden (Best-Case) und 130 Millisekunden (Worst-Case). Dies ist für eine sinnvolle 3D-Visualisierung bei weitem ausreichend.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Cloud-Steuerung im Zusammenspiel mit der 3D-Visualisierung an der vorhandenen Anlage gut funktioniert hat. Die klar zu Tage getretenen Leistungsgrenzen des Raspberry Pis zeigen aber auch, dass das Projekt so nicht skalierbar ist. Eine deutlich größere Anzahl von Sensoren und Aktoren oder auch der Einsatz weiterer Produktionszellen würde Probleme sicherlich auch bei sogar höheren Zykluszeiten auftreten lassen, was wiederum die Steuerungsfunktionalität beeinflussen würde.

Wie erwähnt hat die Cloud-Steuerung für die vorhandene AUT Small Smart Factory aber gute Ergebnisse geliefert. Ein realer Einsatz einer ähnlichen Cloud-Steuerung in einem Umfeld mit einer geringen Anzahl an Clients oder mit leistungsstärkerer Hardware scheint hier also sehr gut möglich.

Referenzen:

- [1] [Online]. https://aut-oth.de/wp-content/uploads/2022/04/Poster_SmartFactory_final.pdf (Zuletzt aufgerufen am 03.09.2022)
- [2] [Online]. <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/> (Zuletzt aufgerufen am 03.09.2022)
- [3] [Online]. <https://mqtt.org/> (Zuletzt aufgerufen am 03.09.2022)
- [4] [Online]. <https://docs.unity3d.com/Manual/index.html> (Zuletzt aufgerufen am 03.09.2022)

Kontakt:



Stefan Ries, B.Eng.

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

s.ries@oth-aw.de



Johannes Halbritter, B.Eng.

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

j.halbritter1@oth-aw.de



Franz Ruidisch, B.Eng.

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

f.ruidisch@oth-aw.de



Lukas Giestl, B.Eng.

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

l.giestl@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

Parametrisierte Rechenmodelle zur Optimierung von Herstellungsprozessen für Halbleitermaterialien mit ANSYS Workbench

Magdalena Lang
Antonia Wörsing
Shiva Krishna Tangedipelli, M.Sc.
Prof. Dr.-Ing. Marc Hainke

Zusammenfassung

Durch parametrisierte Simulationsmodelle können Herstellungsverfahren von Halbleitermaterialien systematisch optimiert werden. Die gewählte Vorgehensweise wird vereinfacht dargestellt und mögliche Einschränkungen der Berechnungsmodelle werden diskutiert.

Die Umsetzung der Methodik für die speziellen Anforderungen bei der AlN-Kristallzüchtung ist Bestandteil unserer aktuellen Arbeiten

Abstract

Using parameterized simulation models, manufacturing processes for semiconductor materials can be systematically optimized. The selected procedure is presented in simplified form and possible limitations of the calculation models are discussed.

The implementation of the methodology for the special requirements of AlN crystal growth is part of our current work.

1 Einleitung

Im Rahmen des Vorhabens „Sim_AlN_100“ unterstützt unser Team an der OTH AW in enger Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Materialien [1, 2] am Fraunhofer Institut IISB [3] die Prozessentwicklung zur Herstellung von Aluminiumnitrid (AlN)-Volumenkristallen mit großen Durchmessern. Primäre Anforderung an die numerischen Modelle ist die Vorhersage der Temperaturverteilung in den Zuchtungsanlagen, was die Simulation aller Wärmeübertragungsmechanismen (Wärmeleitung, -konvektion und insbesondere Wärmestrahlung) erfordert. Dabei ist zu beachten, dass bei den hohen Prozesstemperaturen viele Materialparameter – als wesentliche Eingangsgrößen für ein Berechnungsmodell – häufig nur näherungsweise bekannt sind. Zusätzliche Modelle bilden den Stofftransport im Zuchtungsraum ab. Durch die Berechnung der mechanischen Spannungen im Kristall kann die resultierende Kristallqualität bewertet werden. Die im Vorhaben entwickelten Modelle sind in der kommerziellen Simulationssoftware ANSYS Workbench [4] implementiert.

Im Folgenden soll die grundsätzliche Vorgehensweise dargestellt werden. Die Übertragung der Methodik auf die speziellen Anforderungen bei der Herstellung von AlN-Kristallen ist Bestandteil unserer aktuellen Arbeiten.

2 Parametrisierte Simulationsmodelle

Abbildung 1 zeigt schematisch den Aufbau einer Zuchtungsanlage. Mit einem Heizsystem muss in der Hotzone ein definiertes Temperaturprofil erzeugt werden. Mithilfe der Simulation sollen unterschiedliche Gestaltungen der wesentlichen Baugruppen bewertet werden. Beispielsweise kann nach der optimalen Größe und Position des Heizsystems gefragt werden – eine Fragestellung die experimentell nur mit erheblichem Aufwand beantwortet werden kann.

Veränderliche Baugruppen können in ANSYS Workbench durch parametrisierte Geometrien modelliert werden. Im Beispiel kann sowohl die Größe des Heizsystems (b , h) als auch die Position (x , y) variiert werden, ohne im CAD-System die Geometrie neu zu gestalten. Eine entsprechende Vorgehensweise kann auf weitere Baugruppen übertragen werden, was zu der gewünschten Flexibilität,

aber auch sehr schnell zu vielen Geometrieparametern führt. Zusätzliche Modellparameter entstehen durch die gewählten Prozessparameter, z. B. Volumenströme von Gasströmungen, Kühltemperaturen und Heizleistungen. Schließlich müssen die teilweise unbekanntenen Materialdaten als zusätzliche Modellparameter beachtet werden.

Ein typischer Screenshot eines derartig parametrisierten Modells in ANSYS Workbench ist in Abbildung 2 gezeigt. Die Variablen der Geometrie (A), die Materialdaten (B) und die gewählten Prozessparameter der verschiedenen physikalischen Module (C, D) definieren einen Parametersatz und ein mögliches Modellergebnis (E). Die Software ermöglicht systematische Variationen und bietet Module zur Analyse von Einflussgrößen (F). Weiterhin können Optimierungsalgorithmen (G) gewählt werden, um beispielsweise die optimale Position (x, y) des Heizelementes zur Erzeugung stabiler Wachstumsbedingungen in der Hotzone zu bestimmen.

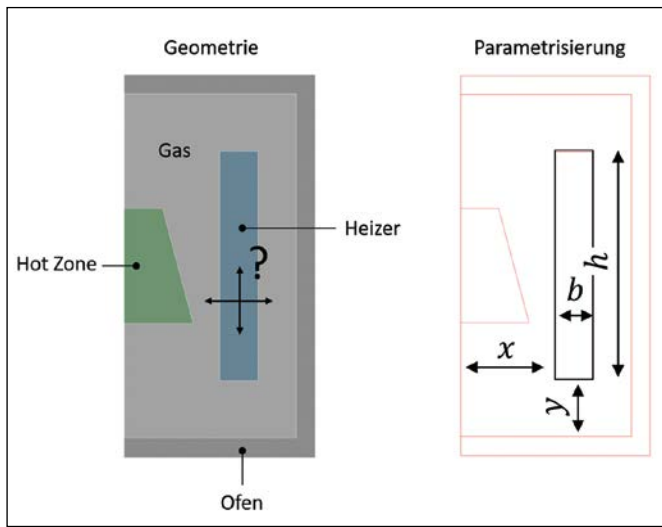


Abbildung 1: Stark vereinfachter schematischer Aufbau einer Züchtungsanlage (links) und parametrisierte Definition der Geometrie am Beispiel des Heizsystems (rechts).

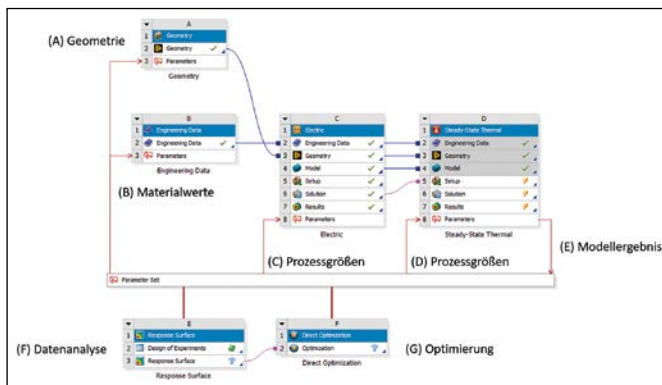


Abbildung 2: Typischer Aufbau eines parametrisierten Simulationsmodells in ANSYS Workbench. Variable Modellparameter werden sowohl bei der betrachteten Geometrie (A), bei den verwendeten Materialkennwerten (B) und den Prozessgrößen zu unterschiedlichen physikalischen Modellen (C, D) verwendet. Der Datensatz ergibt ein im Parameterraum mögliches Modellergebnis (E). ANSYS Workbench beinhaltet eigene Komponenten zur systematischen Datenanalyse (F) und gezielter Optimierung (G).

3 Möglichkeiten und Grenzen

Eine typische Parametervariation kann wie in Abbildung 3 dargestellt aussehen. Die Varianten unterscheiden sich nicht nur in der geometrischen Anordnung der Baugruppen, sondern verwenden auch unterschiedliche Prozessparameter. Mithilfe der Analysemöglichkeiten kann nun beispielsweise der Effekt auf verschiedene Zielgrößen, wie z. B. Wachstumsrate, Temperaturgradienten im Kristall oder mechanische Spannungen, analysiert werden (Abbildung 4) und damit die „bestmögliche“ Prozessvariante gefunden werden.

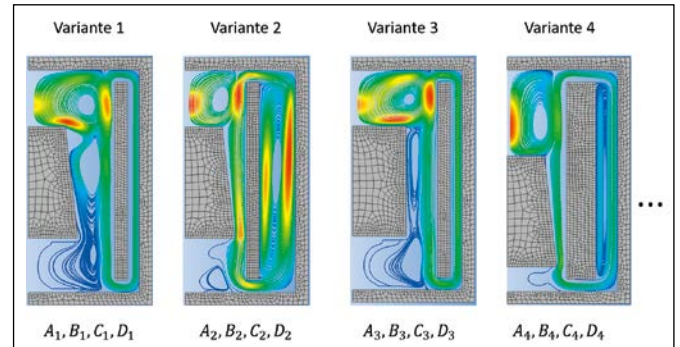


Abbildung 3: Varianten des Rechenmodells mit unterschiedlichen Gestaltungen der Anlagengeometrie und zusätzlich im Rahmen des Lösungsraums variierten Material- (B_i) und Prozessparameter (C_i, D_i).

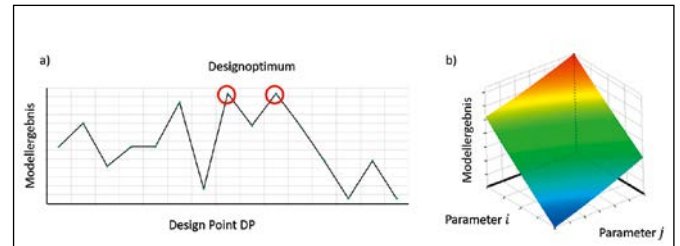


Abbildung 4: Typische Analyse der Design-Varianten in ANSYS Workbench: Grafische Darstellung eines Modellergebnisses (z. B. lokale Temperatur, Wachstumsrate, Temperaturgradient, etc.) für die verschiedenen Design-Varianten (links) und detaillierte Auswertung zum Einfluss einzelner Parameter auf das Modellergebnis mit Antwortflächen (rechts).

Die Möglichkeiten zur rechnerischen Designoptimierung sind außer Frage reizvoll. Allerdings bestehen in der Praxis bei der Anwendung der Tools auf ingenieurwissenschaftliche Fragestellungen eine ganze Reihe von Limitierungen, u. a.:

- Teilweise Vorhersage bekannter Tatsachen, wie z. B. möglichst gut leitende Materialien zur Steigerung der Wärmeabfuhr oder Steigerung des Volumenstroms zur Erhöhung der Kühlrate.
- Die möglichen Geometrievarianten werden durch ungeschickte Parametrisierung eingeschränkt (z. B. immer Rechteckform, keine schräge Anordnung) oder sind teilweise nicht möglich (Überschneidungen Hotzone und Heizsystem).
- Die Güte bei den numerischen Gittern ist bei Geometrievariationen möglicherweise nicht immer gleich-

wertig, z. B. zu wenig Gitterelemente in sehr kleinen Spalten oder Einflüsse auf die Genauigkeit bei der Berechnung der Wärmestrahlung.

- Möglicherweise werden bei bestimmten Varianten physikalische Effekte nicht angemessen modelliert (z. B. Alterungseffekte oder turbulente Strömungen).
- Im Modell schwer quantifizierbare Werte wie Wärmekontakte und mechanische Eigenspannungen können einen erheblichen Einfluss auf das Rechenergebnis haben.
- Aufgrund der Vielzahl an Simulationen sollte die Rechenzeit für einen Datensatz nicht zu groß sein, was insbesondere bei Strömungssimulationen und zeitabhängigen Analysen beachten werden muss.
- Bei der tatsächlichen Umsetzung bestehen typischerweise erhebliche Einschränkungen der Lösungsvielfalt durch Bauraum, Montagemöglichkeiten, Materialien und Kosten.

4 Fazit

Gerade die Rahmenbedingungen bei der Herstellung von Halbleitermaterialien erfordern die Anwendung der modellbasierten Prozessgestaltung und -optimierung [5]. Die Optimierung basiert auf physikalisch-mathematischen Modellen und ist dementsprechend immer eine Vereinfachung des realen Systems. Dabei ist die Vorhersage von Trends durch die Simulationsanwendung häufig wichtiger als die Angabe absoluter Zahlenwerte. Die oben diskutierten Einschränkungen dürfen nicht als Nachteil der Methodik verstanden werden. Vielmehr verdeutlicht dies die Notwendigkeit gut und breit ausgebildeter Ingenieur:innen, um erfolgreich effiziente Modelle zu entwickeln und fehlerfrei die verschiedenen Softwaretools einzusetzen, um die Vielfalt an Rechenergebnissen richtig interpretieren zu können.

Referenzen:

- [1] Friedrich, J.; Müller, G.: Erlangen – An Important Center of Crystal Growth and Epitaxy: Major Scientific Results and Technological Solutions of the Last Four Decades, Cryst. Res. Technol., 2019
- [2] Friedrich, J.; Müller, G.: Kristallmaterialien – Schlüsselwerkstoffe für Zukunftstechnologien, „Fokus Technologiemarkt: Technologiepotenziale identifizieren – Marktchancen realisieren“. (Hrsg. H.-J. Bullinger), Carl Hanser, 2012
- [3] Fraunhofer IISB: www.iisb.fraunhofer.de
- [4] ANSYS: www.ansys.com
- [5] Kranert, Ch.; Hainke, M., Friedrich, J.: Modeling the growth of ultrawide bandgap materials, IWMCG-10, 2022 (eingeladener Vortrag)

Fördergeber:

Das Bayerische Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst fördert das Projekt „Sim_ALN_100“ im Rahmen des Programms zur Förderung der angewandten Forschung und Entwicklung an Hochschulen für angewandte Wissenschaften – Fachhochschulen (Kap. 1549 TG 78), 6. Förderrunde (2021–2024).

Bayerisches Staatsministerium für
Wissenschaft und Kunst



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



Magdalena Lang

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

m.lang6@oth-aw.de



Antonia Wörsing

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

a.woersing@oth-aw.de



Shiva Krishna Tangedipelli, M.Sc.

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

s.tangedipelli@oth-aw.de

Herausforderungen bei der Einführung von Digital Twins und Auswirkungen auf die Datenanalyse

Prof. Dr.-Ing. Michael Möhring

Zusammenfassung

Digitale Zwillinge, auch Digital Twins genannt, sind eine wichtige Zukunftstechnologie für Unternehmen und Organisationen. Mit der Einführung dieser Technologie sind verschiedene Herausforderungen verbunden. Diese müssen beachtet werden, um die wirtschaftliche Einführung von Digitalen Zwillingen nicht zu gefährden. Am Beispiel der Herausforderungen der Datenintegration werden Auswirkungen auf die Datenanalyse / das Machine Learning als Anwendungsgebiet des Digitalen Zwillings aufgezeigt und Lösungsmöglichkeiten hergeleitet. Weiterhin werden Implikationen und Limitationen abgeleitet.

Abstract

Digital Twins are an important future technology for companies and organisations as well. There are various challenges associated with the introduction of this new technology. These must be taken into account in order not to danger the economic introduction of Digital Twins. Using the example of the challenge of data integration, implications for the later data analysis / machine learning as an application area of the digital twin are shown and possible solutions are derived. Furthermore, implications and limitations are pointed out.

1 Einleitung

Der Digitale Zwilling ist eine wichtige Zukunftstechnologie [1,2]. Gemäß dem Technologiemarktforschungsinstitut Gartner [1] zählen Digital Twins zu den wichtigsten Technologien der Zukunft. Auch das Fraunhofer Institut [2] definiert Digitale Zwillinge als die Technologie der Zukunft. Digitale Zwillinge sind nach Gösser [4] ein virtuelles Modell (bspw. eines Produktes oder Prozesses), welches die reale und die virtuelle Welt verbindet. Im Allgemeinen bestehen Digitale Zwillinge aus drei Bestandteilen [5,6,7,8]: (1.) dem physischen Objekt oder Entität der realen Welt, (2.) dem virtuellen Modell (virtuelle Welt) sowie (3.) den Daten, die beiden „Welten“ miteinander verbinden. Dabei können Digitale Zwillinge in unterschiedlichen Bereichen eingesetzt und Prozesse verbessert werden [3]. Klostermeier et al. [3] zeigen dabei bspw. Anwendungsgebiete u.a. im Bereich der Produktions-Design-Phase, dem Materialeinkauf, der Produktion, dem Transport, dem Verkauf und dem Aftersales auf. Organisationen setzen Digitale Zwillinge ein, um strategische Vorteile durch bspw.

Kostenreduktion und gesteigerte Effizienz zu erhalten [9,10]. Dies unterstreicht die Wichtigkeit der Einführung dieser Technologie. Jedoch sind Organisationen mit verschiedenen Herausforderungen konfrontiert [11], die es zu überwinden gilt, wenn die Technologie eingeführt werden soll. Werden diese Herausforderungen [11] (wie bspw. die Datenintegration) nicht überwunden, besteht die Gefahr, dass Digital Twins scheitern oder nur eingeschränkt genutzt werden können. Der nachfolgende Forschungsartikel zeigt aktuelle Forschungsbefunde aus diesem Gebiet auf und geht der Frage nach, welche Herausforderungen bei der Einführung von Digitalen Zwillingen bestehen und welche möglichen Auswirkungen auf die nachfolgende Verwendung in der Datenanalyse / Machine Learning daraus resultieren können. Der Artikel gibt hierfür zunächst Einblicke in grundlegende Herausforderungen, die bei der Einführung von Digitalen Zwillingen auftreten können. Im weiteren Verlauf wird der Fokus auf den Bereich der Datenintegration gelegt. Anhand der Datenintegration werden exemplarisch die Herausforderungen, die mit der Einführung von Digitalen Zwillingen einhergehen aufgezeigt und eine Verbin-

zung zum Einsatz in der Datenanalyse bzw. im Machine Learning hergestellt. Im Anschluss wird ein Fazit gezogen, Implikationen abgeleitet und Aspekte aufgeworfen, die im Rahmen von zukünftigen Forschungsprojekten adressiert werden sollten.

2 Herausforderungen bei der Einführung von Digitalen Zwillingen

Aktuelle Forschung von Möhring et al. [11] zeigt vor allem drei Hauptkategorien von Herausforderungen bei der Implementierung von Digitalen Zwillingen auf: Herausforderungen im Rahmen der Datenintegration, organisatorische Herausforderungen und Compliance Herausforderungen. Eine detailliertere Darstellung dieser Kategorien ist der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen [11]. Neben den genannten wichtigsten Herausforderungen existieren gemäß der Studie [11] noch weitere, wie bspw. Datenqualität oder die Infrastruktur.

Tabelle 1: Herausforderungen bei der Einführung von Digitalen Zwillingen nach Möhring et al. [11, S. 233]

Herausforderungen der Datenintegration	Organisatorische Herausforderungen	Compliance Herausforderungen
Fehlende, standardisierte Struktur & Semantik	Qualifizierte Mitarbeiter	Data Protection
Komplexität der Integration	Zusammenarbeit mit anderen Abteilungen / Organisationen	Data Ownership
Schnittstellen	Wert für das Management	

Die Erkenntnisse der Autoren [11] wurden basierend auf einer qualitativen Expertenstudie (n=29 Experten) mit führenden europäischen Unternehmen (durchschnittlich 23.530 Angestellte und ca. im Durchschnitt 2,5 Mrd. € Umsatz) durchgeführt. Die Experten hatten durchschnittlich 20,97 Jahre Berufserfahrung und hielten Positionen wie bspw. Head of Digital Twin Lab, Manager PLM oder Data Engineer Expert [11]. Die qualitativen Daten der Expertenstudie wurden mit verschiedenen Coding-Techniken analysiert [12]. Mit Blick auf die Studienteilnehmer wird die Qualität der Erkenntnisse, die aus den Antworten gewonnen werden konnten, deutlich.

Im Allgemeinen versucht die **Datenintegration** verschiedene Daten, die ursprünglich in unterschiedlichen Datenquellen gespeichert wurden, zu kombinieren [13,14,15]. Gemäß der Studie von Möhring et al. [11] ist vor allem eine fehlende standardisierte Datenstruktur und Semantik eine Herausforderung bei der Implementierung von

Digitalen Zwillingen. Ohne das Wissen über die Struktur und Semantik können Daten nur schwierig zusammengeführt werden, da kein Verständnis darüber existiert, wie diese zusammengehören. Folglich können diese Daten nicht in einen Digitalen Zwilling einfließen und ein umfassendes Bild über bspw. ein Produkt oder eine Dienstleistung ist nicht möglich. Dies erschwert weiterhin die Analysen, die, basierend auf den Daten des Digitalen Zwillingen, durchgeführt werden sollen. Denn sollen die Daten später genutzt werden, um bspw. intelligent datenbasiert Wartung am Produkt durchzuführen (bspw. Predictive Maintenance [16]), kann dies nicht erfolgen, da diese aufgrund der fehlenden Semantik und standardisierten Struktur meist unbrauchbar sind. Des Weiteren stellt die Komplexität der Integration eine wesentliche Herausforderung dar [11]. Oftmals sind im Unternehmen Daten in verschiedenen, meist schwierig zugänglichen „Datensilos“ verteilt und gespeichert [11]. Um diese Daten zu erschließen, bedarf es standardisierter Schnittstellen, die ebenfalls eine Herausforderung darstellen. Weiterhin herrscht in der Praxis fehlendes Wissen über die Anwendung von Standards vor [11].

Neben der Datenintegration sind **organisatorische Herausforderung** in Unternehmen bei der Implementierung von Digitalen Zwillingen zu finden [11]. Oftmals fehlten das nötige Fachwissen und die Experten zur zielgerichteten Einführung von Digitalen Zwillingen. Ohne die nötige Fachexpertise kann ein meist komplexer, Digitaler Zwilling für Produkte oder Dienstleistungen nicht eingeführt werden. Auch die Zusammenarbeit mit verschiedenen Abteilungen im Unternehmen und anderen Organisationen außerhalb des Unternehmens kann zu großen Herausforderungen führen. Ein Digital Twin weist meist eine hohe Komplexität auf [11] und Personen unterschiedlicher Funktion und organisationalem Hintergrund müssen daher zusammenarbeiten. Die erwähnten Punkte sind mit hohem Aufwand und damit einhergehenden Kosten verbunden. Daher ist es wichtig, den Nutzen des Digitalen Zwillingen dem Management für die Organisation transparent zu gestalten [11]. Ohne diese Transparenz und dem Aufzeigen des Mehrwerts für das Unternehmen werden Digitale Zwillinge ggf. schon vor der Einführung vom Management abgelehnt.

Auch **Compliance** Herausforderungen sehen sich Organisationen zunehmend ausgesetzt, wenn es um die Implementierung von Digitalen Zwillingen geht [11]. Compliance sind in der Regel eine Sammlung von zu anwendenden Gesetzen, Regularien, Vorschriften, Standards etc. [17]. In diesem Zusammenhang werden von den Experten [11] vor allem Datenschutz-Regeln und rechtliche Herausforderungen im Bereich der Daten-Eigentümer genannt. Ohne die Klärung der rechtlichen Herausforderungen kann ein Digitaler Zwilling nicht eingeführt werden. Das Unternehmen würde ggf. zu viel riskieren und verschiedene rechtliche Probleme könnten daraus resultieren.

Im Folgenden soll der Fokus auf die Herausforderungen der Datenintegration insbesondere mit Blick auf die Datenanalyse gelegt werden. Dies ist vor allem für die weitere Qualität der Datenanalyse und darauf aufbauenden Entscheidungen relevant.

3 Herausforderungen der Datenintegration und Auswirkung auf die Datenanalyse

Basierend auf den zuvor beschriebenen Herausforderungen der Datenintegration [11] sollen im Nachfolgenden die Auswirkungen auf die Datenanalyse aufgezeigt werden. Die Basis hierfür bilden die wissenschaftliche Literatur sowie durchgeführte Projekte und Prototypenentwicklungen.

Liegt eine fehlende standardisierte Datenstruktur und Semantik vor [11], können Daten schwierig in Analysen einbezogen werden, die auf einem Digitalen Zwilling fußen. Der Grund hierfür ist, wie bereits oben erwähnt, dass die Daten entweder gar nicht oder nur unzureichend in den Digitalen Zwilling integriert werden können. Dies hat zur Folge, dass die Entscheidungen, die auf Basis derartiger Analysen getroffen werden, voraussichtlich nur eingeschränkt oder nicht gültig sind [18]. Zum Beispiel: Sollen Daten für die Prognose von Wartungsvorfällen im Rahmen von Predictive Maintenance [16] genutzt werden, so muss deren Struktur klar definiert sein. Sind bspw. unterschiedliche Datumsformate bei den Messwerten der Sensoren vorzufinden (bspw. TT-MM-JJ vs. TT-MM-JJJJ vs. JJJJ/MM/TT), können diese Werte nicht oder zumindest nicht direkt in der Analyse verwendet werden. Hierfür muss zunächst eine Transformation stattfinden. Sind die Formate bekannt, kann hierfür auf etablierte ETL (Extract/Transform/Load) Prozesse zurückgegriffen und dabei integrierte Regeln angewendet werden [19]. Ist die Bedeutung (Semantik) einer Variablen im Digitalen Zwilling unbekannt, ist der Einbezug dieser Variable in die Analysen mit Vorsicht abzuwägen. Die Einbeziehung in erste explorative Analysen zur Feststellung von Abhängigkeiten (bspw. Korrelations- oder Varianzanalysen etc. [18]) ist durchaus möglich. Ohne jedoch die Bedeutung zu kennen und ob sich der Zustand der Variable ändern kann, ist ein Einbezug – vor allem im produktiven Betrieb – in keinem Fall ratsam. Hier sollte in jedem Fall der Bedeutung der Variable (ggf. auch mit beteiligten Maschinenherstellern) auf den Grund gegangen werden.

Im Regelfall ist die Komplexität der Integration verschiedener Datenquellen bei der Einführung von Digitalen Zwillingen sehr hoch [11]. Oftmals sind Daten, wie auch aus den Erkenntnissen der Expertenstudie hervorgeht, in verschiedenen Datensilos gespeichert. Daten für den Digitalen Zwilling können daher bspw. im ERP-, PLM-, CRM-, SCM-, MES-System gespeichert sein. Zudem sind individuell eingesetzten Tools und individuell agierende Bereiche im Unternehmen keine Grenzen gesetzt, was die Komplexität noch einmal enorm erhöht. Die Daten

für den Digitalen Zwilling sollten jedoch i. d. R. je nach Anwendungsfall der Analyseintensität aus den Quellsystemen in eine konsolidierte Umgebung geladen werden. Dies verfolgt das Ziel, Performanceengpässe [21, 23] der Quellsysteme (bspw. ERP) bei der Analyse zu vermeiden und die Daten können weiterhin in einer standardisierten Datenstruktur abgelegt werden. In der Praxis werden hier häufig Konzepte wie Data Lakes [20] oder Data Warehouses [21] verwendet. Ohne ein entsprechendes Handling der Komplexität sind Datenanalysen nur eingeschränkt und in nicht annehmbarer Zeit möglich. Vor allem wenn es um die nahe Echtzeitverarbeitung und Analyse von Daten aus Digitalen Zwillingen geht, ist das Management der Komplexität hoch relevant, da sonst der Nutzen des Digitalen Zwillings auch in Frage gestellt werden kann. Für die Verarbeitung von großen Datenmengen in Echtzeit und erste Analyseoperationen haben sich Complex Event Processing Technologien [22] wie bspw. Apache Kafka in der Praxis etabliert. Auch die Integration der Analyseplattform hin in die Public-Cloud [23] kann vor allem für kurzfristige Analysen von Digital Twin Daten sinnvoll sein. Möglichkeiten bieten hier IaaS, PaaS-Anbieter wie Amazon AWS, Microsoft Azure oder Google Cloud Platforms. Auch regionale Anbieter wie bspw. T-Systems oder Hetzner können hier von Organisationen verwendet werden, um Analysen an einem zentralen Ort zuzulassen sowie bedarfsgerecht Ressourcen für die Analyse hinzu zu buchen (bspw. CPU, RAM, Disk).

Fehlende Schnittstellen stellen eine weitere Herausforderung dar [11], die sich auch auf die Datenanalyse auswirken. Denn können Daten nicht über definierte Schnittstellen integriert werden, stehen diese für die Analyse nicht ohne i. d. R. hohen manuellen Aufwand zur Verfügung. Sollen bspw. für Predictive Maintenance Ansätze zur Wartung [16] Sensordaten von Maschinen (etwa der Öldruck, die Temperatur, etc.) genutzt werden, müssen diese über Schnittstellen abgerufen werden. Ohne Zugriff auf diese Daten über Schnittstellen können diese nicht zur Wartungsprognose verwendet werden und reduzieren ggf. die Prognosegüte des Wartungsereignisses. Somit sind Analysen i. d. R. weniger genau und liefern u. U. nicht die in der Praxis benötigte Güte. Eine Lösung kann die Anbindung dieser Sensoren bzw. Maschinen und Schaffung von standardisierten Schnittstellen [11] sein. Eine Anbindung kann dabei zum Beispiel mit IoT Gateways wie bspw. von Rexroth oder anderen Herstellern erfolgen [24]. Bei neuen Sensoren und Maschinenkäufen sollte auf die Möglichkeit der Anbindung mit standardisierten Schnittstellen geachtet werden.

4 Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf

Der Digitale Zwilling ist eine wichtige Zukunftstechnologie [1,2]. Der Einsatz dieser Technologie kann Unternehmen neue strategische Möglichkeiten generieren

[9,10]. Jedoch sind verschiedene Herausforderungen der Datenintegration sowie organisatorische und Compliance Herausforderungen zu berücksichtigen [11]. Versäumt ein Unternehmen, sich diesen Herausforderungen zu stellen, kann der Nutzen aus den Digitalen Zwillingen, wie z. B. bessere datenbasierte Simulation, Planung und Monitoring, nicht entstehen [11]. Dies bedeutet in Konsequenz, dass ohne die Berücksichtigung dieser Herausforderungen die Einführung dieser Technologie scheitern kann. Diese wichtigsten Herausforderungen wurden im vorliegenden Beitrag aufgezeigt und Auswirkungen auf die Datenanalyse am Beispiel der Datenintegration hergeleitet. Dies ist vor allem mit Blick auf die Nutzung in der Datenanalyse von sehr hoher Relevanz. In den vorangegangenen

Ausführungen wurden bestehende wissenschaftliche Arbeiten erweitert (bspw. [11]). Organisationen können die Forschungsergebnisse nutzen, um besser die Herausforderungen bei der Implementierung von Digitalen Zwillingen zu berücksichtigen. Somit können sie die Technologie etwa schneller und wirtschaftlich erfolgreicher einsetzen. Limitationen der Forschung liegen in der eingeschränkten empirischen und prototypischen Umsetzung und sollten durch weitere Forschung aufgegriffen werden. Zukünftiger Forschungsbedarf liegt bspw. in der weiteren qualitativen (bspw. Case-Study) und quantitativen Erforschung (Studien) sowie Prototypen-Entwicklung zur besseren Berücksichtigung der Herausforderungen.

Referenzen:

- [1] Gartner. (2019). Top 10 Strategic Technology Trends. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2018/> (Zugriff: 30.08.2022)
- [2] Fraunhofer. (2021). Digitaler Zwilling: Der Technologietrend für Industrie 4.0. https://www.iese.fraunhofer.de/de/innovation_trends/industrie4_o/trendthema-digitaler-zwilling.html (Zugriff: 30.08.2022)
- [3] Klostermeier, R., Haag, S., & Benlian, A. (2020). Geschäftsmodelle Digitaler Zwillinge. Geschäftsmodelle Digitaler Zwillinge: HMD Best Paper Award 2018, Springer.
- [4] Gösser, S. (2021). Digitaler Zwilling. Gabler Wirtschaftslexikon. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/digitaler-zwilling-54371> (Zugriff: 30.08.2022)
- [5] Qi, Q., Fei, T. (2020) Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison. IEEE Access 6, S. 3585–3593.
- [6] Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., Hicks, B. (2020). Characterising the digital twin. CIRP J. Manuf. Sci. Technol. 29, S. 36–52.
- [7] Michael, W. (2014). Grieves digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication
- [8] Hochhalter, J., Leser, W.P., Newman, J.A., Gupta, V.K., Yamakov, V., Cornell, S.R., Willard, S.A., Heber, G. (2014) Coupling damage-sensing particles to the digital twin concept. No. NF1676L-18764
- [9] Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., Wang, L., Nee, A.Y.C. (2021) Enabling technologies and tools for digital twin. J. Manuf. Syst. 58, S. 3–21.
- [10] Rosen, R. von Wichert, G., Lo, G., Bettenhausen, K.D. (2015). About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. 15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing.
- [11] Möhring, M., Keller, B., Radowski, C. F., Blessmann, S., Breimhorst, V., & Müthing, K. (2022). Empirical Insights into the Challenges of Implementing Digital Twins. In Human Centred Intelligent Systems. Springer, S.229–239. Springer.
- [12] Glaser, B.G. (2016) Open coding descriptions. Grounded Theory Rev. 15(2), S. 108–110.
- [13] Lenzerini, M. (2002). Data integration: a theoretical perspective. Twenty-First ACM SIGMOD-SIGACT-SIGART, S. 233–246.
- [14] Halevy, A.Y (2001). Answering queries using views: a survey. VLDB J. 10(4), S. 270–294.
- [15] Hull, R. (1997). Managing semantic heterogeneity in databases: a theoretical prospective. In: SIGACTSI MOD-SIGART, S. 51–61.
- [16] Möhring, M., Schmidt, R., Keller, B., Sandkuhl, K. and Zimmermann, A. (2020). Predictive maintenance information systems: The underlying conditions and technological aspects. International Journal of Enterprise Information Systems, 16(2), S. 22-37.
- [17] Buddle, J.J., Burke, B.S., Perkins, B.A, Roday, L, Tartaglia, R., Vermiglio, IA. (2005) System and method for compliance management. Google Patents.

- [18] Möhring, M., Keller, B., Schmidt, R. (2022). Möglichkeiten zur Sicherstellung der IT-Service Resilienz. IT-Operations in der Transformation, HMD-Edition, Springer, im Erscheinen.
- [19] Vassiliadis, P., (2009). A survey of extract–transform–load technology. International Journal of Data Warehousing and Mining, 5(3), S. 1–27.
- [20] Nargesian, F., Zhu, E., Miller, R.J., Pu, K.Q. and Arocena, P.C., (2019). Data lake management: challenges and opportunities. Proceedings of the VLDB Endowment, 12(12), S. 1986–1989.
- [21] Gardner, Stephen R. (1998). Building the data warehouse. Communications of the ACM 41, 9, S. 52–60.
- [22] Sun, A.Y., Zhong, Z., Jeong, H. and Yang, Q., (2019). Building complex event processing capability for intelligent environmental monitoring. Environmental Modelling & Software, 116, S.1–6.
- [23] Schmidt, R. and Möhring, M., (2013). Strategic alignment of cloud-based architectures for big data. 17th IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Conference Workshops. IEEE, S. 136–143.
- [24] Rexroth IoT Gateway (2022). <https://www.boschrexroth.com/en/xc/products/product-groups/electric-drives-and-controls/news/software-iot-gateway/index>. (Zugriff: 30.08.2022)

Kontakt:



Prof. Dr.-Ing. Michael Möhring

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

m.moehring@oth-aw.de



reine
Produktivität
Herding
FILTERTECHNIK

reine Produktivität

langlebig. wirkungsvoll. filtern.



Wir sind ein mittelständisches Familienunternehmen in zweiter Generation, dem es gelingt, den Erfolg der Vergangenheit auch in der Zukunft fortzusetzen und das seit 1977.

Vom Filterelement bis hin zur komplett installierten Filteranlage, am Stammsitz Amberg beginnt die Produktionskette mit der Fertigung der Filterelemente und findet ihren Abschluss in der Endmontage.

WIR bei Herding haben eine vollkommen eigene Art Probleme gemeinsam zu lösen.

www.herding.jobs



NEUGIERIG AUF
**NACHHALTIGE
GLASTECHNOLOGIEN?**

Als Ingenieur*in sind Sie bei uns Teil eines internationalen Teams, das Tag für Tag gemeinsam mit Partnern auf der ganzen Welt an innovativen Technologien zur Glasherstellung forscht.

Global vernetzt & regional verwurzelt: So gestaltet HORN® die Zukunft der Glasmelztechnologie als stetiger Innovationsmotor gemeinsam mit Ihnen!

#BORN
FOR
HORN

HORN
GLASS INDUSTRIES

GEHEN SIE JETZT DEN SCHRITT
IN DIE ZUKUNFT UNTER
WWW.HORNGLASS.COM

Digitalisierungs-Cluster für Geschäftsprozesse – Prozessinnovationen, Forschungsdiskurse und praktische Relevanz

Prof. Dr. Matthias Lederer

Zusammenfassung

Im Rahmen des Megatrends der Digitalisierung werden Arbeitsabläufe zunehmend automatisiert, datengestützt optimiert oder im Rahmen einer Transformation systematisch kreativ überarbeitet. Das bekannte Konzept der Prozessorientierung in Kombination mit intelligenten Informationssystemen dient vielen digitalen Entwicklungen als Grundlage. Das Forschungsprojekt hat in drei Stufen die Trends des Geschäftsprozessmanagements (BPM) über mehrere Jahre hinweg untersucht und systematisiert. Entstanden ist eine Landkarte wichtiger Cluster, die Innovationen und Forschungstrends im Bereich des BPM kategorisiert und deren Wert in der Unternehmenspraxis bewertet. In einem ersten Portfolio konnte zunächst aufgezeigt werden, dass digitale Innovationen in Prozessen durch Menschen (z. B. Design Thinking, Social BPM) oder durch Technologien (z. B. Process Mining, Simulation) entstehen können. Ebenso fördert ein Wandel weg von klassischen Lebenszyklen hin zu fallbasierten Ansätzen die Digitalisierung von Prozessen. In zwei weiteren Untersuchungen konnten viele Einzeltrends den Bereich Daten (z. B. Process Mining), Technologie (z. B. IoT für BPM) und Management (z. B. Vertrauenswürdigkeit von Abläufen) zugeordnet und in einen gemeinsamen Kontext gebracht werden. Eine Befragung im Rahmen der dritten Studie konnte darstellen, dass viele der aufwändigen und komplexen BPM-Cluster zur Digitalisierung in Unternehmen noch nicht angekommen sind – vielmehr fordern Prozess-Praktiker pragmatische Antworten auf klassische Fragen des Prozessmanagements (z. B. Modellierbarkeit, Integration), um die digitale Transformation in Unternehmen nachhaltig voranzutreiben.

Abstract

As part of the megatrend of digitization, workflows are increasingly being automated, optimized with the help of data, or human-driven creatively revised as part of a transformation. The well-known concept of process orientation in combination with intelligent information systems serves as the basis for many digital developments. The research project has investigated and systematized the digital trends in business process management (BPM) in three stages over several years. The result is a map of important clusters that categorizes innovations and research trends in the field of BPM and evaluates their value in business practice. In an initial portfolio, it was first possible to show that digital innovations in processes can be created by people (e.g., design thinking, social BPM) or by technologies (e.g., process mining, simulation). Likewise, a shift away from classical life cycles to case-based approaches promotes the digitization of processes. In two further studies, many individual trends could be assigned to the areas of data (e.g., process mining), technology (e.g., IoT for BPM) and management (e.g., trustworthiness of processes). A survey conducted as part of the third study showed that many of the complex BPM clusters for digitization have not yet arrived in companies – rather, process practitioners need pragmatic answers to classic questions of process management (e.g., modelability, integration) in order to support digital transformation.

1 Einleitung

Das traditionelle Geschäftsprozessmanagement als Teil der Wirtschaftsinformatik gilt insgesamt als sehr umfassend untersuchtes Gebiet. Dies liegt u. a. daran, dass es traditionell im Top-down-Ansatz eine essenzielle Operationalisierung von Unternehmenszielen bietet und daher seit jeher für Unternehmen eine besondere Relevanz hat. Gleichwohl zeigen Studien wiederholt, dass Unternehmen immer noch große Probleme bei der systematischen Orientierung entlang von Prozessen haben, die nachweislich die digitale Transformation fördert. Für neu auftkommende Fragestellungen (z. B. intensiverer Einsatz von IT-Systemen) werden laufend neue Forschungs- und Studienergebnisse im traditionellen BPM veröffentlicht. Durch die Digitalisierung von Geschäftsprozessen (und Unternehmen) sind für BPM-Initiativen neue Informationsquellen (z. B. Sensoren) und Daten (z. B. Echtzeit-Transaktionen, Einbindung von Menschen über digitale interne und externe Netzwerke) verfügbar. Gleichzeitig nehmen die Anforderungen und auch die Möglichkeiten der Informationsverarbeitung (z. B. KI und Mustererkennung, agile Verfahren und Kreativität) bei BPM-Initiativen zu. Das Ergebnis stellt Geschäftsprozesse, die noch zielgenauer und besser auf die Notwendigkeiten der Unternehmen und Kunden (z. B. Robustheit, Flexibilität) zugeschnitten sind [1;2;3;4;5].

Um Forschenden und Unternehmenspraktikern eine systematische Übersicht der Trends für digitale Prozesse zu liefern, hat dieses Forschungsprojekt in drei Teilstudien verschiedene Systematisierungen von BPM-Trends erstellt. Sie geben eine Übersicht aktueller Cluster der Prozessdigitalisierung und auch offener Fragestellungen zur ganzheitlichen Digitalisierung von Prozessen.

2 Trendstudien im Geschäftsprozessmanagement

Dieser Beitrag fasst die wesentlichen Erkenntnisse der von 2017 bis 2022 laufenden Initiative und seiner entstandenen Veröffentlichungen als Überblick zusammen. Für Hinweise zur genauen Methodik sowie für die genauen Ergebnisse (insbesondere die Einzeltrends und deren Bedeutung) wird auf die entsprechenden Publikationen verwiesen.

2.1 Innovationen

Das systematische Ausrichten von Unternehmen an IT-gestützten/digitalen Prozessen führt häufig zu inkrementellen oder auch disruptiven Verbesserungen, die Unternehmen für sich nutzen können. Welche Einzeltrends und Cluster unter digitalen Prozessinnovationen subsummiert werden können, hat die erste Studie zusammengefasst [1].

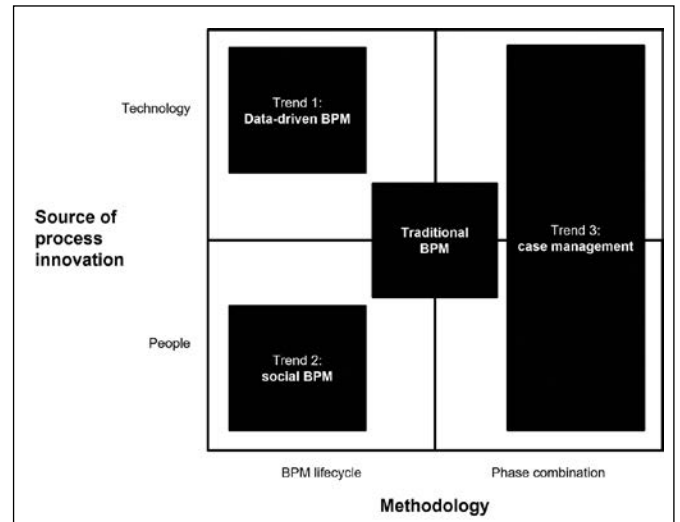


Abbildung 1: Systematisierung der Trends für digitale Prozessinnovationen [1]

Auf Basis von 112 Texten konnten 19 Einzeltrends zu drei Trendkategorien in einem Portfolio zusammengefasst werden. Trends der Kategorien 'Data-driven' und 'Social-driven' nutzen weiterhin die traditionellen Phasen des BPM-Lebenszyklus, professionalisieren jedoch die Nutzung von Technologien und menschlicher Kreativität. Abweichend vom klassischen BPM-Lebenszyklus basieren die Ansätze der Kategorie "Case-driven BPM" auf dem Drang nach Flexibilität und Änderbarkeit von Workflow-Instanzen während der Ausführung. Sie weichen damit von der klassischen Top-Down-Methode ab:

- Datengesteuertes BPM fokussiert Methoden und Ansätze, die intensiv die in Informationssystemen vorhandenen (und laufend wachsenden) Informationen für Innovationen nutzen. Dies kann beispielsweise durch Mining-Techniken, die Wiederverwendung von Prozessinhalten oder durch die Anwendung intelligenter Datenanalyse passieren. Gemein haben die Trends, dass sie versuchen nicht nur Routine-Workflows, sondern auch vermehrt solche mit vielen Freiheitsgraden zu automatisieren. Daten im BPM-Lebenszyklus (z. B. in der Analyse oder dem Monitoring) werden genutzt, um Wissensvorsprünge zu generieren. Unternehmen nutzen Daten, um wirtschaftliche Vorteile zu erzielen und Alleinstellungsmerkmale für ihre Produkte oder Produktionsabläufe zu entwickeln.
- Trends der Kategorie „Sozial getriebenes BPM“ haben die gleiche Intention, nutzen für die Ideensammlung, -prüfung und -implementierung innerhalb des BPM-Lebenszyklus allerdings menschliche Potenziale. Diese können das professionelle Zusammenarbeiten von Menschen (z. B. Collaborative BPM) in Prozessen oder auch die Einbindung von Wissensarbeitern in das Design der Prozesse (z. B. BPM 2.0) bedeuten. Die Ansätze dieses Bereiches halten für die Herangehensweisen meist Vorgehensmodelle mit Rollen und Ressourcen bereit. Während einige Trends die Adaption von bekannten Verfahren auf die BPM-Disziplin be-

schreiben (z. B. Design Thinking für BPM) sind andere in ihren Grundansätzen neu und innovativ. Im Allgemeinen folgt diese Trendkategorie dem traditionellen BPM-Lebenszyklus, jedoch wird die Innovationskraft des Unternehmens durch die digitale Beteiligung von Menschen (z. B. Mitarbeiter oder Kunden) gefördert.

- Wie auch in der letzten Kategorie spielen Menschen für Trends im Bereich „Fallgesteuertes BPM“ eine zentrale Rolle. Um jedoch eine allgemeine Flexibilität der Abläufe zu ermöglichen, werden Prozessinstanzen als Fälle angesehen, die ein höheres Maß an Flexibilität erlauben. Die einzelnen Trends (z. B. Adaptive Case Management, Collaborative Case Management) haben gemein, dass intelligente Algorithmen während der Prozessausführung genutzt werden, um einen potenziellen Ablauf zu prognostizieren und damit digital bestmöglich zu unterstützen. Dies kann (wie in den beiden erstgenannten Kategorien) durch Menschen (z. B. kollaborative Zusammenarbeit) oder auch durch Datenanalyse (z. B. Vorlagenentwicklung auf Basis von historischen Instanzen/Trainingsdaten) geschehen [1].

2.2 Wissenschaftliche Bedeutung

Bei vielen Studien und praktischen Lösungen zur Digitalisierung von Unternehmensabläufen werden als Grundlage Ideen des BPM verwendet, auch wenn Untersuchungen zeigen, dass der Begriff des Geschäftsprozesses dabei selten verwendet wird [2]. Beispiele reichen von der Berücksichtigung von Transaktionsdaten in Prozessen („Mining“) über die Berücksichtigung weiterer Akteure in Prozessen („IoT“ bei Geräten und „New Work“ bei Menschen) und die vollständige Automatisierung von Workflows („Smart Factory“, „Hyperautomation“) bis hin zu Märkten für Prozessressourcen („Sharing Plattformen“). In einem weiteren Teil des Gesamtforschungsprojekts wurde untersucht, welche Diskurse für modernes BPM in der Wissenschaft geführt werden und insbesondere, welche Begriffe und Benennungen für digitale BPM-Trends verwendet werden [3;4].

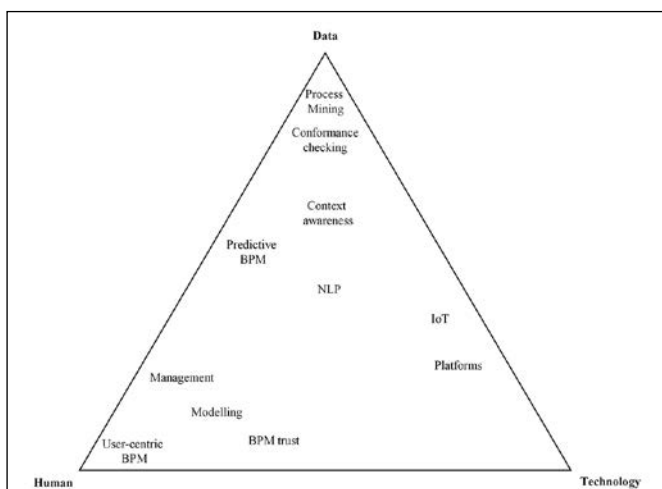


Abbildung 2: Klassifikation von BPM-Forschungsdiskursen [3;4]

Hierfür wurden iterativ 752 Paper von acht wichtigen Konferenzen aus der Wirtschaftsinformatik aus den Jahren 2017 sowie 2019 eingelesen und mehrstufig ausgewertet. Entstanden ist eine Einteilung aktueller wissenschaftlicher BPM-Trends in drei Dimensionen [3;4]:

- Im menschenzentrierten Cluster finden sich viele Entwicklungen, die das Potenzial von Stakeholdern (u. a. Prozessbeteiligten, Kunden, Partnern) nutzen, um Prozesse zu digitalisieren. Hierunter fallen zunächst klassische Fragestellungen, wie die Beteiligung von Menschen an den BPM-Lebenszyklusphasen zu organisieren ist. Dies kann Fragen der Ideensammlung für Prozessoptimierung, die (agile) Organisation solcher Initiativen sowie das Verständnis und die Konformität von Modellen betreffen. Auch neuauftretende Herausforderungen wie das Vertrauen in Akteure und Abläufe in einer zunehmend digitalen Wirtschaft werden in der Forschung stark diskutiert.
- Ähnlich wie in der ersten Teilforschung fokussieren viele Forschungsbeiträge neben Menschen auf den besonderen Wert von Daten für das Design, die Optimierung und Überwachung von Prozessen. Das zunehmende Potenzial ergibt sich aus der wachsenden Anzahl digitalisierter Prozesse (Verfügbarkeit von Daten), neuen Berechnungsmöglichkeiten und einem schnelleren Austausch von Daten zwischen Prozesspartnern. Die Möglichkeiten durch statistische Verfahren (insbesondere Process Mining) werden thematisiert. Hierdurch sollen beispielsweise Auswirkungen einer stetig sich wandelnden Umwelt (z. B. Verhalten von Kunden und Wettbewerbern) auf Prozesse besser vorausgesagt werden und laufende digitale Prozesse sollen besser mit den realen oder intern vorgegebenen Geschäftsregeln übereinstimmen.
- In den BPM-Entwicklungen, die dem Bereich „Technologie“ zugeordnet werden, zeigt sich, dass mit der Digitalisierung von Prozessen mehr Schnittstellen und Netzwerke fokussiert werden. Nicht mehr nur das isolierte Management von singulären Prozessen oder Einzelunternehmen wird in der Forschung thematisiert. Vielmehr können IT-gestützte Prozesse (und beteiligte Ressourcen) über Portale verteilt und kollaborativ realisiert werden. Schnittstellen zu Akteuren lassen sich mit neuen Technologien (z. B. Sprache mit NLP) realisieren und eine Vielzahl neuer Entitäten (z. B. Sensoren, intelligente Objekte) werden mit den digitalen Prozessen verbunden, um eine höhere Stufe der Effizienz in Unternehmen zu erreichen.

2.3 Praktische Bedeutung

Der Wert anwendungsorientierter Forschung (Rigor) bemisst sich, wie auch in diesem Projekt, an der praktischen Umsetzbarkeit. Insbesondere die Wirtschaftsinformatik, und damit das Geschäftsprozessmanagement, versucht mit anerkannten Ansätzen wie der Design Science-Research

Artefakte zu entwickeln, die einer praktischen Evaluation standhalten. In einer dritten Studie wurde daher untersucht, welche Relevanz (Relevance) die aktuellen Trends der BPM-Forschung in der Praxis tatsächlich haben. Hierfür wurden im Rahmen einer systematischen Befragung Prozesspraktiker (u. a. Prozessberater, Chief Process Officers) zunächst offen und anschließend systematisch pro BPM-Digitalisierungstrend (auf einer siebenstufigen Likert-Skala) befragt, welche Bedeutung die Einzeltrends aus der vorangegangenen Studie (siehe Abschnitt zuvor) haben [5].

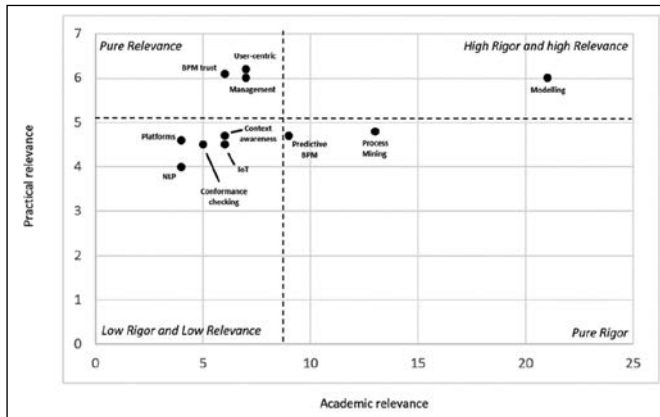


Abbildung 3: Gegenüberstellung der wissenschaftlichen und praktischen Bedeutung von BPM-Trends [5]

Aus der Gegenüberstellung dieser praktischen Bewertung und der Anzahl von Forschungsbeiträgen lässt sich das dargestellte Portfolio ableiten [5]:

- Die Trends im Feld “Pure Relevance” zeigen an, dass Praktiker den genannten Entwicklungen hohe Relevanz zusprechen, die Forschung allerdings aktuell dazu relativ wenig Beiträge liefert. Es zeigt sich, dass Unternehmen operative, menschenorientierte und pragmatische Fragen in Bezug auf Prozesse haben. Dies unterstreicht nochmal, dass Prozesse eine gute Grundlage bieten können, um viele Digital-Trends umzusetzen (z. B. Trends zur Nachhaltigkeit, agile Entwicklung, Zusammenarbeit über Unternehmensgrenzen hinweg, Testen von Geschäftsregeln usw.). Gleichzeitig stehen die eher traditionellen Fragestellungen des Projektmanagements im Fokus der Unternehmen
- Die fünf genannten Trends, die keine besondere Relevanz und auch keine große relative Forschungsverbreitung haben, sind zum einen sehr technisch (z. B. NLP, Plattformen, IoT) und zum anderen sehr spezifisch geschäftsorientiert (z. B. Context Awareness). Dies scheint der Spezifität der Themen geschuldet zu sein. Praktiker setzen hierfür oft (noch) bekannte und etablierte Rahmenwerke (z. B. Lean Management) ein.
- Hohe Rigorosität und hohe Relevanz vereint in der Studie nur ein Trend. Die Modellierung und der Umgang mit Modellen hat schon immer eine besondere Bedeutung im BPM gehabt und scheint es auch weiterhin zu haben. Klassische Herausforderungen (z. B. vollständige und syntaktisch korrekte Modellen, Standardisierung) der

Prozessmodellierung finden sich in den freien Antworten ebenso wie der Hinweis, dass Workflow-Modelle eine essenzielle Grundlage für fortgeschrittene Digitalisierungsinitiativen liefern (z. B. Echtzeit-Unternehmenssteuerung, Synchronisation). Offen scheint die Frage, wie Modelle der Volatilität einer komplexen Wirtschaft effizient standhalten können.

- Im wissenschaftlichen Quadranten (“Pure Rigor”) finden sich überwiegend die datengetriebenen Trends. Die Studie gibt Hinweise darauf, dass oftmals die Rohdaten vieler Unternehmen (noch) nicht bereit sind für die Anwendung fortgeschrittener statistischer Methoden, die heute in der Forschungsliteratur diskutiert werden. Weiterhin befinden sich einige der Daten-Trends aktuell in einer besonderen Hype (u.a. maschinelles Lernen), und es wird sich noch zeigen, wie ihr Zusammenspiel mit etablierten BPM-Ansätzen (z. B. Prozesssimulation, Benchmarking oder kontinuierliche Verbesserung) aussehen kann.

3 Zusammenfassung

Trotz oder gerade wegen der besonderen Bedeutung von Geschäftsprozessen im Megatrend der Digitalisierung sind laufend neue Entwicklungen, Verfahren und Ansätze im Bereich des BPM zu beobachten. Das vorgestellte Forschungsprojekt hatte zum Ziel die aktuellen Entwicklungen zu systematisieren. Dies kann Praktikern einen schnellen und gleichzeitig fundierten Einstieg in das moderne BPM liefern. Forschende können ihre eigenen Projekte in der Disziplin verorten oder Impulse für neue Forschungslücken ausmachen [1;2].

Die erste große Teilstudie fokussierte als Grundlage auf die Frage, wie Prozessinnovationen bei digitalen Prozessen aktuell realisiert werden. Auf der Grundlage einer Literaturstudie sammelte der Artikel die aktuellen Trends im BPM, die in drei wesentliche Wirkungsrichtungen eingeteilt werden können. Anstelle, wie im traditionellen BPM typisch, die strategischen Ziele top-down operationalisieren zu wollen, geben vermehrt IT-Systeme (Data-driven BPM) oder am Prozess beteiligte Personen (Social-driven BPM) wertvolle Impulse für die Prozessoptimierung. In einem weiteren Cluster werden diese Quellen für flexible Anpassungen während der Laufzeit verwendet (Case-driven BPM) [1].

In einer zweiten Teilstudie wurde eine Übersicht aktueller Forschungsdiskurse auf dem Gebiet des digitalen BPM erstellt, in dem elf auf akademischen Konferenzen identifizierte Trendthemen identifiziert und ihr Stand der Forschung zusammengefasst wurde. Die Themen konnten in menschen-, technologie- und/oder datengetrieben Cluster eingeordnet werden [3;4;5]. In der dritten Studie zeigt ein Abgleich dieser Trends und Cluster mit den Bedarfen der Unternehmenspraxis, dass die Wissenschaft viele moderne und manchmal ausgefallene BPM-Trends thematisiert, während lang bekannte und pragmatische Herausforderun-

gen weiterhin in der Unternehmenswelt wichtig sind, um die digitale Transformation zu gestalten [5].

In der Summe zeigt sich, dass es laufend sehr viele neue Entwicklungen und Fortschritte zur Verbesserung von Unternehmensabläufen gibt. Diese gehen mit verän-

derten Denkweisen (z. B. Nachhaltigkeit, Sinnstiftung für Menschen statt operativer Anweisung in Workflows) sowie auch mit neuen technischen Möglichkeiten (z. B. Interoperabilität, Rechenleistung, datenbasierte Automatisierung) einher. Alle zahlen aber gesamthaft auf den Megatrend der Prozessdigitalisierung ein.

Referenzen:

- [1] Lederer, M., Schott, P. & Knapp, J., "The Digital Future has Many Names – How Business Process Management drives the Digital Transformation". 6th IEEE International Conference on Industrial Technology and Management. Cambridge, 2017.
- [2] Lederer, M., "What's going to happen to Business Process Management? Current Status and Future of a Discipline". 12th International S-BPM ONE Conference. Sevilla, 2019.
- [3] Lederer, M., Betz, S., Kurz, M., & Schmidt, W., "Some say Digitalization – others say IT-enabled Process Management thought through to the End". 9th International S-BPM ONE Conference. Darmstadt, 2017.
- [4] Lederer, M., Elstermann, M., Betz, S., Schmidt, W., "Technology-, Human-, and Data-driven Developments in Business Process Management: A Literature Analysis". 12th International S-BPM ONE Conference. Bremen, 2020.
- [5] Lederer, M., Betz, S., Schmidt, W., Elstermann, M., "Are BPM Practitioners and Researchers Friends? Current Questions of Process Professionals and the Impact of Science". 13th International S-BPM ONE Conference. Karlsruhe, 2022.

Projektpartner:

Werner Schmidt

Technische Hochschule Ingolstadt, 85049 Ingolstadt

Stefanie Betz

Hochschule Furtwangen, 78120 Furtwangen

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT, 53850 Lappeenranta, Finnland

Matthes Elstermann

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 76131 Karlsruhe

Kontakt:



Prof. Dr. Matthias Lederer

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

ma.lederer@oth-aw.de

Zusammenfassung

Im internationalen Projekt „Didaktik über Grenzen – Wir unterrichten gemeinsam für die Zukunft“, in Zusammenarbeit mit der Universität Pilsen (CZ) und dem Geschichtspark Bärnau-Tachov werden historische Inhalte in moderner, digitaler Form für angehende Pädagog:innen und Schüler:innen bereitgestellt. Dabei geht es vorrangig darum, die historischen Inhalte sowohl didaktisch als auch aus medial optimal zu gestalten und hierfür neueste intelligente Techniken zu nutzen. Durch die digitalen Medien soll ein erhöhtes Themeninteresse und besseres Lernverhalten bei den Schüler:innen erreicht werden.

Abstract

The international project “Didactics across borders – We teach together for the future”, in cooperation with the University of Pilsen (CZ) and the Historical Park Bärnau-Tachov, provides historical content in modern, digital form for future educators and students. The main goal is to design the historical content didactically optimal and to use the latest intelligent technologies for this purpose. Digital media should increase the students' interest in the subject and improve their learning behavior.

1 Einleitung

Zu Beginn des Jahres 2021 wurde das Projekt an der OTH Amberg-Weiden gestartet. Hierzu wurden zuerst zwei Mitarbeiter eingestellt, ein wissenschaftlicher Mitarbeiter mit einer 75%-Stelle sowie ein weiterer Projektmitarbeiter mit einer halben Stelle. Koordiniert wurde und wird das Projekt von Beginn an von der an der OTH angestellten Forschungscluster-Assistentin. Im Sommersemester wurde eine studentische Hilfskraft im Projekt angestellt. Zudem wurde eine Praktikantin direkt an der Hochschule angestellt, die sich im Rahmen ihres Praxissemesters mit der Arbeit am Projekt beschäftigte. Dies war aufgrund einer Sonderregelung wegen der Corona-Situation möglich. Im Wintersemester wurden weitere vier studentische Hilfskräfte eingestellt. Es ist festzuhalten, dass die Corona-Lage das Team vor eine große Herausforderung gestellt hat. Besonders die Koordination im Team, die Meetings mit dem Projektpartnern und die Planung, Organisation und die Durchführung von Drehterminen vor Ort war sehr fordernd.

2 Methodische Vorgehensweise

Das Hauptziel des EU Ziel-ETZ-Projekts war es, neue und moderne Mittel für den Unterricht in regionaler Geschichte und Heimatkunde in digitaler und interaktiver Form zu erstellen und für die akademische Ausbildung einer neuen Generation von Grundschullehrer:innen bereitzustellen.

Im Rahmen des Projekts entstanden in deutsch-tschechischer Fassung fünf zweisprachige Lehrfilme zur Regional- und Alltagsgeschichte an der tschechisch-bayerischen Grenze im Mittelalter, Arbeitsblätter für diese Filme zur direkten Verwendung im Unterricht auf beiden Seiten der Grenze, sowie thematische E-Learning- und Webanwendungen für den Unterricht. Diese Projektergebnisse können entsprechend den Bedürfnissen der Lehrkräfte und den Lehrplaninhalten aktualisiert, bewertet, modifiziert und langfristig im Hinblick auf die Nachhaltigkeit des Projekts verwendet werden.

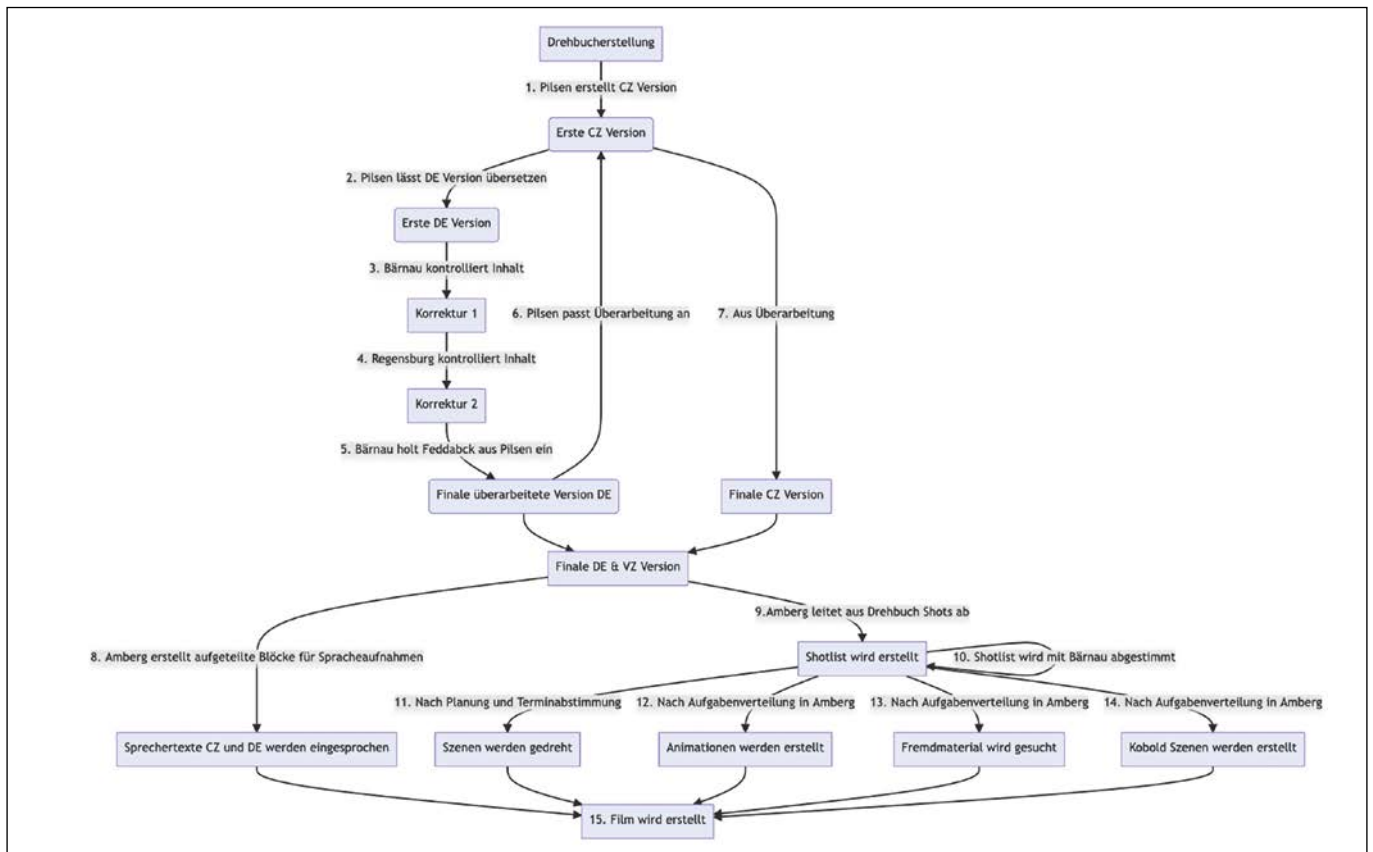


Abbildung 1: Workflow zur Erstellung mehrsprachiger Lehrmaterialien am Beispiel eines Films

2.1 Filme und Lehrmaterialien

Die große Herausforderung bei der Entwicklung von Lehrmaterialien für Grundschüler:innen zum Thema der bayerischen-böhmischen Grenzgeschichte im Mittelalter war, neben dem Erarbeiten der fachlichen Inhalte, vor allem die strukturelle Abwicklung und Steuerung der Prozesse, um am Ende zweisprachige Lehrmaterialien zu erhalten.

Die Universität Pilsen, genauer der Lehrstuhl für Geschichtsdidaktik, war als zentraler Projektpartner für die Konstitution der Lernziele und der inhaltlichen Aufbereitung der Materialien zuständig. Die fachliche Prüfung der Medien bezüglich der historischen Fachbegutachtung wurde vom Lehrstuhl für Archäologie des Mittelalters der Universität Bamberg übernommen. Die geschichtsdidaktische Fachbegutachtung wurde vom Institut für Geschichte der Universität Regensburg übernommen.

Die erste Hürde für die gemeinsame Arbeit war die Konkretisierung der Inhalte der Materialien. Fünf Themengebiete wurden identifiziert:

- Essen und Trinken im Mittelalter
- Handwerk und Landwirtschaft im Mittelalter
- Dorfleben im Mittelalter
- Jagd und Kampf im Mittelalter
- Reisen im Mittelalter

Zu diesen Themen wurde vom tschechischen Projektpartner eine inhaltliche Vorgabe gemacht und daraus wurden dann Ideen für Filme, Arbeitsblätter und digitale Lehrmaterialien entwickelt. Die Aufgabe des Teams an der OTH war es, aus den Vorgaben für die einzelnen Bereiche sinnvolle medientechnische Endprodukte für den Einsatz im Unterricht umzusetzen.

Die größte Herausforderung war es, bei den vielen Projektpartnern und unterschiedlichen Stellen einen gemeinsamen Workflow zu finden, um die Materialien auch in zwei Sprachen vgl. [1, S. 26 ff] strukturiert umzusetzen.

In Abbildung 1 sieht man den Workflow für die Umsetzung der Filme und der anderen Medien. So wurde die inhaltliche Vorgabe in Deutsch übersetzt und von den Fachgutachtern redigiert. Eventuelle Änderungen und Anpassungen wurden in mehreren Schleifen in die deutsche und tschechische Fassung eingearbeitet. Mit einem zweisprachigen Skript wurde dann eine Shotlist vgl. [2, S. 40 ff] erstellt. In einem nächsten Schritt wurden die Sprachaufnahmen der Sprechertexte in Deutsch und Tschechisch umgesetzt. Darauf aufbauend wurde dann die Produktion von gedrehten Szenen im Geschichtspark mit deutschen und tschechischen Studierenden der Projektpartner aufgenommen. Zusätzlich wurden Animationssequenzen erstellt, die nicht drehbare Inhalte ergänzen sollten. Ein wiederkehrendes Alter Ego in Form eines Kobold-Avatars, dessen grafi-

scher Entwurf von der Universität Pilsen stammt, wurde von der OTH Amberg-Weiden mittels Lipsync-Software als animierter, sprechender Charakter als Gamification-Element [3] in die Lehrfilme eingebaut.

Auf Basis der entstandenen Skripte und Shotlists wurden dann auch die anderen Materialien angefertigt. So hat die Universität Pilsen gemeinsam mit ihren Studierenden die Inhalte in Form von Aufgaben für verschiedene Arbeitsblätter entwickelt, die dann vom Amberger Projektpartner in eine grafische, einheitliche Form gebracht worden sind, immer passend zu den bildlichen Elementen, die auch in den dazugehörigen Lehrfilmen verwendet wurden.

Der letzte Baustein, die digitalen Lehrmaterialien, wurden im Anschluss zusammengefügt, wobei dem Schritt eine Evaluation der passenden Plattform und Darbietungsform für die Lehrmaterialien zu Beginn des Projekts vorausging. Es wurde entschieden, die Materialien frei zugänglich auf einer öffentlichen Plattform abrufbar bereitzustellen. Hier musste sichergestellt werden, dass Lehrer:innen ohne große Expertise in Medien- und Informatikfächern die Materialien auch in eigene Systeme einbetten und nutzen können. Weiter wurde von der Universität Pilsen eine Vorlage für die Blended-Learning-Materialien entworfen und gemeinsam mit der OTH Amberg-Weiden Methoden des Storytellings [4] unter Einbeziehung von Gamification-Elementen erarbeitet. Diese ermöglichen den Schüler:innen einen spielerischen Zugang zu den Lerninhalten. Dabei wurde der Stoff der jeweiligen Lehrfilme aufgegriffen und die Informationsvermittlung teilweise noch erweitert.

Für die Umsetzung der Blended-Learning-Inhalte wurde durch formative Evaluation in Hinblick auf die Zielgruppe und der Prämisse einen so einfachen Zugang wie möglich zu schaffen, auf die Plattform H5P gesetzt. Diese H5P-Materialien sind dann nach Projektende direkt über die Projektwebsite zugreifbar.

Im Einzelnen wurden die vielen verschiedenen Funktionen von H5P mittels Feature Inspection untersucht und dann im Prozess der Umsetzung der erarbeiteten Learning Stories mittels der Verfahren agiler Entwicklung [5, S. 177 ff] immer weiter aufgebaut und verfeinert.

2.2 Filmanalyse

Ein weiteres Ziel des ETZ-Projekts war es, die Qualität der Lehrvideos zu verbessern, indem den Lehrenden ein Feedback beim Upload eines Videos gegeben wird. Dazu wurde ein KI-System an die Lernplattform "Moodle" angebunden, welches das hochgeladene Video analysiert und bewertet. Bei der Bewertung eines Videos wird dabei die Verwendbarkeit für eine bestimmte Zielgruppe evaluiert und Vorschläge für Verbesserungsmöglichkeiten angezeigt. Durch diese Evaluierung wird auch

prognostiziert, wie der Lernerfolg bei der Zielgruppe, den Grundschüler:innen, aussehen wird. Den Lehrer:innen soll damit vermittelt werden, an welchen Stellen noch nachgebessert werden kann bzw. ob das Lehrvideo für sie geeignet ist. Technisch wird hierbei das Transkript des Videos analysiert und auf sprachliche Grundbausteine reduziert. Diese werden anschließend verwendet, um Ähnlichkeiten zu einem größeren Datensatz in derselben Domäne zu erkennen, mithilfe dessen eine Prognose auf einem trainierten Modell durchgeführt wird.

Der Datensatz "VLEngagement" [6], auf dem das Modell trainiert wurde, enthält Lehrvideos der Lernplattform <http://www.videlectures.net>. Diese Videos über verschiedene Themen sind öffentlich einsehbar. Durch die Verwendung in Bezug auf die Didaktik sind diese passend für den Vergleich mit den Lehrvideos, die innerhalb dieses Forschungsprojekts entstanden sind. Das Transkript des Lehrvideos wird dabei analysiert, in die einzelnen Textbausteine zerlegt und mit dem Datensatz verglichen, um daraus Schlüsse über die Qualität des Videos zu folgern. Als Ergebnis kann die zu erwartende Bewertung des Videos durch die Zielgruppe sowie die Zielgruppe, in welche das Lehrvideo eingeordnet wird, prognostiziert werden. Der verwendete Datensatz beinhaltet 12.000 Videos der Lernplattform, welche in die sprachlichen Grundbausteine zerlegt, anonymisiert und mit weiteren Metriken ergänzt wurden.

Das Transkript des Videos wird innerhalb der Analyse auf bestimmte Merkmale untersucht. Diese werden erfasst und für die weitere Verarbeitung gespeichert. Zu diesen zählen unter anderem:

- Anzahl der Wörter
- Durchschnittliche Sprechdauer pro Wort
- Anzahl der Wortwiederholungen
- Lesbarkeitsindex (Flesch-Index)
- Anteil an Stoppwörtern, Präpositionen, Hilfsverben, Konjugationen, Pronomen

Nach Sichtung der Lehrvideos innerhalb des Datensatzes wurden auch einige Probleme festgestellt und so musste dieser vorverarbeitet werden. Das Ziel der Vorbereitung der Trainingsdaten ist es, dass das zu entwickelnde Modell eine höhere Güte erreicht. Beispielsweise existieren einige Lehrvideos, die eine sehr geringe Anzahl an Bewertungen besitzen. Lehrvideos, die beispielsweise nur eine einzige Bewertung haben, werden nicht in das Training miteinbezogen, da die Gefahr einer Manipulation zu hoch ist. Das liegt daran, dass diese einzige Bewertung vom Ersteller selbst kommen könnte.

Das Training auf den Datensatz wurde dann mit verschiedenen Regressoren verglichen. Die besten Vorhersageergebnisse konnte dabei mit dem "Random Forest" erreicht werden. Aus verschiedenen Entscheidungsbäumen

wird dabei eine Kombination deren ausgewählt, die die beste Prognose liefern können. Beim Datensatz bedeutet dabei eine gute Prognose, dass anhand der sprachlichen Grundbausteine die zu erwartende Bewertung der Zielgruppe so nah wie möglich am im Datensatz vermerkten tatsächlichen Wert liegt.

3 Ergebnisse

3.1 Filme und Lehrmaterialien

Die fünf Themengebiete wurden in rund mehr als 280 Szenen bearbeitet. Es entstanden zahlreiche Charakter-Animationen des Lern-Avatars, dem Kobold, außerdem mussten diverse Szenen auch als Animationen umgesetzt werden, da die szenische Abbildung schlicht nicht möglich war. Als plastisches Beispiel sei hier der Aufbau der mittelalterlichen Reisestation genannt.

Die fünf Lehrfilme sind alle auf der Projektwebsite einsehbar: <https://www.didactica-bavaria-bohemia.eu> darüber hinaus finden sich auch die erstellten Arbeitsblätter zu den Lehrfilmen auf der Website. Die Blended-Learning-Materialien wurden auf je einer Themenseite zusammengeführt und können direkt dort genutzt werden. Als Basis für die Learning Stories diente das H5P-Material Interactive Book, dies bietet in der Verwendung zahlreicher kombinierbarer Sub-Elemente die meisten Vorteile und die größte Flexibilität. (vgl. Abbildung 2)

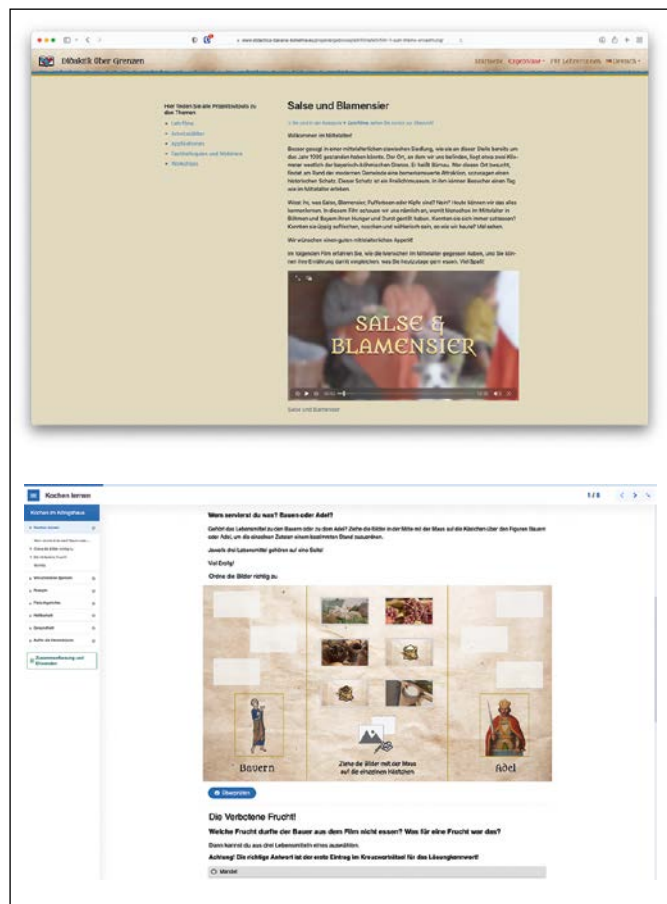


Abbildung 2: Lehrfilme und Blended-Learning-Material

3.2 Filmanalyse

Bei der Evaluation der Ergebnisse der Prognose für die Lehrvideos konnte mit der oben beschriebenen Methode eine „Mittlere absolute Abweichung“ von ungefähr 0.92 bei einer Skala von 1.0–5.0 erreicht werden. Zwar bedeutet das, dass nicht wirklich eine exakte Prognose durchgeführt werden kann, man aber trotzdem eine grobe Vorhersage durchführen kann. Zusätzlich zur Prognose der Zielgruppe anhand der sprachlichen Grundbausteine und Vorschläge zur Verbesserung des Transkriptes wurde damit innerhalb dieses Projekts ein Hilfsmittel für Lehrer:innen untersucht und entwickelt, das eine grobe Richtlinie bieten kann.

4 Ausblick

Wunschziel ist der weit verbreitete Einsatz der Lehrmaterialien auf beiden Seiten der Grenzen, damit Grundschüler:innen die gemeinsame Grenzgeschichte des Mittelalters nachvollziehbar erleben können. Ein weiterführendes Ziel könnte hier sein, die Nutzung der Lehrmaterialien weiter zu analysieren, um die Verbesserung im Sinne der Lernzielkontrolle noch zu verstärken.

Außerdem wäre zu überlegen, ob es für Lehrer:innen auf deutscher und tschechischer Seite nicht hilfreich wäre, wenn aus der Vielzahl an erstellten Materialien – seien es Filmsequenzen, Grafiken oder auch H5P-Übungen – wie aus einem Baukasten zugegriffen werden könnte. Denkbar wäre hier eine Datenbank aufzubauen, die es Lehrer:innen ermöglicht auf den Materialien nach Schlagwörtern, Zeitepochen, Inhalten u. a. zu suchen und sich dann für den eigenen Unterricht einfach die Materialien aus der Datenbank herausziehen zu können.

Überdies wäre ein weiterer Ansatz, die verwendeten Medien auch über Film, Arbeitsblätter und Blended-Learning-Materialien hinaus zu erweitern. So wäre eine Umsetzung einzelner Materialien in 3D eine gute Basis, um eine immersive virtuelle Lern- und Lehrumgebung zu schaffen. So könnten aus den einzelnen Teilen VR- und AR-Szenarien geschaffen werden, die im Unterricht wie auch im Geschichtspark selbst oder an anderen Lernorten zugänglich gemacht werden.

Das Verständnis für die Bedeutung und den Wert der Regionalgeschichte und des Potenzials von modernen didaktischen Mitteln ist ein langfristiges Ziel und kann über die Grenzen unserer Länder wie auch die des Forschungsprojekts selbst noch weiterverfolgt werden.

Referenzen:

- [1] P. Anders, M. Staiger, C. Albrecht, M. Rüssel, und C. Vorst, „Film in der Schule“, in Einführung in die Filmdidaktik: Kino, Fernsehen, Video, Internet, P. Anders, M. Staiger, C. Albrecht, M. Rüssel, und C. Vorst, Hrsg. Stuttgart: J.B. Metzler, 2019, S. 21–34. DOI: 10.1007/978-3-476-04765-6_2.
- [2] O. Jacobs und T. Großpietsch, Journalismus fürs Fernsehen: Dramaturgie – Gestaltung – Genres. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. [Online]. Available: <https://books.google.de/books?id=jh3FBgAAQBAJ> (zuletzt aufgerufen am 13.12.2022)
- [3] T. W. Liew, N. A. Mat Zin, und N. Sahari, “Exploring the affective, motivational and cognitive effects of pedagogical agent enthusiasm in a multimedia learning environment”, Human-centric Computing and Information Sciences, Bd. 7, Nr. 1, S. 9, 2017, DOI: 10.1186/s13673-017-0089-2.
- [4] M. Carr und W. Lee, Learning Stories in Practice. SAGE Publications, 2019. [Online]. Available: <https://books.google.de/books?id=u0OWDwAAQBAJ> (zuletzt aufgerufen am 13.12.2022)
- [5] H. Helmke, F. Höppner, und R. Isernhagen, Einführung in die Software-Entwicklung. 2007.
- [6] Bulathwela, Sahan; Perez-Ortiz, Maria; Yilmaz, Emine; Shawe-Taylor, John: VLEngagement: A Dataset of Scientific Video Lectures for Evaluating Population-based Engagement. 2020. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.02273> (zuletzt aufgerufen am 13.12.2022)

Fördergeber:



Ziel ETZ
Freistaat Bayern –
Tschechische Republik
2014 – 2020 (INTERREG V)



Europäische Union
Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung

Kontakt:



Prof. Dr. Dieter Meiller

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

d.meiller@oth-aw.de
www.didactica-bavaria-bohemia.eu



Stephan Prettnner, B.Eng.

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

s.prettnner@oth-aw.de
www.didactica-bavaria-bohemia.eu



Dipl.-Betw. Melanie Steiner, M.Sc.

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

m.steiner@oth-aw.de
www.didactica-bavaria-bohemia.eu



Veit Stephan, M.Eng.

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

v.stephan@oth-aw.de
www.didactica-bavaria-bohemia.eu

Zusammenfassung

Damit Studierende zu forschungsmethodischem Arbeiten befähigt werden, können im Rahmen der Hochschullehre Ansätze des Lernens über, für und durch Forschung realisiert werden. Der Beitrag verortet eine didaktische Konzeption in dieser Trias und berichtet über eine reale Forschungsfragestellung, an deren Bearbeitung Studierende mitgewirkt haben. Die Gemeinde Hohenthann, als Praxispartner, bedurfte zur zielgruppenadäquaten Konzeption von Unterstützungsangeboten für die SeniorInnen zur Nutzung von IKT belastbare Informationen zur bisherigen technischen Ausstattung, zur bisherigen Nutzung und zu gewünschten Unterstützungsangeboten. Auf Basis theoretischer Grundlagen zur Technologieakzeptanz und des Erkenntnisinteresses der Gemeinde wurde eine Befragung (Online und Paper-Pencil) konzipiert und durchgeführt. An der Befragung beteiligten sich 250 SeniorInnen aus den verschiedenen Ortsteilen. Die Ergebnisse zeigen neben dem bisherigen Nutzungsverhalten in den verschiedenen Altersgruppen sowie den zukünftigen Nutzungswünschen, dass mit steigendem Alter die wahrgenommene Nützlichkeit von IKT für die eigene Situation tendenziell abnimmt, die Einstellung zu IKT deutlich weniger positiv ausgeprägt ist und die Ängstlichkeit im Umgang mit IKT bedeutsam ansteigt. Als Unterstützungsangebote wünschen sich SeniorInnen vor allem Vorträge, Schulungen durch eigene Familienangehörige, Informationsnachmittage und Kleingruppenschulungen in der Gemeinde. Dabei stehen gesundheitsrelevante Inhalte (wie der Hausnotruf, das Vereinbaren von Arztterminen online und die Videotelefonie mit der Ärztin bzw. dem Arzt) im Vordergrund, gefolgt von informationsbezogenen Inhalten (Informationen im Internet schneller einholen), versorgungsbezogenen Inhalten (im Internet einkaufen) und sozialen Inhalten (Videotelefonie mit Freunden und Familie, in Kontakt bleiben mit Freunden und Familie sowie Foto- und Videobearbeitung). Auf Basis dieser Erkenntnisse können Unterstützungsangebote zielgruppenspezifisch und adäquat konzipiert werden.

Abstract

To enable students to work with research methods, approaches to learning about, for and through research can be realised within higher education. The paper locates a didactic concept in this triad and reports on a real research question that students helped to solve. The municipality of Hohenthann needed reliable information about the existing technical equipment, the existing use and the desired support offers in order to design target group-appropriate support offers for seniors to use ICT. A survey (online and paper-pencil) was designed and carried out based on theoretical principles of technology acceptance and the community's interest in knowledge. 250 senior citizens from the different districts took part in the survey. The results show, in addition to the previous usage behavior in the different age groups and the future usage wishes, that the perceived usefulness of ICT for one's own situation tends to decrease with increasing age, the attitude towards ICT is clearly less positive and the fearfulness in dealing with ICT increases significantly. Lectures, training by family members, information afternoons and small group training sessions in the community are mentioned as the most desirable forms of support. Health-related content (such as home emergency calls, making doctor's appointments online and video telephoning with the doctor) is in the foreground, followed by information-related content (getting information on the internet more quickly), supply-related content (shopping on the internet) and social content (video telephoning with friends and family, staying in touch with friends and family as well as photo and video editing). Based on these findings, support services can be adequately designed for the specific target group.

1 Einleitung

Forschung und Hochschullehre sind miteinander verschränkt. Forschung und Forschungserkenntnisse bilden einerseits das Fundament des Wissens für Lerninhalte in der Hochschullehre. Andererseits soll Hochschullehre künftige Generationen von Forschenden auf forschende Tätigkeiten vorbereiten: egal ob an Universitäten, Fachhochschulen oder in Unternehmen.

Ein Verständnis für Forschung und forschungsmethodisches Vorgehen können Studierende im Rahmen ihres Studiums entwickeln, indem sie sich mit existierender Forschung vertraut machen (Lernen über Forschung), einzelne Elemente forschungsmethodischen Vorgehens und verschiedene Methoden einüben (Lernen für Forschung) und in abgegrenzten Projekten selbst forschen (Lernen durch Forschung) [1, S. 236]. Diese Dimensionen forschenden Lernens werden in der Hochschullehre vor allem als Lernen über Forschung realisiert. Studierende berichten jedoch häufig darüber, dass ihnen ein Verständnis für Forschung erst mit einem eigenen Projekt (z. B. im Rahmen einer empirischen Abschlussarbeit) gelingt.

Um zu vermeiden, dass Wissen abstrakt und träge bleibt [2], sind daher didaktische Ansätze erforderlich, die es Studierenden ermöglichen, bereits im Studium Erfahrungen mit eigener Forschung zu generieren. Ein solches situierendes und problembasiertes Lernen [3] macht Forschungsmethoden in Anwendungssituationen erfahrbar und damit den Nutzen forschungsmethodischen Vorgehens für Studierende unmittelbar einsichtig. Für das Lernen durch Forschung können reale und abgrenzbare Problemstellungen von Praxispartnern der Hochschule genutzt werden, die von Studierenden in Projektteams bearbeitet werden. Dieser Beitrag stellt ein Forschungsprojekt zur Technologieakzeptanz von SeniorInnen einer Gemeinde vor, das Studierende im Rahmen des Moduls „Einführung in die empirisch-pädagogische Forschung“ im Wintersemester 2021/2022 bearbeitet haben. Im Rahmen eines Blended-Learning-Konzeptes [4] wurden die Studierenden in ihrem Lernen für Forschung durch eine digitale komplexe Lernumgebung [5] unterstützt sowie hinsichtlich ihres Lernens durch Forschung mithilfe instruktionalen Scaffoldings [6] begleitet.

Ausgangsproblem des Forschungsprojektes und damit Ausgangspunkt des forschungslogischen Ablaufs [7] war das Bestreben der Gemeinde Hohenthann Unterstützungsangebote für die SeniorInnen der Gemeinde zur Nutzung von digitalen Technologien, speziell des Internets und digitaler Endgeräte (wie dem Smartphone, dem Tablet oder dem Laptop; nachfolgend als Informations- und Kommunikationstechnologien [IKT] bezeichnet) zielgruppenadäquat zu entwickeln. Die Angebote zielen darauf ab, Ältere zur Teilhabe an den Möglichkeiten der IKT zu befähigen und sie dabei zu unterstützen, länger unabhängig zu bleiben

[8]. Allerdings besteht gerade bei Älteren die Gefahr, dass sie durch die Geschwindigkeit der fortschreitenden Digitalisierung überfordert werden. Wenn sich Ältere nicht in ausreichendem Maße im Umgang mit IKT unterstützt fühlen [9], verweigern sie sich ggf. der Nutzung. Um seitens der Gemeinde Unterstützungsangebote konzipieren zu können, war es daher zunächst erforderlich, die folgenden Forschungsfragen zu beantworten:

- F1: Welche technische Ausstattung in Bezug auf Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) ist bei SeniorInnen der Gemeinde vorhanden?
- F2: Wie stellt sich das bisherige Nutzungsverhalten von IKT durch SeniorInnen dar?
- F3: Welche Einstellungen haben die SeniorInnen zur Nutzung von IKT?
- F4: Welche Gründe haben SeniorInnen bisher an der Nutzung von IKT gehindert?
- F5: Welche Unterstützungsangebote zu IKT wünschen sich die SeniorInnen?

Dieser Beitrag erörtert zunächst die theoretischen Grundlagen zur Akzeptanz und Nutzung von IKT (Gliederungspunkt 2). Anschließend werden methodische Aspekte zur Stichprobe und zum Erhebungsinstrument dargestellt (Gliederungspunkt 3). Wie die Ergebnisse der Erhebung zur Beantwortung der Forschungsfragen beitragen, stellt Gliederungspunkt 4 vor. Der Beitrag schließt mit einem Fazit und Ausblick (Gliederungspunkt 5).

2 Theoretische Grundlagen Technologieakzeptanz

Die Nutzung von IKT ist durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Die Arbeiten zur Technologieakzeptanz und das Technologieakzeptanz-Modell (TAM) einschließlich verschiedener Erweiterungen (u. a. [9]; [10]; [11]; [12]; [13]; [14]) belegen den Einfluss der Verhaltensintention zur Nutzung von IKT („Behavioral Intention to Use“; [15, S. 985]) und der individuellen Einstellungen zur Nutzung von IKT („Attitude Toward Using“; [15, S. 985]). Dabei werden die individuellen Einstellungen zur Nutzung von IKT durch die wahrgenommene Nützlichkeit („Perceived Usefulness“ [15, S. 985]) und die wahrgenommene Einfachheit der Nutzung („Perceived Ease of Use“ [15, S. 985]) determiniert. Wenn Menschen IKT als nützlich empfinden, ist eine positive Einstellung zur Nutzung von IKT und die Intention IKT tatsächlich zu nutzen, wahrscheinlicher [9]. Die Wahrnehmung der Nützlichkeit von IKT für die eigene Situation ist daher von besonderer Bedeutung [16].

Im Rückgriff auf die bestehende Forschung zur Technologieakzeptanz wurde ein Rahmenmodell (Abbildung 1) entwickelt, das die theoretische Grundlage für die Überlegungen zur Konzeption einer Befragung für SeniorInnen darstellt. Das Rahmenmodell enthält den Kern des ursprünglichen Technologieakzeptanzmodells (TAM) mit

den Faktoren wahrgenommene Nützlichkeit, wahrgenommene Einfachheit der Nutzung, Einstellung zur Nutzung und Nutzungsintention, die auf die tatsächliche Nutzung wirken [10]. Beeinflusst werden die wahrgenommene Nützlichkeit und die wahrgenommene Einfachheit der Nutzung von externen Faktoren wie bisherigen Erfahrungen mit IKT, subjektiven Normen, Freude, Computerängstlichkeit und Selbstwirksamkeit [11]. Für die tatsächliche Nutzung nicht zu vernachlässigen ist dabei auch die vorhandene Infrastruktur im Sinne der Ausstattung mit IKT.

Unter Berücksichtigung der Zielsetzung der Gemeinde und in Abstimmung mit den dortigen EntscheiderInnen sollte die Befragung auf Basis dieses theoretischen Rahmenmodells die Technikausstattung der SeniorInnen, ihre bisherige IKT-Nutzung, die wahrgenommene Nützlichkeit und die wahrgenommene Einfachheit der Nutzung, die Einstellungen der SeniorInnen zu IKT, ihre bisherigen Hinderungsgründe sowie die Nutzungsintentionen umfassen.

3 Methode

Zunächst wird die Stichprobe, differenziert nach Teilnehmenden aus den verschiedenen Ortsteilen und Altersgruppen, vorgestellt. Anschließend wird die Konzeption des Fragebogens erläutert.

3.1 Stichprobe

An der Befragung nahmen 250 EinwohnerInnen der Gemeinde Hohenthann teil. Bezogen auf die Einwohnerzahl zum Stand 31.12.2021 entspricht das insgesamt 5,81 Prozent der Gesamtbevölkerung der Gemeinde (Tabelle 1, Einwohnerzahl 31.12.2021: 4.299, Gemeinde Hohenthann, [19]).

Tabelle 1: Einwohnerzahl und Stichprobe

Alt-gemeinde:	Einwohnerzahl	Stichprobe n	Relative Häufigkeit (%) in der Stichprobe	Relative Häufigkeit (%) zur EW-Zahl
Hohenthann	1.701	105	42,00	6,17
Schmatzhäusern	833	35	14,00	4,20
Andermannsdorf	533	28	11,20	5,23
Petersglaim/Grafenhau	222	18	7,20	8,11
Oberergoldsbach	325	29	11,60	8,93
Türkenfeld	223	9	3,60	4,04
Weihenstephan	355	22	8,80	6,20
Wachelkofen*	107	-	-	-
k. A.		4	1,60	
Gesamt	4.299	250	100,00	5,81

(Hinweis: Prozentangaben ggf. kaufmännisch gerundet;
* Die Stichprobe enthält keine EinwohnerInnen von Wachelkofen.)

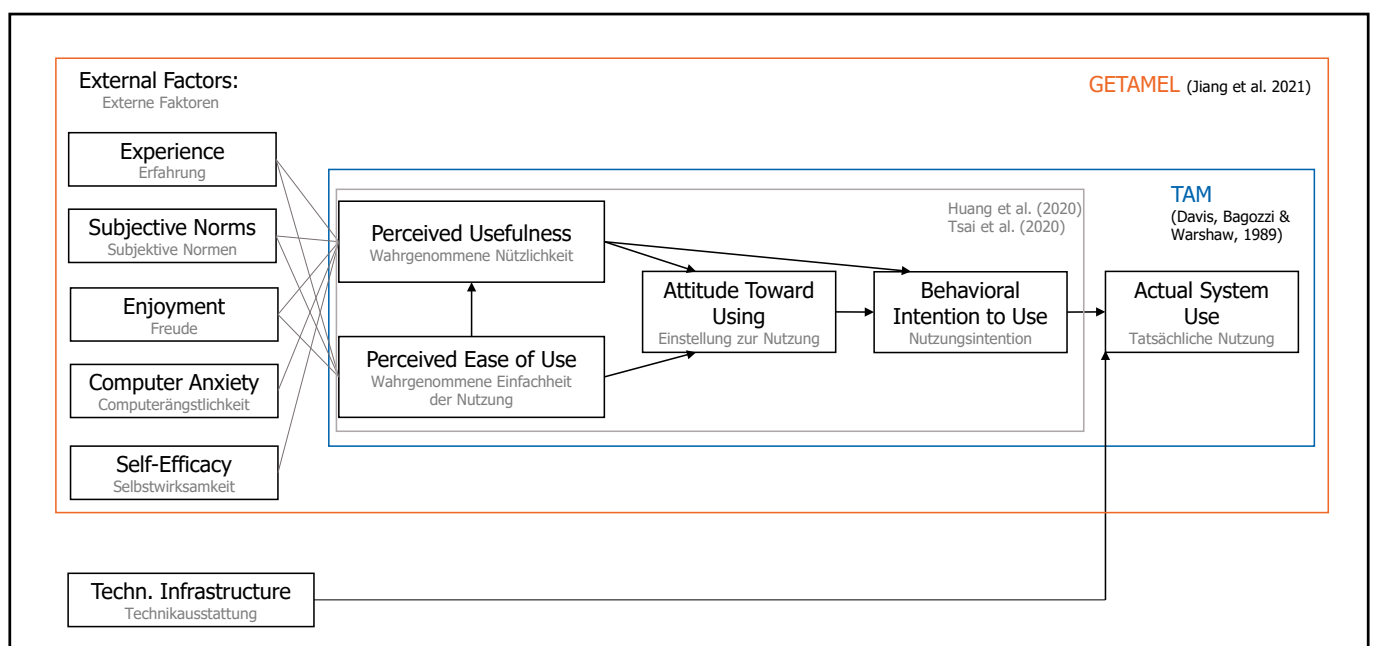


Abbildung 1: Technologieakzeptanz-Modell unter Berücksichtigung externer Faktoren und Technikausstattung (in Anlehnung an [10]; [11]; [13]; [14])

Hinsichtlich der Ortsteile entfällt der größte Anteil auf Hohenthann mit insgesamt 105 Befragten (42,0 %). Den geringsten Anteil der Befragten an der Gesamtstichprobe stellt der Ortsteil Türkenfeld mit insgesamt 9 Personen (3,6 %). Vier Personen bleiben ohne Ortsteilzuordnung.

Differenziert nach Altersgruppen stellen die Teilnehmenden an der Befragung in der Altersgruppe 61 bis 69 Jahre (140 Personen, 56 %) den größten Anteil in der Stichprobe, gefolgt von der Gruppe der 70- bis 80-Jährigen (67 Personen, 26,8 %) und der Gruppe der über 80-Jährigen (31 Personen, 12,4 %). Weiterhin enthält die Stichprobe 12 Personen (4,8 %) bis zu 60 Jahren.

3.2 Fragebogen

Zur Konzeption eines Fragebogens für die Erhebung wurden das theoretische Rahmenmodell zugrunde gelegt und die Erkenntnisinteressen der Gemeinde berücksichtigt. Bisherige Skalen zur Computerängstlichkeit, zur wahrgenommenen Nützlichkeit und Einfachheit der Nutzung, zu Einstellungen und zur Nutzungsintention wurden adaptiert [11]; [12]; [13]; [17]. Der Fragebogen enthielt neben sozio-demografischen Items zum Alter, Ortsteil und Geschlecht fünf Items zur technischen Ausstattung (Internetanschluss, Smartphone, Tablet, etc.), 17 Items zum bisherigen Nutzungsverhalten (Einfachwahlaufgaben zur Nutzungshäufigkeit der vorhandenen Ausstattung), 17 zur inhaltsbezogenen Nutzung, 15 Items zu Einstellung, wahrgenommener Nützlichkeit, Einfachheit der Nutzung und bisherigen Hinderungsgründen (5-stufiges Likert-Antwortformat) und sieben Items zu gewünschten Unterstützungsangeboten (sechs Einfachwahlaufgaben und ergänzend ein offenes Item).

Die Befragung erfolgte im Zeitraum vom 20.12.2021 bis zum 10.01.2022. Dazu wurden eine Online-Version des Fragebogens auf der Plattform SoSci Survey zur Verfügung gestellt und eine Papierversion (Paper-Pencil) durch die Gemeinde postalisch an die SeniorInnen verteilt.

Die Analyse der Daten erfolgte mithilfe der Statistik-Software IBM SPSS Statistics und Verfahren der deskriptiven und induktiven Statistik (Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$). Fehlende Daten wurden nicht in die Analyse einbezogen.

4 Ergebnisse

Ergebnisse zu F1: Welche technische Ausstattung in Bezug auf IKT ist bei SeniorInnen der Gemeinde vorhanden? Die deskriptive Analyse zeigt, dass 214 der befragten Personen (knapp 89,2 %) über einen Internetanschluss verfügen, 26 Personen (10,8 %) nicht. Von den Befragten besitzen 211 (87,2 %) ein Smartphone/Handy. Ein Tablet besitzen 109 Personen (45 %), einen Laptop 136 Personen (56,2 %) und einen Computer 122 Personen (50,4 %).

Ergebnisse zu F2: Wie stellt sich das bisherige Nutzungsverhalten von IKT durch SeniorInnen dar?

Differenziert nach Altersgruppen zeigt sich eine unterschiedliche Verteilung der Nutzungszeiten des Internets. Der größte Teil der bis 60-Jährigen (80%), der 61- bis 69-Jährigen (66,2%) und der 70- bis 80-Jährigen (58,3%) nutzt das Internet mehr als 30 Minuten bis zwei Stunden täglich. Hingegen geben die meisten der über 80-Jährigen (48,4%) an, das Internet gar nicht zu nutzen. Die am häufigsten genannten aktuellen Nutzungsarten sind „Nachrichten schreiben“ (SMS, WhatsApp, etc.; insgesamt 72% der Befragten), gefolgt von der Informationssuche („im Internet nachlesen“; 68%), „Briefe, E-Mails und sonstige Texte schreiben“ (64,4%) sowie „Fotografieren“ (55,6%).

Ergebnisse zu F3: Welche Einstellungen haben die SeniorInnen zur Nutzung von IKT?

Die 15 Items mit Likert-Antwortformat wurden einer Explorativen Faktorenanalyse (EFA) unterzogen [18, S. 481]. Die daraus resultierende 3-Faktorenlösung erklärt 65,7% der Varianz (KMO = 0.812, Bartlett $p < 0.001$). Die Faktoren lassen sich inhaltlich wie folgt abgrenzen: Faktor 1: Wahrgenommene Nützlichkeit (Eigenwert 5,2; Varianzaufklärung 34,6%; sechs Items, Cronbachs Alpha = 0.834), Faktor 2: Einstellung zur IKT (Eigenwert 3,3; Varianzaufklärung 22,1%; vier Items, Cronbachs Alpha = 0.888), Faktor 3: Computerängstlichkeit (Eigenwert 1,4; Varianzaufklärung 9,0%; vier Items, Cronbachs Alpha = 0.776). Die Personen der verschiedenen Altersgruppen unterscheiden sich nicht in der Wahrnehmung der Nützlichkeit von IKT (Kruskal-Wallis-Tests, $p = 0.084$, $H = 6.639$). Die Werte für die Einstellung zu IKT nehmen allerdings mit steigender Altersgruppe signifikant ab (Kruskal-Wallis-Test, $p < 0.001$, $H = 17.499$). Die Computerängstlichkeit nimmt mit steigender Altersgruppe zu und unterscheidet sich signifikant zwischen den Altersgruppen (Kruskal-Wallis-Test, $p < 0.001$, $H = 19.058$).

Ergebnisse zu F4: Welche Gründe haben SeniorInnen bisher an der Nutzung von IKT gehindert?

Die am häufigsten genannten Hinderungsgründe sind „Sicherheitsbedenken im Internet“, gefolgt von „Bedenken im Umgang mit dem Gerät“ und dem „nicht erkennbaren eigenen Nutzen“. Signifikante Unterschiede zwischen den Altersgruppen finden sich für die beiden Hinderungsgründe: „eigener Nutzen nicht erkennbar“ (Kruskal-Wallis-Test, $H = 12.106$, $p = 0.007$) sowie für „Bedenken im Umgang mit dem Gerät“ ($H = 8.836$, $p = 0.032$). Der eigene Nutzen ist insbesondere für Menschen, die älter als 80 Jahre sind, nicht erkennbar. Paarweise Vergleiche zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Altersgruppen der bis 60-Jährigen und der über 80-Jährigen (Mann-Whitney-U-Test, $Z = -2.328$; $p = 0.020$), der 61- bis 69-Jährigen und der über 80-Jährigen (Mann-Whitney-U-Test, $Z = -3.188$; $p = 0.001$) sowie zwischen den 70- bis 80-Jährigen und den über 80-Jährigen (Mann-Whitney-U-Test, $Z = -2.661$, $p = 0.008$). Beden-

ken im Umgang mit dem Gerät sind bei Menschen, die älter als 80 Jahre sind, stärker ausgeprägt als bei Jüngeren. Paarweise Vergleiche zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Altersgruppen der 61- bis 69-Jährigen und der über 80-Jährigen ($Z = -2.640$, $p = 0.008$).

Ergebnisse zu F5: Welche Unterstützungsangebote zu IKT wünschen sich die SeniorInnen?

Hinsichtlich gewünschter Schulungsangebote entfällt der größte Anteil der Wünsche auf „Vorträge“ (67 Nennungen), gefolgt von „Schulungen durch eigene Familienangehörige“ (55 Nennungen), „Informationsnachmittage“ (51 Nennungen) und „Kleingruppenschulungen im EDV-Raum der Gemeinde“ (51 Nennungen).

5 Fazit und Ausblick

Die wahrgenommene Nützlichkeit von IKT zeigt sich vergleichbar zu [9] und [16] auch in diesem Projekt als

bedeutsam. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass die Einstellung im Sinne der Aufgeschlossenheit gegenüber IKT mit zunehmendem Alter abnimmt. Die Computerängstlichkeit steigt mit zunehmendem Alter an. Die Modellvorstellungen des TAM untermauern, dass die Wahrnehmung der Nützlichkeit die Einstellung zu IKT und die Nutzungsintention positiv beeinflussen kann. Für SeniorInnen können daher die Nützlichkeit von IKT und deren Wahrnehmung in konkreten Nutzungsarten als Dreh- und Angelpunkte für die Konzeption von Unterstützungsangeboten genutzt werden.

Das komplexe Ausgangsproblem der Gemeinde Hohenthann wurde im Rahmen hochschulischen Lehr-Lern-Handelns forschungsmethodisch bearbeitet. Studierende erhalten solchermaßen die Möglichkeit, nicht nur über und für Forschung, sondern auch durch Forschungstätigkeiten zu lernen.

Referenzen:

- [1] G. Reinmann, „Gestaltung akademischer Lehre: semantische Klärungen und theoretische Impulse zwischen Problem- und Forschungsorientierung“, *Zeitschrift für Hochschulentwicklung*, 11(5), 225–244, 2016.
- [2] A. Renkl, „Fürs Leben lernen. Träges Wissen aus pädagogisch-psychologischer Sicht“, *Schulmagazin*, 72, 5–10, 2004.
- [3] C. E. Hmelo-Silver, “Creating a Learning Space in Problem-based Learning”, *Interdisciplinary Journal of Problem-based Learning*, 7(1), 24–39. <http://dx.doi.org/10.7771/1541-5015.1334>, 2013. (Letzter Zugriff: 09.12.2022)
- [4] J. C. Bonk, C. R. Graham, *The Handbook of Blended Learning. Global Perspectives, Local Designs*. San Francisco: Pfeiffer, 2006.
- [5] J. Schlicht, M. Hommel, B. Fürstenau, F. Klauser, „WiWiPäd: Ein komplexes Lehr-Lern-Arrangement für forschendes Lernen in wirtschaftswissenschaftlichen und wirtschaftspädagogischen Studiengängen“, *HDS.Journal*, 1/2017, 42–48, 2017.
- [6] B. R. Belland, *Instructional Scaffolding in STEM Education. Strategies and Efficacy Evidence*. Cham: Springer, 2017.
- [7] J. Friedrichs, *Methoden empirischer Sozialforschung*, 14. Aufl. Opladen: Westdeutscher Verlag, 1990.
- [8] B. Niehaves, R. Plattfaut, “Internet adoption by the elderly: employing IS technology acceptance theories for understanding the age-related digital divide”, *European Journal of Information Systems*, 23, 708–726, 2014.
- [9] H. Guner, C. Acaturk, “The use and acceptance of ICT by senior citizens: a comparison of technology acceptance model (TAM) for elderly and young adults”, *Universal Access in the Information Society*, 19, 311–330, DOI: 10.1007/s10209-018-0642-4, 2020.
- [10] V. Venkatesh, F. D. Davis, “A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model: Four Longitudinal Field Studies”, *Management Science*, 46(2), 186–204, 2000.
- [11] M. Y. C. Jiang, M. S. Y. Jong, W. W. F. Lau, Y. L. Meng, C. S. Chai, M. Chen, “Validating the General Extended Technology Acceptance Model for E-Learning: Evidence From an Online English as a Foreign Language Course Amid COVID-19”, *Frontiers in Psychology*, online: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2021.671615/full>, DOI: 10.3389/fpsyg.2021.671615, 2021. (Letzter Zugriff: 09.12.2022)
- [12] F. Huang, T. Teo, M. Zhou, “Chinese students’ intentions to use the Internet-based technology for learning”, *Educational Technology Research and Development*, 68(1), 575–591, 2020.

- [13] T. H. Tsai, W. Y. Lin, Y. S. Chang, P. C. Chang, M. Y. Lee, “Technology anxiety and resistance to change behavioral study of a wearable cardiac warming system using an extended TAM for older adults”, PloS one, 15(1), e0227270. DOI: 10.1371/journal.pone.0227270, 2020.
- [14] F. D. Davis, “A Technology Acceptance Model for Empirically Testing New End-User Information Systems: Theory and Results” (Doctoral dissertation). Massachusetts Institute of Technology, 1986.
- [15] F. D. Davis, R. Bagozzi, P. R. Warshaw, “User Acceptance of Computer Technology: A Comparison of Two Theoretical Models”, Management Science, 35(8), 982–1003. DOI: 10.1287/mnsc.35.8.982, 1989.
- [16] L. Dogruel, S. Joeckel, N. D. Bowman, “The use and acceptance of new media entertainment technology by elderly users: development of an expanded technology acceptance model”, Behaviour & Information Technology, 34(11), 1052–1063, DOI: 10.1080/0144929X.2015.1077890, 2015.
- [17] F. J. Neyer, J. Felber, C. Gebhardt, „Kurzsкала zur Erfassung von Technikbereitschaft (technology commitment)“, Zusammenstellung sozialwissenschaftlicher Items und Skalen (ZIS). DOI: 10.6102/zis244, 2016.
- [18] N. Döring, J. Bortz, Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften, 5. Aufl., Cham: Springer, 2016.
- [19] Gemeinde Hohenthann, Statistik und Daten, online: https://daten2.verwaltungsportal.de/dateien/seitengenerator/9ccbc2e76c25e109f023a04c5822ff1d165131/ewo-statistik_31.12.2021.pdf, o. D. (Letzter Zugriff: 02.08.2022).

Projektpartner:

Gemeinde Hohenthann, 84098 Hohenthann

Kontakt:



Prof. Dr. rer. pol. habil. Mandy Hommel

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Elektrotechnik, Medien und Informatik
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik
Professur Berufspädagogik
Didaktikbeauftragte der Hochschule
Kaiser-Wilhelm-Ring 23
92224 Amberg

m.hommel@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:
Rektor-Riedel-Str. 2
92245 Kümmersbruck

Telefon +49 (172) 2659863
Sekretariat +49 (172) 1591724
E-Mail: freunde.oth-amberg@oth-aw.de

Unsere aktuellen Öffnungszeiten: Immer – Überall.

Wann, wo,
wie Sie wollen:
Wir sind für
Sie da!



Online-Banking



VR-BankingApp



Über 17.300
Geldautomaten



Sicher online
bezahlen



Persönliche
Beratung vor Ort



Weltweit
bezahlen

Morgen kann kommen.

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-as.de
www.vr-as.de



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

Wie wär's mit...

... INFORMATIK UND MEDIEN | ENERGIE UND UMWELT |
PÄDAGOGIK | TECHNIK | GESUNDHEIT | WIRTSCHAFT..?

DU HAST DIE WAHL!



Jetzt informieren!

www.oth-aw.de



Hocheffiziente Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung für Industrie und Gewerbe

Andreas Röhl, M.Eng.
Dipl.-Ing. Christian Wuschig
Dr.-Ing. Manuel Riepl
Prof. Dr. Raphael Lechner

Zusammenfassung

Das Projekt „Hocheffiziente Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung für Industrie und Gewerbe“ hatte zum Ziel, ein System zu entwickeln und im Labor zu testen, das die Effizienz der Kältebereitstellung im Bereich kleiner Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungssysteme (20 kW elektrisch) um ca. 20 % steigert.

Hierfür wurde eine zwei-/einstufige LiBr-H₂O-Absorptionskältemaschine (AKM) entwickelt, die das Rauchgas eines entsprechend modifizierten BHKW direkt zum Antrieb bei ca. 500 °C nutzt und auch durch das Heißwasser des BHKW angetrieben wird. Die entwickelte AKM wurde gebaut und in eine Teststandumgebung integriert. Die Vermessung der AKM hat gezeigt, dass die erwartete Effizienzsteigerung realisiert werden konnte. Mit einer Kälteleistung von 34,7 kW bei einer Antriebsleistung von 38,3 kW wurde ein EER von 0,91 erreicht. Mit einem konventionellen System wäre eine Kälteleistung von ca. 28,7 kW zu erwarten gewesen.

Abstract

The project “Highly efficient combined heat, power and cooling for industry and commerce” aimed to develop and test in the laboratory a system that increases the efficiency of the cold supply in the field of small combined heat, power and cooling systems (20 kW electrical) by 20 %.

For this purpose, a two/one-stage absorption chiller (ACh) was developed which uses the flue gas of an appropriately modified CHP directly to drive it at about 500 °C and is also driven by the hot water of the CHP. The developed ACh was built and integrated into a testing environment. The detailed experimental analysis of the absorption chiller system showed the expected increase in efficiency with a cooling capacity of 34.7 kW at a driving capacity of 38.3 kW, an EER of 0.91 could be achieved. With a conventional system, a cooling capacity of approx. 28.7 kW would have been expected.

1 Einleitung

Im Rahmen des Vorhabens „Hocheffiziente Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung für Industrie und Gewerbe“ entwickelte das Kompetenzzentrum für Kraft-Wärme-Kopplung (KoKWK) in Kooperation mit dem Standort Garching des Zentrums für Angewandte Energieforschung Bayern e.V. (ZAE) ein Gesamtsystem für eine hocheffiziente Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung, bestehend aus einem Blockheizkraftwerk (BHKW) und einer zwei-/einstufigen Absorptionskältemaschine (AKM). Im Rahmen des Projektes wurde der Prototyp einer für den Einsatz in KWKK-Systemen kleiner Leistung optimierten zwei-/einstufigen AKM entwickelt. Durch die Kopplung beider Systeme ergeben sich sowohl

primärenergetische und ökologische als auch wirtschaftliche Vorteile. Die in diesem Projekt entwickelte Systemkonfiguration aus BHKW und AKM ermöglicht folgende Eigenschaften:

- Elektrische Leistung: 20 kW
- Wärmeleistung (Heizbetrieb): 40 kW
- Kälteleistung (Kühlbetrieb): 36 kW
- Teillastfähigkeit 25...100 %
- Gleitende Umschaltung zwischen Heizen und Kühlen

Es wurde eine innovative Absorptionskältemaschine eingesetzt, welche eine Steigerung der Kälteleistung um bis zu 30% gegenüber der bisher eingesetzten Technik

erlaubt. Diese Wirkungsgradsteigerung wird ermöglicht durch eine getrennte Auskopplung der Hoch- und Niedertemperatur-Wärmeströme aus dem BHKW, was zu einem exergetischen Vorteil führt.

Die Absorptionskältemaschine erhöht die jährliche Ausnutzung des Blockheizkraftwerks da neben dem wärmeorientierten Betrieb im Winter im Sommer Klima- oder Prozesskälte bereitgestellt werden kann. Diese Laufzeitverlängerung verbessert den wirtschaftlichen Betrieb von Blockheizkraftwerken im kleinen Leistungsbereich. Durch die Entwicklung eines aufeinander abgestimmten Komplettsystems wird die Anwendung von Kraft-Wärme-Kälte-Systemen erleichtert.

Im Rahmen des Projektes wurde ein funktionsfähiger Prototyp entwickelt. Dabei war das ZAE für die Entwicklung der AKM zuständig, das KoKWK übernahm die Kopplung mit dem BHKW sowie die Erprobung des Prototypen im KWK-Technikum am Standort Amberg.

2 Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung für den kleinen Leistungsbereich

Grundsätzlich sind sowohl Blockheizkraftwerke als auch Absorptionskältemaschinen bewährte Technologien und für einen weiten Leistungsbereich verfügbar. Für die effiziente Anwendung im kleinen Leistungsbereich ergeben sich jedoch Einschränkungen. BHKW im kleinen Leistungsbereich werden von einer Vielzahl von Herstellern angeboten, jedoch handelt es sich hierbei um standardisierte Produkte, bei denen keine direkte Rauchgasnutzung vorgesehen ist, was sowohl technisch als auch in Hinsicht auf die Gewährleistung und Zertifizierung herausfordernd ist. Außerdem stehen für diesen Leistungsbereich lediglich konventionelle einstufige Kältemaschinen zur Verfügung, was die Effizienz jedoch limitiert.

Durch die Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung durch den Gesetzgeber, bei der die Stromerzeugung mit Blockheizkraftwerken kleiner Leistung mit höheren Vergütungssätzen attraktiver gemacht wird, sind eine ganze Reihe Motor-BHKW auch mit kleiner Leistung auf dem Markt erhältlich. Der Großteil der angebotenen BHKW sind modifizierte Motoren von Fahrzeugherstellern (Ford, VW, MAN) oder Zulieferern (Kubota). Von einigen Firmen werden jedoch auch eigens für den Betrieb als BHKW entwickelte Motoren angeboten. Konzipiert sind sie für den Einsatz in Ein- und Mehrfamilienhäusern und kleinen und mittleren Betrieben (Hotels, Schwimmbäder, etc.).

Aktueller Stand der Technik bei Absorptionskältemaschinen sind ein- und zweistufige Absorptionskältemaschinen. Die Antriebswärme wird bei einstufigen AKM durch einen Heißwasser- oder Dampfmassenstrom zugeführt. Der EER (EER = Energy Efficiency Ratio; das Verhältnis von bereitgestellter Kälte zu der dafür notwendigen Antriebs-

wärme) liegt bei Standardbedingungen für die Kältebereitstellung (Kaltwasser 12/6 °C, Kühlwasser 27/32 °C) im Bereich von ca. 0,70 bis 0,75 (z. B. [1], [2]). Zweistufige AKM werden in der Regel direkt befeuert und erreichen durch die Nutzung von Antriebswärme höherer Temperatur EER-Werte von ca. 1,3 (z. B. [2]).

Als Antriebswärmemeterniveau für einstufigen Absorptionskältemaschine gelten 90 °C und für die Rücklauftemperatur 80 °C als Standard. Die Kältemaschine kann auch mit niedrigeren Temperaturen angetrieben werden, was ebenfalls zu geringeren Rücklauftemperaturen führt. Allerdings schrumpft mit dem Temperaturniveau der Antriebswärme die den Prozess antreibende Temperaturdifferenz zur internen Prozesstemperatur im Generator. Dies führt dazu, dass mit sinkenden Antriebs- und Rücklauftemperaturen die eingekoppelte Wärmemenge und damit auch die Kaltwasserleistung abnehmen. Bei Verminderung der Kälteleistung bleibt der EER anfangs annähernd konstant und fällt dann bei 30% Last auf etwa 0,5. Für den in diesem Forschungsprojekt relevanten Leistungsbereich von Anlagen mit Kälteleistungen im Bereich bis ca. 100 kW werden nur einstufige Kreisläufe angeboten.

Die Effizienz der Kälteerzeugung kann deutlich gesteigert werden, indem die Rauchgaswärme direkt auf dem vorliegenden Temperaturniveau zum Antrieb eines zweistufigen Kreislaufs genutzt wird. Diese Kreisläufe sind thermodynamisch sehr effizient, da die am Kondensator des Hochdruckteils abzuführende Wärme auf einem Temperaturniveau vorliegt, auf dem sie als Antriebswärme für den Generator des Niederdruckteils verwendet werden kann. Durch diese Nutzung der Abwärme der zweiten Stufe zum Antrieb der ersten Stufe steigt der EER für die eingesetzte Rauchgaswärme auf Werte von ca. 1,3 Entsprechende Forschungsarbeiten und deren Ergebnisse sind z. B. in [1], [2] oder [3] zu finden.

3 Anlagenkonzept

Dieses Anlagenkonzept mit Kombination von einstufigem und zweistufigem Absorptionskreislauf wird als zwei-/ einstufiger Kreislauf bezeichnet. Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung des Kreislaufkonzepts in einer Druck/Temperatur-Auftragung. Entsprechend den Beiträgen des einstufigen und des zweistufigen Anlagenteils ergibt sich für die Gesamtanlage eine Kältezahl (EER) um 0,9 und damit eine Steigerung der Kälteerzeugung um etwa 30 % im Vergleich zur Nutzung derselben BHKW-Wärme zum Betrieb einer einstufigen Kältemaschine.

Die direkte Kopplung von BHKW und Absorptionskälteanlage erfordert eine Anpassung der Abgasanlage und der Wärmeauskopplung des BHKW. Der Hochtemperaturgenerator (Generator 2, G₂) ist direkt an das Motorabgas zu koppeln und ersetzt den Standard-Abgaswärmeüber-

trager des BHKW. Gleichzeitig ist der Hochtemperatur-austreiber in die Prozessführung der kombinierten zwei-/ einstufigen AKM einzubinden. Dem Hochtemperaturaustreiber nachgeschaltet sind ein wassergekühlter Abgaswärmetauscher und ein Schalldämpfer.

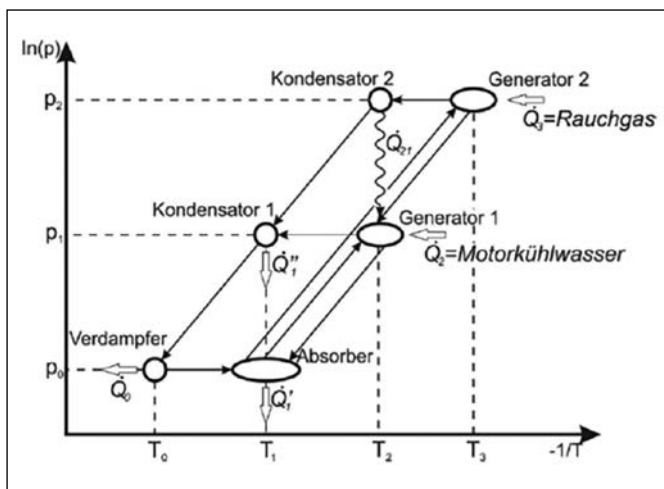


Abbildung 1: zwei-/einstufige Kälteanlage: Zufuhr von Antriebswärme Q_3 und Q_2 bei T_3 und T_2 (aus [1])

Vom BHKW wird das Rauchgas direkt in die Hochtemperaturstufe der AKM geführt. Aufgrund der hohen Temperaturen und zur Minimierung der thermischen Verluste ist diese Rauchgasleitung stark isoliert (siehe Abbildung 2). Es ist zu sehen, dass die Hochtemperaturstufe im Verhältnis zur Steigerung der Kälteleistung sehr kompakt ist. Die kompakte Bauweise in Form eines Siederohrgenerators wird einerseits durch die hohen direkt nutzbaren Abgastemperaturen ermöglicht und die sehr gute Wärmeübertragung auf der Prozessseite [3,4]. Die Hochtemperaturstufe ist apparativ im Vergleich zum Standardabgaswärmetauscher nicht deutlich aufwändiger.



Abbildung 2: BHKW, Rauchgasstrang und Hochtemperaturstufe der AKM

4 Leistungsmessung des KWKK-Systems

Es wurden Leistungsmessungen mit dem KWKK-System durchgeführt. Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen die wesentlichen Ergebnisse der Leistungsvermessung.

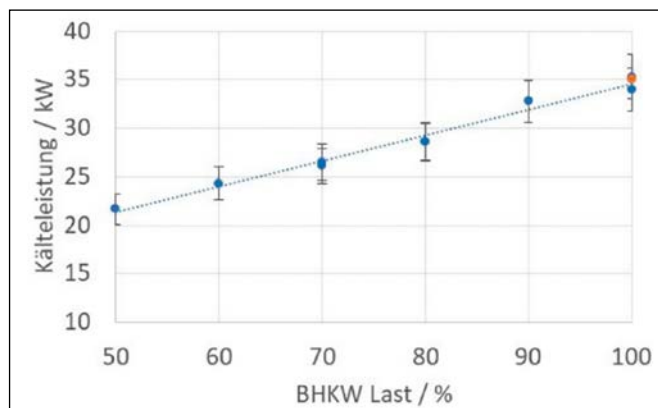


Abbildung 3: Kälteleistung (blau) in Abhängigkeit der BHKW Last und Auslegungspunkt (orange)

In Abbildung 3 ist die mit der Absorptionskältemaschine bereitgestellte Kälteleistung in Abhängigkeit von der BHKW-Last dargestellt. Dabei wird in jedem Betriebspunkt die gesamte durch das BHKW bereitgestellte Wärme vollständig zum Antrieb der AKM verwendet. Im Modulationsbereich des BHKW von 50 bis 100 % Last liegt die Kälteleistung zwischen 21,7 (50 % Last) und 34,6 kW (100 % Last). Die Kälteleistung verhält sich wie erwartet nahezu linear zur Antriebsleistung bzw. BHKW Last. Zusätzlich ist in Orange der Auslegungspunkt des Systems eingezeichnet. Es zeigt sich, dass die Messergebnisse aus der Versuchsanlage sehr gut mit dem Erwartungswert übereinstimmen.

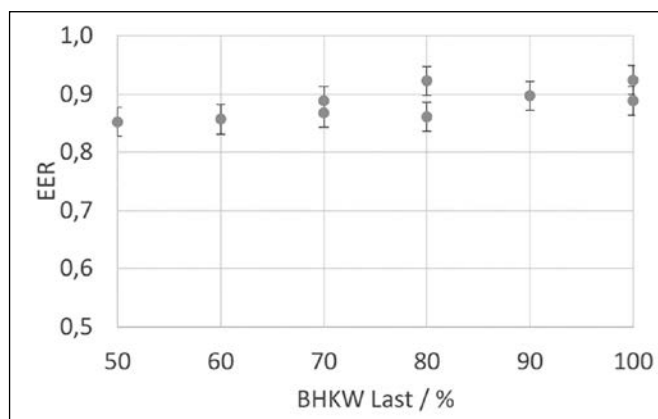


Abbildung 4: EER in Abhängigkeit der BHKW-Last

Dies zeigt sich auch im Verhältnis von Kälteleistung zu Antriebswärme (EER), das in Abbildung 4 dargestellt ist. Im Volllastbetrieb liegt der EER über 0,9. Es ist mit sinkender BHKW-Last eine leicht absteigende Tendenz im EER zu erkennen. Dies resultiert aus den in den Lösungskreisläufen auftretenden Irreversibilitäten, die über den gesamten Lastbereich konstant bleiben und sich deshalb bei kleinen Kälteleistungen stärker auswirken.

Die Messergebnisse zeigen, dass das Anlagenverhalten sehr gut mit dem Auslegungswert übereinstimmt und die Erwartungen in die Effizienzsteigerung durch die mehrstufige AKM erfüllt.

5 Fazit

Das Projekt „Hocheffiziente Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung für Industrie und Gewerbe“ hatte zum Ziel ein System zu entwickeln und im Labor zu testen, dass die Effizienz der Kältebereitstellung im Bereich kleiner Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungssysteme (20 kW elektrisch) um 20 % steigert.

Hierfür wurde eine zwei-/einstufige Absorptionskältemaschine (AKM) entwickelt, die das Rauchgas eines entsprechend modifizierten BHKW direkt zum Antrieb bei ca. 500 °C nutzt und auch durch das Heißwasser

des BHKW angetrieben wird. Die entwickelte AKM wurde gebaut und in eine Teststandumgebung integriert. Die Vermessung der AKM hat gezeigt, dass die erwartete Effizienzsteigerung realisiert werden konnte und der apparative Aufwand für die mehrstufige Ausführung den einer Standardausführung nicht deutlich übersteigt, so dass zudem mit einer attraktiven Wirtschaftlichkeit gerechnet werden kann. Mit einer Kälteleistung von 34,7 kW bei einer Antriebsleistung von 38,3 kW wurde ein EER von 0,91 erreicht. Im nächsten Schritt muss das System in realen Anwendungen getestet werden.

Referenzen:

- [1] Trane Roggenkamp, Produktkatalog 2022, abgerufen am 06.07.2022
https://trane-roggenkamp.de/wp-content/uploads/2022/05/Elektronischer_Produktkatalog_2022.pdf
- [2] Wuschig, Christian, et al. Entwicklung einer hocheffizienten Kraft-Wärme-Kälte-Anlage – EFFKKII : öffentlicher Schlussbericht : Teilprojekt „Kopplung von BHKW und zweistufiger Absorptionskältemaschine mit separater Nutzung von Rauchgas und Niedertemperaturwärme“ : Teilprojekt „Konstruktion, Bau und Zusammenbau von Komponenten“ : Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2012–31.10.2017. [Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern), Bereich Energiespeicherung], 2018, DOI:10.2314/GBV:1036476952.
- [3] Plura, Stefan: Entwicklung einer zweistufigen Absorptionskältemaschine zur effizienten Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung, Technische Universität München, Fakultät Maschinenwesen, Dissertation, 2008
- [4] Plura, S., Kren, C., Schweigler, C.: Efficient and flexible tri-generation with two-stage absorption chiller, ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, IMECE 2006-15900, 05.-10. November 2006, Chicago, Illinois 2006, USA

Projektpartner:

ZAE Bayern – Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V.

Fördergeber:



Bayerisches Staatsministerium für
Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie

Kontakt:



Andreas Röhl, M.Eng.

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

a.roell@oth-aw.de



Dipl.-Ing. Christian Wuschig

ZAE Bayern – Energiespeicherung
Walther-Meißner-Straße 6
85748 Garching

christian.wuschig@zae-bayern.de



Dr.-Ing. Manuel Riepl

ZAE Bayern – Energiespeicherung
Walther-Meißner-Straße 6
85748 Garching

manuel.riepl@zae-bayern.de



Prof. 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

Methanemissionen und ihr Einfluss auf die Treibhausgasbilanz von Erdgas-Blockheiz- kraftwerken

Zusammenfassung

Am Kompetenzzentrum für Kraft-Wärme-Kopplung wurden Berechnungen durchgeführt, die eine Einordnung erdgasbetriebener Blockheizkraftwerke anhand ihrer Treibhausgasbilanz hinsichtlich der Emissionsminderung im Energiesektor ermöglichen sollen. Dafür wurden die Emissionsfaktoren aus der Energieerzeugung mit Erdgas-BHKW prognostizierten Strom- und Wärmemixen für das Jahr 2030 gegenübergestellt.

Die Kraft-Wärme-Kopplung erreicht durch die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme hohe Gesamtwirkungsgrade und schöpft so den Energieinhalt der eingesetzten Brennstoffe bestmöglich aus. Die Erhöhung der Effizienz ist ein erster Schritt zur Verringerung der Emissionen. Der Energiesektor ist vor dem Hintergrund der deutschen Klimaziele 2045 [1] zu einer Reduzierung der Treibhausgasemissionen bei gleichzeitiger Sicherstellung der Versorgungssicherheit aufgefordert. Erdgas gilt – als fossiler Energieträger mit den geringsten Treibhausgasemissionen bei der Verbrennung – als Brückentechnologie für die Transformation des Energiesystems (zumindest vor dem Februar 2022). Aktuell steht die Klimaverträglichkeit von Erdgas zur Diskussion, da bei der Gewinnung und auf dessen Transportweg vermehrt Leckagen festgestellt werden und der Treibhausgaseffekt der Methanemissionen bisher womöglich unterschätzt wurden. Es stellt sich die Frage, ob mit dem Energieträger Erdgas in Blockheizkraftwerken (BHKW) mittel- und langfristig ausreichend geringe CO₂-Emissionsfaktoren erreicht werden können, um die Treibhausgasemissionen im Strom- und Wärmesektor wirksam zu reduzieren.

Abstract

Researchers at the Center of excellence for cogeneration technologies carried out calculations in order to classify the emissions of natural gas operated cogeneration units regarding their greenhouse gas (GHG) balance. In order to do that, the emissions of natural gas CHP plants were compared to the emissions of conventional heat and electricity producers (electricity mix and heat mix for the year 2030).

Cogeneration units produce heat and electrical power in one process and therefore has a very high efficiency and so very low greenhouse gas emissions per produced amount of energy. The question is, if CHP units, that run with natural gas, help to reduce the greenhouse gas emissions of the german energy sector in order to meet the goal of greenhouse neutrality in 2045.

Because natural gas has the lowest GHG emissions compared to other fossil fuels it is seen as bridge technology until enough renewable energy producers are installed (especially before february 2022). But it is discussed that due to leakages at production and transport facilities the emission of methane is so high that natural gas has even higher GHG emissions than e.g. coal that is used in power plants. The calculations are supposed to show quantifiable answers on these questions.

1 Hintergrund: Treibhausgaswirkung von Methan

Erdgas besteht zu einem Großteil aus Methan, dem zweitwichtigsten Treibhausgas nach CO₂. Anders als CO₂ ist Methan ein kurzlebigeres und stärkeres Treibhausgas. Damit die Treibhausgaswirkungen verglichen werden können, werden Treibhausgase mit Faktoren in CO₂-Äquivalente umgerechnet. Die Treibhausgaswirkung von fossilem Methan ist nach Angaben des IPCC AR5 [2] in den ersten 20 Jahren 85-mal stärker (Global Warming Potential für 20 Jahre: GWP₂₀) als dieselbe Menge an CO₂ und 30-fach stärker in einem Zeitraum von 100 Jahren (GWP₁₀₀). Hieraus ergibt sich die Kernproblematik in der Diskussion um Erdgas: Welcher Zeitraum der Treibhausgaswirkung wird für die Umrechnung in CO₂-Äquivalente angesetzt? Meistens werden die Treibhausgase mit dem 100-jährigen Faktor umgerechnet, teilweise werden auch noch Faktoren aus älteren IPCC-Berechnungen verwendet, die für Methan einen Faktor von 21 angegeben hatten. Dabei wird jedoch die kurzfristige Treibhausgaswirkung vernachlässigt, die von Bedeutung für die Stabilität des Klimasystems und der Kippunkte sein kann. In die folgenden Berechnungen der Treibhausgasemissionen von Erdgas-BHKW wurde daher die Treibhauswirkung von Methan sowohl mit dem GWP₁₀₀ als auch dem GWP₂₀ in CO₂-Äquivalente übersetzt.

2 Treibhausemissionskette von Erdgas-BHKW

Bei fossilen Energien werden Treibhausgasemissionen (hauptsächlich Methan und CO₂) bei Förderung, Speicherung, Transport und Verbrauch freigesetzt. Je nach Herkunft, Fördermethode und Transport (Erdgasvorkette) variieren die freiwerdenden Treibhausgase. Bei der Förderung entweicht beim Fracking mehr Methan als bei konventioneller Förderung. Entlang des Transportweges wird Methan durch Leckagen in Pipelines frei, noch emissionsintensiver ist der Transport von Flüssigerdgas per Schiff. Die Vorkettenemissionen von Erdgas, die bei Förderung, Speicherung und Transport entstehen, unterscheiden sich stark je nach Studie durch die getroffenen Annahmen über Leckageraten, Bilanzgrenzen und Treibhausgasfaktoren. Beim Einsatz von Erdgas in Kraftwerken spielt zudem die Effizienz des Kraftwerks eine Rolle, um den Energieträger bestmöglich auszunutzen. Insgesamt ist festzuhalten, dass wenn vermehrt Methan bei Förderung, Transport und Nutzung von Erdgas über Leckagen austritt, unter Umständen kein Vorteil mehr gegenüber anderen fossilen Energieträgern gewährleistet ist.

Bei der Verbrennung von Erdgas entsteht im Vergleich zu anderen fossilen Kraftstoffen auf den Heizwert bezogen am wenigsten CO₂. Die rein verbrennungsbedingten CO₂-Emissionen belaufen sich auf 201 g/kWh und machen den größten Anteil der Treibhausgasemissionen bei der Nutzung von Erdgas aus.

Beim Betrieb von Gasmotoren tritt Erdgas aber auch unverbrannt mit dem Abgas aus – als sog. Methanschluß. Mit der Novellierung der 44. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchV) wurde mit dem Gesamtkohlenstoff organischer Stoffe erstmals ein Abgasgrenzwert eingeführt, der den Methanschluß implizit beinhaltet. Dieser liegt bei 1.300 mg/m³ für Magermotoren und bei 300 mg/m³ für Lambda-1-Motoren. Lambda-1-Motoren setzen verfahrensbedingt weniger unverbranntes Methan frei und haben einen hohen Gesamtwirkungsgrad, jedoch bei niedrigerem elektrischem Wirkungsgrad. Demgegenüber weisen Magermotoren in der Regel einen höheren elektrischen Wirkungsgrad auf, was aber mit Nachteilen beim Gesamtwirkungsgrad und einem stärkeren Methanschluß einhergeht. Um den Einfluss der Methanemissionen herauszuarbeiten, wurden daher beide Motortypen in einer theoretischen Betrachtung gegenübergestellt. Dabei wurde angenommen, dass die aktuellen Grenzwerte für Gesamtkohlenstoff voll ausgereizt werden. Die Annahmen zu den Motortypen für die Berechnung sind in Tabelle 1 angegeben und beruhen auf dem aktuellen Stand der Technik. Der maximale Methanschluß, bei dem der aktuelle Grenzwert nach 44. BImSchV noch eingehalten werden kann, wurde nach [3, S. 243-244] berechnet. Damit ist in der Modellbetrachtung der Treibhausgasemissionen der Methanschluß anhand des Grenzwertes bei beiden Motortypen maximal gewählt, wobei er in der Praxis niedriger liegen kann. Die Daten der Vorkettenemissionen und der Verbrennungsemissionen stammen aus GEMIS (Globales Emissionsmodell integrierter Systeme) [4]. Für die zwei verschiedenen Erdgas-BHKW-Motoren werden die Emissionsfaktoren für Strom und Wärme unter Verwendung des GWP₂₀ und GWP₁₀₀ aus dem AR5 des IPCC [2] berechnet.

Tabelle 1: Annahmen für die Berechnung – Motoren und Emissionen

	Lambda-1-Motor	Magermotor (λ = 1,8)
Elektrischer Wirkungsgrad η_{el}	37,3 %	39,8 %
Thermischer Wirkungsgrad η_{th}	57,7 %	48,3 %
Carnot-Wirkungsgrad η_c	16,97 %	
Gesamt-C-Grenzwert	300 mg/m ³	1300 mg/m ³
Resultierender maximaler Methanschluß	9,4 g CO ₂ e/kWh (GWP ₁₀₀) 26,5 g CO ₂ e/kWh (GWP ₂₀)	40,5 g CO ₂ e/kWh (GWP ₁₀₀) 115 g CO ₂ e/kWh (GWP ₂₀)
Vorkettenemissionen	32 g CO ₂ e/kWh (GWP ₁₀₀) 54 g CO ₂ e/kWh (GWP ₂₀)	
Verbrennungsemissionen	201 g CO ₂ /kWh	
Treibhausgasfaktor Methan: GWP ₂₀ =85 und GWP ₁₀₀ =30 für fossiles Methan aus AR5 IPCC		

3 Berechnungsmethodik und Allokation der Treibhausgasemissionen für Strom und Wärme

Zur Bildung der Gesamtbilanz des Energieträgers Erdgas in BHKW-Anlagen werden die Vorkettenemissionen, die Verbrennungsemissionen und der Methanschluß eines typischen Lambda-1-Motors und eines Magermotors als CO₂-Äquivalente aufsummiert. Alle Annahmen und Werte der Berechnung sind der Tabelle 1 zu entnehmen.

In KWK-Anlagen werden aus dem Brennstoff gleichzeitig die Produkte Strom und Wärme gewonnen. Daher müssen die entstandenen Emissionen diesen Produkten zugeteilt werden, wofür es verschiedene Allokationsmethoden gibt. Mit ihnen lassen sich die spezifischen Emissionsfaktoren für Strom und Wärme pro erzeugter Kilowattstunde anhand des thermischen und elektrischen Wirkungsgrades errechnen. Die verschiedenen Allokationsmethoden gewichten Strom und Wärme unterschiedlich, weshalb die gewählte Methode einen starken Einfluss auf die resultierenden spezifischen Emissionsfaktoren hat. Die exergetische Methode weist dem ökonomisch und thermodynamisch höherwertigen Strom den Großteil der Emissionen zu, während die energetische Methode die Energieformen Strom und Wärme gleich gewichtet. Die finnische Methode stellt einen Mittelweg dar und bezieht den Wirkungsgrad der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme mit ein. Für die nachfolgenden Berechnungen wurde die exergetische Methode angewendet, deren Berechnungsformeln in Tabelle 2 zu finden sind.

Tabelle 2 Exergetische Allokation zur Berechnung des spezifischen Emissionsfaktors für Strom und Wärme

Exergetische Allokationsmethode		
Spezifisch elektrischer Emissionsfaktor in $g\ CO_2e/kWh_{el}$	$c_{CO_2spez.,el.}$	$\frac{c_{CO_2spez.,Gas}}{\eta_{el} + \eta_c \eta_{th}}$
Spezifisch thermischer Emissionsfaktor in $g\ CO_2e/kWh_{th}$	$c_{CO_2spez.,th.}$	$\frac{c_{CO_2spez.,Gas}}{\eta_{el}/\eta_c + \eta_{th}}$
$c_{CO_2spez.,Gas} = \text{Heizwertbezogener Emissionsfaktor in } g\ CO_2e/kWh$		

4 Ergebnisse

Die resultierenden Emissionsfaktoren beider BHKW-Typen werden in Bild 1 am Beispiel der exergetischen Allokation für Strom und Wärme den jeweiligen prognostizierten Emissionsfaktoren im Jahr 2030 gegenübergestellt. Der Vergleich der spezifischen Emissionsfaktoren nach der exergetischen Allokation für Strom und Wärme von Erdgas-BHKW erfolgt mit prognostizierten Emissionsfaktoren des Öko-Instituts für Strom und Wärme im Jahr

2030 [4] und einem prognostizierten Verdrängungsstrommix von Prognos [3] für 2030. Der Verdrängungsstrommix setzt sich hauptsächlich aus fossilen Kraftwerken nach der Merit-Order zusammen. Im Diagramm wird deutlich, dass die verbrennungsbedingten CO₂-Emissionen zwar den größten Anteil an den Gesamtemissionen haben, der Einfluss des Methanschlußes jedoch erheblich ist. Die Emissionen des Magermotors liegen aufgrund des höher angenommenen Methanschlußes höher als die des Lambda-1-Motors. Bei Verwendung des GWP₂₀ wird dieser Effekt am deutlichsten: Hier liegen die strombezogenen Gesamtemissionen inklusive des Methanschlußes höher als die des prognostizierten Verdrängungsmixes im Jahr 2030, d. h. es würde stromseitig keine Nettoeinsparung von Treibhausgasen mehr erzielt werden. Wird der 100-jährige Betrachtungszeitraum zugrunde gelegt, ergeben sich für Erdgas-BHKW sowohl im Vergleich mit dem Verdrängungsmix als auch mit dem Wärmemix Emissionseinsparungen. Allerdings liegen die stromseitigen Emissionen auch in diesem Szenario weiterhin höher als der prognostizierte durchschnittliche Emissionsfaktor für den Strommix 2030. Eine gezielte Fahrweise von Erdgas-BHKW zur Abdeckung der Residuallast ohne Verdrängung erneuerbaren Energien im elektrischen Netz ist daher essenziell, um auch mittel- und langfristig einen Emissionsvorteil zu erzielen. Wärmeseitig bieten Erdgas-BHKW auch im Jahr 2030 in allen betrachteten Fällen einen Emissionsvorteil gegenüber dem prognostizierten Wärmemix.

Lambda-1-Motoren sind durch den geringeren Methanschluß weniger emissionsintensiv als Magermotoren. Bei Letzteren können daher Maßnahmen zur Reduzierung des Methanschlußes durch Abgasnachbehandlungssysteme wie Methankatalysatoren besonders wirksam dazu beitragen, dass die Treibhausgasemissionen reduziert werden. Kleinere Einsparungen lassen sich außerdem durch die Steigerung des elektrischen und thermischen Wirkungsgrades oder den Bezug von Erdgas mit geringeren Vorkettenemissionen erzielen. Größere Verbesserungen der Treibhausgasbilanz von Erdgas-BHKW kann mittelfristig die Zumischung von grünem Wasserstoff oder Biomethan bewirken. So ließen sich die Emissionen aus Vorkette, Verbrennung und Methanschluß für beide Motortypen vermindern. Die Beimischung von grünem Wasserstoff in das Erdgassystem ist ein Weg der nachhaltigen Transformation des Energiesystems, die die Chance hat, den Lock-in-Effekt anderer fossiler Energien zu umgehen. Allerdings macht z. B. ein Volumenanteil von 20 % Wasserstoff zunächst nur eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von ca. 7 % möglich. Ziel sollte also der Reinbetrieb mit grünem Wasserstoff bei vollständiger Defossilierung sein, damit weniger CO₂ und CO₂-äquivalente Emissionen in der gesamten Emissionskette freigesetzt werden.

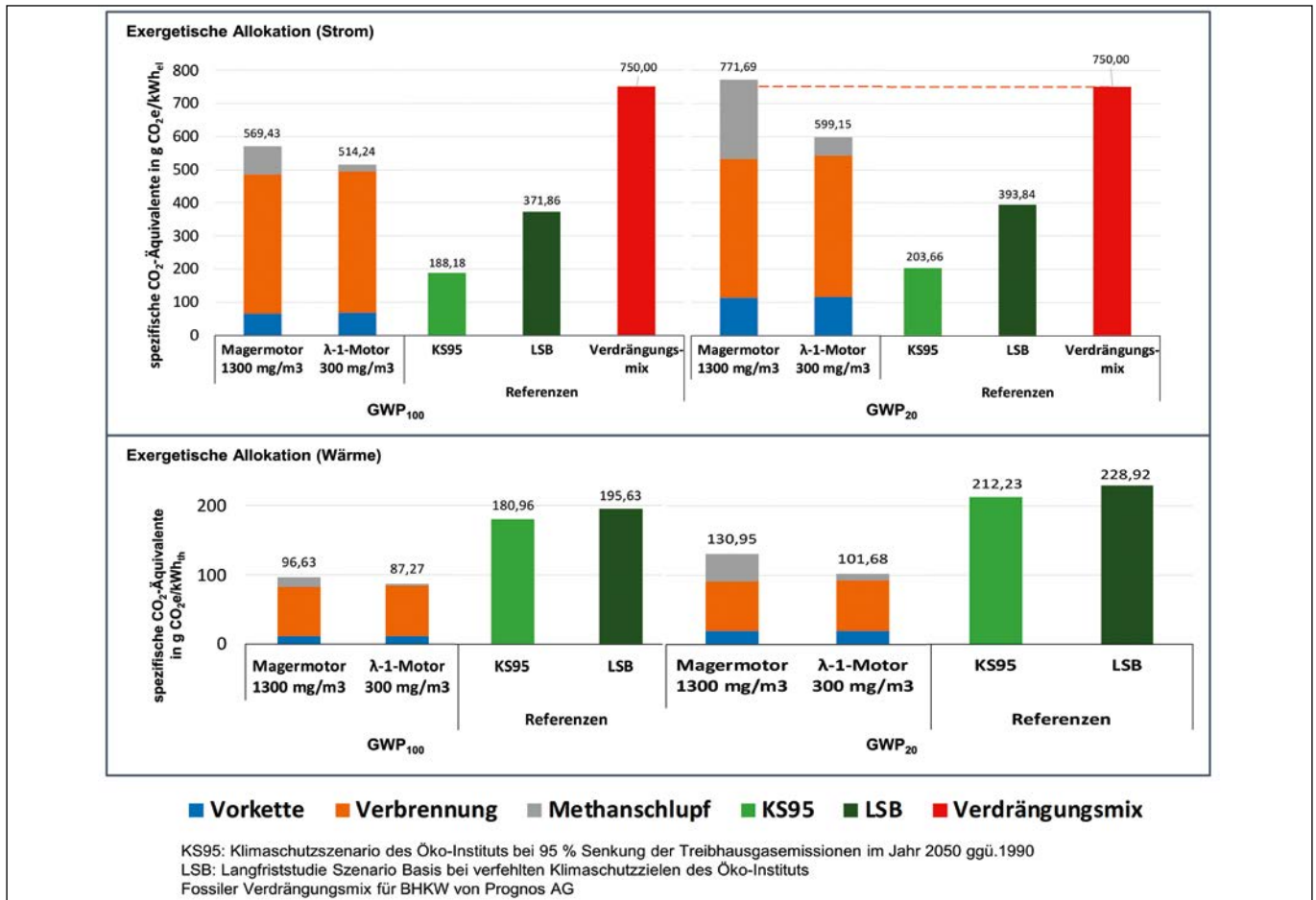


Abbildung 1: Spezifische Emissionsfaktoren für Strom und Wärme für BHKW mit Magermotor und λ-1-Motor sowie Treibhausgaspotentiale (GWP) und Vergleich mit prognostizierten Emissionsfaktoren der Sektoren

5 Fazit

Eine Bewertung des Einsatzes von Erdgas-BHKW im Jahr 2030 ist stark von den getroffenen Annahmen sowie der Allokationsmethode abhängig. Großen Einfluss auf die Ergebnisse der CO₂-äquivalenten Emissionen hat die Wahl des GWP für Methan. Mit GWP₂₀ wird die Treibhausgaswirkung von Methan höher gewichtet und die CO₂-äquivalenten Emissionen eines Erdgas-BHKW sind deutlich größer als mit GWP₁₀₀. Wenn auch unter den strengsten Annahmen noch Einsparungen erzielt werden sollen, müssen alle Möglichkeiten genutzt werden, um die Emissionsbilanz weiter zu verbessern. Dazu zählt

v.a. die Reduzierung der Methanemissionen bei Magermotoren und eine gezielt an der elektrischen Residuallast orientierte Fahrweise. Unter diesen Bedingungen können Erdgas-BHKW auch in 2030 noch Emissionsvorteile erzielen. Im Vergleich mit anderen fossilen Optionen stellen Erdgas-BHKW daher aufgrund ihrer hohen Gesamteffizienz und ihrer guten Anpassungsfähigkeit an klimaneutrale Brennstoffe, wie z. B. grüner Wasserstoff, eine wichtige Brückentechnologie dar, die den Pfad zu einem klimaneutralen Energiesystem ebnet und bei Umstellung auf erneuerbare Energieträger auch darüber hinaus noch genutzt werden kann.

Referenzen:

- [1] Bundesregierung, Generationenvertrag für das Klima: Klimaschutzgesetz 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672> (Zugriff am 16. August 2021).
- [2] IPCC, Hg., „Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change“, United Kingdom and New York, 2013.
- [3] Prognos AG, Fraunhofer IFAM, Öko-Institut e.V., BHKW-Consult und Stiftung Umweltenergierecht, „Evaluierung der Kraft-Wärme-Kopplung: Analysen zur Entwicklung der Kraft-Wärme-Kopplung in einem Energiesystem mit hohem Anteil erneuerbarer Energien“, 25. Apr. 2019.
- [4] GEMIS 5.0 – Globales Emissions-Modell integrierter Systeme, 2019.

Kontakt:



Regina Trötsch, M.Eng.

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

r.troetsch@oth-aw.de



Max Becker, M.Eng.

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

ma.becker@oth-aw.de



Prof. 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

Europäische Klimaschutzinitiative – EUKI

Erstes grenzüberschreitendes
tschechisch-deutsches
Energieeffizienznetzwerk

Laura Weber, M.Eng.

Zusammenfassung

Übergeordnet zielt das Projekt „Energy Efficiency Network – a cross-border energy consultant training“ auf die Schaffung eines grenzüberschreitenden Energieberater-Netzwerkes zwischen Deutschland und der Tschechischen Republik ab. Eine Kernaktivität ist dabei der Transfer des sehr erfolgreichen deutschen Formats der Energieeffizienznetzwerke (EEN) nach Tschechien. Aktuelle Themen der Energieeinsparmöglichkeiten und der Energieeffizienz sollen an die wichtigen Akteure und Entscheidungsträger aus der Industrie, der Kommunen und aus dem öffentlichen Sektor getragen werden. Im Rahmen des Projekts soll das erste EEN auf tschechischer Seite gegründet und in die tschechische Förderlandschaft aufgenommen werden. Workshops und Studienaufenthalte diesseits und jenseits der Grenze sollen einen regen Austausch und das Netzwerken ermöglichen. Begleitende Treffen, Projektvorstellungen, thematische Veranstaltungen im Rahmen der EUKI-Community runden das Projekt ab. Innerhalb der Projektlaufzeit von 27 Monaten soll das erste tschechische Energieeffizienznetzwerk in Tschechien gegründet werden. Lead Partner ist dabei die Prager Czech Technical University (CTU).

Abstract

The overall objective of the project “Energy Efficiency Network – a cross-border energy consultant training” is to create a cross-border energy consultant network between Germany and the Czech Republic. A core activity is the transfer of the very successful German format of energy efficiency networks (EEN) to the Czech Republic. Current topics of energy saving possibilities and energy efficiency are to be brought to the attention of important actors and decision makers from industry, municipalities and the public sector. Within the framework of the project, the first EEN on the Czech side is to be founded and included in the Czech funding landscape. Workshops and study visits on both sides of the border should enable a lively exchange and networking. Accompanying meetings, project presentations and thematic events within the EUKI community will round off the project. Within the project duration of 27 months, the first Czech energy efficiency network is to be established in the Czech Republic. The lead partner is the Czech Technical University (CTU) in Prague.

1 Das Projekt – Erstes Energie-Effizienz-Netzwerk in Tschechien

Im Rahmen der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Europäischen Klimaschutzinitiative (EUKI) haben sich die Prager Technische Universität (CTU), die OTH Amberg-Weiden und die Association of Energy Service Providers (APES) in einem Projektkonsortium zusammengeschlossen, um Energieeinsparprojekte in Kommunen und Unternehmen in Tschechien voranzutreiben. Im Jahr 2019 wurde die

Projekt-Idee “Energy Efficiency Network – a cross-border energy consultant training” (siehe Abbildung 1) im bereits seit vielen Jahren bestehenden Tschechisch-Deutschen Partnernetzwerk entwickelt. Dabei sollen die in Bayern und Deutschland sehr erfolgreichen Energieeffizienz-Netzwerke auch im Nachbarland Tschechien etabliert werden.

Vor dem Hintergrund, die Klimaschutzziele der EU zu unterstützen, steht bei der EUKI die Stärkung klimapolitischer Kapazitäten in den EU-Mitgliedstaaten durch den

Ausbau einer Vielzahl von Kooperationen zwischen staatlichen, kommunalen, zivilgesellschaftlichen, wirtschaftlichen und bildungspolitischen Akteuren im Fokus.

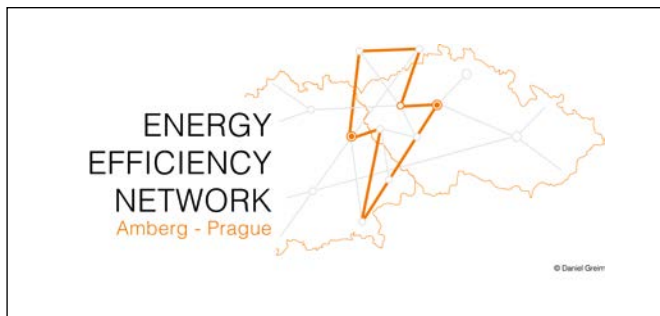


Abbildung 1: Logo Energy Efficiency Network

Innerhalb der Projektlaufzeit werden in beiden Ländern Workshops, Veranstaltungen, Anlagenbesichtigungen und Projekttreffen durchgeführt. Neben der grenzüberschreitenden Vernetzung verschiedener Akteure aus den Kommunen ist das übergeordnete Ziel die Gründung des ersten Energie-Effizienz-Netzwerks in Tschechien. Fördermöglichkeiten auf tschechischer Seite sollen ausfindig gemacht werden, um die EEN auch dauerhaft in Tschechien zu etablieren. Deswegen ist auch der Zusammenschluss mit Vertretern aus der Regierung von Bedeutung.

Die Netzwerkbetreuung übernehmen externe Berater, außerdem wird hier die notwendige Expertise in der Durchführung von Energieeffizienz-Projekten und Einsparpotentialen in das Konsortium eingebracht. Das Institut für Energietechnik an der OTH Amberg-Weiden (IfE) ist dabei prädestiniert für diese Dienstleistung, da es bereits eine Vielzahl von Energieeffizienz-Netzwerken in Bayern betreut.

2 Projektaktivitäten

Aufgrund von Covid 19 war es eine große Herausforderung, die – noch vor Corona geplanten – Projektpläne in die Tat umzusetzen. Vieles musste in angepasster Form umgesetzt oder verschoben werden. Dabei entwickelte das Konsortium neue Formate, um auch im Krisenmodus die grenzüberschreitenden Themen behandeln zu können. Online-Treffen und virtuelle Touren durch innovative Anlagen traten an die Stelle von Austausch in Präsenz und Besichtigungen vor Ort. Dabei wurden stets aktuelle Themen behandelt, die in Tschechien und Deutschland herausfordernd sind oder große Verbesserungspotentiale bergen.

Innerhalb des ersten Online-Workshops im Frühjahr 2021 erläuterte Dipl.-Ing. Max Cornrad vom IfE das Konzept der Effizienznetzwerke und die Vorteile und Möglichkeiten für die Teilnehmenden. Jens Machold, Bürgermeister der Gemeinde Wolnzach, teilte seine langjährigen und sehr positiven Netzwerk-Erfahrungen mit. Von tschechischer Seite referierte der Geschäftsführer der APES, Radim Ko-

houtek, über Energiedienstleistungen mit Einsparungsgarantie (EPC), welche auch in den zukünftigen Netzwerken eine zentrale Rolle einnehmen werden. Milan Vilch als Energiemanager der Region Pardubice und Pavel Drahovzal, Bürgermeister der Gemeinde Velký Osek, rundeten die Veranstaltung mit ihren Vorträgen und Einblicken aus tschechischer Sicht ab. Schon bei diesem Kick-off der simultanübersetzten Veranstaltung nahmen 62 Interessierte teil.

Im Fokus des zweiten Online-Workshops des Projekts ging es um die Umsetzung von Energiesparprojekten in der Tschechischen Republik und in Bayern. Dabei berichten die Referenten, sowohl von tschechischer wie auch von bayerischer Seite, über ihre Erfahrungen und die Schwierigkeiten bei der erfolgreichen Umsetzung von Energiesparprojekten. “Best and worst practice” – Beispiele führten zu einem kurzweiligen Austausch und angeregter Diskussion unter den Teilnehmenden.

Beim dritten Online-Workshop des Netzwerks standen virtuelle Touren durch verschiedene innovative Energieeinsparprojekte auf dem Programm. Die 3D-Rundgänge ermöglichten den Teilnehmenden hinter die Kulissen innovativer Projekte und spannenden Konzepte zu blicken – von der Wasserstoffnutzung in KWK-Anlagen beim Stadtwerk Haßfurt bis zur nachhaltigen Prozessenergiebereitstellung. Sechs kommunale Projekte aus Tschechien und Bayern wurden dabei virtuell – aber doch fast so, als wäre man mittendrin – vorgestellt.

An der Technischen Prager Universität konnte ein erstes Präsenz-Vernetzungstreffen bereits 2021 realisiert werden, wiederum Corona geschuldet, jedoch ausschließlich mit tschechischen Teilnehmenden (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2: Netzwerktreffen an der CTU

Im Oktober 2022 konnte nun erstmals seit Projektstart eine grenzüberschreitende Tagung in Präsenz stattfinden. Als für bayerische und tschechische Kommunen spannendes aktuelles Thema hat sich die Abfall- und Abwasserwertung herauskristallisiert. Die Tagung konnte beim Zweckverband Müllverwertung Schwandorf (ZMS) durchgeführt werden. Herr Knoll (siehe Abbildung 3), der Verbandsdirektor des Zweckverbands, hielt einen um-

fassenden Vortrag über das Werk und gab uns eine eindrucksvolle Führung durch die Anlage (siehe Abbildungen 4,5,6). Das Müllheizkraftwerk (MHKW) Schwandorf befindet sich auf höchstem technischen Stand. Im Jahr 2021 konnten 455.121 Tonnen Müll durchgesetzt werden, dessen Energieinhalt umgerechnet ca. 137 Millionen Liter Heizöl substituieren würde.



Abbildung 3: Geschäftsführer des ZMS, Herr Knoll, führt durch die Anlage



Abbildung 4: Tagungsraum beim ZMS



Abbildung 5: Müllbunker beim ZMS



Abbildung 6: Brennraum des MHKW beim ZMS

Aus Tschechien waren neben Vertretern und Vertreterinnen von Kommunen auch Projektleiter vor Ort, die sich über Planung, Bau und Betrieb einer solch hochinnovativen Müllverwertungs-Anlage informierten. Auch die Gäste gaben spannende Einblicke in ihre Arbeit, Herr Dalibor Roik (ČEZ, a.s.), Herr Slavoj Zemánek (United Energy a.s.) und Herr Tomáš Miklík (SAKO Brno, a.s.) stellten ihre Pläne zur thermischen Abfallverwertung vor. In der Diskussion wurden die verschiedenen auf Abfall und Abwasser bezogenen Herausforderungen beider Länder diskutiert. So ist besonders der zeitnahe Ausbau von Kapazitäten zur thermischen Verwertung von Abfall in Tschechien von großer Bedeutung, da in den kommenden Jahren die De-

ponierung von Müll verboten wird. In Deutschland drängt sich aktuell insbesondere die Frage der Klärschlammverwertung auf, da Klärschlamm ab 2029 bzw. 2032 nicht mehr zur Düngung auf Felder ausgebracht werden darf. Außerdem muss zukünftig der Phosphor aus dem angefallenen Schlamm zurückgewonnen werden. Für dieses Themengebiet ist Herr Gonschorek vom IfE zuständig. Er rundete die Veranstaltung mit einem sehr informativen Vortrag und spannenden Beispielen aus der Praxis ab.

4 Hintergrund: Energieeffizienz-Netzwerke – eine Erfolgsgeschichte

Die Initiative Energieeffizienz-Netzwerke wurde in Deutschland im Jahr 2014 ins Leben gerufen, mittlerweile stellt sie eines der erfolgreichsten Instrumente im Aktionsprogramm Klimaschutz der Bundesregierung dar. Bis 2020 wurden 278 Netzwerke in das Förderprogramm aufgenommen und etabliert, in deren Rahmen eine CO₂-Einsparung von 5 Mio. Tonnen bis Ende 2020 ermöglicht wurde. Die erfolgreiche Initiative soll in den kommenden Jahren weiter ausgebaut werden. An den EEN beteiligen sich Akteure aus Unternehmen und Kommunen, übergeordnetes Ziel ist dabei Klimaschutz- und Energieeffizienzpotentiale in Industrie, Handwerk, Handel und Gewerbe, aber insbesondere auch in der Energieversorgung von Kommunen, herauszustellen, deren Umsetzung innerhalb

der EEN von Energieexperten begleitet werden. Die Teilnahme an einem Energieeffizienz-Netzwerk ermöglicht es Unternehmen, wirtschaftliche Investitionen in Energieeffizienz auf solider Datenbasis zu planen und effizient umzusetzen. Der gemeinsame Erfahrungsaustausch erleichtert die Umsetzung. Das senkt den Energieverbrauch, trägt zur Reduzierung der Energiekosten bei – und schafft Wettbewerbsvorteile. Gleichzeitig können sich die Unternehmen in einem wichtigen gesellschaftspolitischen Kontext positionieren und Engagement für Klimaschutz und technische Innovationen demonstrieren. Außerdem profitieren alle Beteiligten von der Vernetzung mit Politik, Wirtschaft und weiteren Akteuren vor Ort. Ein konkretes Beispiel ist das LEENetzwerk für Unternehmen in Bayern, bei welchem sich 11 Unternehmen in Ostbayern im Jahr 2015 zusammengeschlossen haben und somit schon auf eine langjährige Erfolgsgeschichte zurückblicken können. Innerhalb von 4 Jahren konnten dabei 36 Energieeinsparmaßnahmen umgesetzt und knapp 10.000 Tonnen CO₂ eingespart werden, das bedeutet eine durchschnittliche Energieeinsparung pro Unternehmen von ca. 3000 MWh. Der Großteil der Unternehmen beurteilten das Kosten-Nutzen-Verhältnis im Rahmen der EEN bestens und alle Beteiligten gingen Anfang 2020 mit hohen Erwartungen und vielen Energieeinsparprojekten in die Neuauflage des Netzwerks.

Projektpartner:

Association of Energy Service Providers, APES, Prague, Czech Republic
Czech Technical University in Prague (CTU), Prague – Dejvice, Czech Republic

Fördergeber:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



Europäische
Klimaschutzinitiative
EUKI


Kontakt:



Laura Weber, M.Eng.

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

la.weber@oth-aw.de



b⁺ Mehr Sicherheit für die Region.

Nina sorgt für mehr Sicherheit per App.

Unser* Energieportal mit Schadensmelder-App bringt schnell und einfach wieder Licht auf die Straße.

Energie, die Bayern weiterbringt. Bayernwerk.

Mehr unter [bayernwerk.de/bplus](https://www.bayernwerk.de/bplus)

bayernwerk

* Das Energieportal unseres Tochterunternehmens Bayernwerk Netz GmbH



Zusammenfassung

Um Reichweitenangst zu bekämpfen und die Zuverlässigkeit und den Komfort von Elektrofahrzeugen zu verbessern, wird im Rahmen des EU-Forschungsprojekts „1000kmPLUS“ eine Routing-Anwendung für Elektrofahrzeuge entwickelt. Teil dieses Routings ist ein Navigationssystem, mit dem die Leistungsfähigkeit des Routings auf der Straße demonstriert werden soll. Um das Fahrzeug entlang der Route zu verfolgen, werden eingehende GPS-Positionen auf einer digitalen Karte lokalisiert. Dieser Prozess nennt sich Map Matching. Zu diesem Zweck wird ein Online-Map-Matching-Algorithmus entwickelt, der topologische Informationen verwendet, um das Fahrzeug zu tracken und das Verlassen der Route zu detektieren.

Abstract

To fight range anxiety and to improve the reliability and comfortability of electric vehicles, a routing application for electric vehicles is being developed in the EU project ‘1000kmPLUS’. Part of that routing is a navigation system, which will be used to demonstrate the performance of the routing on the road. To track the vehicle along the route, incoming GPS positions are located on a digital map. This process is called map matching. For this, an online Map Matching algorithm is developed that uses topological information to track the vehicle and detect off-route scenarios.

1 Introduction and Motivation

Due to growing concerns about the global climate and the use of fossil fuels, electric vehicles (EV)s are coming into focus of both politics and society. But despite their growing share in the mix of private vehicles and the ever-increasing amount of different vehicle models, EVs still suffer from bad reputation in some areas. Low range, high purchase costs, long charging times, sparse charging infrastructure, and the resulting range anxiety are factors that must be addressed to increase the acceptance of EVs in society. By developing a routing algorithm specialized for electric vehicles, which includes charging stops along the way, long trips that significantly exceed the maximum range of the vehicle should be simplified. To demonstrate the effectiveness of said algorithm in the field, a navigation system that constantly communicates with the vehicle is developed. This way, the route and instructions for charging can be updated to be optimal in terms of time. One important aspect of navigation is locating the

vehicle along the route. This way not only is the driver up to date about upcoming driving maneuvers but also the remaining driving distance and the necessity to reroute the vehicle can be assessed.

‘Map Matching’ (MM) is the process of assigning geographical objects to locations on a digital map [1]. In this case, these ‘geographical objects’ are point positions received by a positioning system (GPS) for a moving object (vehicle) in a road network, which is represented by a number of polylines, each representing the centerline of a road. Due to inaccuracies of the received GPS signals, GPS position and polylines usually do not intersect. The task of MM is therefore to localize the position to its corresponding location on the road network.

In general, MM is distinguished into offline and online MM [2]. In the offline variant, a trajectory of recorded GPS points is already available at the time the matching takes place. The task then consists of matching the trajectory to a set of

roads in the most logical way. By having all the information of the follow-up GPS coordinates available, it is much easier to apply logical dependencies between coordinates and to determine the correct road segment. On the contrary, during online MM there is a continuous flow of new GPS points that must be matched to the road in real-time (as it is the case during navigation). To determine where to match an incoming GPS point, different approaches can be chosen. In general MM is categorized into geometrical, topological and advanced matching [3]. The geometrical approach compares the shape of a GPS trajectory to the one of a road. It therefore needs little information and is fast to implement. However, it frequently fails at junctions or roundabouts due to the presence of many proximate roads. The geometrical MM group includes point-to-point, point-to-curve and curve-to-curve matching (see Figure 1).

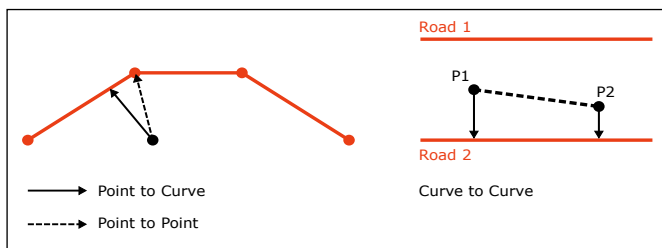


Figure 1: Three variants of geometrical Map Matching

Topological MM makes use of additional information such as previously identified road segments or general topological information, like link connectivity, road classification or turn restrictions. Advanced algorithms apply special decision-making models like fuzzy logic.

2 Methodic Approach

For the use case of navigation a topological approach was chosen, as it matches the desired complexity and the data availability for the system. The main requirement for the MM is the precise detection of detour scenarios, i.e. when the driver leaves the suggested route so that a recalculation of the route becomes necessary. To further increase the robustness of the MM, additional topological information is used. In terms of the geometrical MM, a point-to-curve approach is used. The main task for the algorithm is to find the correct road segment for matching. Such segments build up the road network. In this case they will also be referred to as 'highways', which is the categorizing tag for roads in the Open Street Map database [4] that is used as a source for public road data. Once an MM algorithm has found the correct highway for matching, the GPS point is perpendicularly projected (matched) onto the highway. Determining the right road segment in online matching is a more challenging task than during the offline mode because less information is available at the time of matching.

To match to the correct road segment during online matching, several factors are relevant and various sensor

data can be used to achieve better results. In general, three scenarios for MM emerge. The first scenario appears, when movement starts. At this stage, the GPS heading information is almost useless due to the low vehicle speed. The second difficult scenario occurs when crossing an intersection. This is due to the proximity of many other road segments with valid segment transitions. The last scenario occurs after leaving an intersection. In this scenario there is a lot of confidence in the heading information of the vehicle and the GPS points can usually simply be matched perpendicularly to the closest road segment. Besides these three major scenarios, an MM algorithm might want to deal with other potentially problematic situations such as segment skipping (short segments and low GPS rate), GPS outages (e.g., in tunnels) and generally the inaccuracy of the GPS. In this case, the following criteria were chosen to determine the appropriate segment to a GPS point:

- Closeness of a segment
- Connectivity between segments
- Information about the suggested route
- Information about previous GPS points and matched positions

The closeness of segments is generally a good criterion to search for the best candidates. GPS has a certain error range (about 2-9m for the sensor used, according to [5]). Segments outside this range therefore don't have to be considered. However, proximity alone is a poor indicator around junctions or roundabouts where the amount of proximate road segments is naturally high. In that case, the connectivity between segments is a good approach to further filter the list of candidates. The developed MM algorithm thereby only considers segments intersecting each other on a two-dimensional plane. This does not take into account turn restrictions and non-intersecting roads at a three-dimensional level (e.g., bridges or overpasses). To make that distinction, a more complex representation of the road network would be necessary, which in return would increase the complexity of the algorithm and interfere with its capability for online matching.

Finally, knowledge about the route suggested by the routing is used to narrow down the list of eligible segments. It can be assumed that the driver will most likely follow the route, which is known in advance. Therefore, the list of candidates can be reduced to the route and its adjacent segments. Should one of the latter turn out to be the true segment, this would mean that the vehicle left the route, which would trigger a recalculation of the entire route and therefore also the MM. This in turn makes it important to recognize this scenario with a high degree of certainty. Essentially, it must be checked whether a transition from one segment to another one has occurred. For this, an algorithm based on a majority vote is used, which can be seen in Figure 2.

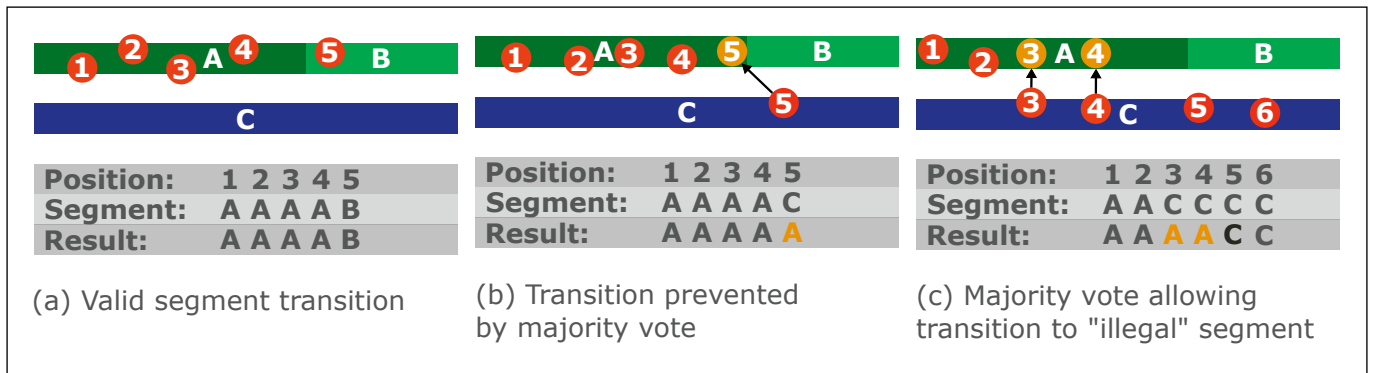


Figure 2: Majority vote for segment transition validation

The algorithm keeps a record of the last highways that were declared closest. It is then checked which highway was picked as the closest by the majority of the past matches. This highway is then declared the 'most common highway'. The idea of this system is to prevent transitions to invalid segments but not completely block them, as a previously selected segment might turn out to be wrong. The proposed MM algorithm uses two majority votes: one to validate transitions between segments and the other one to validate transitions to non-route segments. The purpose of the second voting is to give the MM more robustness towards leaving the route, as the first one does not know such restrictions to the application. This way a frequent recalculation of the route can be avoided. In Figure 2 (a) the scenario of a valid transition is shown. For the first four points, segment 'A' is the closest. The fifth point is closer to segment 'B'. Since 'B' is a direct neighbor of 'A', the transition is valid. In Figure 2 (b) the fifth point is closest to segment 'C', which is not connected to 'A'. Since a transition to an 'invalid' segment was detected, the majority vote takes effect. From the past five segments, the majority (4/5) votes for segment 'A'. The vote system therefore declares segment 'A' to be correct and projects point 5 perpendicularly onto that segment. Figure 2 (c) shows a scenario where the majority vote allows the transition to an 'invalid' segment. The first two points get matched to segment 'A' as it is the closest. Points 3 and 4 are closer to segment C but get 'outvoted' by point 1 and 2 since at stalemate, earlier votes win. With point 5 however, segment 'C' becomes the 'winner' of the voting so that points 5 and 6 get matched on that segment. Such a transition to an invalid segment is an indicator that rerouting should be triggered.

The vote-based system increases the MM's robustness against wrong segment matches but in return makes it vulnerable to 'segment skipping'. That skipping can occur as a result of a low GPS frequency, in combination with short road segments. In that case, the majority vote prevents the matching to the next but one segment, until the majority of the buffer wants to match on that segment. However, this is only a visual flaw during navigation and does not affect the overall performance of the application.

2.1 Dealing with GPS Error

Roundabouts generally present MM with great difficulties, due to the large number of branches. An example can be seen in Figure 3. The red dots represent the incoming GPS positions, the blue line is the trajectory of the matched results, and the green points mark the positions where rerouting is triggered due to off-route detection.

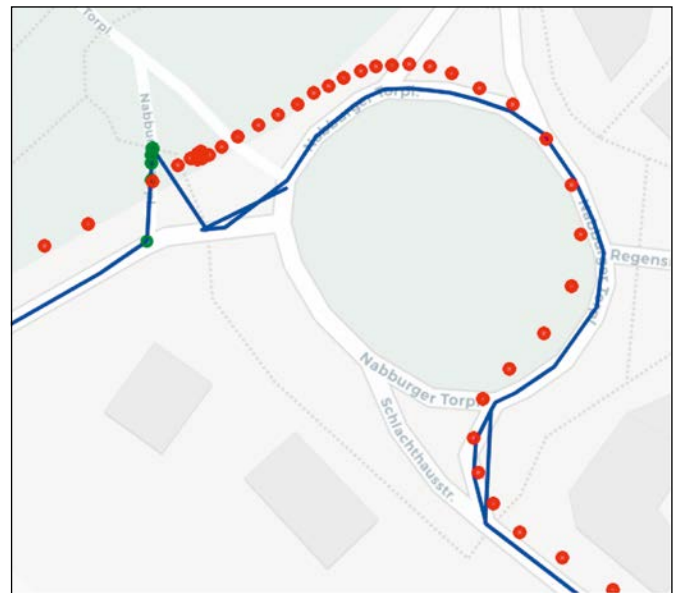


Figure 3: Bad GPS at a roundabout

The great deviation of the GPS signal combined with the vast number of points easily 'overpower' the majority vote, which causes a wrong rerouting to be triggered. Since no additional sensors are used to increase the accuracy, another strategy is required. The proposed approach tries to make use of the knowledge about GPS behavior. In their work, Jagadeesh et al. [6] make two observations: First, the deviation between two consecutive GPS readings is much smaller than the actual GPS error. In their experiments, the error was less than 2m in 95% of all cases. Secondly, the analysis of their data shows that the distance between two consecutive readings is almost exactly the distance of the respective true vehicle positions. In this case, the deviation remains below one meter in 95% of all cases. This dependency is depicted in Figure 4.

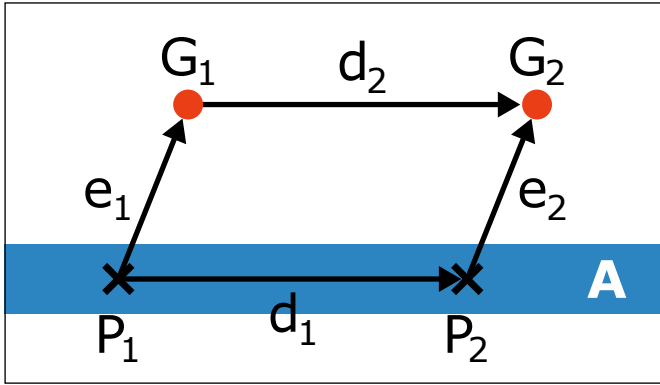


Figure 4: GPS error characteristics

Let P_1 and P_2 be two consecutive true positions of a vehicle on road segment A . And let G_1 and G_2 be the two corresponding estimated positions of the GPS. Then e_1 and e_2 denote the current and the previous GPS error. Furthermore, d_2 is the distance between the current and the previous GPS position and d_1 is the distance between the corresponding, true vehicle position. Referring to the above observation, this means that under normal conditions it holds that $e_1 \approx e_2$ and therefore also $d_1 \approx d_2$. Furthermore, it is analyzed that the heading of two consecutive GPS points corresponds the vehicle's motion of travel. The true vehicle position and the GPS points are arranged in a rough parallelogram. For MM this means, if one of the true positions (e.g. P_1) is known, the other true position (P_2) can be determined by calculating the fourth point in the parallelogram. Of course, the vehicle's true position along the route is not known, which makes MM necessary in the first place. However, having good confidence in a previous matched point, that point can be used to determine a more accurate position for the next one. Using this technique on matches that are suspect to an increased error rate, significantly improves the results as can be seen in Figure 5. In this case, the orange dots represent points that were moved with this 'parallelogram' method before matching. It can be seen that the technique is used only at those points that are very far from the route segment.



Figure 5: Increased accuracy with parallelogram method

3 Results and Conclusion

The performance of the MM algorithm was tested on several recorded test tracks in Amberg and Aschaffenburg that both include several different road types, including residential areas, rural roads and highway sections. The tracks are 25 and 24 km long. To measure the performance of the matching, the distance between the received GPS position and the resulting matched position was measured. All matches with a deviation of more than 11 meters is considered a mismatch. The results of the matching can be seen in the following Table:

Table 1: Match results

	Avg.	Median	Max	Mismatch ratio
Amberg	3,35 m	2,27 m	48,20 m	2,11 %
Aschaffenburg	3,12 m	2,45 m	263,44 m	1,91 %

When comparing the average to the median deviation, values are both small and close to another. This is a good sign, since it can be assumed that there are only a few high deviations that set the average apart from the median. The overall mismatch ratio seems low enough for good use in navigation. When checking for high deviations ($>20m$) the ratio stays below 0.5%. The maximum deviation of 263 meters in Aschaffenburg occurs due to two temporary GPS outages in the recorded data. Such error sources are to be expected and are handled with the loss of accuracy of the MM. A way to deal with such problems would be the incorporation of more sensor data, e.g. dead reckoning.

Project "1000kmPLUS"

The online MM algorithm for navigation was developed in the project 1000kmPLUS [7], which is part of the European Union's Horizon 2020 research and innovation projects. It plans to ensure the superiority of European automotive key technologies in terms of performance, scalability and costs for the 2nd and 3rd generation of EVs. Part of the development in the project is a scalable and highly efficient powertrain technology platform, a fast charging capable and weight-optimized battery system as well as a routing algorithm that plans optimal charging stops for electric vehicles.

References:

- [1] C. S. Jensen and N. Tradišauskas, “Map Matching”, in Encyclopedia of Database Systems, L. LIU and M. T. ÖZSU, Eds. Boston, MA: Springer US, 2009, pp. 1692–1696. DOI: 10.1007/978-0-387-39940-9_215.
- [2] D. Zhang, Y. Dong, and Z. Guo, “A turning point-based offline map matching algorithm for urban road networks”, Information Sciences, vol. 565, pp. 32–45, Jul. 2021, DOI: 10.1016/j.ins.2021.02.052.
- [3] M. Ren and H. A. Karimi, “A Chain-Code-Based Map Matching Algorithm for Wheelchair Navigation”, Transactions in GIS, vol. 13, no. 2, pp. 197–214, Apr. 2009, DOI: 10.1111/j.1467- 671.2009.01147.x.
- [4] „OpenStreetMap Deutschland: Die freie Wiki-Weltkarte“. <https://www.openstreetmap.de/> (accessed Sep. 10, 2022).
- [5] P. Heß, “Network quality of service prediction for a mobile-based vehicle-to-server communication for automated driving”, Masterthesis, OTH Amberg-Weiden, Amberg, 2018.
- [6] G. R. Jagadeesh, T. Srikanthan, and X. Zhang, “A Map Matching Method for GPS Based Real-Time Vehicle Location”, Journal of Navigation, vol. 57, pp. 429–440, Sep. 2004, DOI: 0.1017/S0373463304002905.
- [7] „1000kmPLUS“. <https://1000kplus.eu/> (accessed Sep. 10, 2022).

Fördergeber:

1000kmPLUS (<https://1000kplus.eu/>) is receiving funding within the European Union's H2020 Framework Program, under grant agreement no. 824262.



Kontakt:



Martin Fischer, M.Sc.

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

m.fischer@oth-aw.de



Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

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

a.hoess@oth-aw.de

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

KI-ASIC

Ein teilautomatisierter Datenlabelingprozess für Deep Learning für radarbasierte Automobil- anwendungen

Zusammenfassung

Die kontinuierliche Verbesserung der Rechenleistung in den vergangenen Jahren 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, 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. Die Signalflusskette der Mikroprozessoren ist dem menschlichen Gehirn nachempfunden und soll eine Steigerung der Rechenleistung bei gleichzeitiger Reduktion der Leistungsaufnahme ermöglichen. Die Forschungsergebnisse sollen anhand definierter Fahrscenarien mithilfe eines Versuchsträgers im Realverkehr getestet werden.

Abstract

The continuous improvement of computing power in recent years is helping Artificial Intelligence (AI) to achieve a breakthrough, not least in the development of automated vehicles. AI algorithms are used 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, 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)”. Over the period of three years, the Automotive Research Group of the Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden (OTH AW) is conducting research together with the German project partners on the development of neuromorphic microprocessors. The signal flow chain of these microprocessors 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 wurden, 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 einen steigenden Energiebedarf bei klassischen Prozessoren, die auf der auf der Von-Neumann-Architektur basieren. Dieser Zielkonflikt lässt sich jedoch durch Innovationen bei der Architektur der datenverarbeitenden Komponenten, Module und Systeme im Fahrzeug vermeiden. 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 (OTH AW) 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.

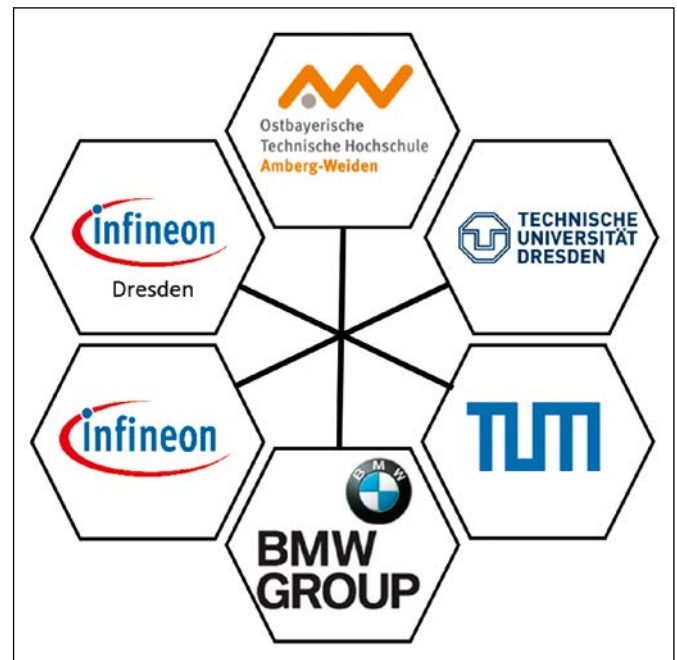


Abbildung 1: Übersicht der Projektpartner

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 potentiell 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, 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.

Mit den derzeitigen Methoden zur Übertragung und Verarbeitung von Sensordaten ist ein erhöhter Stromverbrauch der zugrunde liegenden elektronischen Komponenten unvermeidlich. Dies wird zu einem immer größeren Problem, vor allem wenn die Fahrzeugautomatisierung weiter voranschreitet, insbesondere bei der Aufnahme und Auswertung von vom automatisierten Fahrzeug aufgezeichneten Radardaten. Die konventionelle Radarverarbeitungskette bietet Potenzial für die Anwendung lernfähiger Algorithmen, wie z. B. neuronale Netze, die in

der Lage sind, den Energieverbrauch bei der Datenverarbeitung reduzieren zu können. Um ein neuronales Netz zu entwickeln, benötigt man zwangsläufig Trainingsdaten, auf deren Grundlage das Netz lernt. In der Literatur gibt es zahlreiche Datensätze im Fahrzeugumfeld, wie KITTI [6] oder Waymo Open Dataset [7]. Allerdings fehlen in beiden Fällen Trainingsdaten für ein Kamera-Lidar-Radar-Sensorsystem, wie wir sie im Projekt für die Entwicklung der neuronalen Netze benötigen. In dieser Arbeit untersuchen wir einen 77-GHz-FMCW-Radarsensor und ein Referenzsystem, das aus einer Stereokamera und einem Lidarsensor besteht, um die aufgezeichneten Radardaten zu annotieren. Wir verwenden einen halbautomatischen Datenbeschriftungsprozess, der eine kosteneffiziente und großflächige Erstellung der annotierten Radar-Rohsindatensätze ermöglicht. Der erzeugte Testdatensatz sollte so umfangreich wie möglich sein, um ihn in zukünftigen Arbeiten generisch für das Training von NNs zur Radarmustererkennung verwenden zu können.

3 Entwicklung des Datenauswertungsprozesses

Als Referenzsystem verwenden wir einen Ouster-Lidar-Sensor und zwei Farbkameras. Nach der Kalibrierung der Sensoren zueinander ist es möglich, die Informationen der verschiedenen Sensortypen zu kombinieren. Nach der Beschriftung der Kamerabilder können die Daten fusioniert und nachbearbeitet werden (siehe Abbildung 2). Dabei liefert der Lidar-Sensor Entfernungsinformationen, die Stereokamera liefert zusätzlich Disparitätsinformationen für eine zusätzliche Abstandsbestimmung. In MATLAB werden die Daten zusammengeführt und für jedes detektierte Objekt werden verschiedene Eigenschaften wie Winkel, Entfernung etc. berechnet. Die Daten des Hi-Res-Radarsensors werden ebenfalls in MATLAB verarbeitet und mit den Eigenschaften des Referenzsystems kombiniert. Um die Größe der Trainingsdaten zu kontrollieren,

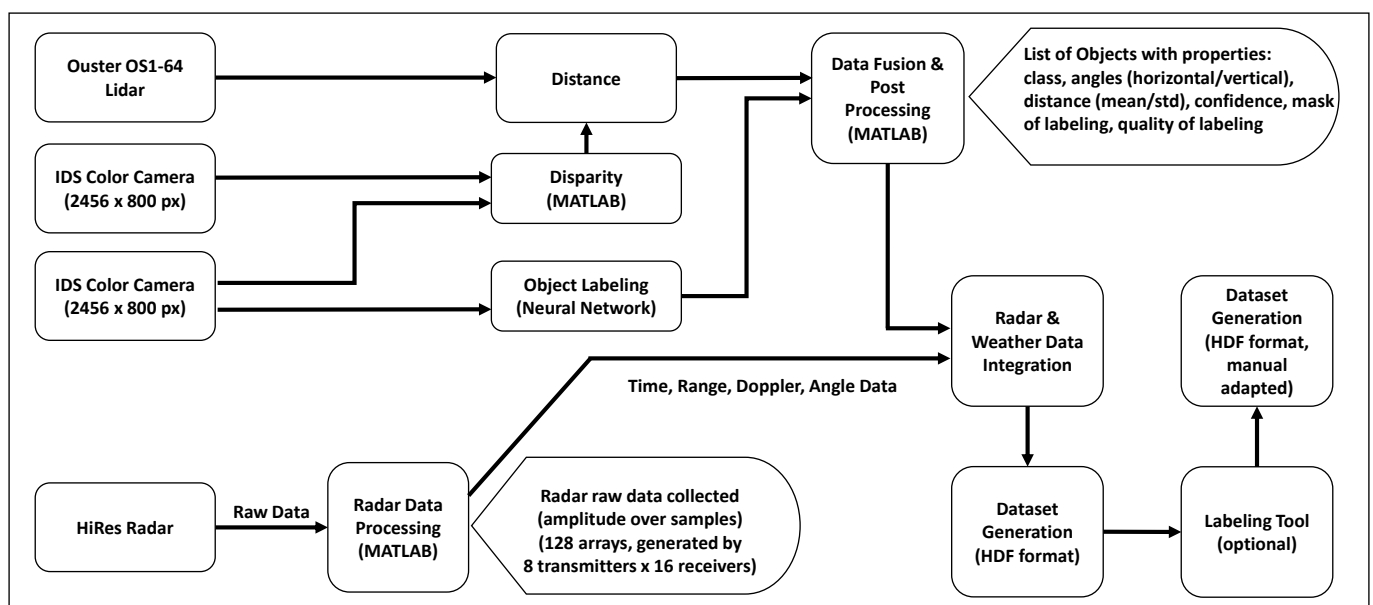


Abbildung 2: Labeling-Prozess

werden nur die Radarrohdaten gespeichert, aber es ist auch möglich, Entfernungs-, Doppler- oder Winkeldaten zu speichern. Danach wird auch das Wetter, bei dem das Testszenario ausgeführt wurde, hinzugefügt. Nun ist es möglich, alle Informationen in einem Datensatz im HDF5-Format [8] zu speichern, das aus Gründen der einfachen Handhabung und der Leistungsfähigkeit gewählt wurde. Es ist möglich, die Beschriftung des neuronalen Netzes durch einen menschlichen Benutzer anzupassen und die Objekteigenschaften neu zu berechnen, um die Leistung des Datensatzes zu optimieren.

Radarsensoren sind im Allgemeinen robust gegenüber extremen Witterungsbedingungen; nur starker Regen kann zu Leistungseinbußen führen. Die Kamera- und Lidar-Sensoren, die zur Erstellung des annotierten Trainingsdatensatzes verwendet werden, sind empfindlicher gegenüber Verschmutzung und rauem Wetter. Das Wetter, das während der Durchführung eines Testszenarios vorherrscht, kann also einen Einfluss auf die Qualität der Trainingsdaten haben. Daher ist es notwendig, die Wetterdaten bei der Durchführung der Testfahrten entsprechend zu erfassen, um später bei der Auswertung der generierten Testdaten auf diese Informationen zurückgreifen zu können. Aus diesem Grund haben wir eine API implementiert, über die das aktuelle Wetter vom Deutschen Wetterdienst mit den GPS-Koordinaten des Fahrzeugs während der Testdurchführung abgerufen werden kann. Die Wetterinformationen werden dann im Trainingsdatensatz hinterlegt.

Um die Datenerfassung und damit auch die Bildbeschriftung weiter zu verbessern, wird ein Beschriftungstool in die Datenverarbeitung integriert, um die vorgestellte automatische Pipeline durch Hinzufügen einer manuellen Komponente zu optimieren. Zu diesem Zweck wird ein Tool entwickelt, mit dem die erkannten Objekte von einem Benutzer manuell überprüft und korrigiert werden können, um die Qualität der Trainingsdaten zu gewährleisten. Dies kann die Leistung des zu entwickelnden NN verbessern. Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die Funktionalitäten des entwickelten Labeling Tools.

In Abbildung 3 werden oben links allgemeine Objektinformationen aufgeführt. Neben dem Namen des Testszenarios werden das verwendete NN angegeben, bzw. im Falle einer Kombination mehrerer Netze die verwendeten NNs, die im Rahmen der Bildbeschriftung verwendet werden. Darüber hinaus werden zusätzliche Informationen wie das aktuell zu beschriftende Bild sowie der aktuelle Zeitstempel angezeigt. Die Klassenzugehörigkeit des von den NNs bereits beschrifteten Objekts ist darunter angegeben und kann vom Bediener des Labeling Tools geändert werden. Anhand des weißen Polygons innerhalb des aktuell zu beschriftenden Bildes (siehe unterer Teil) werden weitere objektspezifische Daten wie der Abstand zwischen dem Referenzsystem und dem gepunkteten Objekt sowie horizontale und vertikale Winkel berechnet. Zur übersichtlicheren Anwendung wird das zuvor beschriftete Bild mit allen kommentierten Objekten in der rechten oberen

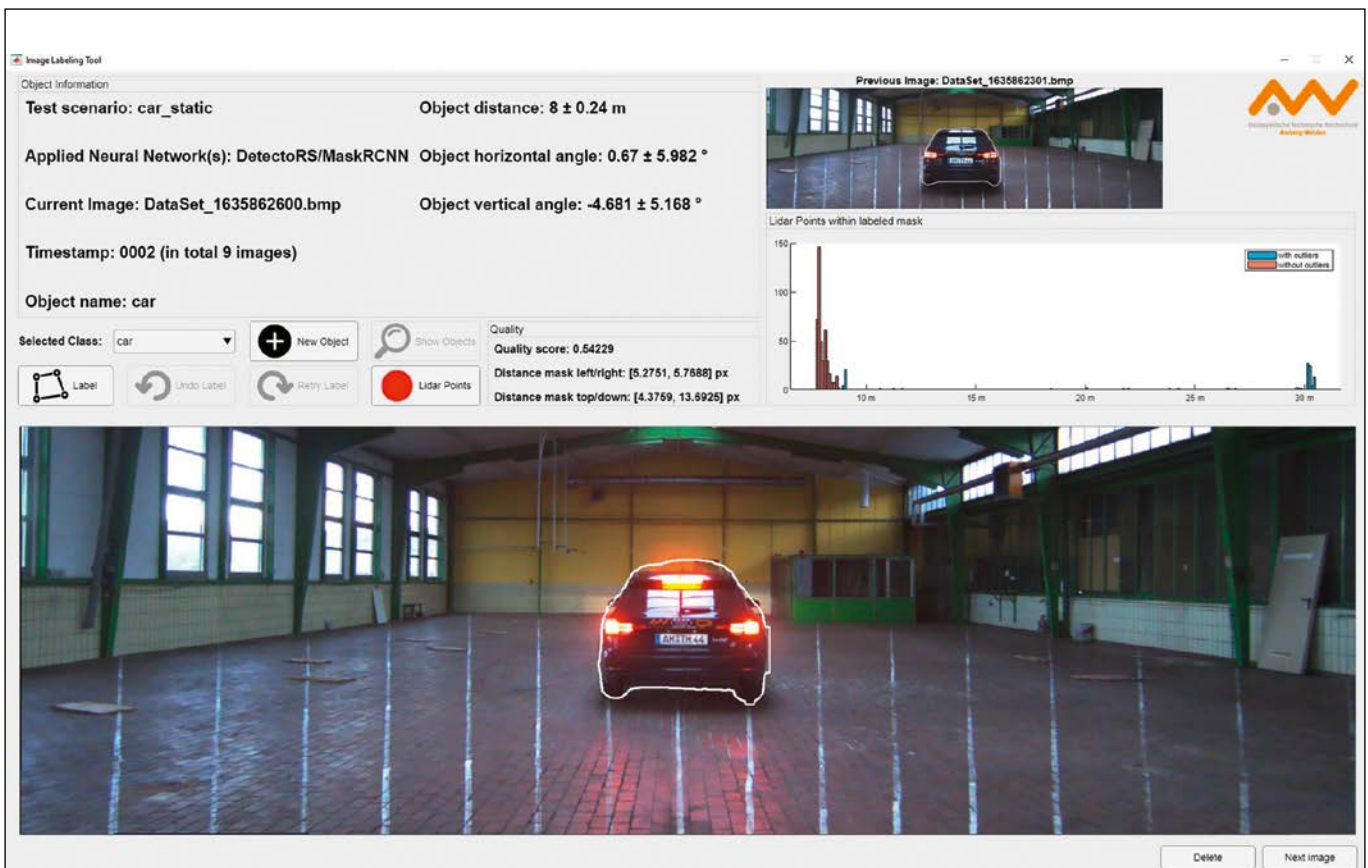


Abbildung 3: Labeling Tool

Ecke zusammen mit seinem Bildnamen angezeigt. Neben den bereits vorgestellten Hauptinformationen bietet das Labeling Tool noch einige weitere Hauptfunktionen, die vom Benutzer angepasst werden können. Um die Qualität der Trainingsdaten zu optimieren, kann der Benutzer die Maske des Objekts, das bereits automatisch durch die Kombination verschiedener NNs annotiert wurde, manuell anpassen, indem er Zwischenpunkte innerhalb der weißen Polygonlinie hinzufügt oder entfernt und die Form der Objektkontur anpasst. Es ist auch möglich, die Klasse des erkannten Objekts zu ändern oder manuell ein neues Objekt hinzuzufügen.

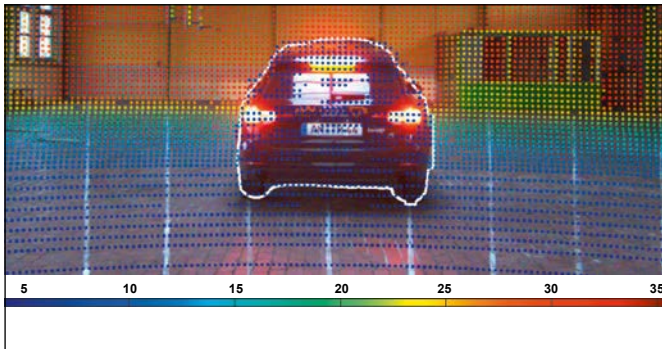


Abbildung 4: Labeling Tool – Auflösung Lidarpunkte

Abbildung 4 stellt die auf das beschriftete Kamerabild projizierten Lidarpunkte mit dem weißen Polygon aus dem Annotationsprozess dar. Da es sich bei dem verwendeten Lidarsensor um den Ouster OS1-64 mit Gradientenstrahlverteilung handelt, hängt die Dichte der Punktwolke von der Lokalisierung der Lidarpunkte im Bildbereich ab. Die Dichte ist in der Mitte des Bildes am größten und nimmt sowohl horizontal als auch vertikal nach außen hin mit unterschiedlichen Raten ab. Unter Berücksichtigung der durch den Beschriftungsvorgang ermittelten Objektmaske und der Gradientenstrahlverteilung lässt sich somit die maximale Anzahl der Lidarpunkte berechnen, die idealerweise innerhalb der Objektmaske auftreten können. Vergleicht man diesen Idealwert mit den tatsächlich innerhalb der Objektmaske vorhandenen Lidarpunkten, so kann ein Qualitätsscore ermittelt werden, der einen Wertebereich zwischen 0 und 1 hat und somit Aussagen über die Qualität der Messung für den ermittelten Abstandswert ermöglicht. Aufgrund der Form des Fahrzeughecks einschließlich der im Bild gezeigten Windschutzscheibe werden viele der ausgesendeten Lidarpunkte nicht zum Lidarsensor zurückreflektiert, was zu einer Verringerung der Punktdichte innerhalb der Objektkontur führt. Wir drücken diese Metrik aus, indem wir die Masked Point Cloud Coverage Ratio (MPCL-CR) einführen, die die Qualität der Lidar-Punkte innerhalb der Maske darstellt. Für das Beispiel im Bild beträgt dieser Wert etwa 54% für das erkannte Objekt-Fahrzeug, was für die Berechnung der Objektinformationen ausreichend ist.

Nachdem alle Objekte jeder Szene eines Test szenarios annotiert wurden, werden alle gesammelten Informa-

tionen sowie die berechneten Objektmerkmale in einer Ergebnisdatei gespeichert. Diese Datei wird für den Trainingsprozess des zu entwickelnden NN verwendet, der später die Objekte der vom neuartigen Radarsensor erfassten Daten klassifizieren wird. Die Trainingsdatei jedes durchgeführten Szenarios enthält neben den allgemeinen Angaben zum Test szenario auch die einzelnen Zeitstempel. Diese Zeitstempel umfassen je nach Aufzeichnungsfrequenz des Sensorsystems 10 oder 20 Szenen pro Sekunde, die vor Beginn der Ausführung des definierten Szenarios eingestellt werden können. Für jedes Test szenario wird eine eigene Ergebnisdatei erstellt. Hierbei werden beispielsweise neben dem Datum des Tests, die für die Bildbeschriftung verwendeten NNs, der Breiten- und Längengrad des Testfahrzeugs, der Namen des im Testkatalog [9] definierten Test szenarios sowie das Wetter hinterlegt. Neben diesen allgemeinen Informationen zur Testdurchführung werden in der Ergebnisdatei die Spezifikationen der Sensoren sowie die relevanten Bilder für die Objektmerkmalbestimmung, die mit der Datenverarbeitungspipeline ermittelten Objekteigenschaften und die Daten von Lidar- und Radarsensor gespeichert.

4 Ausblick

Die Analyse von Sensordaten mithilfe von KI wird in der Automobilindustrie in Zukunft immer wichtiger werden. Um den Energiebedarf der Sensordatenverarbeitung so gering wie möglich zu halten, gilt die KI-basierte Radarverarbeitung als vielversprechender Ansatz, der deutlich weniger Rechenleistung benötigt als herkömmliche Algorithmen. Die Entwicklung neuer Methoden zur datengesteuerten Radarmustererkennung, z. B. mithilfe neuromorpher Prozessoren, erfordern Datensätze mit Radar-Rohsignalen, die derzeit in den bestehenden Datensätzen nicht verfügbar sind. In dieser Arbeit haben wir einen Ansatz vorgestellt, um diese Lücke zu schließen, indem wir halbautomatisch beschriftete Low-Level-Radar-Trainingsdatensätze erzeugen. Dazu haben wir eine zusätzliche Kamera und einen Lidar-Sensor verwendet. Alle Objektinstanzen werden durch Informationen aus der Lidar-Punktwolke, wie z. B. Entfernung und Winkel, sowie durch Umgebungsfaktoren, wie z. B. die vorherrschenden Wetterbedingungen, ergänzt. Es wurde ein spezielles Tool für die Bildbeschriftung implementiert, das den automatischen Annotationsprozess um eine manuelle Anpassungsoption erweitert, so dass die Qualität des Datensatzes von einem menschlichen Experten optimiert werden kann. Alle berechneten Ergebnisse werden dann in einer Ergebnisdatei gespeichert und für die Entwicklung verwendet.



Abbildung 5: Versuchsfahrzeug BMW X5

Demnach sind alle nötigen Vorarbeiten abgeschlossen, um im nächsten Schritt eine Vielzahl an Daten mit dem Versuchsfahrzeug (siehe Abbildung 5) auf dem Flugplatz in Schmidgaden einzufahren, die im Anschluss ausgewertet und den Partnern als annotierter Trainingsdatensatz für die Entwicklung der gepulsten neuronalen Netze zur Verfügung gestellt werden. Dabei wird die Datenverarbeitungspipeline unter Berücksichtigung des Feedbacks der Projektpartner iterativ verbessert, um ein für den Trainingsprozess der neuronalen Netze optimalen Datensatz liefern zu können, der die Anforderungen bestmöglich erfüllt.

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 14.09.2022].
- [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 14.09.2022].
- [6] A. Geiger, “Vision meets robotics; the KITTI dataset”, 32th Internal Journal of Robotics Research, 2013.
- [7] H. Kretschmar, “Scalability in Perception for Autonomous Driving: Waymo Open Dataset”, Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2020.
- [8] The HDF Group, “Hierarchical Data Format, version 5”, 1997. [Online]. Available: <https://www.hdfgroup.org/HDF5/>. [Zugriff am 14.09.2022].
- [9] K. Stein, “Development and implementation of a test strategy for the generation of requirements-based data sets”, Master's Thesis at OTH Amberg-Weiden, 2021.

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



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



Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

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

a.hoess@oth-aw.de

AUTBUS – Implementierung einer V2X-Kommunikation für automatisiertes Fahren im ländlichen Raum

Roman Babl, M.Sc.
Fabian Zeitler, M.Sc.
André Baldermann, M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

Zusammenfassung

In den letzten Forschungsberichten informierten wir über unterschiedliche Phasen des Projektes AUTBUS. So beschrieben wir im Forschungsbericht in 2020 [1] die Idee des Projektes. Viele grundlegende Fragen waren noch zu klären. Würden zusätzliche Sensoren am Straßenrand benötigt und wenn ja welche. Würden auf der Teststrecke zusätzliche Geschwindigkeitsbegrenzungen nötig? Für welche konkreten Zwecke wird eine auszuwählende Fahrzeugkommunikation mit welchen noch zu definierenden technischen Eigenschaften benötigt. Hierin zeigte sich der Forschungscharakter des Projektes. Die erste Projektphase war vor allem der Beantwortung all dieser Fragen gewidmet und wir berichteten im Forschungsbericht 2021 [2] darüber.

Im letzten Jahr stand vor allem die ingenieurmäßige Implementierung der Ideen im Vordergrund. In diesem Beitrag werden einige Aspekte dokumentiert. So wurde eine wetterfeste RSU (Road Side Unit) für den Batteriebetrieb und späteren Anschluss an das Leitungsnetz der Stadt Roding entwickelt und aufgebaut. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf dem Testen des Systems. Beispielsweise wurden Kommunikationstests mit den Amazon Cloud Services entlang der Teststrecke erfolgreich durchgeführt. Die Kommunikation zwischen RSU und Fahrzeugempfänger wurde evaluiert und gefundene Unzulänglichkeiten angegangen.

Abstract

In the last research reports we informed about different phases of the project AUTBUS. We described the idea of the project in the research report in 2020 [1]. Many fundamental questions still had to be answered. Would additional roadside sensors be needed and if so, which ones? Would additional speed limits be necessary on the test track? For which specific purposes is a vehicle communication to be selected with which technical properties which also have to be defined. This shows the research character of the project. The first phase of the project was mainly dedicated to answering all these questions and we reported on them in the research report 2021 [2].

In the last year, the focus was mainly on the engineering implementation of the ideas and this research report tells about it. A weatherproof RSU (Road Side Unit) for battery operation and later connection to the Roding city network was developed and built. In addition, the testing of the system was in the foreground. For example, communication tests with the Amazon Cloud were successfully carried out along the test track. The communication between the RSU and the vehicle receiver was evaluated and any problems found have been addressed.

Projektbeschreibung

Landflucht ist nach wie vor ein anhaltender Trend in Deutschland [3]. Insbesondere ziehen junge Menschen mangels Perspektiven in die Städte. Zurück bleibt eine alternde Gesellschaft. Im Zuge des im Sommer für 3 Mo-

nate eingeführten 9-€-Tickets für deutschlandweiten Nahverkehr zeigte sich, dass Menschen nicht nur Fahrten vom Auto auf den öffentlichen Nahverkehr verlegen, sondern Menschen insgesamt mobiler sind. Dies führte auch zu mehr Besuchen in ländlichen Bereichen [4]. In

der Diskussion um eine Verstärkung des 9-€-Tickets gab es deutschlandweit diskutierte Vorschläge. Einer davon schlug vor, ein 29-€-Ticket einzuführen, das Taxifahrten beinhaltet. Dies wurde explizit im Hinblick auf die Versorgung im ländlichen Bereich vorgeschlagen [5]. Hierin zeigt sich die Weitsichtigkeit des Projektes AUTOBUS, den zukünftigen gesellschaftlichen Bedarf zu erkennen und zu adressieren. Hierbei gehen Mobilitätsforscher*innen so weit, dass das Taxi im ländlichen Bereich zum „Massenverkehrsmittel“ werden müsse. Dies wird insbesondere im Hinblick auf die abgehängten ländlichen Bereiche gefordert, deren Bewohner*innen das 9-€-Ticket für sich selbst kaum gewinnbringend nutzen konnten [6]. Hier zeigt sich ein neues gesellschaftliches Moment, ländliche Bereiche zielgerichtet zu unterstützen, um gleiche Lebensverhältnisse überall im Land zu erreichen.

Das Projekt AUTOBUS zielt auf die Entwicklung eines automatisierten Rufbusses im ländlichen Bereich ab, um die oben beschriebenen Bedürfnisse zu decken. Zunächst soll der automatisierte Rufbus feste Routen abfahren. Später könnte der flexibel buchbare Bus als Taxi fungieren, indem die Routenplanung an den Benutzer*innen angepasst wird. So könnten Benutzer*innen direkt von zu Hause zum nächstgelegenen Supermarkt transportiert werden. Hier wird deutlich, dass gesellschaftliche Entwicklungen im letzten Jahr den wirtschaftlichen Wert des Projektes weiter gestärkt haben.

Infrastruktur

Als sensorische Wahrnehmungsverbesserung für den automatisiert fahrenden Bus werden so genannte RSUs (Road Side Units) im Projekt eingesetzt. Es handelt sich dabei um am Straßenrand befindliche Infrastruktureinheiten, die im Projekt AUTOBUS mit einem Radarsensor ausgestattet ist. Die RSU bietet die Möglichkeit, die Informationen zu den mittels Radarsensor detektierten Objekten an andere Verkehrsteilnehmer*innen zu senden. Die RSUs sind vor allem an schlecht einsehbaren Kreuzungen und Einmündungen notwendig, da hier – v.a. aufgrund des eingeschränkten Wahrnehmungsbereichs – die im Fahrzeug verbauten Sensoren nicht ausreichen, um eine sichere Fahrt zu gewährleisten. Durch die auf Landstraßen zulässigen Höchstgeschwindigkeiten können jedoch auch Situationen entstehen, in denen die Reichweite der eigenen Sensorik auch bei guter Einsehbarkeit nicht ausreicht. Aus diesen Gründen wurden für die RSUs geeignete Positionen ausgewählt, die die Sichtweite des Busses optimieren und so einen sicheren Betrieb gewährleisten. Die Kommunikation zwischen den RSUs und dem automatisierten Rufbus erfolgt mittels dem Funkstandard ITS-G5. Die Informationen der RSUs nutzt der Bus, um an Kreuzungen Verhaltensentscheidungen zu treffen. Der Kommunikationsstandard und die dafür verwendete Software wird im späteren Abschnitt zu Vehicle-to-Infrastructure (V2I) genauer erklärt.

Die wesentlichen Komponenten einer RSU sind ein ITS-G5-Kommunikationsmodul mit Antennen und ein hochauflösender Radarsensor. Antennen und Radarsensor befinden sich an einem ca. 3 m hohen Mast, und die sonstige Elektronik ist in einen wetterfesten Schaltschrank integriert (siehe Abbildung 1). Hierbei beinhaltet der Schrank alle Komponenten zur Spannungsversorgung und Datenverarbeitung. Speziell erwähnt sei ein Akku, der rein rechnerisch eine ausreichende Kapazität für etwa zwölf Stunden Betrieb bei typischer Leistungsaufnahme aller Komponenten besitzt. Die erwartete Betriebsdauer konnte während Testphasen bestätigt werden. Die verbauten ITS-G5-Kommunikationsmodule unterstützen zusätzlich die Verwendung von Mobilfunk und ermöglichen damit Fernwartung.



Abbildung 1: Road Side Unit

Vehicle-to-Network (V2N)

Es soll dem Nutzer ermöglicht werden, mittels Buchungs-App auf dem Smartphone den Bus zu ordern. Der Begriff „Vehicle-to-Network“ meint hier die Kommunikation des Rufbusses über das Internet mit dieser Buchungs-App. Hierfür ist eine bidirektionale Verbindung notwendig, über welche das Senden und Empfangen von Daten erfolgt. Diese sind zum einen Statusinformationen des Busses, wie der Standort, welcher durch ein im Fahrzeug verbautes, hoch genaues, globales Navigationssatellitensystem (GNSS) ermittelt wird. Darüber hinaus auch Informationen, ob der Bus aktuell für Fahrten eingesetzt werden kann. Zum anderen werden auch die Buchungsinformationen bezüglich Route, Fahrgäste und anderen Buchungsdetails sowie der derzeitige Buszustand „pausierend“ und „fahrbereit“ Signale zwischen Buchungs-App und Rufbus ausgetauscht.

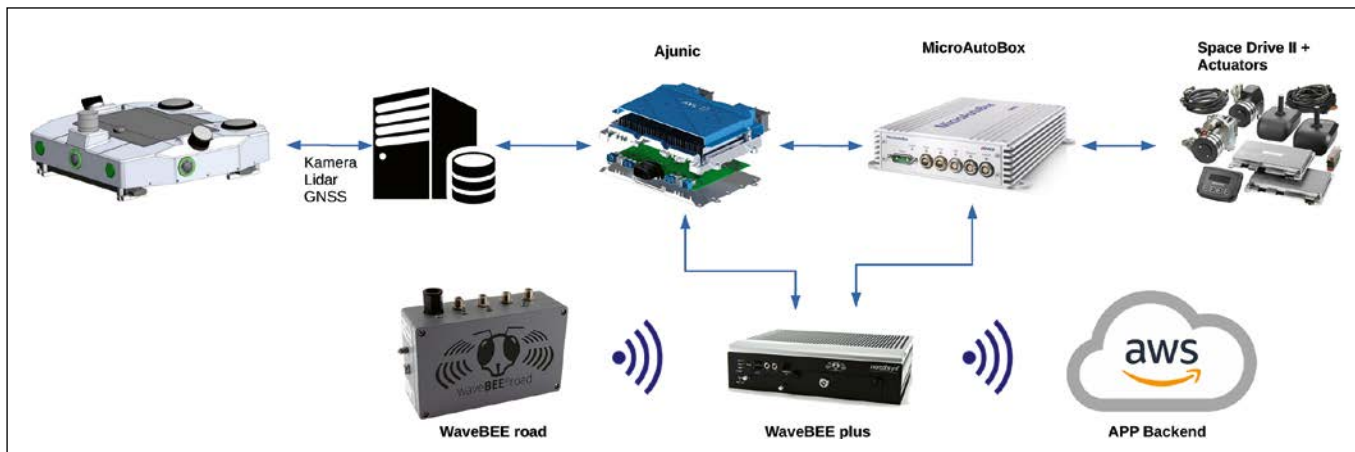


Abbildung 2: Kommunikation mit dem AWS Backend

Bereits im letzten Bericht wurde das Konzept des Datenaustauschs zwischen Server und Bus beschrieben. Dabei erfolgt die Kommunikation zum Server hin über Amazon Web Services Internet of Things (AWS IoT). Die Kommunikation im Rufbus erfolgt mithilfe des Robot Operating System (ROS). Dieses Konzept wurde nun im letzten Jahr im Detail ausgearbeitet und umgesetzt. ROS wird auch zur Kommunikation mit der Hardware unseres Projektpartners AVL Software and Functions GmbH verwendet. ROS ermöglicht hierbei u. a. die Überwachung und Systemtests der gesamten verteilten Kommunikations- und Dateninfrastruktur. Da allerdings im Bus zusätzlich Partnerhardware verbaut wurde, mit welcher nicht über ROS kommuniziert werden kann, wurde zusätzlich eine TCP-Kommunikation eingerichtet.

Im Anschluss an die Programmierung erfolgten umfangreiche Systemtests. Hierfür wurden sowohl statische Tests im Labor sowie Feldtests entlang der Teststrecke durchgeführt. Dabei wurden zwei Testansätze verfolgt. Zum einen ein Belastungstest, welcher eine maximal auftretende Nachrichtenlast simulierte. Die Mindestzeit zwischen dem Senden gleichartiger Datenpakete ist auf eine Sekunde festgelegt. Daraus ergibt sich umgekehrt die maximale Datenrate, dass jedes Paket einmal pro Sekunde gesendet wird. Zum anderen erfolgte ein Langzeittest, welcher die Stabilität der Kommunikation auch über einen längeren Zeitraum abprüfen sollte. Es zeigte sich, dass längere Phasen ohne Kommunikation zu erhöhten Sendezeiten führen können. Deshalb wurden Kommunikationspausen und das resultierende Systemverhalten mit besonderem Augenmerk untersucht. Dabei geht es vor allem darum, ein Einschlafen der Clients zu überwachen, da diese manchmal nach einer gewissen Zeit ohne aktive Kommunikation nicht mehr oder nur noch verlangsamt reagieren. Dies ist vor allem für die "Subscriber" in der MQTT-Verbindung wichtig, da es zweideutig ist, ob einfach keine Daten gesendet wurden oder die Verbindung unterbrochen wurde und deswegen die gesendeten Daten nicht empfangen wurden. Das Konzept des Langzeittests sah vor, wiederholt Bursts der Nachrichten zu senden und zwischen diesen Bursts die Warte-

zeit kontinuierlich zu erhöhen [7]. Beide beschriebene Testansätze wurden sorgfältig geplant, implementiert und durchgeführt. Es traten keinerlei Paketverluste auf. Ebenfalls zeigte sich, dass Latenzen in den seltensten Fällen 0,25 Sekunden überschritten, was absolut ausreichend für den Anwendungsfall ist, welcher mit einer maximalen Latenz von 1 Sekunde spezifiziert wurde.

Bei den Intervalltests zeigte sich, dass eine größere Wartezeit zwischen dem Senden von Paketen in einer Erhöhung der Latenz des ersten versendeten Pakets nach der Wartezeit resultiert. Dies geschieht dadurch, dass die Kommunikationskette über AWS nach längerer kommunikationsfreier Zeit niedriger priorisiert wird. Darüber hinaus könnte auch die bearbeitende Funktion auf dem Server nach längerer Inaktivität die Priorität verlieren. Das Phänomen kann behoben werden, indem durchgehend eine Nachricht gesendet wird, wie es im Normalbetrieb der Fall sein wird, da durchgängig vom Bus die Positionsdaten übermittelt werden. Zusammenfassend stellte sich die umgesetzte Kommunikation als für den Anwendungsfall passend dar [7].

Vehicle-to-Infrastructure (V2I)

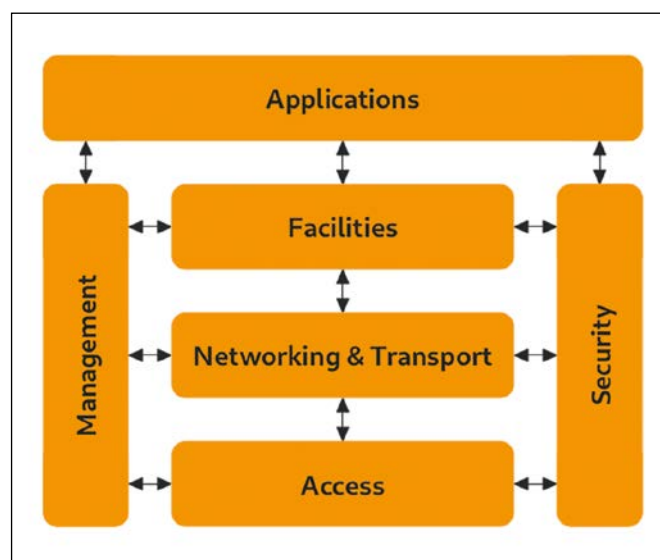


Abbildung 3: Schichtenmodell des ITS-G5-Standards [8]

Zur Funkkommunikation zwischen RSU und Fahrzeug wird ITS-G5 verwendet. Dabei handelt es sich um ein sehr komplexes Protokoll, dessen Protokollstapel in Abbildung 3 stark vereinfacht wiedergegeben wird. ITS-G5 wurde extra für den Einsatz im Bereich intelligenter Verkehrssysteme entwickelt. Der "ITS Access Layer" im Bild definiert physikalische Funkeigenschaften. So basiert die Technologie auf WLAN und definiert eine höhere Sendeleistung, was eine Reichweite bis 1 km bei klarer Sicht ermöglicht. In der nächsten "ITS Networking and Transport"-Schicht wird das von der Position der einzelnen Kommunikationspartner abhängige GeoNetworking für die Steuerung des Nachrichtenflusses realisiert. Darüber liegt der sogenannte "Facility-Layer", der verschiedene Nachrichtentypen für unterschiedliche Anwendungsfälle bereitstellt. Und hier haben wir einen wichtigen Bezug zum Projekt AUTOBUS. So nutzt unsere RSU die neu definierten Collective Perception Messages (CPM) [9], welche verwendet werden, um anderen Verkehrsteilnehmer*innen Informationen über detektierte Objekte mitzuteilen. So kann beispielsweise ein hinter einem LKW fahrendes Auto trotz versperrter Sicht für den Fahrer über das Verhalten der vorausfahrenden Fahrzeuge in Kenntnis gesetzt werden, solange die entsprechenden Objekte von einer Station – zum Beispiel einer RSU – erfasst, die Informationen mithilfe zyklisch gesendeter CPMs verteilt und die Nachrichten empfangen werden.

Die komplette Kommunikationskette auf dem V2I-Pfad ist in Abbildung 4 dargestellt. Der Radarsensor ARS 408-21 erfasst bewegte Objekte und gibt die Daten als Objektliste über eine CAN-Schnittstelle aus. Ein von der OTH-AW programmiertes Gateway setzt die empfangenen Frames in TCP-Pakete um und sendet sie an das waveBEE Road Kommunikationsmodul der Firma Nordsys. Die Daten werden mittels inhouse programmierter Software von der waveBEE Road empfangen, dekodiert und in eine CP-Nachricht umgewandelt. Diese Nachricht wird nun über die Antennen versendet. Im Bus wird das ITS-G5-Datenpaket mittels eigens programmierter Software von der waveBEE plus empfangen, dekodiert, verarbeitet und im Rufbus verteilt.

Im Projekt AUTOBUS nutzen wir ROS bereits für eine ganze Reihe von Aufgaben. Innerhalb der RSU dient ROS dem Aufzeichnen und späteren Auswerten von Messwerten und unterstützt beim Testen der Softwarefunktionen.

Darüber hinaus bietet ROS eine vereinfachte Schnittstelle zu externen Sensoren. So ist es zum Beispiel möglich, einen LIDAR-Sensor statt eines Radars zu verbauen und die im Rahmen dieses Projekts entwickelte Software bis auf die entsprechende Schnittstelle sehr schnell wieder zu verwenden.

Ausblick

Nach zwei erfolgreichen Projektphasen, in denen die Anforderungen erforscht und danach in konkrete, zielgerichtete technische Umsetzungen gegossen wurden, erfolgt nun die Finalisierung der Implementierung. Hier geht es vor allem um Systemtests, die konkrete Realisierung des Probetriebes und das Beseitigen von noch vorhandenen Schwachpunkten. So überspannt das Projekt AUTOBUS den kompletten Bogen von Forschung und Innovation über Engineering und praktische Arbeiten zur iterativen Verbesserung des Prototyps bis hin zum „echten“ Probetrieb. Das Projektergebnis wird abschließend der Öffentlichkeit vorgestellt. Parallel zur Arbeit an den Projektzielen von AUTOBUS wird die Vorbereitung und Erschließung weiterer automatisiert zu befahrender Teststrecken im Rahmen von Folgeprojekten ins Auge gefasst. Bereits begonnene Planungen werden im kommenden Jahr weitergeführt.

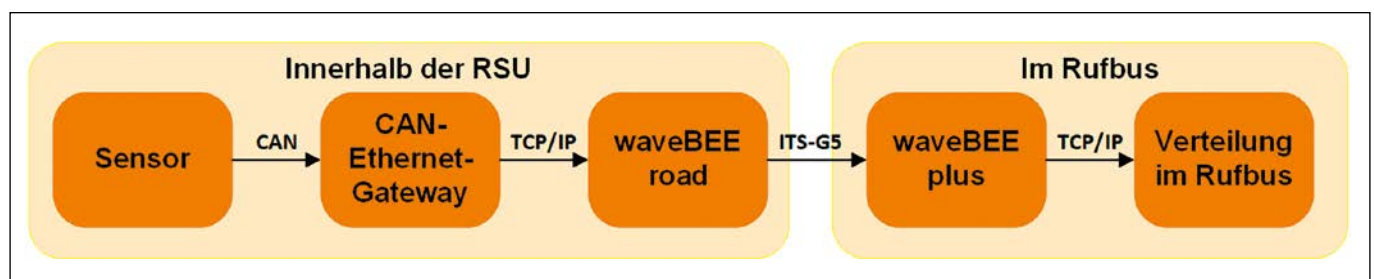


Abbildung 4: Kommunikationspfad vom Radarsensor bis zu den Datenverbrauchern im Rufbus

Referenzen:

- [1] F. Zeitler, R. Babl, J. Schmid, A. Höß, „AUTBUS – Entwicklung eines autonomen Kleinbusses für den ländlichen Raum“, in Forschungsbericht 2021, Amberg, Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, 2020
- [2] F. Zeitler, R. Babl, J. Schmid, A. Baldermann, A. Höß, „AUTBUS – Entwicklung eines autonomen Kleinbusses für den ländlichen Raum“, in Forschungsbericht 2021, Amberg, Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, 2021
- [3] F. Rösel, T. Weishaupt, „Städte quellen über, das Land dünnt sich aus: Anteil der Landbevölkerung auf niedrigstem Stand seit 1871“, ifo Dresden berichtet, 2020
- [4] Franziska Kaindl, „Malerische Städte und Dörfer in Deutschland, die Sie perfekt mit dem 9-Euro-Ticket erreichen“ 25.08.2022. [Verfügbar]. <https://www.merkur.de/reise/9-euro-ticket-staedte-doerfer-malerisch-deutschland-tagesausflug-zug-zr-91717115.html> [Zugegriffen: 04.10.2022]
- [5] Johanna Wahl, „9-Euro-Ticket ist Großstadtpolitik“ 01.06.2022. [Verfügbar]. <https://www.tagesschau.de/inland/gesellschaft/neun-euro-land-101.html> [Zugegriffen: 04.10.2022]
- [6] Tagesspiegel, „Von Zuhause bis zum genauen Ziel“ 22.08.2022. [Verfügbar]. <https://www.tagesspiegel.de/politik/berliner-mobilitaetsforscher-knie-fordert-29-euro-ticket-mit-taxi-flatrate-8589076.html> [Zugegriffen: 04.10.2022]
- [7] R. Babl, „Implementierung und Validierung der Kommunikation zwischen einem automatisierten Bus und dem zugehörigen Server im ländlichen Bereich“, Masterarbeit, Fakultät Elektrotechnik, Medien und Informatik, Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, Amberg, 2022
- [8] Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service, ETSI EN 302 637-2 V1.3.1, 2014
- [9] ETSI, “ETSI TR 103 562 V2.1.1 (2019-12) Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Analysis of the Collective Perception Service (CPS); Release 2”, 12.2019

Fördergeber:

AUTBUS (Zuweisungsbescheid Nr. 07 03/686 69/ 799/20/ 76/22/ 77/23/ 78/24) wird im Rahmen des Förderprogramms BayVFP Förderlinie Digitalisierung (DIK-2006-0016// DIK0233/02) im Teilbereich Informations- und Kommunikationstechnologien gefördert.



Bayerisches Staatsministerium für
Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie

Kontakt:



Roman Babl, M.Sc.

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

r.babl@oth-aw.de



Fabian Zeitler, M.Sc.

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

f.zeitler@oth-aw.de



André Baldermann, M.Eng.

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

a.baldermann@oth-aw.de



Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

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

a.hoess@oth-aw.de

Repräsentativer Trainingsdatensatz für KI-gestützte Energieverbrauchsvorhersage für Elektrofahrzeuge

Katharina Lutter, M.Eng.
Moritz Schaffenroth, M.Sc.
Heike Lepke, M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß



Zusammenfassung

Im Bereich der Mobilität sind Veränderungen nötig, um den Herausforderungen der Gegenwart und der Zukunft zu begegnen. Klimaschutz, die Reduktion von Schadstoff- und Lärmbelastungen sowie höhere Verfügbarkeit und Sicherheit stellen zu erreichende Ziele dar. Im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes "Automotive Intelligence 4 Connected Shared Mobility" (AI4CSM) werden Systeme für die Mobilität von morgen entwickelt [1]. Diese wird insbesondere elektrisch betriebene, autonome und gemeinsam genutzte Fahrzeuge umfassen. Eingebettete Intelligenz sowie vertrauenswürdige Künstliche Intelligenz (KI) spielen dabei eine wichtige Rolle. An dem Projekt AI4CSM sind 40 Partner aus zehn verschiedenen Ländern beteiligt. Es wird im Rahmen des H2020 ECSEL Joint Undertaking über einen Zeitraum von drei Jahren von der Europäischen Union gefördert und erhält außerdem Förderungen durch die nationalen Förderstellen, in Deutschland ist das das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).

Die Automotive-Forschungsgruppe der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden (OTH AW) arbeitet im Rahmen des Projektes an energieeffizienten Routing-Algorithmen für Elektrofahrzeugflotten und einer präziseren Vorhersage des Energieverbrauchs elektrisch betriebener Fahrzeuge durch Künstliche Intelligenz. Mit Hilfe der Methode des föderierten Lernens (Federated Learning) sollen zudem unterschiedliche Fahrzeuge voneinander lernen und ihre Energieverbrauchsprognosen weiter verbessern können, ohne dass private Daten bezüglich der Fahrten der einzelnen Fahrzeuge ausgetauscht werden müssen. Grundlage für das Training der KI-Modelle stellen ausreichende und geeignete Trainingsdaten dar. In den vergangenen Monaten wurde durch die Automotive-Forschungsgruppe und mehrere studentische Hilfskräfte ein repräsentativer Datensatz für das Training der Algorithmen erstellt. Dieser umfasst Fahrten mit einer Gesamtlänge von ca. 8000 km und 16 verschiedene Fahrer.

Abstract

In the area of mobility changes are necessary in order to meet the challenges of the present and the future. Climate protection, the reduction of pollutants and noise pollution, as well as higher availability and safety are goals to be achieved. Within the framework of the European research project "Automotive Intelligence 4 Connected Shared Mobility" (AI4CSM), systems for the mobility of tomorrow are being developed [1]. This will include, in particular, electrically powered, autonomous and shared vehicles. Embedded intelligence, as well as trustworthy artificial intelligence (AI), will play an important role. The AI4CSM project involves 40 partners from ten different countries. It is funded by the European Union over a period of three years as part of the H2020 ECSEL Joint Undertaking and also receives funding from the national funding agencies, which in Germany is the Federal Ministry of Education and Research (BMBF).

The automotive research group at the East Bavarian University of Applied Sciences Amberg-Weiden (OTH AW) is working on the topics of AI-based energy consumption prediction for electric vehicles and energy-efficient routing algorithms for electric vehicle fleets as part of the project. Artificial intelligence should enable a more precise, data-driven prediction of the energy consumption of electrically powered vehicles. Using the federated learning method, different vehicles will also be able to learn from each other and further improve their energy consumption forecasts without having to share private data regarding the trips of the individual vehicles. The basis for training the AI-models is sufficient and suitable training data. In recent months, the automotive research group and several student assistants have created a representative dataset for training the algorithms. This includes journeys with a total length of approximately 8000 km and 16 different drivers.

1 Einleitung

Ziel der deutschen Bundesregierung ist es, die CO₂-Emissionen im Verkehrssektor bis zum Jahr 2030 im Vergleich zum Jahr 1990 um 40 bis 42 Prozent zu reduzieren. Einen wichtigen Beitrag dazu soll der Umstieg von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor auf Fahrzeuge mit Elektroantrieb leisten. Bis 2030 wird eine Zahl von sieben bis zehn Millionen in Deutschland zugelassenen Elektrofahrzeugen angestrebt. Auch in der europäischen Union werden Bemühungen in diese Richtung unternommen. Geplant ist momentan, dass ab 2035 keine Neuwagen mit Verbrennungsmotor mehr verkauft werden dürfen. [2] [3]

Um die Verfügbarkeit und damit auch die Benutzerakzeptanz von Elektrofahrzeugen zu erhöhen, sind neben dem Ausbau der Ladeinfrastruktur und der Weiterentwicklung von Batterietechnologien auch speziell auf die Bedürfnisse der Nutzer von Elektrofahrzeugen ausgerichtete Routing-Services erforderlich. Diese dienen dazu, möglichst optimale Zeitpunkte und Orte zum Laden vorzuschlagen und alternative Fahrtrouten mit einem geringeren zu erwartenden Energieverbrauch aufzuzeigen. Die Grundlage für diese Funktionen stellt dabei eine möglichst präzise Vorhersage des Energieverbrauchs des Fahrzeugs über die gewünschten Strecken dar. Der Energieverbrauch eines Elektrofahrzeugs hängt von zahlreichen Faktoren ab. Zu diesen zählen unter anderem Geschwindigkeit und Beschleunigung, das Wetter, die Verkehrslage, die Art der befahrenen Straßen und mehr. Unterschiedliche Fahrzeughersteller bieten heute proprietäre Modelle für die Schätzung des Energieverbrauchs ihrer Fahrzeuge an. Dabei werden jedoch nicht alle Einflussgrößen erfasst und nicht immer wird eine realistische Prognose gegeben. Die Verwendung von Modellen, die auf Künstlicher Intelligenz basieren, könnte die Genauigkeit der Energieverbrauchsprognosen deutlich erhöhen, da diese Modelle durch neue Daten, die während der Fahrten generiert werden, stetig weitertrainiert und damit verbessert werden. Zudem können diese Modelle auch individuellere Faktoren wie die Fahrstile der Fahrer miteinbeziehen.

Im Folgenden wird dargestellt, wie die Automotive-Forschungsgruppe der OTH AW im Rahmen des Forschungsprojektes "Automotive Intelligence 4 Connected Shared Mobility" (AI₄CSM) plant, Künstliche Intelligenz und Federated Learning zur Ermöglichung präziserer Energieverbrauchsvorhersagen für Elektrofahrzeuge zu verwenden. Des Weiteren wird beschrieben, wie ein umfangreicher und repräsentativer Datensatz für das Training der KI-Algorithmen erstellt wurde.

2 Federated Learning Ansatz für KI-gestützte Energieverbrauchsvorhersage für Elektrofahrzeuge

Um ein KI-Modell für die Vorhersage des Energieverbrauchs eines elektrisch betriebenen Fahrzeugs erstellen und verbessern zu können, werden Trainingsdaten benötigt. Diese müssen den Verlauf des Energieverbrauchs des Fahrzeugs während des Fahrens sowie Daten bezüglich der Größen, die den Energieverbrauch beeinflussen, enthalten. Zu letzteren zählen beispielsweise der Verlauf von Geschwindigkeit und Beschleunigung während der Fahrt, die gefahrenen Strecken sowie Datum und Uhrzeiten der Fahrten. Da es sich dabei um höchst sensible private Daten handelt, sollen diese das Fahrzeug nach Möglichkeit nicht verlassen. Erforderlich ist also eine Edge-Computing-Einheit an Bord des Fahrzeugs, auf der das, zum Beispiel durch Simulation, vortrainierte KI-Modell für die Energieverbrauchsprognose weitertrainiert und verbessert wird. Da ein Fahrzeug allein nur eine begrenzte Menge an Daten generiert, verbessert sich das Modell bei dieser Methode allerdings nur langsam. Eine deutlich schnellere Verbesserung und insgesamt präzisere Ergebnisse wären zu erwarten, wenn die Daten mehrerer Fahrzeuge für das Training zur Verfügung stehen würden.

Eine Lösung für diesen Konflikt stellt die Verwendung des sogenannten föderierten Lernens (Federated Learning) dar. Bei diesem Ansatz wird ein globales KI-Modell entwickelt und verbessert, indem die Parameter der lokal trainierten KI-Modelle mehrerer Teilnehmer, in dem hier beschriebenen Anwendungsfall mehrerer Fahrzeuge, ausgetauscht werden. Da nur die Modellparameter, nicht aber die Datensätze selbst, mit den anderen Teilnehmern geteilt werden, bleibt die Privatsphäre der einzelnen Teilnehmer gewahrt. Federated Learning wird in einigen Bereichen der Technik bereits angewandt, etwa für die Verbesserung der Rechtschreibkorrekturvorschläge von Smartphone-Tastaturen [4] [5].

Die Idee Federated Learning zur KI-basierten Vorhersage des Energieverbrauchs von Elektrofahrzeugen einzusetzen, ist auch in der Forschung noch sehr neu. Die Automotive-Forschungsgruppe der OTH AW möchte nun erstmals mithilfe realer Energieverbrauchsdaten von Elektrofahrzeugen dieses Konzept umsetzen. Abbildung 1 illustriert den geplanten Aufbau des Federated Learning Systems. Mehrere Fahrzeuge trainieren in der Edge täglich während des Ladens lokale KI-Modelle mithilfe der Daten, die während ihrer Fahrten aufgenommen werden. Die Parameter dieser Modelle werden regelmäßig in die Cloud übertragen, um mithilfe von Federated Learning Algorithmen dort ein globales KI-Modell zu trainieren. Umgekehrt werden die Parameter des globalen Modells an die lokalen Modelle der Fahrzeuge übertragen, damit diese so indirekt voneinander lernen können.

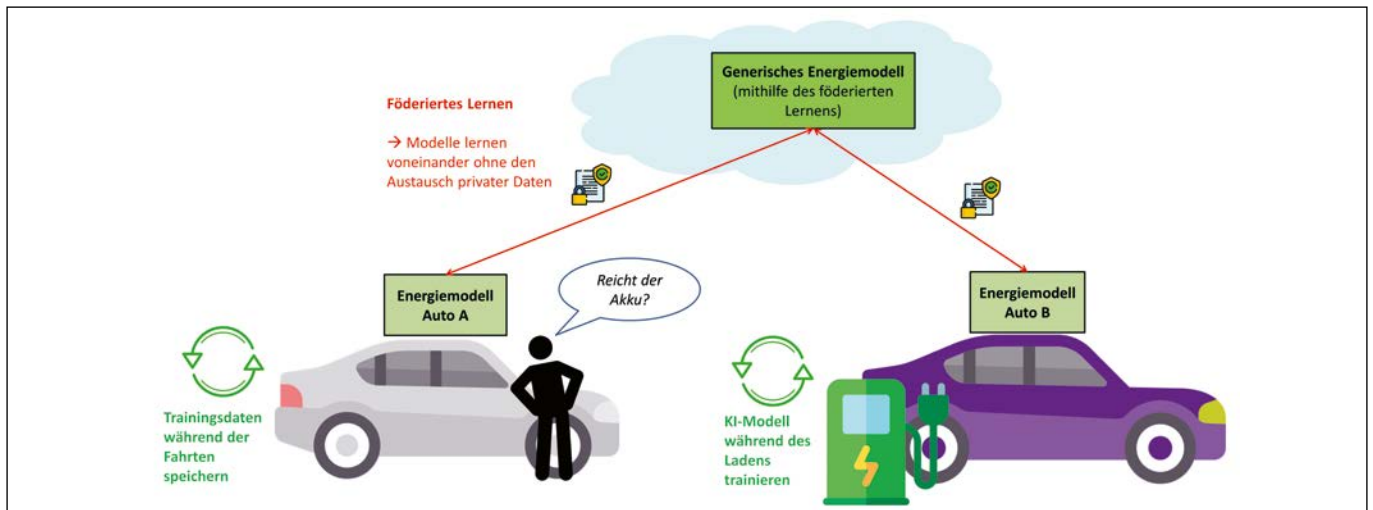


Abbildung 1: Kombinierte Cloud/Edge Architektur für Federated Learning und KI-gestützte Energieverbrauchsvorhersage

3 Erstellung eines repräsentativen Trainingsdatensatzes

Um das im vorigen Kapitel beschriebene Konzept im Projekt umsetzen zu können, mussten zunächst geeignete Trainingsdaten akquiriert werden. Durch Recherche stellte sich heraus, dass es derzeit keine passenden öffentlich zugängliche Datensätze zum Energieverbrauch von Elektrofahrzeugen gibt. Aus diesem Grund erstellte die Automotive-Forschungsgruppe der OTH AW selbst einen repräsentativen Datensatz.

3.1 Testfahrten und Datenerfassung

Über einen Zeitraum von zwei Monaten hinweg wurde ein Elektrofahrzeug von der E-Mobility Solutions GmbH gemietet. Die Autovermietung mit Sitz in Sulzbach-Rosenberg bietet die monatsweise Vermietung sowie das Leasing von Elektrofahrzeugen vieler verschiedener Modelle an. Die E-Mobility Solutions GmbH erlaubte der Forschungsgruppe zur Datenerfassung das Anbringen eines OnBoardDiagnose(OBD)-Adapters an der entsprechenden Schnittstelle des Fahrzeugs. Erfasst wurden die Fahrzeuggeschwindigkeit sowie Leistung und Ladezustand der Batterie. Mithilfe des OBD-Adapters wurden CAN-Bus-Nachrichten des Fahrzeugs mitgeschnitten und über Bluetooth an ein Smartphone übertragen. Eine Smartphone-App dekodierte die Nachrichten und speicherte die erforderlichen Parameter mit Zeitstempel in einer Protokolldatei ab. Zusätzlich wurden während der Fahrten GPS-Koordinaten aufgenommen. Diese dienen dazu, den Datensatz um die Umgebung betreffende Informationen wie Temperatur, Wetter, Wind, Höhenunterschiede im Streckenverlauf und die Eigenschaften der befahrenen Straßen zu ergänzen.

Insgesamt legte das Fahrzeug innerhalb des zweimonatigen Mietzeitraums ca. 8000 km zurück und wurde dabei von 16 unterschiedlichen Personen gefahren.



Abbildung 2: Einige der Fahrer und das Testfahrzeug



Abbildung 3: OBD-Adapter zum Abgriff von Daten aus dem CAN-Bus des Fahrzeugs

Der Fahrerkreis setzte sich aus für das Projekt stundenweise angestellten Studierenden der OTH Amberg-Weiden und Mitgliedern der Automotive-Forschungsgruppe zusammen. Die Fahrten wurden hauptsächlich innerhalb und im Umkreis der Städte Amberg, Schwandorf und Regensburg durchgeführt, wie in Abbildung 4 dargestellt ist. Durchgeführt wurden Testfahrten mit vorgegebenen Routen, die jeweils mehrmals durch unterschiedliche

Personen wiederholt wurden, und Testfahrten mit freier Streckenwahl.

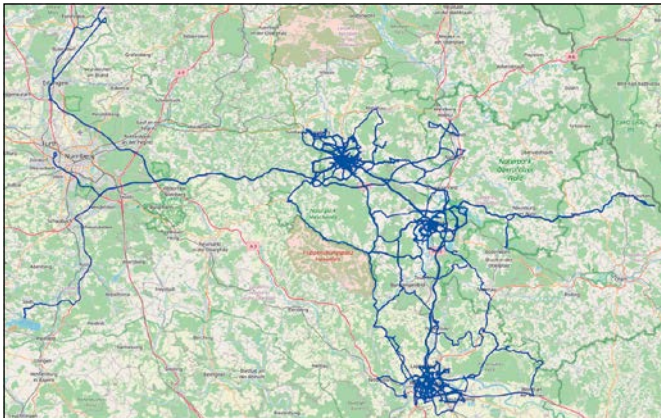


Abbildung 4: Im Datensatz enthaltene Strecken (ca. 8000 km Gesamtlänge, hauptsächlich Amberg, Schwandorf und Regensburg)

3.2 Aufbereitung und Ergänzung des Datensatzes

Auf Basis der während der Fahrten aufgenommenen GPS-Daten wurde der Datensatz um zusätzliche Größen, die den Energieverbrauch eines Elektrofahrzeugs beeinflussen, ergänzt. Nachfolgend werden diese beschrieben.

Wetter:

Das Wetter beeinflusst den Energieverbrauch von Elektrofahrzeugen in mehrerlei Hinsicht. Windstärke und Windrichtung haben Auswirkungen auf die Energie, die ein Fahrzeug benötigt, um den Luftwiderstand zu überwinden. Die Außentemperatur beeinflusst die Leistungsfähigkeit der Batterie. Diese muss ggfs. gekühlt oder beheizt werden. Zudem werden die Passagiere des Fahrzeugs abhängig von der Außentemperatur Heizung oder Klimaanlage in Anspruch nehmen, was ebenfalls Energie kostet. Wetterereignisse wie Regen, Schnee, Frost oder Nebel beeinflussen den Energieverbrauch indirekt, indem sie den Fahrstil des Fahrers und den Rollwiderstand der Straße verändern. Der Datensatz wurde mithilfe der API von openweathermap.org [6] um Temperatur, Windstärke und -richtung sowie die Wetterereignisse zum Zeitpunkt der Fahrten ergänzt. [7]

Höhenprofil:

Das Höhenprofil der Strecke beeinflusst die potenzielle Energie, die ein Fahrzeug auf der Fahrt überwinden muss. Zudem kann bei Elektrofahrzeugen beim Bergabfahren eine Energierückgewinnung (Rekuperation) erfolgen, indem der Motor beim Bremsen als Generator fungiert und die Batterie wieder auflädt. Der Datensatz wurde deshalb anhand der GPS-Koordinaten mit Höhenangaben ergänzt.

Eigenschaften der Fahrstrecke und der Straßen:

Einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch eines Fahrzeugs besitzen die Geschwindigkeiten und die Beschleunigungsvorgänge [7]. Damit ein KI-Modell lernen kann, diese über eine bestimmte Strecke vorherzusagen,

muss es einige Eigenschaften der Strecke kennen. So muss beispielsweise bekannt sein, wie hoch die vorgegebene Höchst- oder Richtgeschwindigkeit auf den einzelnen Streckenabschnitten ist. Wird innerhalb der Strecke von einer Straße auf eine andere abgebogen oder ist eine Straße sehr kurvig, sind Brems- und Beschleunigungsvorgänge nötig. Dasselbe gilt mit einiger Wahrscheinlichkeit auch, wenn Ampeln oder Fußgängerüberwege überfahren werden müssen. Um diese Informationen für die Strecken, die im Rahmen der Testfahrten gefahren wurden, zu ermitteln, wurden die frei zugänglichen und nutzbaren Daten des OpenStreetMap-Projekts [8] verwendet. OpenStreetMap bietet eine Karte, die neben dem Straßen- und Wegenetz mit ihren zugehörigen Eigenschaften auch weitere Elemente der Straßeninfrastruktur wie Ampeln und Fußgängerüberwege enthält. OpenStreetMap-Straßenabschnitte und -Knoten sind über ihre GPS-Koordinaten lokalisierbar.



Abbildung 5: Beispiel für Map-Matching (blau: aufgenommene GPS-Koordinaten, rot: den befahrenen Straßen zugeordnete GPS-Koordinaten)

Im ersten Schritt wurden also die aufgenommenen GPS-Koordinaten den befahrenen Straßenabschnitten, definiert durch deren IDs in OpenStreetMap, zugeordnet. Dieser als Map-Matching bezeichnete Vorgang wurde mithilfe der Routing-Engine Valhalla [9] durchgeführt. Abbildung 5 zeigt ein Beispiel für das Ergebnis eines Map-Matchings. Anhand der OpenStreetMap-IDs der Straßenabschnitte war es anschließend möglich, aus OpenStreetMap zu extrahieren, wie viele Fußgängerüberwege, Radfahrstreifen, verkehrsberuhigte Bereiche oder Ampeln auf diesen Straßenabschnitten liegen. Des Weiteren wurden Informationen bezüglich der Oberflächenbeschaffenheit und der üblichen Geschwindigkeiten und Geschwindigkeitsbegrenzungen der Straßen entnommen. Um Daten aus OpenStreetMap zu extrahieren, können beispielsweise die Overpass API [10] oder die OpenStreetMap Editing API [11] verwendet werden. Mithilfe eines eigens entwickelten Algorithmus wurde anschließend geprüft, an welchen Ampeln und Fußgängerüberwegen tatsächlich vorbeigefahren wurde. Das ist nötig, damit diese, falls sie zwischen zwei Straßen liegen, nicht doppelt im Datensatz auftauchen und damit sie ig-

noriert werden, falls sie zwar zu einem Straßenabschnitt gehören, aber auf einem Teil dieses Straßenabschnitts liegen, der nicht befahren wurde. Zudem wurde für jeden Straßenabschnitt anhand der Koordinaten aus OpenStreetMap berechnet, wie kurvig dieser ist. Mithilfe der API der OSRM Routing Engine [12] wurde noch ergänzt, wann Abbiegevorgänge notwendig waren.

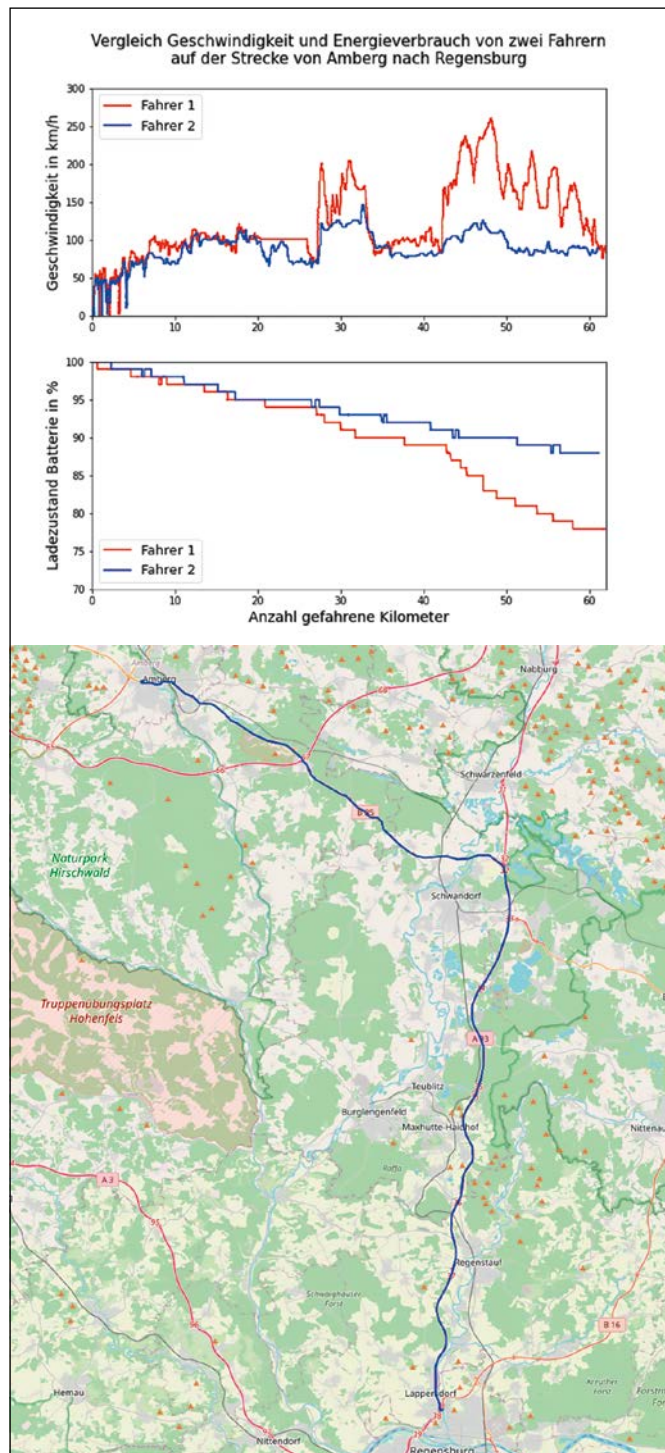


Abbildung 6: Vergleich des Energieverbrauchs und des Geschwindigkeitsverlaufes bei den Fahrten zweier unterschiedlicher Fahrer von Amberg nach Regensburg

Fahrer:

Der Fahrstil der Person, die ein Kraftfahrzeug führt, beeinflusst ebenfalls die Geschwindigkeiten und die Beschleunigungsvorgänge und damit den Energieverbrauch massiv. Dies verdeutlicht das in Abbildung 6 dargestellte Beispiel aus dem aufgenommenen Datensatz. Zwei unterschiedliche Personen sind dabei mit dem Testfahrzeug auf demselben Weg von Amberg nach Regensburg gefahren. Der Akku des Fahrzeugs war zu Beginn bei beiden zu 100% geladen. Während Fahrer 1 22% der Batteriekapazität für die Fahrt benötigt hat, verbrauchte Fahrer 2 nur 12 %. Dies lag daran, dass Fahrer 2 deutlich energiesparender gefahren ist, indem er vor allem auf der Autobahn eine deutlich langsamere Geschwindigkeit wählte als Fahrer 1.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Ein Team der Automotive-Forschungsgruppe der OTH AW beschäftigt sich im Forschungsprojekt AI4CSM mit der Entwicklung von KI-Modellen für die Energieverbrauchsvorhersage für Elektrofahrzeuge. Das Konzept des Federated Learning soll ermöglichen, dass die KI-Modelle mehrere Fahrzeuge voneinander lernen können, ohne dass sensible Daten ihrer Fahrten miteinander geteilt werden müssen. Im ersten Projektjahr wurden die Anforderungen für das Federated Learning System festgelegt und Einflussgrößen auf den Energieverbrauch von Elektrofahrzeugen identifiziert. Zudem wurde ein repräsentativer Datensatz für das Training der Algorithmen mit einem gemieteten Elektrofahrzeug erstellt. Dieser Datensatz wurde aufbereitet und um relevante Parameter ergänzt. In den kommenden zwei Projektjahren wird der beschriebene Datensatz für das Training von KI-Modellen zur Vorhersage des Energieverbrauchs von Elektrofahrzeugen verwendet werden, wobei der Federated Learning Ansatz angewandt wird.

Referenzen:

- [1] “Automotive Intelligence 4 Connected Shared Mobility”, <https://ai4csm.eu>
- [2] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/verkehr-1672896>
- [3] Vertretung der europäischen Kommission in Deutschland, „Europäischer Grüner Deal: Kommission schlägt Neuausrichtung von Wirtschaft und Gesellschaft in der EU vor, um Klimaziele zu erreichen“, erstellt 14.Juli 2022, https://germany.representation.ec.europa.eu/news/europaischer-gruner-deal-kommission-schlagt-neuausrichtung-von-wirtschaft-und-gesellschaft-der-eu-2021-07-14_de
- [4] Google Research, “Federated Learning: Collaborative Machine Learning without Centralized Training Data”, 6.April 2017, <https://ai.googleblog.com/2017/04/federated-learning-collaborative.html>
- [5] Google, “Learn how Gboard gets better”, <https://support.google.com/gboard/answer/9334583?hl=en>
- [6] OpenWeather Ltd, “Weather API”, <https://openweathermap.org/api>
- [7] Martin Fischer, Johanna Steindl, Heike Lepke und Alfred Höß, “EU-Research-Projekt ‘1000kmPLUS’ – Optimized Routing for Electric Vehicles”, OTH Amberg-Weiden, Forschungsbericht 2020, Amberg, 2020, S.45-46
- [8] <https://www.openstreetmap.de/faq/#was-ist-openstreetmap>
- [9] “Valhalla open source routing”, <https://valhalla.readthedocs.io/en/latest/valhalla-intro/>
- [10] „Handbuch zur Overpass API“, <https://dev.overpass-api.de/overpass-doc/de/>
- [11] https://wiki.openstreetmap.org/wiki/API_vo.6, 6.September 2022
- [12] <https://project-osrm.org/docs/v5.24.0/api/#>

Alle Online-Quellen wurden zuletzt aufgerufen am 9.September 2022.

Projektpartner:

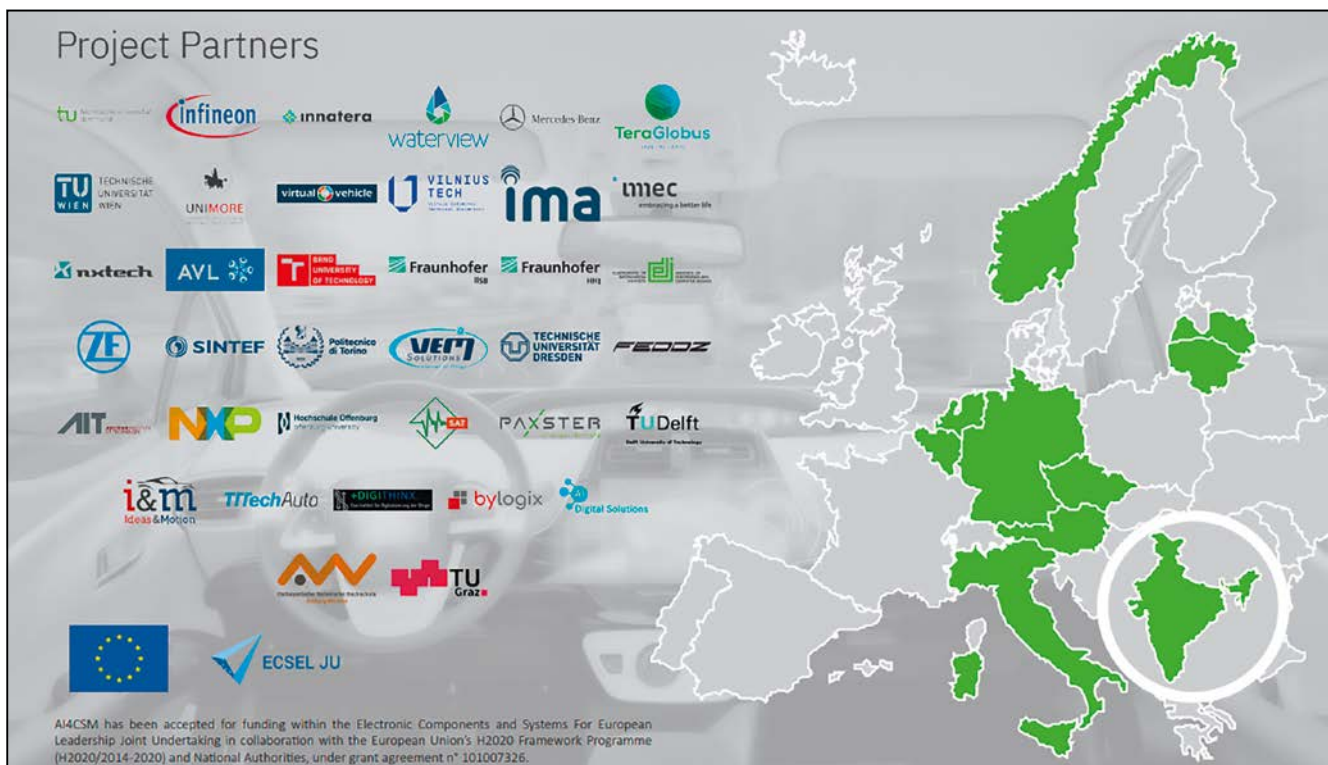


Abbildung 7: Überblick über die Projektpartner im europäischen Forschungsprojekt AI4CSM [1]

Fördergeber:

AI4CSM wird im Rahmen des H2020 ECSEL Joint Undertaking über einen Zeitraum von drei Jahren von der Europäischen Union gefördert und erhält außerdem Förderungen durch die nationalen Förderstellen, in Deutschland ist das das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).



Kontakt:



Katharina Lutter, M.Eng.

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

k.lutter@oth-aw.de



Moritz Schaffenroth, M.Sc.

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

m.schaffenroth@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



Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

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

a.hoess@oth-aw.de



Siemens Amberg

HIGH-TECH-STANDORT AMBERG

Impulse für die Zukunft Siemens Amberg feiert Geburtstag!

Happy Birthday Siemens Amberg! Seit 75 Jahren entwickeln und fertigen wir in Amberg Produkte, Systeme und Software für den Weltmarkt. Und wir setzen Impulse für die industrielle Produktion. Unsere beiden preisgekrönten Fertigungen Elektronikwerk und Gerätewerk sind Benchmark im Konzern und bilden die Blaupause für die digitale Fabrik. Mit über 1.000 Ingenieuren entwickeln wir Hi-Tech-Produkte für industrielle Anwendungen, Infrastruktur und Gebäude, darunter führende Automatisierungssysteme wie die SIMATIC und SIRIUS-Familie. Dabei kooperieren wir mit Partnern in einem starken Netzwerk aus Wirtschaft und Bildung. Mit 5.000 Beschäftigten und 200 Auszubildenden sind wir der größte Arbeitgeber in der Region und bieten die modernsten Industriearbeitsplätze der Welt mit attraktiven Leistungen eines global agierenden Unternehmens. Wir sind stolz auf unseren Standort und setzen auf nachhaltiges Ressourcenmanagement.

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

SIEMENS

Zusammenfassung

Immer häufiger werden Geräte aus dem Alltag und dem Arbeitsumfeld mit einem Netzwerk verbunden und werden so Teil des sog. Internet der Dinge. Viele dieser Geräte weisen jedoch Schwachstellen auf, die folglich die Sicherheit und Privatsphäre der Nutzer bedrohen. In diesem Bericht wird der aktuelle Stand einer laufenden Promotion vorgestellt, das Gerätehersteller dabei unterstützen soll, Bedrohungen und Schwachstellen zu erkennen und geeignete Gegenmaßnahmen zu entwickeln. Dazu werden eine Technik zur Modellierung von Bedrohungen und eine Methodik zur Risikobewertung vorgestellt.

Abstract

An increasing number of devices from everyday life and the working environment are being connected to a network, and thus become part of the so-called Internet of Things. However, many of these devices have vulnerabilities that consequently threaten the security and privacy of the users. This report presents the current progress of a PhD project that aims to support device manufacturers in identifying threats and vulnerabilities and developing suitable countermeasures. For this purpose, a threat modelling technique and a risk assessment methodology are presented.

1 Introduction

Since 2021, more than 10 billion devices have been connected to the Internet [1], forming the so-called Internet of Things (IoT). This trend of connecting devices to a network can be seen in various fields of application, such as consumer, medical, and industrial applications. However, the increasing attack surface due to multiple network interfaces leads to a higher risk of cyberattacks on these IoT devices. A compromised device may violate the users' privacy or even endanger the safety of people and the environment in industrial applications, for example. Manufacturers of such devices are therefore required to conduct a threat analysis and vulnerability assessment, i.e. threat modelling. This allows the systematic identification of attack scenarios and definition of appropriate countermeasures. The aim of this work is to support manufacturers in the process of identifying threats and vulnerabilities and developing suitable countermeasures. The report describes the current progress of this PhD project.

2 Status Quo and Project Aim

In recent decades, several approaches have evolved to identify threats. For example, security experts developed techniques such as STRIDE [2, Ch. 3] and attack trees [3] for threat and attack vector identification. However, many manufacturer do not have skilled personnel to apply these fundamental techniques [4], as their staff are mainly mechanical, electrical and firmware engineers. This has been recognized by national and international organisations that seek to support manufacturers through best practice guidelines, e.g. ENISA's Baseline Security Recommendations for IoT [5], and lists of the most common threats, e.g. OWASP Top 10 IoT [6]. Another approach are risk assessment processes, which aim to accompany the identification of threats through a formal process. However, established processes such as NIST SP 800-30, IEC 62443-3-2, or PASTA [7] are usually complex and focused on IT systems. The latter also applies to software tools, which do not consider the special characteristics of embedded systems.

The aim of this PhD project is to improve and specialise threat modelling on IoT devices. The previously listed approaches to threat identification have their respective benefits, but need to be extended or adapted to achieve the best result for IoT devices. Therefore, in the next two sections, a threat modelling technique and a risk assessment methodology are proposed to ultimately enable simple device modelling and threat identification. Both technique and methodology will be made available to manufacturers in the form of a software tool.

3 Cyber-Physical Data Flow Diagram

One of the most popular threat modelling technique is the Data Flow Diagram (DFD) [2, Ch. 2]. It is used to model how data is transmitted, processed, and stored in a system using the five elements Process, Data Store, External Entity, Data Flow, and Trust Area. The advantages of a DFD include its simplicity and the possibility to combine it with other techniques such as STRIDE or LINDDUN [8] to identify and generate threats. However, there are several issues when used for IoT devices that the proposed extension, Cyber-Physical DFD (CPDFD), aims to address.

One major difference between IT and IoT applications is the data source and sink. The source is often a sensor that measures a value, for example, a camera, a temperature sensor or a presence detector. After processing, an actuator, which acts as the data sink, may be changed, for instance, a door lock. In other words, physical values are captured and the environment is influenced accordingly. This direct interaction of the device with the real world, however, causes privacy and safety concerns that did not previously exist to this extent in IT applications. The DFD notation is therefore extended by the element Physical Link in order to be able to model these interactions with the physical world. This allows sensors and actuators, among others, to have a first-class representation in the diagrams, highlighting issues with the goals of privacy and safety.

As IoT devices are often placed outdoors or offered to customers, patients and external parties, attacks on the hardware must also be taken into account. However, there is no established technique for creating a model of the hardware for a security assessment. It is proposed to adapt and extend the DFD notation in order to be able to create such a model. DFDs are mainly used to model software-related components. By splitting the elements into logical and physical, both the software and hardware can be modelled. The added physical elements are used to create the hardware model and allow, for example, the visualisation of processors, data stores such as a FLASH or a One-time Programmable (OTP) memory, and trust boundaries such as a Printed Circuit Board (PCB) or a device casing. The Data Flow element is not required for hardware diagrams, but the representation of interfaces

is not satisfactory. Interfaces significantly determine the attack surface on an IoT device. Therefore, these should be represented in a first-class manner by a new element Interface in the same way as the element Physical Link.

In conclusion, as part of the CPDFD technique, the element Physical Link is added to highlight sensors and actuators and their corresponding privacy and safety issues, the element Interface emphasises the increased attack entry points. Reusing the elements of a DFD for a hardware model creates a unified notation, simplifying the communication between hardware, embedded, and software developers. The extended notation is also intended to enable more accurate modelling of the devices and to facilitate automated threat generation. Table 1 provides an overview of all CPDFD elements including their symbol, use in the two different diagrams, and a few examples.

Table 1: The elements of a CPDFD including the newly added elements Physical Link and Interface. The third column shows the distinction between logical and physical elements. The fourth and fifth column indicate their use in a DFD and the hardware diagram (HWD).

Element	Symbol	Type	DFD	HWD	Examples
Process		Log. Process Phy. Processor	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Process, web server Microprocessor, ASIC
Data Store		Log. Data Store Phy. Data Store	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	File, SQL database FLASH, OTP memory
External Entity		Log. External Entity Phy. External Entity	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Browser, cloud service User, machine
Data Flow			<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Data flow with protocol
Trust Area		Log. Trust Area Phy. Trust Area	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Net segment, container Building, casing, PCB
Physical Link			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Microphone, battery, motor
Interface			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	WiFi, USB, JTAG

4 Thing Threat Modelling

In this section, a methodology for risk assessment, called Thing Threat Modelling (TTM), is presented. The methodology is aligned with the previously mentioned guidelines NIST SP 800-30, IEC 62443-3-2, and PASTA, but in contrast to those, it is focused on IoT devices. Another focus is on modelling and identifying threats and vulnerabilities, which is often only described superficially in other methodologies. Due to these circumstances, the guidelines referred to do not need to be replaced by TTM, but can be complemented. TTM follows the four phases analysis, modelling, mitigation, and validation and consists of 13 steps as shown in Figure 1. The steps are briefly explained below.

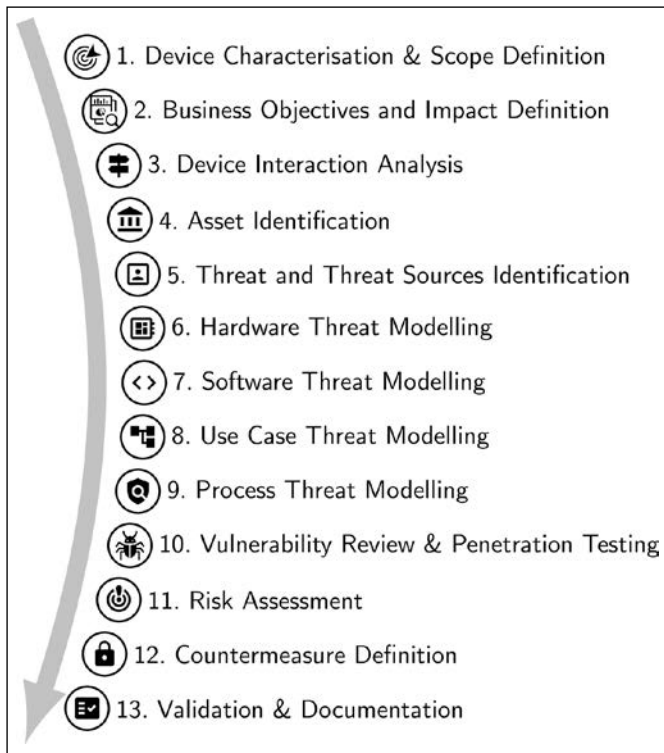


Figure 1: The 13 steps of the TTM methodology.

The aim of the first step is to provide an overview of the device under consideration and to define the scope of the entire process. This includes describing the device

according to various criteria such as application, location and environment, connectivity and requirements. All persons and parties who need to be involved in the process should also be identified and a joint goal defined. This serves as an introduction and base level for all persons involved. The second step is to set the goals for both the device and the business. An analysis of the potential impacts and risks should also capture what is at stake, for example, based on reports from other companies. The third step, Device Interaction Analysis, has the goal to identify actors, external systems, and use cases. A use case diagram and a system context diagram, including the interfaces to humans, machines and the environment, should provide an overview of all the actors involved. The next step is to identify the various (intangible) assets. The procedure is described in more detail in [9]. The fifth step is to address the questions of who is threatening the device, why they might attack it, which threats arise, and what consequences may result. Further information can be found in [9, 10].

The next steps focus on modelling the device and finding threats and vulnerabilities. During the step Hardware Threat Modelling, a hardware model should be created according to the description in Section 3. Security-relevant features should be noted for all components and subsequently threats, vulnerabilities and attack vectors

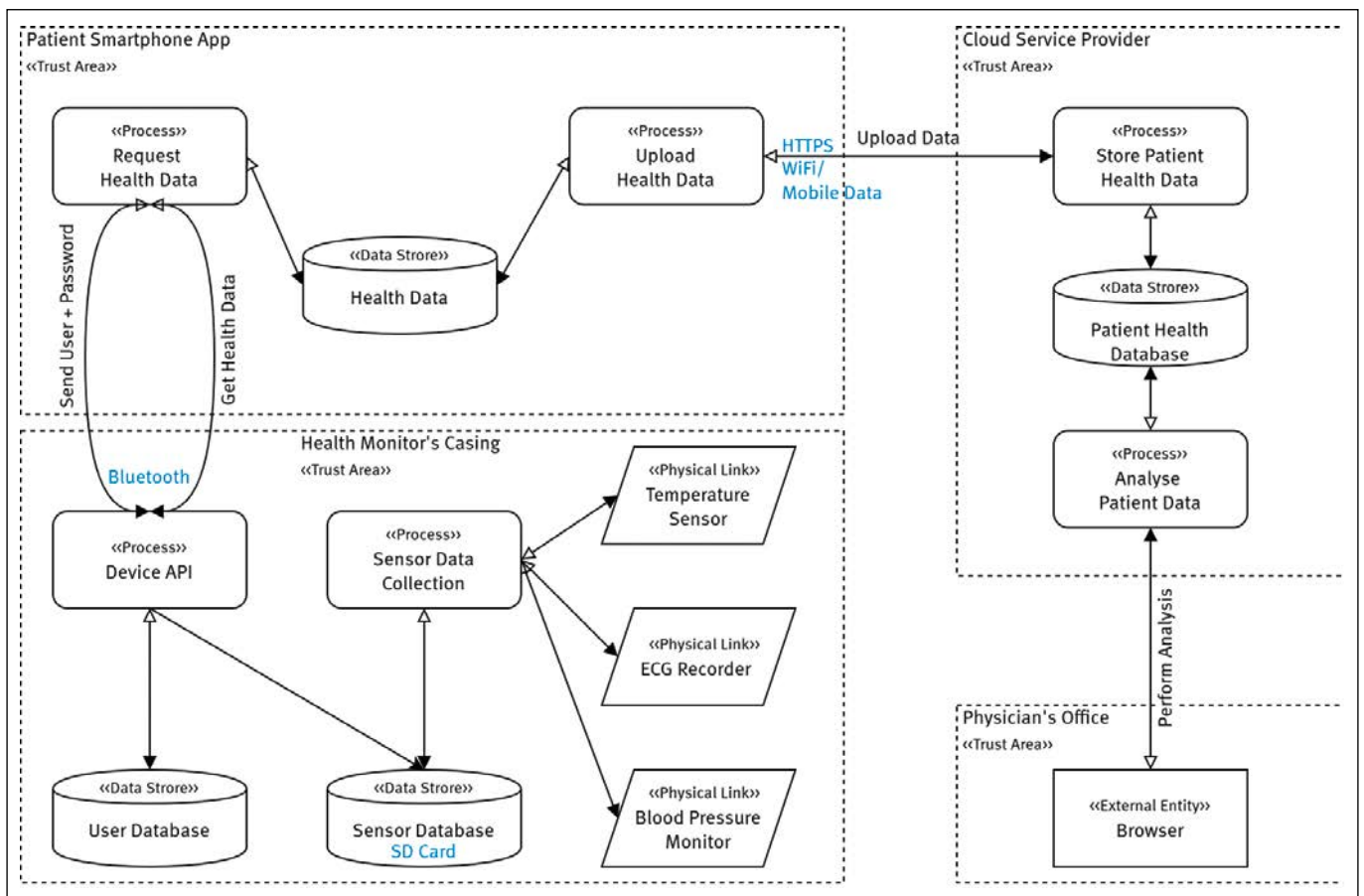


Figure 2: An example CPDFD for a medical IoT device. The entire system includes a device, a smartphone app and a cloud service and allows physicians to view and analyse the patient's health data.

identified throughout the product lifecycle. Public weakness and attack libraries such as Common Weakness Enumeration (CWE) and Common Attack Pattern Enumeration and Classification (CAPEC) can be included to support the latter. The seventh step aims at identifying threats resulting from software components and their configuration. Examples of such components are the operating system, the cryptography library, and a web server, as well as modules for firmware updates, authentication and logging. The collection of third-party components can also be used to track dependencies and software updates. The next step is the creation of DFDs including the new element Physical Link. The aforementioned weakness and attack libraries can also be applied in this step, as well as other techniques such as STRIDE and LINDDUN. Additional information or links to the hardware model can also be noted, which are shown in blue in Figure 2 as an example. It can be ensured that no use case is missed using the use case diagram from step 3. The step Process Threat Modelling is not typical for a risk assessment process. In this step, processes and policies that relate to the device during the entire product lifecycle should be documented. The absence of certain processes may not lead to immediate threats, but can indicate weaknesses in the product lifecycle. Examples for such processes and policies include secure coding standards, an update policy, an incident handling process, and regular penetration testing. The latter is also part of the tenth step of the TTM methodology. At this point, all hardware and software components should be known and all design flaws should have been discovered. The components can then

be checked against public vulnerability databases such as the Common Vulnerability Enumeration (CVE). With the help of penetration testing, the identified vulnerabilities can be verified and further ones uncovered.

In step 11, all vulnerabilities found should be assessed with a risk score. This score is intended to help in the decision on how to handle the vulnerability. In general, there are the four options to handle risks: mitigate, avoid, transfer or accept. The twelfth step is to define countermeasures if the risk is to be mitigated. Subsequently, the effectiveness of the measure should be assessed by calculating the residual risk. Finally, the entire process, including the created models, identified threats, and developed countermeasures, should be validated and documented.

5 Conclusion and Further Work

Despite established security techniques, risk assessment processes, and threat modelling tools, as well as recent guidelines on the security of IoT devices, many devices contain vulnerabilities. The idea of this project is to focus and combine the different approaches on IoT devices. In Sections 3 and 4, an adapted methodology for threat modelling and risk assessment were presented. The adaptations are intended to improve guidance for device manufacturers and support them in identifying threats to privacy and safety. The next steps are to provide the methodologies in a software tool and to evaluate them through several studies with device manufacturers and students.

References:

- [1] Transforma Insights, “Number of Internet of Things (IoT) connected devices worldwide from 2019 to 2030 (in billions)”, Statista, 2022. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/> [accessed: 2022-08-26]
- [2] A. Shostack, “Threat modeling: designing for security”. Indianapolis, IN: Wiley, 2014.
- [3] B. Schneier, “Attack Trees”, Dec. 1999. [Online]. Available: https://www.schneier.com/academic/archives/1999/12/attack_trees.html [accessed: 2022-08-26]
- [4] Thales Group, “Internet of Things (IoT) Security Threats and Concerns Worldwide as of Late 2019”, Statista, 24 Mar 2020. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1202640/internet-of-things-security-concerns/> [accessed: 2022-08-26]
- [5] “Baseline Security Recommendations for Internet of Things in the context of Critical Information Infrastructures”, European Union Agency for Cybersecurity, Nov. 2017. [Online]. Available: <https://www.enisa.europa.eu/publications/baseline-security-recommendations-for-iot> [accessed: 2022-07-05]
- [6] “OWASP Top 10 2018: Internet of Things”, OWASP. [Online]. Available: <https://owasp.org/www-pdf-archive/OWASP-IoT-Top-10-2018-final.pdf> [accessed: 2022-08-26]
- [7] M. M. Morana and T. Uceda Vélez, “Risk centric threat modeling: process for attack simulation and threat analysis”. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2015.
- [8] M. Deng, K. Wuyts, R. Scandariato, B. Preneel, and W. Joosen, “A privacy threat analysis framework: supporting the elicitation and fulfillment of privacy requirements”, *Requirements Eng*, vol. 16, no. 1, pp. 3–32, Mar. 2011, DOI: 10.1007/s00766-010-0115-7.
- [9] S. Liebl, L. Lathrop, U. Raithel, A. Aßmuth, I. Ferguson, and M. Söllner, “Analyzing the Attack Surface and Threats of Industrial Internet of Things Devices”, *International Journal on Advances in Security*, vol. 14, Dec. 2021, p. 59–70.
- [10] S. Liebl, L. Lathrop, U. Raithel, M. Söllner, and A. Aßmuth, “Threat Analysis of Industrial Internet of Things Devices”, in *The Eleventh International Conference on Cloud Computing, GRIDs, and Virtualization*, Nice, France, Oct. 2020, p. 31–37.

Acknowledgement:

This work is part of the author's PhD project, which is supervised by Prof. Dr. Andreas Aßmuth from OTH Amberg-Weiden in cooperation with Dr. Ian Ferguson and Dr. Natalie Coull from Abertay University in Dundee, UK.

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

Zusammenfassung

Im Zuge des industriellen Internet der Dinge werden Sensoren und Aktoren netzwerkfähig und intelligenter. Die vergrößerte Angriffsfläche führt jedoch zu einem erhöhten Risiko von Cyberangriffen auf industrielle Kontrollsysteme. Vor allem in kritischen Infrastrukturen kann dies zur Gefahr für Mensch und Umwelt werden. In diesem Bericht wird das Forschungsprojekt „iSEC“ vorgestellt, dessen Ziel die Entwicklung von Security-Lösungen für leistungsschwache industrielle eingebettete Systeme ist. Es werden Ergebnisse aus den Bereichen Bedrohungsanalyse, Physical Unclonable Functions und Kryptografie präsentiert und eine Auswahl gewonnener Erkenntnisse beschrieben.

Abstract

As the industrial Internet of Things progresses, sensors and actuators become network-enabled and smarter. However, the increasing attack surface leads to a higher risk of cyberattacks on industrial control systems. This may endanger people and the environment, especially for systems in critical infrastructures. This report presents the research project “iSEC”, which aims to develop security solutions for low-power industrial embedded systems. The results from the threat analysis, the evaluation of Physical Unclonable Functions and cryptographic solutions are presented and a few findings described.

1 Einleitung

Das Internet der Dinge (engl. Internet of Things, IoT) hat Einzug in das industrielle Umfeld gehalten, um auch dort Lösungen zur Effizienzsteigerung oder Minimierung des Energieverbrauchs realisieren zu können. Um die Daten auch auf der untersten Ebene eines industriellen Kontrollsystems, den Sensoren und Aktoren, analysieren zu können, werden diese Geräte netzwerkfähig und intelligenter.

Durch das so entstehende industrielle Internet der Dinge (IIoT) nimmt die Angriffsfläche auf die ehemals isolierten und meist proprietären Systeme stark zu. Es müssen deswegen auf allen Ebenen Geräte und Systeme abgesichert werden, um Angriffe zu verhindern. Vor allem in den sog. kritischen Infrastrukturen [1], wie Energie, Gesundheit und Transport und Verkehr, könnte ein erfolgreicher Angriff zu katastrophalen Konsequenzen für Mensch, Umwelt und Gesellschaft führen. Bei der Umsetzung von Security-Maßnahmen auf Geräten wie Sensoren und

Aktoren gibt es jedoch einige Herausforderungen, wie zum Beispiel geringe Rechen- und Speicherkapazitäten, Echtzeitfähigkeit und lange Produktlebensdauer, die in diesem Projekt bewältigt werden sollen.

2 Projektübersicht

Im Projekt „Intelligente Security für elektrische Stellantriebe und Stromrichter in kritischen Infrastrukturen (iSEC)“ forscht die OTH Amberg-Weiden gemeinsam mit den beiden Industriepartnern SIPOS Aktorik GmbH und Grass Power Electronics GmbH an Security-Lösungen speziell für eingebettete Systeme mit geringen Ressourcen. Die Produkte beider Firmen werden den zuvor beschriebenen kritischen Infrastrukturen zugeordnet. Die elektrischen Stellantriebe für Industriearmaturen der SIPOS Aktorik GmbH werden beispielsweise in Kraftwerken, Kläranlagen und Pumpwerken eingesetzt und sind somit in den Sektoren Energie und Wasser angesiedelt. Grass Power Electronics GmbH entwickelt leistungselekt-

ronische Systeme für die elektrische Energieversorgung. Die Anlagen verwalten zum Beispiel Photovoltaikanlagen, Batteriespeicher und Ladestationen für Elektrofahrzeuge und verbinden die lokalen Stromnetze durch ein intelligentes Einspeisemanagement mit dem öffentlichen Stromversorgungsnetz.

Das Ziel des dreijährigen Forschungsprojekts bestand darin, umfassende und zugleich ressourcenschonende Security-Lösungen für eingebettete Systeme zu entwickeln und so zum Schutz der kritischen Infrastrukturen beizutragen. Basierend auf einer Bedrohungs- und Risikoanalyse wurden zunächst verschiedene Konzepte mit Hardware- und/oder Softwarelösungen erstellt, um so das jeweils erreichbare Security-Niveau abschätzen zu können. Anschließend wurden konkrete Lösungen zur Sicherstellung der Systemintegrität, der Benutzerauthentifizierung und der sicheren Kommunikation erarbeitet. Die Validierung der einzelnen sowie des Verbundes der entwickelten Sicherheitsmaßnahmen, sowohl durch die Projektpartner als auch durch externe Institute, rundeten das Projekt ab.

3 Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden ausgewählte Teilergebnisse des Projekts vorgestellt.

3.1 Bedrohungsanalyse und Penetrationstests

Als erstes wurde eine Bedrohungs- und Risikoanalyse für die Geräte der beiden Industriepartner durchgeführt. Um die Angriffsfläche eines IoT-Geräts vollständig aufzudecken, wurde wie folgt vorgegangen: Zunächst wurden alle Hardware- und Softwarekomponenten identifiziert und die verschiedenen Daten gesammelt, die auf einem Gerät gespeichert oder verarbeitet werden. Als nächstes wurden Vermögenswerte aus verschiedenen Perspektiven identifiziert. Dazu zählen beispielsweise das geistige Eigentum für den Hersteller, die generierten Daten für Gerätebesitzer und die gesammelten Daten vom Gerätbenutzer. Diese Vorarbeit war hilfreich bei der Ermittlung von potenziellen Angreifern und deren Motiv im nächsten Schritt. Daraufhin wurden Bedrohungstypen gesammelt und kategorisiert. Anschließend sind verschiedene Angriffstechniken auf das IoT-Gerät analysiert worden. Durch diese Vorarbeiten konnten sämtliche Angriffsszenarien auf die Geräte der Industriepartner untersucht werden. Die angesprochenen Ergebnisse sind detailliert in den Publikationen [2,3] beschrieben.

Die Bedrohungsanalyse wurde durch Penetrationstests begleitet, um weitere Schwachstellen zu finden und die identifizierten Angriffsszenarien zu verifizieren. Im Rahmen dessen wurden auch Fuzzing-Tests durchgeführt. Dabei wurde u. a. eine Schwachstelle in der USB-Implementierung eines Mikrocontrollers entdeckt.

3.2 Physical Unclonable Functions

Physical Unclonable Functions (PUFs) ermöglichen es, einen einzigartigen und nicht klonbaren kryptografischen Schlüssel von den Eigenschaften eines physikalischen Objekts abzuleiten, ähnlich einem Fingerabdruck. Im Rahmen des Projekts wurden PUFs auf Funktionsweise, Anwendungsmöglichkeiten und Marktverfügbarkeit untersucht. Die Ergebnisse sind in der Publikation [4] beschrieben.

3.3 Auswahl der kryptografischen Algorithmen

Bei der Auswahl der kryptografischen Algorithmen und Bibliotheken gibt es einiges zu beachten.

Da eingebettete Systeme oft kein vollständiges Betriebssystem haben und in den Ressourcen beschränkt sind, können beliebige Bibliotheken wie OpenSSL nicht verwendet werden. Zunächst wurden Kriterien für die Auswahl einer Bibliothek gesammelt, um eine objektive Entscheidung treffen zu können. Zu den wichtigsten identifizierten Kriterien zählen: Quellcodeverfügbarkeit, Lizenzmodell, (FIPS 140-) Validierung, Update-Verfügbarkeit, Unterstützung von Hardwarebeschleunigern, Unterstützung von TLS und die Verfügbarkeit der verschiedenen kryptografischen Grundbausteine wie symmetrische Verschlüsselung, Public-Key-Kryptografie (Verschlüsselung, Schlüsselaustausch, Signatur), Hashfunktion und Zufallszahlengenerierung. Ein Beispiel für das letztgenannte Kriterium ist die Verfügbarkeit von Elliptische-Kurven-Kryptografie und speziell den ressourcenschonenden Algorithmen basierend auf den Kurven 25519 und 448.

Um den Ressourcenverbrauch hinsichtlich Geschwindigkeit und Speicherbedarf beurteilen zu können, wurden Messungen für die verschiedenen kryptografischen Grundbausteine auf mehreren Mikrocontrollern durchgeführt. Abbildung 1 zeigt beispielhaft die Messung von AES128 im GCM-Modus verschiedener kryptografischer Bibliotheken auf einem STM32L4 Mikrocontroller.

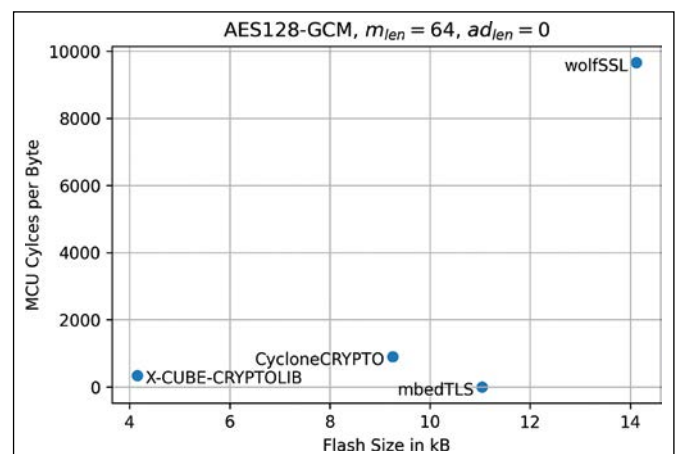


Abbildung 1: Vergleich verschiedener Bibliotheken hinsichtlich Speicherbedarf und Geschwindigkeit für die symmetrische Blockchiffre AES128 im GCM-Modus.

3.4 Erzeugung von Entropie

Für kryptografische Operationen werden häufig Zufallszahlen benötigt. Die Sicherheit der Algorithmen ist allerdings nur gewährleistet, wenn diese Zufallszahlen eine hohe Entropie haben. Sie dürfen nicht vorhersagbar sein und nur einmalig verwendet werden. Da ein Computer deterministisch arbeitet, stellt die Erzeugung von echten Zufallszahlen eine große Herausforderung dar. Bei PCs lässt sich beispielsweise durch Benutzerinteraktion oder Netzwerkkommunikation Entropie erzeugen, in eingebetteten Systemen sind diese Entropiequellen jedoch nicht oder nur unzureichend gegeben. Es ist deswegen ein echter Zufallszahlengenerator (engl. True Random Number Generator, TRNG) als Hardwarekomponente notwendig. Wenn dieser nicht vorhanden ist, sollten kryptografisch sichere Pseudozufallszahlengeneratoren (CSPRNG) eingesetzt werden. Für diese werden zwar immer noch echte Zufallszahlen als Startwert, der sog. Seed, benötigt, der Bedarf an echten Zufallszahlen ist aber um ein Vielfaches geringer.

Um Entropie für den Seed zu erzeugen, wurden zwei Möglichkeiten, mittels SRAM-Speicher und Temperatursensor, evaluiert. Bei Erstgenanntem lässt sich der Effekt nutzen, dass der Zustand einer SRAM-Speicherzelle nach dem Anlegen einer Spannung undefiniert ist, sie kann also den Wert „0“ oder „1“ haben. Die Idee der zweitgenannten Möglichkeit ist, das letzte Bit des Temperatursensors, das aufgrund der hohen Auflösung scheinbar willkürlich wechselt, als Zufall zu verwenden. Die Qualität der beiden potenziellen Entropiequellen wurde anhand der Empfehlungen vom National Institute of Standards and Technology (NIST) überprüft [5], welche maßgebend durch die Min-Entropie $H = -\log_2 \max_{(1 \leq i \leq k)} p_i$ bestimmt wird.

Um den Temperatursensor als Entropiequelle zu validieren, wurden mehrere Megabyte Daten von dem letzten Bit des Analog-Digital-Konverters eines C2000-Echtzeit-Mikrocontrollers von Texas Instruments gesammelt und validiert. Entsprechend der Empfehlung [5] wurden 1000 Neustart-Tests und Tests bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. Optional können die Daten noch durch eine Hashfunktion (z. B. SHA256) aufbereitet werden (sog. Conditioning). Bei der direkten Verwendung der Werte des Temperatursensors resultierte eine Min-Entropie von $H=0,745$ Bit, nach der Aufbereitung stieg sie auf $H=0,878$ Bit (siehe Abbildung 2). Beide Ergebnisse sind für einen praktischen Einsatz als Entropiequelle hinreichend groß.

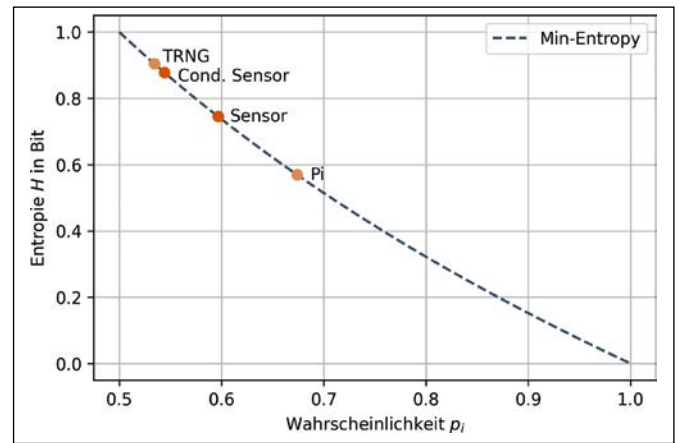


Abbildung 2: Die Min-Entropie für den direkten und aufbereiteten Wert des Temperatursensors im Vergleich mit der Kreiszahl Pi und einem TRNG. Die gestrichelte Linie deutet alle möglichen Werte an.

Die SRAM-Startwerte wurden von verschiedenen STM32-Mikrocontrollern (Fo, F4, F7) extrahiert. Die Messungen zeigten, dass nicht alle Speicherzellen den gewünschten undefinierten Startzustand mit einer Wahrscheinlichkeit von jeweils 50 % für „0“ und „1“ haben. Es müssen rund 20 bis 30 Bit zusammengefasst werden, um ein Bit Entropie zu erhalten. Diese Komprimierung kann ebenfalls durch eine Hashfunktion umgesetzt werden. Die Ergebnisse der Min-Entropie Berechnung waren positiv, scheinen jedoch von Controller und Anwendung abzuhängen. Des Weiteren kann durch diese Methode nur einmalig Entropie erzeugt werden, nämlich beim Anlegen einer Spannung.

4 Lessons Learned

Im folgenden Abschnitt werden drei Erfahrungen und Erkenntnisse aus diesem Projekt beschrieben. Die erste Erkenntnis ist die Wichtigkeit von Hardwareunterstützung von Security-Funktionen. Diese ist vor allem notwendig, um einen Vertrauensanker (engl. Root of Trust, RoT) zu haben. Nur durch diese unveränderbare RoT lässt sich eine Security-Kette aufbauen, anhand der sich die Integrität des gesamten Systems verifizieren lässt. Solche Security-Module enthalten in der Regel auch einen Beschleuniger für kryptografische Operationen. Bei einem Schlüsselaustausch mittels Public-Key-Kryptografie ist dieser notwendig, um die Echtzeitfähigkeit gewährleisten zu können. Zudem ist ein TRNG enthalten, wodurch sich das Problem mit der Entropieerzeugung löst. Ein Mikrocontroller mit solchen Funktionen sollte einem externen Baustein vorgezogen werden, um die Sicherheit zu erhöhen und um die Kommunikation als Flaschenhals zu vermeiden. Eine Überprüfung der Firmwaresignatur mit einer Dateigröße von mehreren Megabyte durch einen externen Baustein kann den Startvorgang eines Geräts aufgrund der meist langsamen Datenübertragung um mehrere Sekunden verlängern. Erfreulicherweise wird die Hardwareunterstützung von Security-Funktionen in Mikrocontrollern immer häufiger angeboten.

Die zweite Erkenntnis ist die Vielseitigkeit von Zertifikaten und einer Public-Key-Infrastruktur (PKI). Diese werden in erster Linie benötigt, um die Integrität und Authentizität einer Firmware überprüfen zu können. Durch ein eigenes Zertifikat für jedes IoT-Gerät lassen sich diese nicht nur eindeutig identifizieren, sondern es ergeben sich zahlreiche weitere Anwendungsfälle. Es kann zum Beispiel durch eine Hardwaresignatur sichergestellt werden, dass die Firmware nur auf der Hardware des Herstellers läuft. Weitere Beispiele sind sichere Kommunikation, gegenseitiger Austausch von (Benutzer-) Datenbanken und das Freischalten von kostenpflichtigen Optionen.

Weitere Erfahrungen wurden bei der Konzeption einer Multi-Faktor-Authentisierung (MFA) für eingebettete Systeme gesammelt. Für verschiedene Möglichkeiten sind im Folgenden die Voraussetzungen sowie Vor- und Nachteile zusammengefasst. Security-Token, die durch eine USB-Schnittstelle angebunden werden können, lassen sich aufgrund der dafür notwendigen Bibliotheken laut Token-Hersteller praktisch nicht in ein Bare-Metal-System integrieren. Um den vollen Funktionsumfang des FIDO2-Standards nutzen zu können, ist außerdem eine Internetverbindung notwendig. Ein Software-Token hat hingegen den Nachteil, dass dieser nicht vor Duplikation geschützt werden kann. Smartcards setzen ein Lesegerät voraus, wodurch eine Hardwareanpassung nötig sein kann. Wenn es die Möglichkeit gibt, einen Schlüssel zwischen

IoT-Gerät und Mobiltelefon auszutauschen, z. B. durch einen QR-Code auf dem Display, stehen zwei One-Time-Password (OTP) Algorithmen zur Auswahl. Beim HMAC-basierten OTP-Verfahren treten häufig Synchronisationsprobleme auf, weshalb eine sichere Rücksetzmethode der MFA notwendig ist. Bei zeitbasierten OTP-Verfahren wird die genaue Uhrzeit benötigt. Wenn es für das Gerät keine Möglichkeit zur Uhrzeitsynchronisation gibt, kann dies zur Folge haben, dass die Anmeldung aufgrund einer zu großen Abweichung von der aktuellen Uhrzeit nicht mehr möglich ist. Letztendlich sind maßgeschneiderte Lösungen, z. B. durch eine eigene App, meist möglich, die jedoch Aufwand und ggf. nicht verifizierte Sicherheit zur Folge haben.

5 Zusammenfassung

Eingebettete Systeme haben aufgrund zunehmender Vernetzung als Folge des IIoT einen erhöhten Schutzbedarf, um Angriffe auf industrielle Systeme zu verhindern. In diesem Projekt wurde zunächst die Angriffsfläche eines IoT-Geräts analysiert, um den Schutzbedarf zu ermitteln. Anschließend wurden verschiedene Hardware- und Softwarelösungen konzipiert und evaluiert. Dazu zählen die Untersuchungen von PUFs, Bibliotheken für Kryptografie und Quellen für Entropie. Um andere Gerätehersteller bei der Entwicklung sicherer Geräte zu unterstützen, wurden abschließend einige Erkenntnisse zusammengefasst.

Referenzen:

- [1] „Kritische Infrastrukturen“, Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe. [Online]. Verfügbar: https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/Kritische-Infrastrukturen/kritische-infrastrukturen_node.html [letzter Zugriff: 31.08.2022]
- [2] S. Liebl, L. Lathrop, U. Raithel, M. Söllner und A. Aßmuth, “Threat Analysis of Industrial Internet of Things Devices”, in The Eleventh International Conference on Cloud Computing, GRIDs, and Virtualization, Nizza, Frankreich, Okt. 2020, S. 31–37.
- [3] S. Liebl, L. Lathrop, U. Raithel, A. Aßmuth, I. Ferguson und M. Söllner, “Analyzing the Attack Surface and Threats of Industrial Internet of Things Devices”, International Journal on Advances in Security, vol. 14, Dez. 2021, S. 59–70.
- [4] L. Lathrop, S. Liebl, U. Raithel, M. Söllner und A. Aßmuth, “Securing the Internet of Things from the Bottom Up Using Physical Unclonable Functions”, in The Eleventh International Conference on Cloud Computing, GRIDs, and Virtualization, Nizza, Frankreich, Okt. 2020, S. 44–49.
- [5] “SP 800-90B: Recommendation for the Entropy Sources Used for Random Bit Generation”, NIST, Jan. 2018. [Online]. Verfügbar: <https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-90b/final> [letzter Zugriff: 31.08.2022]

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



Prof. Dr. Andreas Aßmuth

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Elektrotechnik,
Medien und Informatik
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

Zertifizierung von zeitkritischer Kommunikation in der Industrie- automatisierung

Sebastian Zach, M.Sc.
Johannes Hilburger
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmidt

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 Testlab 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 absolute Kompatibilität zu 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 usw. 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 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 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.

Herausforderungen für die Zertifizierung

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.

Aktuell wird an vielen Bereichen zur Erweiterung des Testscopes gearbeitet. So wurde der Automated RT-Tester auch für die Zertifizierung von TSN-Features erweitert. Die ersten Testfälle für TSN-Devices 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.

Um die gesteigerten Ansprüche von TSN zu erfüllen, ist das alte 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.

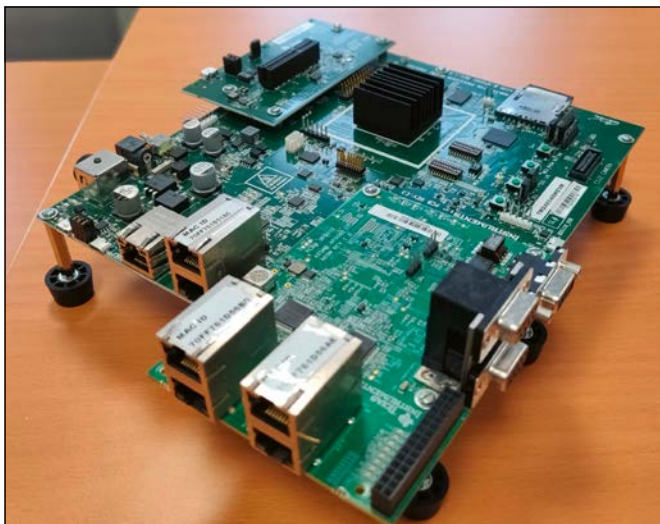


Abbildung 1: Embedded Test System

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

Dieses TRIAL-Bundle enthält auch Testfälle für die Process-Automation Profile 4.0 und wurde für die Zertifizierung von APL (Advanced Physical Layer) erweitert. 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 entsprechenden 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 sowie die damit verbundenen zyklischen und azyklischen Services.

Einordnung von TSN in den 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 jetzt auch auf TSN (Time Sensitive Networking) zurückgegriffen.

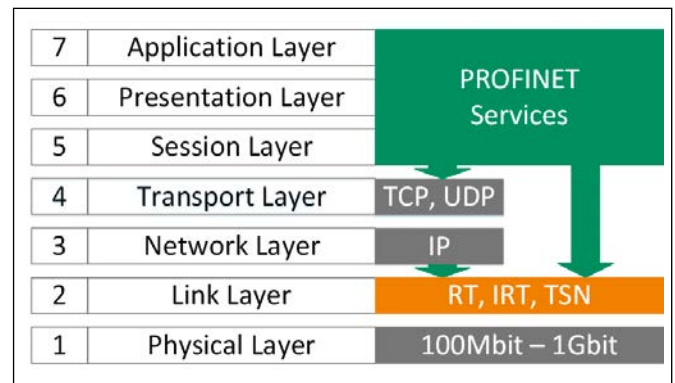


Abbildung 2: PROFINET und TSN im Protokollstack des ISO/OSI-Modells

TSN 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 taktsynchronen Kommunikation bedeuten auf lange Sicht zwangsläufig die Abkehr von den bis dato etablier-

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

Erweiterung des Automated RT-Tester für das neue Testsystem

Für das neue Testsystem 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 zwischen Board und PC zu schaffen. Das DUT wird (wie in Abbildung 3 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.

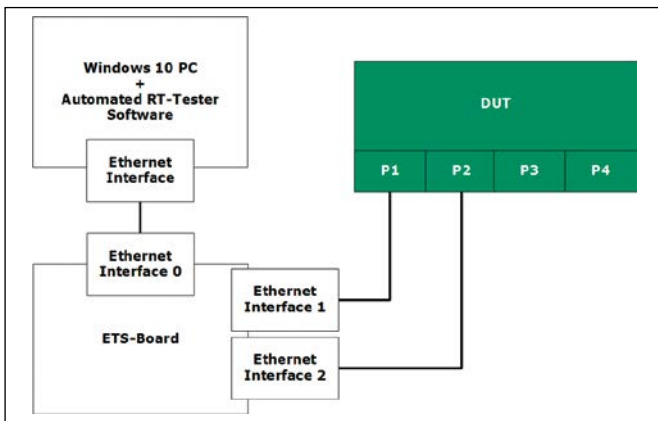


Abbildung 3: PROFINET Testsetup für TSN

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 neue Testcases für das ETS-Board entwickelt werden und die alten Testcases auf das neue Setup migriert werden. 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 4 schematisch dargestellt, die Anpassungen für die TSN-Zertifizierung sind farbig hervorgehoben.

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. Berlin, Frankfurt am Main, Mainz, Hannover, Nürnberg, Prag, Innsbruck, Den Haag und Peking.

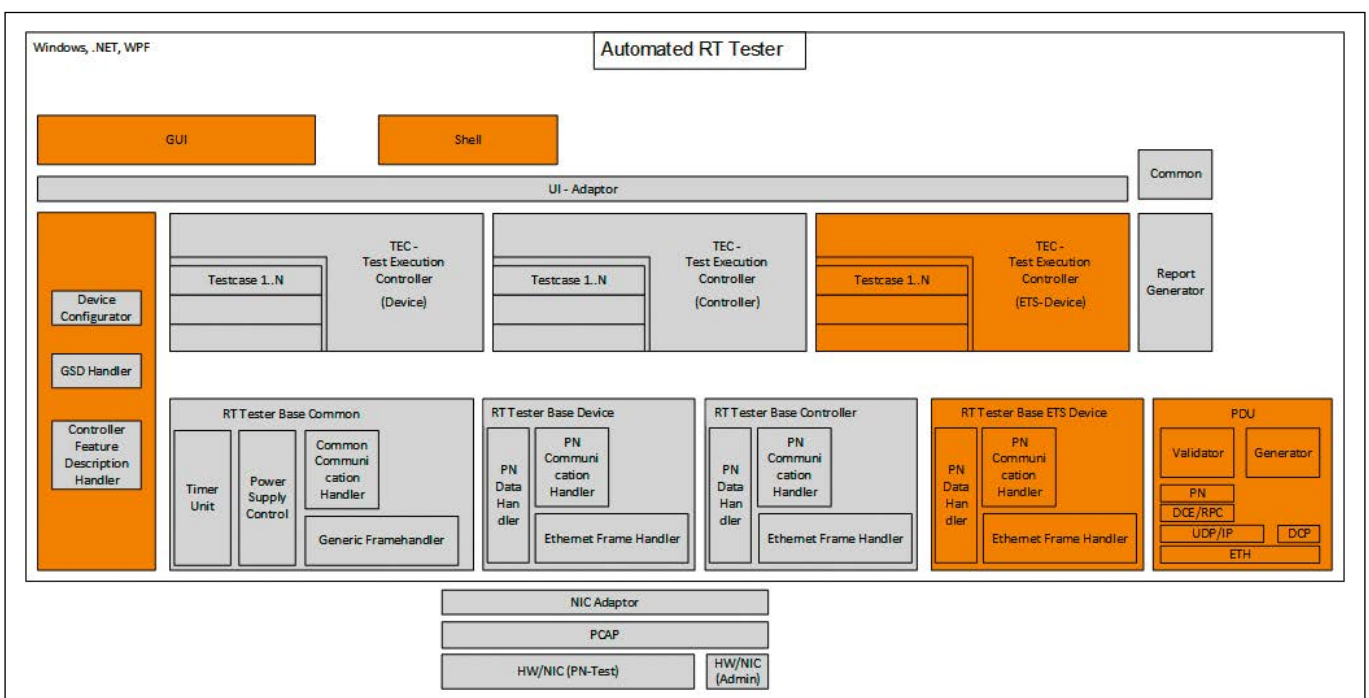


Abbildung 4: Erweiterte Softwarearchitektur des Automated-RT-Testers für TSN-Funktionalität

Kontakt:



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



Johannes Hilburger

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

j.hilburger@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

Kennzahlen für eine robuste Kommunikation im industriellen Umfeld

Sebastian Schaffenroth, M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmidt
Maximilian Bauer, M.Sc.

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 elektromagnetische Störungen (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.

Die Robustheit der Datenübertragung kann auf wenige Kennzahlen heruntergebrochen werden, welche durch Experimente und Literatur herausgearbeitet werden. Durch eine eigens entwickelte Messhardware, mit komplexer Signalverarbeitung [1] [2] [3] werden die Kennzahlen bei realen Datenübertragungen verifiziert.

Abstract

An essential part of Industry-4.0-concepts is safe and robust communication. Several industrial-ethernet standards like PROFINET, Ethernet-IP etcetera are utilized in most of the use-cases.

In some special use-cases in industrial applications electric drives and power electronics, like frequency inverters, or mismatching of the transmission path can make the operation of the industrial-ethernet standards impossible. This can be the case for unshielded single-pair-communication or contactless energy- and data-transfer.

The assessment of the robustness of industrial communication can be simplified to few metrics. With experiments and literature the metrics are identified. With an experimental platform [1] [2] [3] the metrics are evaluated in real applications.

Einleitung

In Bezug auf Datenübertragung sind für den Anwender die wichtigsten Kennzahlen die Latenz, die Datenrate und die Fehlerrate. In Echtzeitanwendungen hat man definierte Obergrenzen für diese Parameter, die unbedingt eingehalten werden müssen. Durch Shannon wissen wir wie die maximal mögliche Datenrate von der Kanalkapazität abhängt [4]. Die Kanalkapazität ist von dem Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) abhängig, also der Signalleistung P und der Rauschleistung N . Die Fehlerrate

ist ebenfalls von dem SNR und seiner Verteilungsfunktion abhängig.

$$SNR = \frac{P}{N} \quad (1)$$

Für viele Kommunikationsmodelle wird ein AWGN-Kanal, also gauss-verteilter Rauschen, angenommen. In realen Kanälen hat man jedoch oft keinen AWGN-Kanal [5], sondern impulsives Rauschen. Dieses kann mit Middleton-Class-A-Rauschen beschrieben werden [6], wobei die

Formel für die Kanalkapazität deutlich komplexer wird [7]. Die Rauschleistung σ^2 wird hier in eine gauss-verteilte Komponente σ_g^2 und eine impulsive Komponente σ_{iz} unterteilt. Die Kanalkapazität ist abhängig von der Rauschleistung, der Signalleistung und zusätzlich der Impulsivität des Rauschens.

In der industriellen Kommunikation sind eine wichtige Ursache von Rauschen elektromagnetische Störungen, welche durch Schaltvorgänge und leistungselektronische Bauteile erzeugt werden [8]. Diese koppeln sich über kapazitive, induktive und elektromagnetische Ausbreitung in die Datenleitung ein [9]. Das komplette Modell für die Kommunikation im industriellen Umfeld ist also abhängig von den Störquellen und der Störeinkopplung. Die Kennzahlen werden drei Teilgebieten zugeordnet:

- Kommunikationssystem
- Störquelle
- Übertragungsstrecke und Kopplung

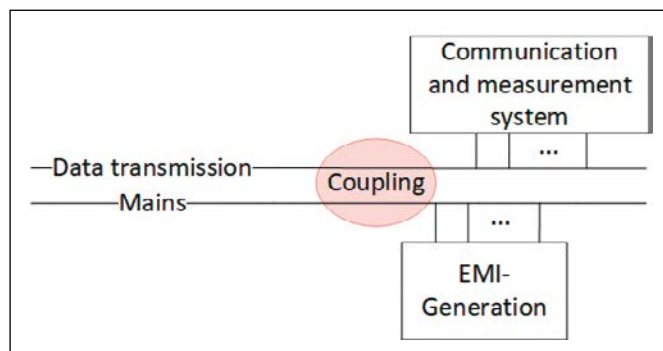


Abbildung 1: Konzept einer Datenübertragung im industriellen Umfeld

Im Folgenden werden die einzelnen Teilgebiete beleuchtet und anschließend der Zusammenhang zum Signal-Rausch-Verhältnis betrachtet.

Kommunikationssystem

Modems haben einen essentiellen Einfluss auf die Datenrate bzw. die Fehlerrate. Die wichtigsten Parameter sind die Übertragungstechnik (Modulation, Kodierung), die Modenkonzersion und die Empfangsdynamik.

Das Kommunikationssignal wird als Spannung zwischen den Leitern $U_{DM}(t)$, dem sogenannten Gegentaktsignal, übertragen. Zur isolierten Betrachtung der Modems vernachlässigen wir Welleneffekte durch die Leitungslänge. Dadurch ist die Spannung U_{DM} nur von den Widerständen des Senders und Empfängers abhängig.

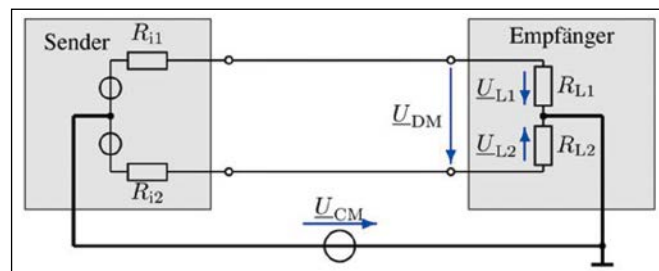


Abbildung 2: Ersatzschaltbild für symmetrische Datenübertragung

Gilt Formel (2) für die Widerstände, so sind die Spannungen U_{DM} und U_{CM} (Gleichtaktsignal) orthogonal und Störströme in der Masse beeinflussen das Kommunikationssignal nicht. Bei Unsymmetrien in den Innenwiderständen oder z. B. zusätzliche Widerstände durch Steckverbindungen entsteht eine Konversion von U_{CM} in U_{DM} und vice versa. Dies wird als Modenkonzersion bezeichnet.

$$\frac{R_{i1}}{R_{L1}} = \frac{R_{i2}}{R_{L2}} \quad (2)$$

Da moderne Empfänger als digitale Systeme realisiert sind, muss das Empfangssignal mithilfe eines Analog-Digital-Konverters digitalisiert werden. Diese können aufgrund der begrenzten Anzahl an Bits nur in einem bestimmten Spannungsbereich arbeiten. Ist die Spannung zu hoch, wird das Signal bei dem maximalen Spannung U_{max} abgeschnitten. Ist die Spannung zu niedrig, wird das Quantisierungsrauschen sehr hoch. Durch den Einsatz eines (Automatic) Gain Controls kann der Dynamikbereich erweitert werden.

Die Nutzdaten werden mithilfe einer Modulation als Spannungssignal übertragen. Es gibt eine Vielzahl von verwendeten und untersuchten Modulationen. In unserer Forschung vergleichen wir die weit verbreiteten Modulationstechniken OFDM (Wi-Fi, DSL, Powerline Communication) und PAM (Ethernet). Bei OFDM-Übertragung werden die Nutzdaten in einem zeitlich langen Symbol parallel auf unterschiedliche Frequenzen verteilt. Bei der PAM-Übertragung werden die Nutzdaten nacheinander mit kurzen breitbandigen Symbolen übertragen. Durch den Einsatz von Kodierungen kann die Fehlerrate reduziert und auch die Datenrate erhöht werden. In modernen Kommunikationssystemen werden meistens BCH-, Turbo- oder LDPC-Codes eingesetzt. Turbo-Codes sind sehr effizient bei impulsivem Rauschen [7]. Zusätzlich sind die Synchronisation und die Entzerrung des Kanals ein wichtiger Aspekt der Kommunikation, welcher hier nicht weiter betrachtet wird.

Störquelle

In industriellen Anwendungen sind drehzahlveränderliche Antriebe und ihre EMS oftmals eine problematische Störquelle. Diese verwenden für die Drehzahlsteuerung

meistens Frequenzumrichter mit konstanter Zwischenkreisspannung [10]. Die steilen Spannungsflanken bei der PWM-Modulation auf der Sekundärseite koppeln sich über parasitäre und gewollte Kapazitäten in die Masse ein und schließen sich über das Netz. Die Masseströme können sich in andere Stromkreise einkoppeln und dort Störungen verursachen.

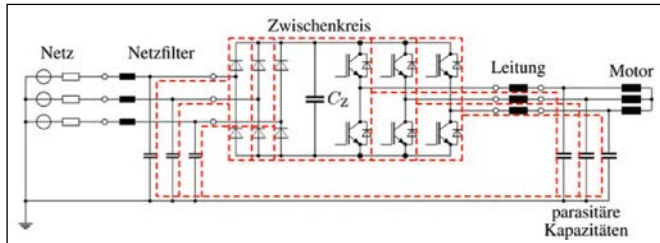


Abbildung 3: Stromanalyse für die EMV-Auskopplung bei Frequenzumrichter [9]

Hierbei ist klar ersichtlich, dass die Installation der Umrichter eine essentielle Rolle auf die Störauskopplung hat. Z. B. bietet der Einsatz eines Netzfilters einen räumlich kurzen und niederimpedanten Rückweg für den Störstrom. Die Leistung, also Drehzahl und Drehmoment, genauso wie die Schaltfrequenz haben einen Einfluss auf die Ansteuerung der IGBTs und damit auf die Störungen [11].

Die Anzahl der Antriebe und die Position untereinander sowie zu der Signalleitung hat einen Einfluss auf die Stärke des Störsignals sowie der Impulsivität, also dessen Verteilungsfunktion.

Übertragungsstrecke und Kopplung

Durch kapazitive, induktive und elektromagnetische Kopplung wird feldgebunden eine Störspannung von dem störenden Stromkreis auf die Signalleitung eingespeist. Die Kopplung ist abhängig von Koppellänge, der Koppelschleife, der Abstand zur störenden Leitung und der Schirmung.

Da das Nutzsignal bei modernen Datenübertragungssystemen üblicherweise als Gegentaktsignal über zwei Leitungen übertragen wird, beeinträchtigen nur Gegentaktstörungen die Datenübertragung. Unterschiedliche Geometrien der Leiter (z. B. Dicke, Länge) und unterschiedliche Abstände der einzelnen Leiter zum störenden Schaltkreis erzeugen eine Konversion von Gleichtakt zu Gegentakt. Eine übliche und sehr effiziente Methode zur Reduzierung der Gegentaktstörungen ist ein Verdrillen der Leitungen.

Der Widerstand in der Leitung sowie die Verluste im Dielektrikum dämpfen das übertragene Signal. Der Widerstand ist hauptsächlich abhängig von dem effektiven Querschnitt der Leitung sowie dem spezifischen Widerstand des Materials. Aufgrund des Skin-Effekts sinkt der effektive Querschnitt ca. mit \sqrt{f} und der Widerstand steigt mit dem gleichen Faktor. Der Widerstand bzw. die Dämpfung steigt linear mit der Länge der Leitung. Das Si-

gnal wird zusätzlich durch Inhomogenität im Kabel, also der Produktionsqualität, gedämpft [12].

Änderungen im Wellenwiderstand auf einer Leitung erzeugen Reflektionen. Dies kann z. B. durch eine Änderung des Leiterabstands, durch Verwendung unterschiedlicher Kabel, durch Verzweigungen oder Steckverbinder entstehen. Dies führt zu einer Mehrwege-Ausbreitung, welche selektives Unterdrücken von Frequenzen und eine lange Impulsantwort (und damit Inter-Symbol-Interferenz) zur Folge hat. Die betroffenen Frequenzen bzw. die Dauer der Impulsantwort ist dabei abhängig von der Leitungslänge und den Stoßstellen.

Zusammenhänge

Die erarbeiteten Kennzahlen können den Größen aus Formel (1) Signalleistung P , Rauschleistung N oder beiden zugewiesen werden. Das Nutzsignal wird durch die Leitungsdämpfung frequenzabhängig gedämpft. Durch Reflektionen wird das Signal frequenzselektiv gedämpft.

Die Anzahl, Installation, Leistungen und Position der Störquelle beschreiben die Leistung und Verteilungsfunktion der Störungen als Gleichtaktstörung U_{CM} . Abhängig von der Kopplungslänge, dem Leiterabstand und der Schirmung wird das Signal in die Signalleitung als Gleichtaktstörung eingekoppelt. Wird das Signal nahe dem Sender eingekoppelt, wird die Störung zusätzlich durch die Leitung gedämpft. Gibt es mehrere Stör- bzw. Koppelstellen, addieren sich diese auf. Reflektionen erzeugen im Signal durch Mehrwegeausbreitung zusätzliche Inter-Symbol-Interferenzen (ISI).

Durch die Leitergeometrie und den Widerständen in den Modems wird die Störung in Störungen im Nutzsignal konvertiert sowie das Nutzsignal gedämpft.

$$SNR(f) = \frac{1 - a_{DM/CM}}{a_{CM/DM}} \frac{P_{tx} a_{line} a_{fading}}{\sum_i U_{CM} K a_{line,N} + ISI} \quad (3)$$

Das SNR ist eine Zufallsvariable mit Middleton-Class-A-Verteilung und frequenzabhängig. Dabei ist für jedes Symbol die Störung im entsprechenden Spektrum $H(f)$ relevant.

$$SNR = \int_{-\infty}^{\infty} SNR(f) \cdot H(f) \quad (4)$$

Bei dem Mehrträgerverfahren OFDM ergibt sich für jeden Träger ein unterschiedliches SNR, für das breitbandige PAM ist das SNR im gesamten Spektrum der Symbole relevant. Durch die lange Symboldauer von OFDM ist diese Übertragungstechnik deutlich unempfindlicher gegenüber ISI.

In unserer weiteren Forschung sollen quantitative Werte und Zusammenhänge an verschiedenen Beispielszenarien erarbeitet und daraus Vorhersage und Richtlinien abgeleitet werden.

Referenzen:

- [1] S. Schaffenroth, M. Bauer und Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmidt, „Robuste Kommunikationstechniken für Multidrop-Konzepte“, Forschungsbericht der OTH AW, 2021.
- [2] A. Gercikow, S. Schaffenroth, H.-P. Schmidt and A. Kölpin, “Measurement Platform for Physical-Layer Analysis of Industrial and Automotive Ethernet”, 2020 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), 2020, pp. 1–6, DOI: 10.1109/SAS48726.2020.9220024.
- [3] A. Gercikow, „Modellierung der Datenübertragung für den Einsatz in industriellen Kommunikationssystemen“, Forschungsbericht der OTH-AW, Jg. 2020, pp. 75–78, 2020.
- [4] C. E. Shannon, “Communication in the Presence of Noise”, in Proceedings of the IRE, vol. 37, no. 1, pp. 10–21, Jan. 1949, DOI: 10.1109/JRPROC.1949.232969.
- [5] S. Schaffenroth, H.-P. Schmidt and A. Kölpin, “Mitigation of Coloured Impulsive noise in OFDM receiver”, 2021 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC), 2021, pp. 43–48, DOI: 10.1109/ISPLC52837.2021.9628650.
- [6] Andrea M. Tonello, Theo G. Swart, Lutz Lampe, Power Line Communications: Principles, Standards and Applications from Multimedia to Smart Grid, Chichester, UK: John Wiley & Sons Inc, 2016.
- [7] Andrei, Mihaela & Trifina, Lucian & Tarniceriu, Daniela. (2015). Capacity of Middleton Class-A impulsive noise channel with binary input. Applied Mathematics and Information Sciences. 9. 1291–1298. 10.12785/amis/090323.
- [8] J. Specovius, Grundkurs Leistungselektronik: Bauelemente, Schaltungen und Systeme, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015.
- [9] J. Franz, EMV – Störungssicherer Aufbau elektronischer Schaltungen, Wiesbaden: Springer Verlag, 2013.
- [10] A. Schramm, „Analyse der Netzzrückwirkungen und Eingangfilter gepulster leistungselektronischer Umrichter“, 2013.
- [11] S. Schaffenroth, H.-P. Schmidt and A. Kölpin, “Experimental analysis of frequency inverter noise on single pair Ethernet communication”, 2022 IEEE 18th International Conference on Factory Communication Systems (WFCS), 2022, pp. 1–4, DOI: 10.1109/WFCS53837.2022.9779184.
- [12] A. Fertner et al., “Backscattering in Twisted-Pair Nonhomogeneous Transmission Lines”, in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 66, no. 6, pp. 2674–2682, June 2018, DOI: 10.1109/TMTT.2018.2818699.
- [13] H.-P. Schmidt, A. Fuchs, “I 4.0 Technology Demonstrator for Research, Development and Education”, research report of OTH Amberg-Weiden, 2019, pp. 10–13, issn: 2365-1997.

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

Hygiene und Medizintechnik – Untersuchungen zur Wirksamkeit neu entwickelter Desinfektionsmethoden

Dr. rer. nat. Sebastian Buhl
Alexander Stich, M.Sc.
Fabian Wickert, B.Eng.
Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

Zusammenfassung

Sowohl im klinischen Umfeld als auch im öffentlichen Sektor hat die Hygiene in den letzten Jahren enorm an Stellenwert gewonnen. Aufgrund dieser gestiegenen Wahrnehmung und vor allem auch dem Bedarf an neuen und besseren Hygienemaßnahmen, ist eine Vielzahl neuer Technologien auf den Markt gekommen. Hierbei handelt es sich zum einen um die Weiterentwicklung bereits bekannter Methoden, zum anderen aber auch um Neuentwicklungen bisher weniger bekannter und eingesetzter Wirkmechanismen. Zwei dieser Technologien wurden nun an der Ostbayerischen Technischen Hochschule in Weiden bezüglich ihrer Effektivität und Wirkungsweise untersucht. Eines dieser Verfahren ist die Desinfektion größerer Räume mittels Trockenvernebelung mit Natriumhypochlorit (NaClO). Dieses Verfahren wurde bereits in Studien unserer Arbeitsgruppe zusammen mit der Firma Apollon (Apollon Biotech GmbH, Kemnath) untersucht und die prinzipielle Wirksamkeit nachgewiesen. In einem neuen Testaufbau wurde jetzt die Anwendung im Personentransport untersucht, um das Potential der Desinfektionsmaßnahme für Busse oder im Krankentransport einschätzen zu können.

Eine weitere Neuentwicklung in diesem Sektor stellt die Kaltplasma-Desinfektion dar. Auch hier wurde in der Arbeitsgruppe Hygiene und Medizintechnik zusammen mit der Firma logfive (logfive GmbH, Bad Windsheim) ein Prototyp eines solchen Geräts auf seine Wirksamkeit überprüft. Dieses Gerät soll es ermöglichen, in einem validierbaren Verfahren und in kurzer Zeit auch komplexe medizinische Produkte zu desinfizieren. Um zu überprüfen, ob hier eine ausreichende Keimreduktion stattfindet, wurden Testläufe mit unterschiedlichen Konzentrationen von bakteriellen Kontaminationen durchgeführt. Beide Technologien stellen vielversprechende Neuentwicklungen dar und könnten einen großen Beitrag bei der Bekämpfung von Infektionskrankheiten leisten.

Abstract

Both in clinical environments and in the public sector, hygiene has become enormously important in recent years. Due to this increased awareness and above all the need for new and better hygiene measures, a large number of new technologies have been introduced in the market. On the one hand, this involves the further development of already known methods, but on the other hand also new developments of previously less known and used mechanisms. Two of these technologies have now been investigated at the Ostbayerische Technische Hochschule in Weiden with regard to their effectiveness and mode of action. One of these methods is the disinfection of larger rooms by dry fogging with sodium hypochlorite (NaClO). Together with the Company Apollon (Apollon Biotech GmbH, Kemnath) this method has already been investigated in studies by our working group and its effectiveness has been demonstrated in principle. In a new study and test setup the application in passenger transport has now been investigated in order to assess the potential of the disinfection measure for buses or in patient transport.

Another new development in this sector is cold plasma disinfection. A prototype of such a device was tested in the working group Hygiene and Medical Technology together with the company logfive (logfive GmbH, Bad Windsheim) for its effectiveness. This device should make it possible to disinfect even complex medical products in a validated procedure and in a short time. Test runs with different concentrations of bacterial contamination were performed to investigate whether sufficient germ reduction takes place. Both technologies represent promising new developments and could make a major contribution to combating infectious diseases.

Einleitung

Die Corona-Pandemie hat gezeigt, wie wichtig eine funktionierende Desinfektion für die Prävention von Infektionskrankheiten sein kann. Dies hat auch die Notwendigkeit erhöht, verbesserte und schneller wirkende Verfahren zu entwickeln. Einige Publikationen und auch Arbeiten an der Ostbayerischen Technischen Hochschule haben sich bereits mit der Möglichkeit der Trockennebel-desinfektion ganzer Räume beschäftigt. [1-3] Ebenso gibt es bereits Veröffentlichungen, die die Wirksamkeit von vernebelten Desinfektionsmitteln auf Chlordioxid und Wasserstoffperoxid-Basis gegen virale Erreger belegen. [4] Dies ist vor allem bei besonders schwer zugänglichen Flächen von großem Vorteil. Ein Bereich, der hier von besonderer Bedeutung ist, ist der Personenverkehr. Sowohl im Personennahverkehr als auch im Bereich des medizinischen Krankentransports besteht eine ständige Gefahr der Kontamination des Fahrzeuges. Aufgrund der Bauweise und Komplexität der Fahrzeuge ist eine effiziente Desinfektion meist schwierig und zeitaufwändig. Neuartige Desinfektionsmethoden, wie z. B. die Trockenvernebelung von Wirkstoffen, könnten einen großen Nutzen bei der Unterbrechung von Infektionsketten haben. Um dies zu belegen, wird die Möglichkeit einer schnellen und effizienten Behandlung eines Transportfahrzeuges mittels einer Trockenvernebelung von hypochloriger Säure untersucht.

Der Einsatz von kaltem Plasma, d. h. ionisiertem Gas, zur Desinfektion wurde ebenfalls bereits in mehreren Publikationen beschrieben. [5, 6] Der Vorteil dieser Technologie ist, dass sie im Gegensatz zu herkömmlichen Desinfektionsverfahren einfach und schnell durchführbar ist. Gerade im Bereich der Medizinprodukte werden an die Aufbereitung oft hohe Anforderungen gestellt. Aufgrund des immer komplexeren Aufbaus solcher Produkte ist eine korrekte Desinfektion hier ebenfalls oft nur mit einem zeitaufwändigen und intensiven Aufwand möglich. Hinzu kommt, dass der Erfolg der manuellen Aufbereitung nicht immer konstant ist. Aus diesem Grund hält das Robert Koch Institut (RKI) die abschließende Wischdesinfektion von semikritischen Medizinprodukten derzeit nicht für validierungsfähig. [7] Ein validierungsfähiges, robustes und effizientes Verfahren zur Aufbereitung wäre hier von großem Nutzen. Daher wurde von der Arbeitsgruppe die keimreduzierende Wirkung eines tragbaren Kaltplasmagerätes der Firma logfive untersucht. Das Gerät ist für die Desinfektion von Produkten unterschiedlicher Größe ausgelegt, wobei dieser Prozess innerhalb weniger Minuten abgeschlossen ist. Die angegebene Keimreduktion des Verfahrens soll im Bereich von log 5,0 liegen.

Trockennebel-desinfektion als Verfahren zur Aufbereitung von Fahrzeugen zur Personenbeförderung

Die Trockenvernebelung wurde mit der Technologie der Firma Apollon (Apollon Biotech GmbH, Kemnath) durchgeführt. Als Modell für ein Personenbeförderungsfahrzeug wurde ein Linienbus verwendet (Ferienfahrschule Hense GbR, Deutschland; Abbildung 1).



Abbildung 1: Linienbus für die Personenbeförderung als Modell für die Durchführung der Wirksamkeitstests.

Um die Wirksamkeit der Methode untersuchen zu können, wurden verschiedene Ansätze gewählt. Um den Einfluss der Trockenvernebelung auf die Luft im Fahrzeug zu testen, wurden aktive Luftkeimmessungen von 1 m³ Luft im Bus nach Protokoll durchgeführt (Klotz Impactor FH6; Markus Klotz GmbH, Deutschland). Dies geschah einmal direkt vor und einmal nach der Desinfektionsmaßnahme. Die luftgetragenen Mikroorganismen wurden mit Blutagarplatten (BD Columbia Agar mit 5 % Schafsblut; Becton Dickinson GmbH; Deutschland) gesammelt und 72 Stunden lang bei 35 °C bebrütet. Die Gesamtkeimzahl auf den Platten wurde dokumentiert und die Keimreduktion durch Vergleich ermittelt.

Zusätzlich wurde die vorhandene mikrobielle Kontamination auf den Busoberflächen durch einen Test mit Kontaktplatten ermittelt (ROTI®ContiPlate TSA-Letheen; Carl Roth GmbH + Co. KG, Deutschland). Die zu untersuchenden High-Touch-Oberflächen (Haltegriffe, Sitze etc.) wurden vor und nach der Trockenvernebelung beprobt und die Platten bebrütet (Abbildung 2). Nach 72 Stunden wurde die Gesamtkeimzahl bestimmt und die Keimzahlen verglichen.



Abbildung 2: Innenraum des Busses mit den getesteten High-Touch-Oberflächen (rote Punkte: Geländer, Haltegriffe und Sitze).

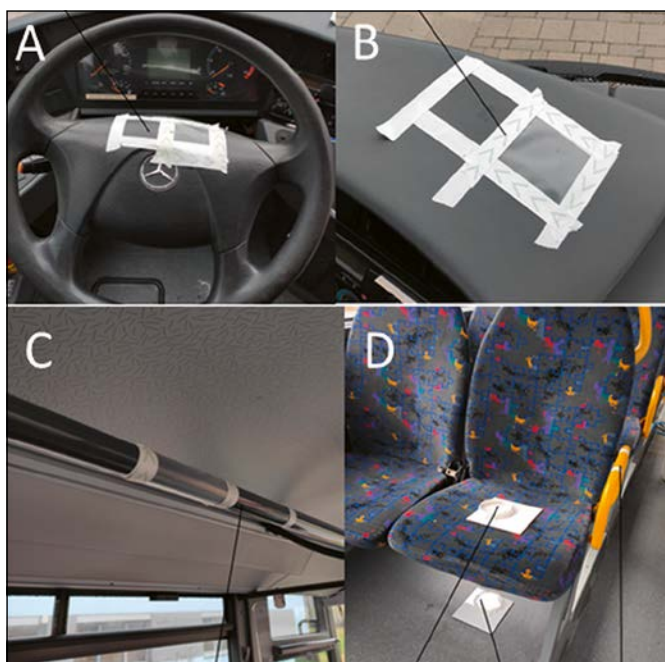


Abbildung 3: Kontaminierte und versiegelte Testflächen (A, B, C) und standardisierte Testfliesen (D).

Um eine standardisierte Keimreduktionsrate ermitteln zu können, wurden außerdem Tests mit künstlichen Kontaminationen durchgeführt. Dazu wurden bestimmte Oberflächen im Bus mit 70% Ethanol gereinigt und an-

schließend mit einer Bakterienlösung (*Staphylococcus aureus* ATCC 6538; 50µl zu 1×10^6 KBE/ml) kontaminiert. Die Oberflächen wurden in zwei Hälften geteilt und eine Oberfläche mit steriler Folie versiegelt (Abbildung 3).

Um einen möglichen Einfluss des Oberflächenmaterials auszuschließen, wurden auch standardisierte Prüfkörper (kontaminierte Fliesen) in den Bus gelegt. Nach Abschluss der Trockennebeldesinfektion wurden die Folien von den Oberflächen entfernt und Kontaktproben von beiden Bereichen (Kontrollstelle/Teststelle) entnommen. Die Platten wurden 24 Stunden lang bei 35 °C bebrütet und die Keimzahlen vor und nach der Desinfektion verglichen. Um die Werte mit anderen Desinfektionsmethoden vergleichen zu können, wurde die log-Reduktion der bakteriellen Kontamination berechnet.

In unseren Tests konnte eine keimreduzierende Wirkung des Trockenvernebelungsverfahrens festgestellt werden. Bei der Luftkeimmessung bestand dieser Effekt in einer Reduktion der mikrobiologischen Luftverunreinigung im Linienbus um ca. 68 %. Es ist jedoch zu beachten, dass es sich hierbei nur um wenige Einzelmessungen handelte. Der zusätzliche Test zur Wirksamkeit der Maßnahme im Hinblick auf die vorhandene bakterielle Kontamination auf High-Touch-Oberflächen war ebenfalls erfolgreich. Hier konnte die mikrobiologische Kontamination durch die Dekontamination von durchschnittlich 348 KBE auf 18 KBE reduziert werden. Bis auf wenige Ausnahmen konnte die Keimzahl auf der Oberfläche auf weniger als 10 KBE reduziert werden (Abbildung 4).

Testposition	13	14	15	16	17	18
Bakterienwachstum Kontrollstelle	+++	+	+++	+	-	+
Bakterienwachstum Teststelle	+	-	-	-	-	-

Bakterienwachstum	Beurteilung
>5000 KBE (Rasenwachstum)	++++
>500 KBE bis ≤5000 KBE (kein komplettes Rasenwachstum)	+++
>100 KBE bis ≤500 KBE	++
>10 KBE bis ≤100 KBE	+
0 KBE bis ≤10 KBE	-

Abbildung 4: Keimreduktion der Desinfektionsmaßnahme auf die vorhandene mikrobiologische Kontamination an sechs (A-F) verschiedenen Teststandorten.

Mithilfe einer standardisierten Testkontamination auf ausgewählten Oberflächen konnte eine Abschätzung der Wirksamkeit der Maßnahme ermittelt werden. Die Bakterien zeigten an allen Teststellen eine starke Kontamination. An den Kontrollstellen (abgedeckt mit einem Folien-/Petrischalendeckel) war dies immer ein komplettes Rasenwachstum und nicht auswertbar (> 5000 KBE). Ein Rückgang dieses Bakterienwachstums ist an allen ungeschützten Teststandorten zu beobachten. Alle Teststellen zeigten eine signifikante Reduzierung des Wachstums zwischen 0 KBE und 358 KBE. Die logarithmische Reduktion der Teststellen reichte von log 0,8 bis log 3,7 (Abbildung 5).

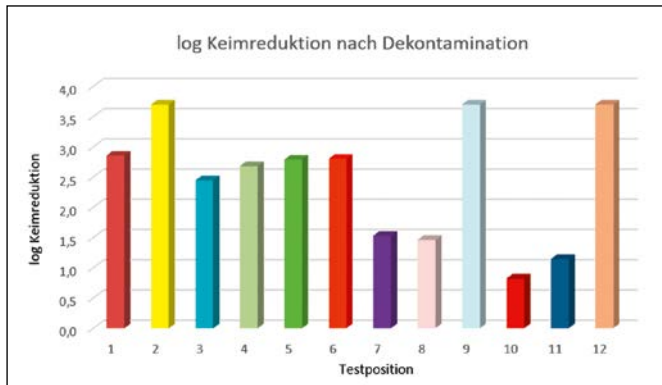


Abbildung 5: Berechnete log-Reduktion der mikrobiologischen Verunreinigung an zwölf verschiedenen Testbereichen im Bus.

Es wurde jedoch festgestellt, dass einige der Testproben noch eine Restkontamination aufwiesen. Ebenso wiesen einige der Oberflächen Verunreinigungen mit Umweltkeimen auf. Bei der Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass das Verfahren im vorderen Teil des Busses (Prüfbereiche 1-6) effektiver war als im hinteren Teil (Prüfbereiche 7-12). Nach Rücksprache mit der Apollon GmbH war eine der beiden Nebeldüsen (die im hinteren Teil des Busses) während des Tests teilweise verstopft und nicht voll funktionsfähig. Dies sollte bei der Bewertung der Ergebnisse ebenfalls berücksichtigt werden.

Kaltes Plasma als schnell wirkende alternative Desinfektionsmethode

Um die Wirksamkeit des tragbaren Kaltplasma-Desinfektionsgerätes (Abbildung 6) zu testen, wurden im 3D-Druckverfahren Träger für Probenplatten hergestellt.



Abbildung 6: Tragbares Kaltplasmagerät zur Desinfektion (Quelle: logfive GmbH, Bad Windsheim).

Auf diesen Trägern wurden kontaminierte Testplatten mit Proben unterschiedlicher Bakterienkonzentrationen (*Staphylococcus aureus*; ATCC 6538; 1×10^2 CFU/ml - 1×10^8 CFU/ml) platziert (Abbildung 7).

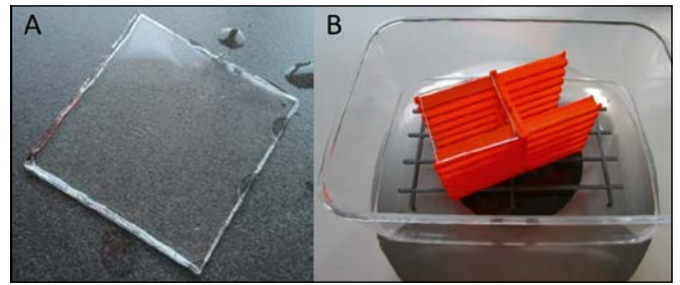


Abbildung 7: (A) mit Bakterien kontaminierte Testprobe (B) 3D-gedrucktes Trägergerüst für die Prüfung mehrerer Testproben.

Anschließend wurde eine Kaltplasmadesinfektion nach Herstellervorgaben durchgeführt und die Restkontamination der Prüfkörper durch Kontaktplattentests (ROTI®ContiPlate TSA-Letheen; Carl Roth GmbH + Co. KG, Deutschland) bestimmt. Testproben, die im Verfahren nicht desinfiziert wurden, dienen als Kontrollen. In einem ersten Testlauf wurde mit unterschiedlichen Konzentrationen der Bakteriensuspension gearbeitet, um schrittweise die maximale Keimreduktion des Verfahrens herauszuarbeiten. Anschließend wurde das Verfahren angepasst und die Anzahl der Desinfektionszyklen sukzessive erhöht.

In unseren ersten Testläufen konnte die Wirksamkeit des Verfahrens generell festgestellt werden. Durch die Wahl größerer Verdünnungsschritte konnte ein Konzentrationsbereich ermittelt werden, in dem die Wirksamkeit des Verfahrens zu erwarten war. In dem gewählten Versuchsaufbau konnte die Keimreduktion des Verfahrens zwischen log 2,9 und log 3,6 bestimmt werden (Abbildung 8).

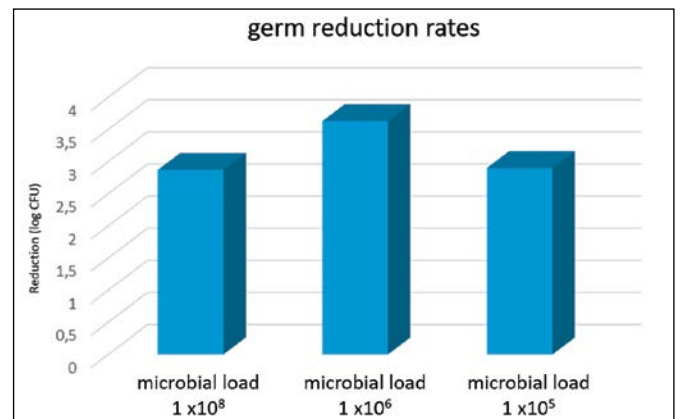


Abbildung 8: Keimreduktionsraten von drei verschiedenen Konzentrationsansätzen.

Durch eine weitere Optimierung des Verfahrens und die Durchführung mehrerer aufeinanderfolgender Desinfektionszyklen (bis zu drei Wiederholungen) konnte die Effektivität des Verfahrens sogar auf maximal log 4,7 gesteigert werden (Abbildung 9).

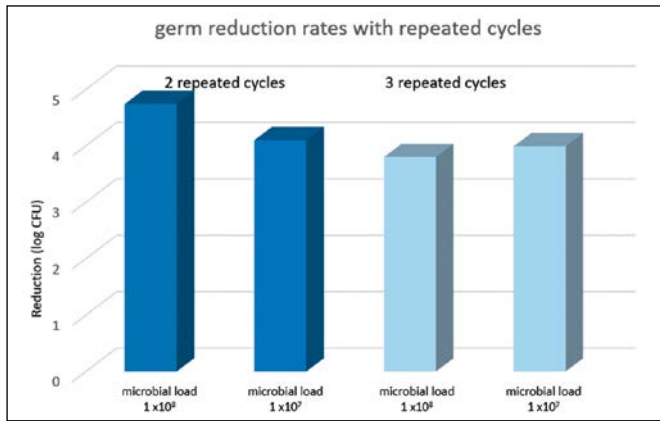


Abbildung 9: Maximale Keimreduktion bei verschiedenen Konzentrationen nach zwei (dunkelblau) und drei (hellblau) Desinfektionszyklen

Fazit

Dank neuer Ansätze bei den Desinfektionsverfahren ist es zunehmend möglich, schneller und kostengünstiger als bisher zu arbeiten. Im Bereich des Personen- und Krankentransports wäre eine neue Technologie von Vorteil, mit der auch schwer zugängliche Stellen schnell und effizient desinfiziert werden können. Eine Möglichkeit, die bisher übliche Wischdesinfektion solcher Fahrzeuge zu ersetzen, ist die Trockennebel-desinfektion. Unsere Versuche haben gezeigt, dass diese Technik in einem Linienbus problemlos eingesetzt werden kann und sowohl die Keimbelastung in der Raumluft als auch die mikrobiologische Kontamination auf kritischen Oberflächen (Griffe, Sitze etc.) zuverlässig reduziert. In Versuchsaufbauten mit definierter mikrobiologischer Kontamination wurde eine Keimreduktion von bis zu log 3,7 erreicht. Dennoch bleibt festzuhalten, dass es noch einige Fragen zu beantworten gilt. In unserem Versuchsaufbau konnten wir zum Beispiel Schwankungen in der Wirksamkeit der Maßnahme an den verschiedenen Ver-

suchsstandorten feststellen. Hier könnte die Verstopfung einer der Vernebelungsdüsen eine Rolle spielen, was aber in weiteren Untersuchungen berücksichtigt werden muss. Die Desinfektion von geschlossenen Räumen mittels eines Vernebelungsverfahrens birgt immer das Risiko von Rückständen des Desinfektionsmittels. Gerade im Bereich des Patiententransports, bei dem viele medizinische Geräte auf kleinem Raum untergebracht sind, muss das Risiko der Beschädigung technischer Geräte ausgeschlossen werden. Damit die Trockenvernebelung im medizinischen Bereich eingesetzt werden kann und möglicherweise eine Alternative zur herkömmlichen Wischdesinfektion darstellt, müssen weitere Untersuchungen die Grenzen des Verfahrens und die tatsächliche Wirksamkeit im Vergleich zu den Standardmethoden aufzeigen. Sollte dies gelingen, wäre die Technologie eine denkbare Alternative, um Räume und Fahrzeuge schnell und kostengünstig aufzubereiten und damit mögliche Infektionsketten wirksam zu unterbrechen.

Die Versuche zeigten zudem ein großes Potenzial für die Desinfektion mit der Kaltplasmatechnologie. Es war möglich, die Keimbelastung in unseren Testproben auf bis zu log 4,7 zu senken. Dennoch gibt es noch viele offene Fragen bezüglich der Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit der Technologie. Aufgrund des breiten Spektrums an Ergebnissen mit unterschiedlichen Einstellungen und Bakterienkonzentrationen sollten weitere Studien durchgeführt werden, um das volle Potenzial des Kaltplasmagerätes zu bewerten. Ein nächster Schritt sollte die Anpassung der Plasmakonzentration im Gerät und damit eine optimierte Keimreduktion in kürzerer Zeit sein. Wenn diese Verbesserungen erfolgreich umgesetzt werden können und das Gerät zuverlässig Keimreduktionsraten von mehr als 5 log-Stufen erreicht, wäre dies ein vielversprechender Ansatz für die validierte Aufbereitung von komplexen Medizinprodukten.

Referenzen:

- [1] Cossu A, Huang K, Cossu M, et al. Fog, phenolic acids and UV-A light irradiation: Eine neue antimikrobielle Behandlung zur Dekontamination von Frischwaren. *Food Microbiol* 2018; 76: 204-208. DOI:10.1016/j.fm.2018.05.013
- [2] Cutts T, Kasloff S, Safronetz D, et al. Decontamination of common healthcare facility surfaces contaminated with SARS-CoV-2 using peracetic acid dry fogging. *J Hosp Infect* 2021; 109: 82-87. DOI:10.1016/j.jhin.2020.12.016 Institute of Medicine (US). Looking at the future of the Medicaid program. Washington: The Institute 1999.
- [3] Sher, M. and Mulder, R. 2020. Comparison of Aerosolized Hydrogen Peroxide Fogging with a Conventional Disinfection Product for a Dental Surgery. *The journal of contemporary dental practice* 21, 12, 1307-1311.
- [4] Montazeri, N., Manuel, C., Moorman, E., Khatiwada, J. R., Williams, L. L., and Jaykus, L.-A. 2017. Virucidal Activity of Fogged Chlorine Dioxide- and Hydrogen Peroxide-Based Disinfectants against Human Norovirus and Its Surrogate, Feline Calicivirus, on Hard-to-Reach Surfaces. *Frontiers in microbiology* 8, 1031.
- [5] Lata S, Chakravorty S, Mitra T, et al. Aurora Borealis in dentistry: The applications of cold plasma in biomedicine. *Materials today. Bio* 2022; 13: 100200
- [6] Chen Y, Chen Y, Chung W, Tong B, Chang MB. Evaluation of the effectiveness of nonthermal plasma disinfection. *Environmental technology* 2020; 41: 2795-2805
- [7] Robert Koch Institut, Aufbereitung von Medizinprodukten: Häufig gestellte Fragen und Antworten, 2020.

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

a.stich@oth-aw.de



Fabian Wickert, B.Eng.

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

fa.wickert@oth-aw.de



Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

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

c.bulitta@oth-aw.de

5G-Ausleuchtung im Klinikum St. Georg in Leipzig

Prof. Dr. rer. pol. Steffen Hamm
Nico Humig, M.Sc.
Philip Bertelshofer, M.Sc.
Maximilian Amm, M.Sc.
Michael Mark, M.Sc.
Anna-Lena Dahmen, approb. Tierärztin
Juliana Hartig, M.A.
Sabrina Richtmann, M.A.
Ann-Christin Schleser, B.Eng.

Zusammenfassung

Nach wie vor ist das Gesundheitswesen von vielen analogen Strukturen und Prozessen geprägt. Nichtsdestotrotz ist die Digitalisierung des Gesundheitswesens mittlerweile in vollem Gange. Einer der Faktoren „digitaler Behäbigkeit“ war in der Vergangenheit der Aspekt, dass es vielfach bisher schlichtweg an einer technischen Infrastruktur mit Performance-Eigenschaften fehlte, die die 5G-Technologie exakt mitbringt und damit zur Beschleunigung der digitalen Transformation beiträgt. Im Rahmen des Projektes 5G4Healthcare werden die Machbarkeit, die Möglichkeiten sowie die Grenzen der Verbesserung der Effektivität und Effizienz in der Gesundheitsversorgung durch die 5G-Technologie ausgelotet. Vor diesem Hintergrund stellt die Erprobung der tatsächlichen Ausleuchtungsfähigkeit einer Outdoor 5G-Antenne im Umfeld eines Krankenhauses ein Teilziel des Projektes 5G4Healthcare dar. Basierend auf den Messergebnissen werden Rückschlüsse gezogen, ob die alleinige Outdoor-Ausleuchtung eines Gebäudes praktikabel ist und somit eine interessante Alternative zu WiFi- und verkabelten Netzen darstellt. Die Umsetzung der Versuche erfolgt mit einem 5G-Standalone-Netzwerk, welches komplett auf den Einsatz der 4G-Technologie verzichtet. Zur Untersuchung der Empfangsstärke an den vorher definierten Messpunkten wurde die 5G-Antenne an fünf verschiedenen Positionen installiert. An den Messpunkten werden die ausgewählten Parameter „Download“, „Upload“, „Latenz“, „Jitter“ und Signalstärke erhoben. Somit ist es möglich, verlässliche Aussagen über die Qualität der Ausleuchtung von der jeweiligen Antennenposition aus zu treffen. Die verschiedenen Messpunkte zur Datenerhebung befinden sich sowohl außer- wie auch innerhalb verschiedener Gebäude, um die Möglichkeiten und Grenzen von 5G im Kontext der Use Cases des Projektes 5G4Healthcare zu erproben und zu bewerten.

Abstract

The healthcare sector is still characterized by many analog structures and processes. Nevertheless, the digitization of healthcare is now in full swing. One of the factors of “digital sluggishness” in the past was the aspect that, in many cases, there has simply been a lack of a technical infrastructure with performance characteristics that 5G technology brings along exactly and thus contributes to accelerating the digital transformation. As part of the 5G4Healthcare project, the feasibility, the possibilities as well as the limits of improving effectiveness and efficiency in healthcare through 5G technology are being explored. Against this background, testing the actual illumination capability of an outdoor 5G antenna in the environment of a hospital represents a sub-goal of the 5G4Healthcare project. Based on the measurement results, conclusions will be drawn as to whether the sole outdoor illumination of a building is practicable and thus represents an interesting alternative to WiFi and wired networks. The implementation of the tests is carried out with a 5G standalone network, which completely dispenses with the use of 4G technology. To investigate the reception strength at the previously defined measurement points, the 5G antenna was installed at five different positions. The selected parameters “download”, “upload”, “latency”, “jitter” and signal strength are collected at the measurement points. This makes it possible to make reliable statements about the quality of the coverage from the respective antenna position. The various measurement points for data collection are located both outside and inside various buildings in order to test and evaluate the possibilities and limits of 5G in the context of the use cases of the 5G4Healthcare project.

1 Einleitung

Die Digitalisierung des Gesundheitswesens ist in vollem Gange und steht mittlerweile vor gänzlich anderen Vorzeichen als noch vor wenigen Jahren: Die Etablierung der Telematikinfrastruktur mit Anwendungen wie der elektronischen Patientenakte schreitet voran, Anpassungen der regulatorischen und rechtlichen Rahmenbedingungen eröffnen einen neuen Markt für Industrieanbieter von digitalen Gesundheitsanwendungen (DiGAs) und nicht zuletzt die Corona-Pandemie trug bzw. trägt zur Verbreitung und Akzeptanz digitaler Lösungen in allen Gesellschaftsbereichen bei. Mit der 5G-Technologie etabliert sich aktuell zudem ein weiterer technischer Faktor, der bisher zum Teil zum Flaschenhals wurde – es fehlte schlichtweg an einer technischen Infrastruktur mit Performance-Eigenschaften, die 5G exakt mitbringt. Ein Großteil der Digital-Health-Anwendungen kann sein volles Potenzial erst in einem 5G-Netz entfalten. Hierzu können etwa Lösungen der Automatisierung und Logistik im Gesundheitswesen wie zum Beispiel fahrerlose Transportsysteme oder Tracking-Lösungen zählen. Das vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) geförderte Projekt 5G4Healthcare wird seit Ende 2019 an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden (OTH Amberg-Weiden) umgesetzt. Bis Ende 2023 wird erprobt, wo und wie 5G die Effektivität und die Effizienz im Gesundheitsbereich erhöhen kann. Dafür wurden sowohl eigene 5G Standalone Systeme am Gesundheits- und Medizintechnik Campus der OTH Amberg-Weiden installiert als auch mehrere mobile 5G-Einheiten für den Einsatz bei Praxispartnern vor Ort in Betrieb genommen – so geschehen am Klinikum St. Georg in Leipzig. Dabei war das primäre Ziel in Leipzig die Erprobung der tatsächlichen Ausleuchtungsfähigkeit einer Outdoor 5G-Antenne im Umfeld eines Krankenhauses. Basierend auf den Messergebnissen werden Rückschlüsse gezogen, ob die alleinige Outdoor-Ausleuchtung eines Gebäudes praktikabel ist und somit eine interessante Alternative zu WiFi- und verkabelten Netzen darstellt. Die verschiedenen Messpunkte zur Datenerhebung befanden sich sowohl außer- wie auch innerhalb verschiedener Gebäude, um die Möglichkeiten und Grenzen von 5G im Kontext der Use Cases des Projektes 5G4Healthcare zu erproben und zu bewerten.

2 5G-Technologie

Die 5G-Technologie ist dabei eine konsequente Evolution bestehender Mobilfunkstandards. Während mit 3G das mobile Internet Einzug hielt und bei 4G v. a. nutzerzentrierte Anwendungen und Kommunikationsdienste wie hochauflösende Videokonferenzen ermöglicht wurden, steht bei dem 5G-Standard – als Weiterentwicklung durch die 3GPP (3rd Generation Partnership Project) – das Internet der Dinge mit Milliarden vernetzten Endgeräten im Vordergrund. Dabei ermöglicht es 5G, die kontinuierlich steigenden Anforderungen digitaler Anwendungen an Ka-

pazität, Bandbreite, Verfügbarkeit und Latenz zu erfüllen, die je nach Anwendungsfall unterschiedlich priorisiert sind. Alle digitalen Mobilfunksysteme senden hochfrequente elektromagnetische Felder aus, welche von einem Empfänger erfasst werden. Die eigene Hochfrequenzimmission des Empfängers ermöglicht dann schlussendlich die Kommunikation [1]. Der Trend sieht immer höhere Frequenzen vor, um letztlich eine Wellenlänge im Millimeter-Bereich zu erreichen. Hierdurch lassen sich höhere Datenraten und Bandbreiten, bei gleichzeitig sehr niedrigen Latenzen realisieren, um mobile Anwendungen (z. B. Robotik, MIIoT, Tracking, etc.) zu ermöglichen, welche mit älteren Mobilfunksystemen nicht durchführbar wären [2]. Die Umsetzung der Versuche erfolgt mit einem 5G-Standalone-Netzwerk, welches komplett auf den Einsatz der 4G-Technologie verzichtet. Standalone Campusnetze arbeiten derzeit im Frequenzband n78, welches sich in einem Frequenzbereich um 3,5 GHz befindet und die Frequenzen von 3,3 bis 3,8 GHz beinhaltet [3]. Unter einem Standalone-Campusnetz ist der Aufbau eines individuellen, privat nutzbaren Mobilfunknetzes mit eigener Netz-ID und strikter Abgrenzung vom öffentlichen Mobilfunknetz durch separate Hard- und Software sowie durch unterschiedliche Funkbänder zu verstehen. [4] 5G stellt damit insbesondere auch abseits des öffentlichen Mobilfunknetzes in Form von Campusnetzen eine interessante Alternative zu WiFi- und verkabelten Netzen dar. Möglich ist dies, da im Frequenzvergabeprozess durch die Bundesnetzagentur neben den Frequenzbereichen für Mobilfunkanbieter zusätzlich 100 MHz Frequenzbandbreite im Bereich 3,7 bis 3,8 GHz exklusiv für private (nichtöffentliche) Campusnetze reserviert wurden. 3GPP unterscheidet zwischen einem nieder- und einem höherfrequenten Bereich:

- Frequency Range 1 (FR1): 410 - 7125 MHz
- Frequency Range 2 (FR2): 24,25 - 52,6 GHz

FR1 umfasst niederfrequente Bereiche, die sich sehr gut für Machine-Type Communications (MTC) bzw. Internet of Things (IoT) eignen. Das Spektrum aus diesem Frequenzbereich verfügt über eine große Reichweite und eine gute Objektdurchdringung wie durch Gebäudewände. FR2 spezifiziert ganz neue Frequenzspektren für den Mobilfunk im Bereich der cm-Wellen bis 30 GHz und der mm-Wellen oberhalb 30 GHz, wobei üblicherweise im gesamten Frequenzbereich FR2 von mm-Wellen gesprochen wird. Diese mm-Wellen verfügen über kurze Reichweiten, im Bereich von 200 Metern, und eine starke Beeinträchtigung durch Hindernisse wie Gebäudewände, Niederschlag, Nebel etc. [5].

3 Eingesetzte Hardware und Aufbau

Für die Umsetzung der Versuche wurde eine „mobile 5G-Einheit“ an definierten Standorten aufgebaut und mit einer Outdoor 5G-Antenne verbunden. An den Mess-

punkten wurden die Downloadraten, Uploadraten, die Latenz, der Jitter, wobei sich um die Varianz der einzelnen Datenpakete handelt, und die Signalstärke gemessen. Dazu werden vier verschiedene 5G-Endpunkte verwendet, um den Einfluss der Hardware auf das Messergebnis zu minimieren. Während Netzbetreiber öffentlicher Mobilfunknetze für die Migration zu einer 5G-Infrastruktur meist die bisherige 4G-Infrastruktur nutzen, erfolgte die Umsetzung der Versuche mit einem 5G-Standalone-Netzwerk, welches komplett auf den Einsatz der 4G-Technologie verzichtet. Für den Versuch wurde eine kompakte 5G-Einheit verwendet, welche standortveränderlich ist.

Outdoor Radio Unit "AWHQF"

Die verwendete 5G-Sendeeinheit für den Versuch ist eine Kombination aus dem Radiomodul "AWHQF AirScale Micro RRH", welches jeweils vier Empfänger und Sendepfade besitzt (4x4 MIMO), und der Antenne "AAQA AirScale Micro Remote Radio Head" aus dem Hause Nokia. Der nutzbare Strahlwinkel für die Datenübertragung beträgt bei der verwendeten Antenne im horizontalen Bereich ca. 120°. Durch das multiple-input and multiple-output (MIMO) Verfahren können mehrere Antennen im Sender und Empfänger zusammenwirken. Hierzu müssen sich jedoch auch ebenso viele Antennen im Endgerät befinden, wie der Sender bereitstellt. Die aktuell gängigen 4x4 MIMO-Geräte können vier Datenströme gleichzeitig empfangen.

Serverrack „mobile 5G-Einheit“

Das Serverrack (Abbildung 1) beinhaltet eine Baseband-Unit (BBU), an welcher das AWHQF Radio mit der AAQA-Antenne über ein 10 Gbit Glasfaserkabel angeschlossen ist. An der BBU ist außerdem eine GPS-Antenne angeschlossen, welche für die Zeitsynchronisation zuständig ist. An einem zentralen Router sind per Glasfaser die BBU und der 5G-Core, ein Virtual Private Network (VPN) Router für die Remotekonfiguration verbunden, sowie der Internetzugang des Netzwerkes per Ethernetkabel. An diesem Router wird für die Messdatenerhebung ein zusätzlicher Server per Ethernet angebunden, welcher die Open Source Software LibreSpeed hostet.

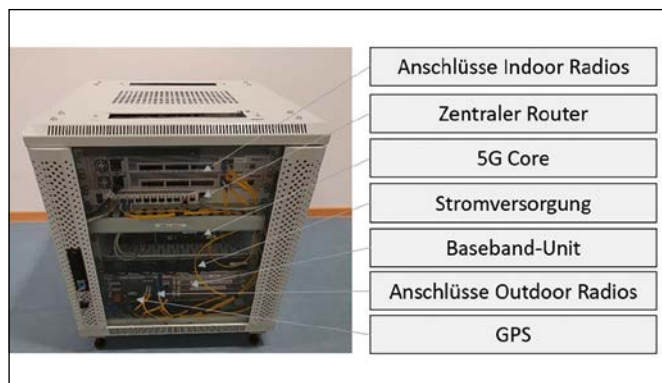


Abbildung 1: Mobile 5G-Einheit

5G-Endpunkte (Hardware, Handys, etc.)

Für die Messdatenerfassung wurden unterschiedliche Endgeräte zur Eliminierung gerätespezifischer Einflüsse auf die Messdaten verwendet. Als Messequipment kamen ein Samsung S22, Samsung Galaxy Tab S8, Nokia XR20 sowie ein Windows Laptop mit externem USB 5G Modem mit Quectel RM500Q Modem zum Einsatz. Jedes Gerät verwendet zum Messen von Download- und Uploadrate sowie Latenz und Jitter einen Browser und öffnet die Website des LibreSpeed Servers. Für die Messung der Signalstärke wurden die geräteinternen Parameter verwendet.

Systemlandschaft und Messstrecke

Das 5G-Funknetz strahlt mit einer Frequenz von 3750 MHz und einer Bandbreite von 100 MHz. Die verwendete Senderausgangsleistung beträgt 1W mit einer Ausnahme, bei welcher die Senderausgangsleistung auf 5W erhöht wird, um eine Steigerung der Signalstärke zu testen. Der maximale Antennengewinn beträgt 10 dBi bei einer Antennenhöhe von ca. 2m. Abbildung 2 zeigt den Aufbau der Systemlandschaft und die Messstrecken.

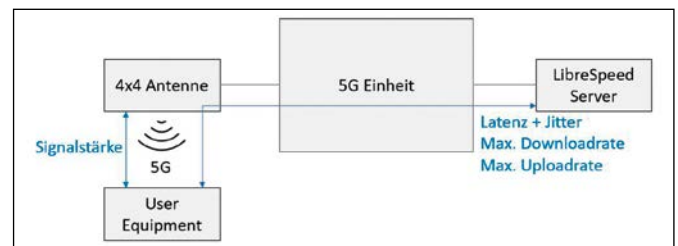


Abbildung 2: Aufbau der Systemlandschaft und Messstrecke

In diesem Versuch wurden die Parameter Signalstärke, Latenz, Jitter, maximale Downloadrate und maximale Uploadrate erfasst. Die Signalstärke wurde ohne Hilfe weiterer Software anhand der Anzeige des User Equipments erfasst und zwischen Outdoor-Antenne und User Equipment gemessen. Die restlichen Parameter wurden erfasst, indem die Open Source Software LibreSpeed auf einem dedizierten Server, welcher mit der 5G-Einheit per Ethernet verbunden ist, eingesetzt wurde. Das User Equipment führte dazu eine Messung durch, indem über den Webserver die Latenz und die Download- bzw. Uploadraten getestet wurden. Die Messstrecke betrifft bei diesen Parametern daher zusätzlich den Weg zum dedizierten Server. Während die maximale Download- und Uploadrate davon nicht betroffen sind, steigt die Latenz im Vergleich zur Latenz zur 5G-Einheit. Die Messungen fanden dabei nacheinander statt, um einen gegenseitigen Einfluss auf die Messdaten auszuschließen.

4 Versuchsdurchführung

Zur Untersuchung der Empfangsstärke an den vorher definierten Messpunkten, wurde die 5G-Antenne an fünf verschiedenen Positionen installiert. An den Messpunkten

wurden die ausgewählten Parameter „Download“, „Upload“, „Latenz“, „Jitter“ und Signalstärke erhoben. Somit ist es möglich, verlässliche Aussagen über die Qualität der Ausleuchtung von der jeweiligen Antennenposition aus zu treffen. Die verschiedenen Messpunkte zur Datenerhebung befanden sich sowohl außer- wie auch innerhalb verschiedener Gebäude, um Aussagen über verschiedene Use Cases in Zusammenhang mit Anbindung zum 5G-Netz zu ermöglichen. Abbildung 3 zeigt beispielhaft die erste von fünf Sendepositionen, welche sich auf dem Hügel in der Parkanlage vor Haus 20 befand. Die Antenne war auf die Kante des Hauses ausgerichtet, sodass sowohl Haus 20, als auch die Parkanlage vom Strahlkegel der Antenne erfasst wurden. Messpunkte 1,2,3,4,5,6 und 7 befanden sich in der Parkanlage mit freier Sicht zur Antenne und mit steigender Entfernung befanden sich zunehmend Bäume zwischen Antenne und Empfänger. Die Messpunkte 6 und 7 befanden sich außerhalb des Strahlkegels der Richtantenne und wurden hauptsächlich über die Reflektionen an den Gebäuden bestrahlt. Punkt 4 entspricht dem Messpunkt 3 mit dem Unterschied, dass die Antenne zum Messpunkt direkt ausgerichtet wurde. Somit wurde der maximale Antennengewinn anstelle eines reduzierten des Randbereichs der Antennencharakteristik genutzt. Die Messpunkte 16 und 8 befanden sich in Haus 20, wobei Punkt 16 in der Lobby war und Punkt 8 in der Radiologie dahinter. Haus 20 ist ein moderner Stahlbetonbau mit großen Fensterflächen. Der Messpunkt in der Radiologie befand sich hinter zusätzlich abgeschirmten Wänden. Die Messpunkte 9, 17, 18, 13, 14, 15 befanden sich direkt im Strahlkegel außerhalb von Gebäuden. Die Antenne war dabei von Haus 20 verdeckt. Die Punkte 13, 14 und 15 wurden zusätzlich von Haus 3 verdeckt. Die Messpunkte 10, 11 und 12 befanden sich außerhalb des Strahlkegels zur linken Seite der Antenne. Die Punkte 11 und 12 waren von Haus 20 und 21 verdeckt. Ziel war es, die Empfangsqualität sowie Download-, Uploadraten und Latenzen unter verschiedenen Infrastrukturbedingungen bei der Nutzung einer 5G-Outdoor-Antenne zur Ausleuchtung eines klinischen Umfeldes zu erörtern. Sendeposition 1 deckte dabei die Fälle der Ausleuchtung einer Parkanlage, eines modernen Stahlbetonbaus mit Glasfronten und Abdeckung verdeckter Außenbereiche ab.



Abbildung 3: Darstellung Sendeposition 1 (orange: Empfang, schwarz: kein Empfang); (Quelle: OpenStreetMap)

5 Ergebnisse

Die Messungen an den verschiedenen Sendepositionen haben gezeigt, dass die Werte der Parameter je nach Antennen- und Messposition schwanken. Das St. Georg Klinikum in Leipzig zeichnet sich durch eine Vielzahl an Häusern mit unterschiedlicher Bausubstanz, Wanddicke und Raumaufteilung aus. Durch diese heterogenen Gebäudestrukturen erfolgte eine unterschiedlich starke Abschirmung des Signals. Generell hat sich gezeigt, dass die Latenz nahezu konstant ist, solange Empfang vorhanden ist. Weiterhin wurde deutlich, dass bei den Messungen Upload- und Downloadraten sowie die Signalstärke korrelieren. Die Ausrichtung der Antenne auf die Messpunkte hat einen großen Einfluss auf die Signalstärke, daher kann besonders mit einer optimierten Ausrichtung der Antenne auf die Basisstation die lokale Empfangsgüte erhöht werden. Eine Erhöhung der Ausgangsleistung von 1W auf 5W veränderte die Signalstärke am Rand des messbaren Punktes nicht. Die Bestrahlung von Außenflächen ohne Hindernisse wie in Parkanlagen stellte in den hier betrachteten Fällen kein Problem dar, ebenso wie die Bestrahlung von Altbauten mit Wänden ohne Stahlbeton. Beim Bestrahlen von einzelnen Gebäuden frontal ist eine Outdoor-Antenne in den hier betrachteten Fällen ausreichend. Mit Steigerung der Entfernung findet eine Schwächung des Signals statt, d. h. je weiter der Empfänger von Sender entfernt ist, desto geringer ist der Empfang bei gleichen Rahmenbedingungen. Wenn Gebäude zur Reflektion der 5G-Strahlung vorhanden sind, können mitunter auch Bereiche außerhalb des Strahlkegels der Antenne abgedeckt werden. Dagegen kann ein Stahlbetonbau mit großen Glasfronten kaum durch eine 5G-Outdoor-Antenne mit einer Frequenz von 3,7 GHz durchleuchtet werden. Die Versorgung von Bereichen im Untergeschoss stellte sich bei Bestrahlung von außen als relativ schwierig dar, da hier zusätzlich zu den Gebäudewänden auch noch Erdreich die Strahlung abschirmte. Die gleichen Ergebnisse weisen besonders abgeschirmte Gebäudebereiche eines Krankenhauses, wie z. B. die Radiologie, auf. Eine Ausleuchtung von außerhalb ist nicht möglich, daher wird in diesen Bereichen eine engmaschige Indoor-Ausleuchtung benötigt. Je mehr Wände und Hindernisse zwischen Sender und Empfänger vorhanden sind, desto geringer ist die Signalstärke. Die Versorgung von Gebäuden bzw. Flächen hinter Gebäuden, die nicht direkt bestrahlt werden können, erweist sich als kaum praktikabel.

6 Ausblick

Aktuell werden weitere 5G-Ausleuchtungen und Erprobungen von Use Cases in Partnerkliniken durchgeführt, um eine valide Datenbasis zugrunde legen zu können. Im Jahr 2023 wird mit der dritten Projektphase der Schwerpunkt auf der umfassenden Evaluation liegen. Die Evaluation insbesondere hinsichtlich der Effekte des

Technologieneinsatzes in der Gesundheitsversorgung erfolgt mit einem eigens entwickelten Bewertungs- und Reifegradmodell. Das Modell wird mehrperspektivisch aufgebaut sein, um die Erkenntnisse der Workstreams systematisch mit einzuschließen. Hierfür wird eine ausführliche Datenerhebung der Szenarien erfolgen und in

einer mehrstufigen Struktur ausgewertet. Die Evaluierung beschränkt sich nicht auf eine reine Auswertung und Beschreibung der Erkenntnisse, sondern leitet Handlungsempfehlungen und Maßnahmen für eine anschließende Weiterführung und Skalierung in der Regelversorgung ab.

Referenzen:

- [1] Strahlenkommission, 2021, Elektromagnetische Felder des Mobilfunks im Zuge des aktuellen 5G-Netzausbaus
- [2] Pant, Mohit; Malviya, Leeladhar, 2022, Design, developments, and applications of 5G antennas: a review. In International Journal of Microwave and Wireless Technologies, S. 1–27
- [3] Iqbal, J. et al, 2022, Bandwidth enhancement by using parasitic patch on dielectric resonator antenna for sub-6 GHz 5G NR bands application. In Alexandria Engineering Journal, 61(6), S. 5021–5032
- [4] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2020, Leitfaden 5G-Campusnetze – Orientierungshilfe für kleine und mittelständische Unternehmen
- [5] Ulrich Trick, 2020, 5G: Eine Einführung in die Mobilfunknetze der 5G-Generation

Projektpartner:

Klinikum St. Georg, Leipzig

Fördergeber:



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

Werde Teil unserer Erfolgsstory

novem
PERFECT CAR INTERIOR

STARTE DEINE KARRIERE

Praktikum | Abschlussarbeit
Werksstudententätigkeit
Direkteinstieg



Komm zu uns!

Lust auf mehr Eindrücke?



#novemgroupkarriere



Novem Group | Novem Gruppe



LANGPATENT

ANWALTSKANZLEI IP LAW FIRM

Ihr Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Christian Lang
Hermann-Hesse-Str. 14
92637 Weiden
www.langpatent.com
0961/40 18 5 - 66/ -77 (Fax)

Patente – Gebrauchsmuster – Marken – Designs

Ihr Partner in der Oberpfalz für globalen Schutz Ihres geistigen Eigentums

München - Weiden - Blatten b. Naters (CH)

AM-LadePole
private

Das Komplettpaket für das E-Laden zu Hause.

- Top-Wallboxen zu Vorzugspreisen
- Elektro-Installations-Kooperationspartner
- Ökostrom – 100 % erneuerbare Energien

Ansprechpartner:

Team Vertrieb
Tel. 09621 603-420
vertrieb@stadtwerke-amberg.de
www.stadtwerke-amberg.de



servicestark
und vor der tür

STADTWERKE AMBERG
STROM GAS WÄRME WASSER BÄDER



HT GROUP

Rambacher Str. 2 · 91180 Heideck
info@htgroup.de · T +49 (0) 9177 98-0

www.htgroup.de



GESUNDHEIT

PFLEGE

FORSCHUNG

Ermittlung der Strahlenexposition des Personals bei nuklearmedizinischen Therapien mit Lu-177-markierten Radiopharmaka mittels Thermolumineszenzdosimetrie

Sophia Krottenthaler, B.Eng.
Agnes Pöllmann, M.Sc.
Dr. rer. nat. Daniel Schmidt
Prof. Dr. Ralf Ringler

Zusammenfassung

Nuklearmedizinische Therapien mit Lu-177-markierten Radiopharmaka können das Überleben bei Tumorerkrankungen verlängern. Ziel der Arbeit ist die Ermittlung der Strahlenexposition des Personals bei den Arbeitsschritten zur Vorbereitung und Durchführung von Therapien mit Lu-177-PSMA und Lu-177-DOTATOC. Als Messmittel kommen Thermolumineszenzdetektoren (TLDs) aus LiF:Mg,Cu,P zum Einsatz. Für den Messeinsatz der TLDs werden Dosimeter, mit jeweils Platz für 4 TLDs, konstruiert und mittels 3D-Druck additiv aus Polylactid (PLA) gefertigt. Mittels Dosisleistungsmessungen werden 18 repräsentative Umgangsorte eines Therapiezyklus identifiziert und verschiedenen Arbeitsplätzen zugeordnet (Assistenz, Radiochemie, Ärztliches Personal, Medizinphysik). Kalibriert werden die TLDs mithilfe eines mit Tc-99m-Pertechnetat-Lösung gefüllten Flächenphantoms. Bei insgesamt 7 Therapien werden Dosiswerte und Dauer von Prozessschritten aufgezeichnet, Dosisleistungen berechnet und auf die Aktivität am Umgangsort normiert. Die Werte der einzelnen Therapien werden anschließend über den Mittelwert zusammengefasst.

Abstract

Nuclear medicine therapies with Lu-177-labeled radiopharmaceuticals can prolong survival in tumor diseases. The aim of this work is to determine the radiation exposure of personnel during the steps of preparing and performing therapies with Lu-177-PSMA and Lu-177-DOTATOC. Thermoluminescence detectors (TLDs) made of LiF:Mg,Cu,P are used as measuring equipment. Dosimeters, each with space for 4 TLDs, are designed for measurement use of the TLDs and additively fabricated from polylactide (PLA) using 3D printing. By means of dose rate measurements, 18 representative handling sites of a therapy cycle are identified and assigned to different workstations (assistance, radiochemistry, medical staff, medical physics). The TLDs are calibrated using an area phantom filled with Tc-99m pertechnetate solution. For a total of 7 therapies, dose values and duration of process steps are recorded, dose rates are calculated and normalized to activity at the handling site. The values of the individual therapies are then summarized by the mean value.

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die Nuklearmedizin ist ein medizinisches Feld, in dem Radionuklide zu diagnostischen oder therapeutischen Zwecken eingesetzt werden. In der Abteilung für Nuklearmedizin am Universitätsklinikum Regensburg (UKR) werden zwei verschiedene Therapien mit Lu-177-markierten Radiopharmaka zur Behandlung verschiedener Tumorerkrankungen durchgeführt, Lu-177-PSMA zur Behandlung von kastrationsresistenten metastasierten

Prostatakarzinomen und Lu-177-DOTATOC zur Behandlung von neuroendokrinen Tumoren. Für die Vorbereitung und Durchführung der Therapien arbeiten Personen aus der Radiochemie, Medizin und Medizinphysik zusammen und sind dabei unterschiedlich stark exponiert. Wie hoch diese Strahlenexpositionen an den einzelnen Arbeitsplätzen ist, ist bisher noch nicht bekannt.

Im Labor für Nuklearmedizin der Ostbayerischen Technischen Hochschule in Weiden wurden in den vergangenen Jahren mehrere Forschungsarbeiten mit dem Einsatz von Thermolumineszenzdetektoren (TLDs) durchgeführt und

der Kenntnisstand über die Einsatzgebiete dieser wurde stets erweitert. Diese Arbeit baut auf den Erkenntnissen die durch Herrn Hofmann [1] und Herrn Mark [2] gewonnen wurden auf. TLDs sind LiF Kristalle dotiert mit Mg, Cu, P, die, wenn sie ionisierender Strahlung ausgesetzt sind die Materialeigenschaft der Thermolumineszenz besitzen und sich somit für die Dosimetrie verwenden lassen.

1.2 Zielsetzung

MitarbeiterInnen der Nuklearmedizin am UKR tragen amtliche Personendosimeter, die monatlich ausgewertet werden. Da durch diese Auswertungen jedoch nicht auf die Exposition einzelner Therapien geschlossen werden kann, ist es Ziel dieser Arbeit die Expositionssituation an den verschiedenen Arbeitsplätzen von Lu-177-Therapien genauer abbilden zu können.

1.3 Vorgehensweise

Durch die Analyse des Therapieprozesses in der Abteilung für Nuklearmedizin am UKR können anhand von Dosisleistungsmessungen repräsentative Umgangsorte als Messpunkte ermittelt werden. Als Messmethode der Dosiswerte werden Thermolumineszenzdetektoren (TLDs) eingesetzt. Um aussagekräftige Dosiswerte mittels Thermolumineszenzdetektoren erhalten zu können, ist es essentiell den Zyklus aus Abbildung 1 einzuhalten.

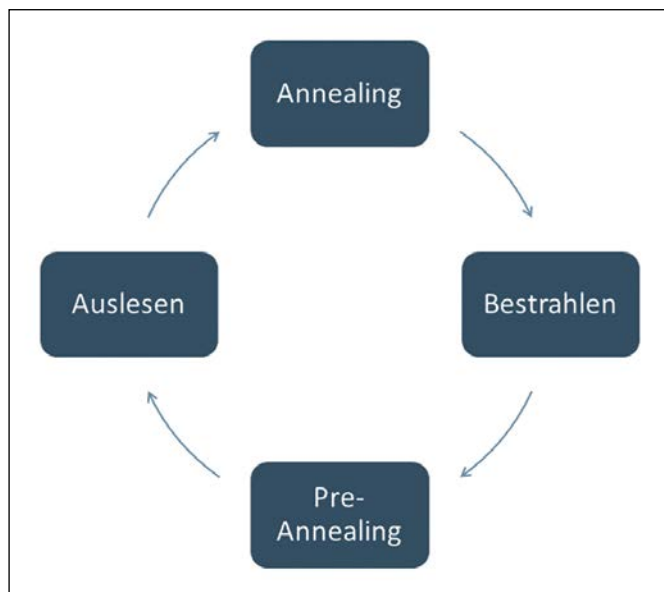


Abbildung 1: Zyklus beim Arbeiten mit TLDs

2 Methodik

2.1 Inbetriebnahme TLDs

Die Inbetriebnahme erfolgt mittels eines mit ca. 1 GBq Tc-99m-Per technetate-Lösung gefüllten Flächenphantoms, auf dem die TLDs platziert und homogen bestrahlt werden. Dabei wird mit einer geeichten Messsonde die

kumulierte Kalibrierdosis von 25 µGy gemessen. Anschließend werden die TLDs im Reader ausgelesen und auf diese Weise je ein Kalibrierfaktor pro TLD bestimmt.

2.2 Dosisleistungsmessungen

Als Erstes wird der Therapieprozess in der Abteilung analysiert und an verschiedenen Arbeitsplätzen Dosisleistungsmessungen durchgeführt. Die Ergebnisse ergeben 18 repräsentative Umgangsorte, verteilt im Heißlabor, im Applikationsraum und im Messraum der Gammakamera. Die Messungen zeigen außerdem vernachlässigbar kleine Dosisleistungen in dem Qualitätskontrolllabor und auf der Therapiestation, daher werden diese bei der weiteren Betrachtung ausgenommen.

2.3 Messaufbau

Für den Messaufbau werden an allen repräsentativen Umgangsarten Dosimeter verteilt, die jeweils 4 TLDs enthalten. Die Dosimeter werden so platziert, dass anhand der Messungen sowohl Aussagen über die Finger- und Körperdosen des Personals als auch über Dosiswerte mit und ohne verwendeter Strahlenschutzmitteln getroffen werden können. Zusätzlich werden in jedem Raum Dosimeter für Untergrundmessungen platziert. Am Tag der Therapie werden im Laufe eines Therapieprozesses nacheinander die Dosimeter angebracht und wieder entfernt. Außerdem wird die Zeit jedes Arbeitsschritts dokumentiert. Insgesamt werden mit dem Messaufbau sieben Therapietage begleitet, darunter vier Lu-177-PSMA und drei Lu-177-DOTATOC Therapien.

3 Ergebnisse

Aus den gemessenen Dosiswerten (D) der TLDs werden mittels der Untergrundmessungen (U), der Zeit der Arbeitsschritte (t) und der Therapieaktivitäten (A) über folgende Formel sogenannte Dosisleistungskonversionen (DLK) für jeden Umgangsart gebildet:

$$DLK = \frac{D - U}{A \cdot t} \quad DLK \text{ in } \frac{\mu Sv}{GBq \cdot s}$$

3.1 DLK-Werte

Die über alle sieben Therapien gemittelten DLK-Werte ergeben den höchsten Wert mit $0,482 \pm 0,347 \mu Gy/(GBq \cdot s)$ am Dosimeter, das an der Therapiespritze platziert ist und die worst case Fingerdosis beim Umfüllen des Radiopharmakons in die Spritze aufzeichnen soll. Dem folgt mit $0,069 \pm 0,019 \mu Gy/(GBq \cdot s)$ das Dosimeter an der Spritzenpumpe, mit der das Radiopharmakon injiziert wird. Das Dosimeter an dem unteren Ende eines Greifwerkzeugs, das zum Handling der Aktivität im Vial verwendet wird, misst einen Wert von $0,023 \pm 0,005 \mu Gy/(GBq \cdot s)$.

Die Werte der restlichen Dosimeter ergeben Werte im Bereich $[0 - 0,008] \pm 0,003 \mu\text{Gy}/(\text{GBq} \cdot \text{s})$.

3.2 Höchste Exposition

Aus den DLK werden kumulierte Dosiswerte pro Arbeitsplatz pro Therapie berechnet. Die Ergebnisse ergeben, wie in Abbildung 2 dargestellt, mit Abstand die höchsten Fingerdosen für die Berufsgruppe der Medizinisch-Technischen Radiologie-AssistentInnen (MTRA).

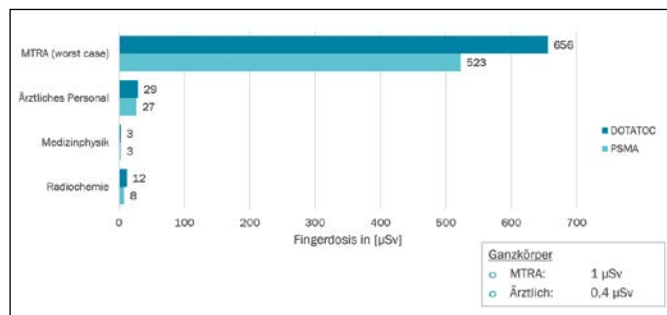


Abbildung 2: Balkendiagramm der unterschiedlich hohen Fingerdosen je Berufsgruppe und Therapieart

3.3 Strahlenschutzmaßnahmen

Der Vergleich der Dosiswerte mit und ohne Strahlenschutzmaßnahmen ergeben eine Reduktion der Fingerdosis der Radiochemie und Medizinphysik im Schnitt auf 35%. Die Ganzkörperdosis der MTRA wird durchschnittlich auf 54% reduziert und die des ärztlichen Personals auf 66%.

3.4 Maximale Therapieanzahl

Die kumulierte Dosis pro Berufsgruppe pro Therapie ergeben in Bezug auf die Jahresgrenzwerte beruflich strahlenexponierter Personen die in Abbildung 3 darstellten Anzahlen an maximal möglichen Fällen pro Jahr.

		Lu-177-PSMA	Lu-177-DOTATOC
Radiochemie Finger	Kat. A (500 mSv)	60.000	42.000
	Kat. B (150 mSv)	18.000	13.000
Ärztliches Personal Finger	Kat. A	18.000	17.000
	Kat. B	6.000	5.000
Medizinphysik Finger	Kat. A	194.000	157.000
	Kat. B	58.000	47.000
MTRA Finger	Kat. A	960	760
	Kat. B	290	230

Abbildung 3: Anzahl der maximal möglichen Fälle bezogen auf die gesetzlichen Jahresgrenzwerte nach StrSchV §71

4 Fazit

Die Verteilung der DLK-Werte zeigt, dass die Exposition je nach Arbeitsplatz stark variiert. Es wird gezeigt, dass die vier beteiligten Berufsgruppen in absteigender Reihenfolge am meisten strahlenexponiert sind: MTRA, Ärztliches Personal, Radiochemie, Medizinphysik.

Die höchste Einzeldosis erfahren die AssistentInnen bei der Umfüllung des Radiopharmakons in die Therapie-spritze an den Fingern. Die bereits verwendeten Strahlenschutzmaßnahmen zeigen gute Wirkung. Die Notwendigkeit des Einsatzes von Strahlenschutzmitteln wird in dieser Arbeit verdeutlicht. Ein bislang nicht etablierter Strahlenschutz beim Aufziehen des Radiopharmakons in die Spritze lässt die Überlegung zu, ob hier nicht nachgerüstet werden könnte. Bei der Etablierung neuer Strahlenschutzmittel sollte jedoch immer die Abwägung zwischen Wirksamkeit und Sinnhaftigkeit dieser berücksichtigt werden. Eine Reduktion der Exposition beim Aufziehen der Spritze kann z. B. gut durch einen routinierten Umgang erzielt werden, da dieser die Arbeitszeit im unmittelbaren Strahlenfeld deutlich verkürzen kann.

Durch den Vergleich der Dosiswerte, zwischen der Lu-177-PSMA und der Lu-177-DOTATOC Therapie, von durchschnittlich 19% der Fingerdosis, wird deutlich, dass die Differenz von 1,5 GBq applizierter Aktivität keinen signifikanten Einfluss auf die Gesamtexposition hat, solange die Arbeitszeit ähnlich bleibt.

Im Vergleich zu den gesetzlichen Jahresgrenzwerten wird deutlich, dass es auch Abteilungen mit wenig personellen Kapazitäten möglich ist, eine Vielzahl an Therapien mit Lu-177-markierten Radiopharmaka im Jahr durchzuführen, ohne die Grenzwerte zu überschreiten.

Referenzen:

- [1] Hofmann, Simon: Entwicklung eines Verfahrens zur Kalibrierung von Thermolumineszenzdetektoren mittels ionisierender Strahlung zur Verifikation der voxelweisen Dosimetrie in der Nuklearmedizin und Röntgendiagnostik. Bachelorarbeit Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, 2020
- [2] Mark, Michael: Einsatz von Thermolumineszenzdosimetrie (TLD) zur Personendosimetrie bei medizinischer Anwendung der selektiven internen Radiotherapie (SIRT) – Möglichkeiten und Limits. Masterarbeit Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, 2021

Projektpartner:

Universitätsklinikum Regensburg, Abteilung für Nuklearmedizin

Kontakt:



Sophia Krottenthaler, B.Eng.

Universitätsklinikum Regensburg
Abteilung für Nuklearmedizin
Franz-Josef-Strauß-Allee 11
93053 Regensburg

sophia.krottenthaler@ukr.de



Agnes Pölmann, M.Sc.

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

a.poellmann@oth-aw.de



Dr. rer. nat. Daniel Schmidt

Universitätsklinikum Regensburg
Abteilung für Nuklearmedizin
Franz-Josef-Strauß-Allee 11
93053 Regensburg

daniel.schmidt@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

Prüfung kommerziell erhältlicher Filamente zur Fertigung von knochenäquivalenten Phantomen mittels additiver Fertigung für röntgendiagnostische Untersuchungen

Noel Jander
Agnes Pöllmann, M.Sc.
Stefan Ziegler, M.A.
Prof. Dr. Ralf Ringler

Zusammenfassung

Zur Qualitätskontrolle in der Röntgendiagnostik sowie in der Therapieplanung in der Nuklearmedizin werden häufig Messphantome eingesetzt. Diese bestehen meist aus einfachen geometrischen Formen mit dem menschlichen Körper nachempfundenen Gewebeeigenschaften. Komplexere Messphantome, welche die menschliche Anatomie vollständig nachbilden, sind äußerst kostspielig. Mittels additiver Fertigungsverfahren können originalgetreue Messphantome basierend auf Patientendaten kostengünstig angefertigt werden. Hierfür werden mehrere kommerziell erhältliche Filamente und deren Eigenschaften unter Anwendung moderner Röntgendiagnostischer Untersuchungen analysiert. Mittels variabler Füllichte soll die Annäherung an die Eigenschaften des menschlichen Knochengewebes erreicht werden.

Abstract

Quality control in X-ray diagnostics, as well as therapy planning in nuclear medicine often use measuring phantoms. Those mostly consist of simple geometric shapes and materials mimicking human tissue properties. Complex phantoms, which simulate the human anatomy are often expensive. With additive manufacturing, phantoms based on data of patients, can be produced inexpensively and faithfully to the patient data. Multiple commercially available filaments and their properties were analysed with modern x-ray diagnostic examinations. Through variation of the infill density the simulation of human bone tissue properties are targeted.

Einleitung

Es gibt eine Vielzahl von kommerziellen Filamenten, welche sich für die Nachbildung der Röntgendichte von Knochen und Weichteilgewebe eignen könnten. Jedoch ist die menschliche Anatomie inhomogen. Knochen weisen unterschiedliche Dichten auf, je nach Alter der Person und des betrachteten Knochens. Somit ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Materialien, welche variable Röntgendichten nachbilden sollen. Zudem besitzen die kommerziell erhältlichen Filamente nicht exakt dieselbe Zusammensetzung wie Knochengewebe. Um dennoch variable Phantome mithilfe der Additiven Fertigung zu erzeugen, werden beispielsweise zwei Filamente mit unterschiedlicher Röntgendichte in abwechselnden Schichten gedruckt und durch Variation der Schichthöhe die Röntgendurchlässigkeit beeinflusst [1]. Dieses Vorgehen benötigt jedoch zwei verschiedene Filamente und zwei unab-

hängige Extruder. Als Alternative zu diesem Verfahren soll die Beeinflussung der Röntgendichte durch die Variation der Füllichte untersucht werden. Somit wird das Phantom nicht vollständig ausgefüllt gedruckt, sondern mit einem bestimmten Prozentsatz an Filament. Hierdurch entstehen regelmäßige Zwischenräume mit Luftporen, welche die gemittelte Röntgendichte herabsetzen sollen.

Material und Methode

Menschliches Knochengewebe schwächt Röntgenstrahlung wesentlich stärker ab als Muskel- oder Weichteilgewebe. Je nach Röntgenquelle und Photonenenergie besitzen Knochen auf der Hounsfieldskala, angegeben in Hounsfield-Einheiten (HE) bzw. englisch HU, Werte von 50 bis 3071 HU. Zur Nachbildung dieser Eigenschaft werden vier PLA-Filamente ausgewählt und mithilfe eines Computertomografen Schichtbildaufnahmen erstellt und ausgewertet.

Die ausgewählten Filamente umfassen ein weißes Premium PLA des Herstellers Raise3D, ein PLA-Filament mit Eisenpartikeln der Firma ProtoPasta (magnetic Iron PLA) und zwei Filamente des Herstellers FormFutura. Einmal ein StoneFil Pottery Clay PLA, welches mit Steinpartikeln versetzt ist, sowie ein mit Kupferpartikeln versetztes PLA-Filament (MetalFil Classic Copper). Durch die beigefügten Metall- bzw. Steinpartikel weisen die Filamente verglichen mit dem Premium PLA der Firma Raise3D eine deutlich höhere Dichte auf. Die höhere Dichte der Filamente soll eine stärkere Absorption der Röntgenstrahlung erzielen.

Um den Einfluss der Füllichte auf die Röntgendichte zu analysieren, werden pro Filament jeweils vier Testwürfel mit einer Grundfläche von 3 x 4 cm und einer Höhe von 3 cm mittels eines Raise3D Pro 2 3D-Druckers angefertigt. Dabei werden für alle Testwürfel jeweils dieselben Einstellungen genutzt und lediglich die Füllichte sowie die Extruder Temperatur variiert. Als Infillmuster wird ein Gitter mit 45 und 135 Grad Anordnungen gewählt. Für jedes Filament wird jeweils ein Testwürfel mit 30 %, 55 %, 80 % und 100 % Füllichte gedruckt (Abbildung 1). Somit können unterschiedliche Röntgendichten bei den einzelnen Füllichteabstufungen erfasst und ausgewertet werden. Zudem kann ein Trend bei Zu- bzw. Abnahme der Füllichte erfasst und so Vorhersagen für die Füllichte zwischen den Messpunkten getroffen werden.



Abbildung 1: Testwürfel aus den unterschiedlichen Filamenten. Erste Reihe von oben: Testkörper aus Kupfer Filament, zweite Reihe: PLA Filament, dritte Reihe: Eisenfilament und letzte Reihe: Steinfilament.

Zur Erfassung der Röntgendichte werden die Testkörper am CT der OTH Amberg-Weiden (Siemens Somatom Emotion 6) bei mehreren Energien durchleuchtet. Durch Auswertung der Hounsfield-Einheiten in den Schichtbildaufnahmen lassen sich Rückschlüsse bezüglich der Röntgenabschwächung ziehen, da die Hounsfield-Einheiten auf der Rückrechnung der linearen Schwächungskoeffizienten mit Bezug auf Wasser als Nullpunkt beruhen.

Messergebnisse

Zur Messung und Auswertung der Röntgenabschwächung wurden am CT der OTH Amberg-Weiden mehrere Messungen vorgenommen und die HU-Werte der Testwürfel mithilfe der open-source-Software 3D Slicer ausgewertet. Dabei wurde ein Bereich im Inneren der Testwürfel segmentiert und der Mittelwert in Hounsfield-Einheiten ausgegeben und in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Erfasste Mittelwerte der Testwürfel bei unterschiedlichen Energien.

Filament und Füllichte [%]	80 kVp Mittelwerte [HU]	110 kVp Mittelwerte [HU]	130 kVp Mittelwerte [HU]
Kupfer PLA 100	3001	3069	3069
Kupfer PLA 80	2971	3070	3070
Kupfer PLA 55	2527	2242	2259
Kupfer PLA 30	519	318	573
PLA 100	-8	-2	1
PLA 80	-250	-244	-240
PLA 55	-509	-503	-501
PLA 30	-757	-744	-743
Eisen PLA 100	3016	2387	2008
Eisen PLA 80	2320	1654	1361
Eisen PLA 55	1397	911	704
Eisen PLA 30	505	162	40
Stein PLA 100	864	654	584
Stein PLA 80	488	319	263
Stein PLA 55	45	-79	-119
Stein PLA 30	-417	-486	-512

Die Testwürfel bestehend aus dem Kupfer-Filament weisen die höchsten Mittelwerte auf. Das Kupfer-Filament besitzt auch die höchste Dichte von allen untersuchten Filamenten, mit 3,4 g/ccm. Zudem besitzt es einen Anteil von 80 % Kupferpartikeln. Das ProtoPasta Magnetic Iron PLA besitzt die zweithöchsten Mittelwerte, gefolgt von dem FormFutura StoneFil. Das PLA hingegen weist deutlich niedrigere Hounsfield Werte auf, was auf die geringere Dichte und das Fehlen von beigetzten Partikeln zurückzuführen ist.

Mit Zunahme der Fülldichte nehmen die Mittelwerte ebenfalls zu, mit Ausnahme des Kupfer-Filaments sogar näherungsweise linear. Generell zeigte sich auch bei der Auswertung der Schichtbildaufnahmen, dass die hohe Röntgendichte der Kupfer-Testkörper zu starken Artefakten in der Bildgebung führte, wodurch das Kupfer-Filament für die Nachbildung von Knochen-Phantomen ungeeignet ist. Die Filamente mit Eisen- und Steinpartikeln weisen ebenfalls hohe Hounsfield-Werte, jedoch keine Artefakte auf. Sie sind somit geeignet zur Simulation von röntgendichtem Knochengewebe. Das PLA weist sehr niedrige Röntgendichten auf. Es ist daher zur Darstellung von Knochenmark oder Weichteilgewebe mit hohem Wasseranteil geeignet. Diese liegen nahe Null Hounsfield Einheiten, da Wasser auch als der Nullpunkt für die Hounsfield Skala angesetzt ist.

Basierend auf den gewonnenen Daten der Testwürfel wird abschließend ein Phantom (Abbildung 2 rechts) eines zuvor ebenfalls durchleuchteten Schweine-Femurs erstellt (Abbildung 2 links).



Abbildung 2: Schichtbildaufnahmen eines Femurs und des darauf basierenden Phantoms. Links: Femur eines Jungschweines. Rechts: Phantommachbildung aus ProtoPasta Magnetic Iron PLA mit einer Fülldichte von 62 %, was den mittleren Hounsfield-Werten für kortikalen Knochen entspricht.

Fazit

Durch Variation der Fülldichte lassen sich unterschiedliche Röntgendurchlässigkeiten bei der Verwendung von kommerziell erhältlichen Filamenten erzielen. Somit können einzelne Filamente für eine Bandbreite an möglichen Phantomen für die Röntgendiagnostik angewendet werden. Basierend auf Schichtbilddaten von Patienten und den darin enthaltenen Hounsfield-Werten lassen sich somit Phantome mit nahezu identischem Verhalten für Messungen in der Röntgendiagnostik anfertigen.

Weitere Messungen bei einer Durchleuchtung aus unterschiedlichen Richtungen mithilfe eines C-Bogens ergaben zudem geringe Abweichungen bei der Dosisreduktion in unterschiedlichen Orientierungen. Somit spielt die Orientierung der Druckschichten und der Lücken im inneren der Druckobjekte kaum eine Rolle.

Durch die Variation der Fülldichte lässt sich die angestrebte Röntgendichte gezielt beeinflussen und somit die gewünschten Hounsfield-Werte eines Phantoms erzeugen.

Ausblick

Moderne Software für 3D-Drucker bietet eine Fülle an Einstellmöglichkeiten. Jedoch besitzen Druckobjekte lediglich globale Einstellungen für die Fülldichte. Somit kann lediglich die Fülldichte für den Mittelwert eines Knochenphantoms eingestellt werden. Um ein detailgetreueres Phantom zu erzielen, müsste der Knochen in Bereiche mit ähnlichen Hounsfield-Werten aufgeteilt und diese als einzelne Modelle mit den jeweiligen Fülldichten versehen werden.

Zudem zeigte sich, dass die Flussrate der Filamente sowie die Druckgeschwindigkeit Einfluss auf die erzielten Hounsfield-Werte der Filamente haben. Weitere Tests mit optimierten Druckparametern könnten daher zu anderen Hounsfield-Werten der Filamente führen. Die Außenschale des angefertigten Phantoms weist zudem wesentlich höhere Hounsfield-Werte auf, da die Druckgeschwindigkeit geringer ist als die der Füllung im Inneren. Auch hier sind weitere Tests und Optimierungen für homogenere Ergebnisse notwendig.

Referenzen:

- [1] R. Tino, M. Brandt, M. Leary und T. Kron, The interlacing deposition method of bone equivalent material extrusion 3D printing for imaging in radiotherapy, 2021.

Kontakt:



Noel Jander

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



Agnes Pöllmann, M.Sc.

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

a.poellmann@oth-aw.de



Stefan Ziegler, M.A.

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



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

Evaluierung der Eigenschaften eines Carbonfaserverstärkten Kunststofffilaments für die additive Fertigung von Zubehörteilen für die Medizintechnik

Niklas Lang, B.Eng.
Stefan Ziegler, M.A.
Agnes Pöllmann, M.Sc.
Prof. Dr. Ralf Ringler

Zusammenfassung

Zur Fertigung von Zubehörteilen für medizinische Anwendungsfälle werden die Eigenschaften eines carbonfaserverstärkten Kunststofffilaments für die additive Fertigung evaluiert. Dafür wird ein 3D-Drucker (Raise 3D Pro 2) an der OTH Amberg-Weiden verwendet, welcher nach dem Verfahren des Fused Deposition Modeling (FDM) arbeitet. Da Materialien für die Anwendung in einem medizinischen Umfeld bestimmte Voraussetzungen erfüllen müssen, wird die Fertigungsqualität des carbonfaserverstärkten Kunststofffilaments infolge des Druckprozesses näher betrachtet. Zudem werden radiologische, mikrobiologische sowie werkstoffspezifische Tests durchgeführt, die Aufschluss darüber geben sollen, ob eine nachfolgende Nutzung des Materials für die Medizintechnik realisiert werden kann.

Abstract

The properties of a carbon fibre-reinforced plastic filament for additive manufacturing are being evaluated to produce accessories for medical applications. For this purpose, a 3D printer at the OTH Amberg-Weiden is used, which operates according to Fused Deposition Modeling (FDM) process. Since materials for use in a medical environment must meet certain requirements, the manufacturing quality of the carbon fibre-reinforced plastic filament as a result of the printing process is examined in more detail. In addition, radiological, microbiological and material-specific tests will be carried out to determine whether the material can subsequently be used for medical engineering.

Einleitung

Carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) stellen hochbelastbare Bauteile dar und werden bereits seit vielen Jahren in der Luftfahrt-, Raumfahrt- sowie Automobilindustrie eingesetzt. Grundlegend sorgt die Einbettung von Carbonfasern in eine Kunststoff-Matrix für eine erhöhte Zugfestigkeit sowie Steifigkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht des Verbunds [1]. Überdies hinaus weist die Kohlenstofffaser eine starke Röntgentransparenz auf, wodurch Faserverbundwerkstoffe ebenso im medizinischen Sektor vermehrt Anwendung finden. Vor allem in Bereichen der Radiologie und Chirurgie wird sich diese Eigenschaft infolge von CFK-Patientenliegen sowie -Zubehörteilen zu Nutze gemacht. Die Herstellung von CFK-Bauteilen erfolgt klassischerweise über Formgebungsverfahren und ist sehr zeit- sowie kostenintensiv [2, 3]. Insbesondere bei geringen Stückzahlen sind diese Verfahren für Hersteller nicht lohnend. Als vielversprechende Alternative

zeigt sich hierbei die additive Fertigung, womit kostengünstige, komplexe sowie individuelle Produkte bereitgestellt werden können. Ein beliebtes Verfahren innerhalb des 3D-Drucks ist die Materialextrusion mittels Fused Deposition Modeling (FDM), welches unter anderem die Herstellung von CFK-Bauteilen ermöglicht. Dahingehend beschäftigt sich diese Arbeit mit der Untersuchung eines kohlenstofffaserverstärkten Kunststofffilaments für den FDM-3D-Druck. Konkret wird überprüft, inwiefern dieses Material die Möglichkeit bietet, funktionelle sowie hochqualitative Zubehörteile zu produzieren, die den hygienischen und materialspezifischen Anforderungen eines Anwendungsfalles in einem medizinischen Umfeld gerecht werden.

Material und Methode

Die Herstellung von Bauteilen mithilfe des 3D-Drucks kann mittlerweile auf eine große Anzahl an Verfahren

zurückgreifen. FDM, als eine Möglichkeit der additiven Fertigung, basiert auf dem Prinzip der Materialeextrusion (vgl. Abbildung 1). Dabei wird das Verbrauchsmaterial in Form eines Filaments in einen halbflüssigen Zustand geschmolzen, an einer erhitzten Düse ausgestoßen und schichtweise auf einer Plattform aufgetragen, um eine Geometrie zu erzeugen [4]. In Abbildung 2 ist der Workflow dieser Methode schrittweise dargestellt. Grundsätzlich beginnt der Prozess mit der Erstellung eines 3D-Modells anhand einer beliebigen CAD-Software. Nach der Fertigstellung der Konstruktion folgt eine Konvertierung der CAD-Datei vorzugsweise in ein STL-Format, mit dem das generierte Modell in eine Slicer-Software importiert werden kann. In dieser wird die Struktur für die Fertigung vorbereitet, indem das Modell in Schichten zerlegt wird sowie Druckanweisungen mithilfe von Prozessparametern festgelegt werden. Anschließend erfolgt eine erneute Umwandlung der STL-Datei in eine G-Code-Datei, welche alle entsprechenden Daten für den 3D-Druck des Modells enthält. Diese wird an den entsprechenden FDM-3D-Drucker gesendet, um die Geometrie herzustellen.

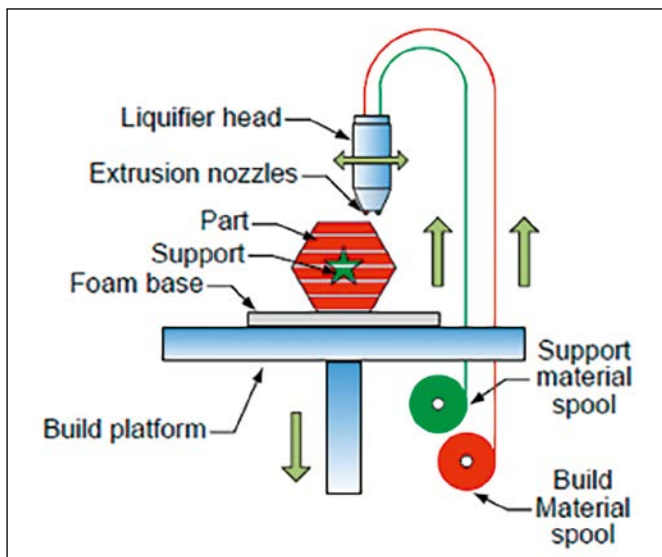


Abbildung 1: Schematischer FDM-Prozess [5]

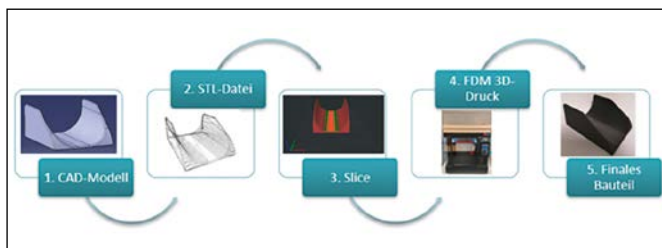


Abbildung 2: FDM-3D-Druck Workflow

Als Untersuchungsgegenstand wird im Zuge dieser Arbeit das auf Nylon bzw. Polyamid 12 basierende "PA-CF Lite" des Herstellers "Fiberthree GmbH" betrachtet. Dieses CFK-Verbrauchsmaterial ist mit 15 % an kurzen, geschnittenen Kohlenstofffasern ausgestattet, welche eine mittlere Länge von 0,15 mm aufweisen [6]. Die Herstellung von Testkörpern anhand des PA-CF Lite Filaments erfolgt mithilfe des kartesischen FDM-Druckers "Raise 3D Pro2" an

der OTH in Weiden. Der Drucker zeichnet sich durch einen Bauraum mit der Größe von 280 x 308 x 300 mm (B x L x H) aus. Zudem ermöglicht das Gerät Düsentemperaturen bis zu 310 °C respektive Bauplattformtemperaturen bis zu 110 °C. Zum Druck des CFK-Materials wurde eine Rubin-düse mit einem Durchmesser von 0,6 mm verwendet. Für die Fertigung von Bauteilen mithilfe dieses Filaments wird sich an die in Tabelle 1 aufgelisteten Prozessparameter gehalten.

Um die Eigenschaften des carbonfaserverstärkten Kunststofffilaments zu überprüfen, werden einerseits allgemein die Druckeigenschaften infolge der Prozessierbarkeit und Ergebnisqualität bezüglich Oberflächenqualität, Maßhaltigkeit sowie Stabilität des Materials charakterisiert. Andererseits werden radiologische, mikrobiologische sowie werkstoffspezifische Untersuchungen durchgeführt. Dafür wird zum einen das Rohmaterial in Form von Filamentsträngen verwendet. Zum anderen werden gefertigte Prüfkörpergeometrien benutzt.

Die radiologische Prüfung beinhaltet die Charakterisierung der Absorptionseigenschaften des CFK-Filaments, indem dessen mittlerer CT-Wert ermittelt wird. Dahingehend wird der Computertomograf "SOMATOM Emotion 6" des Herstellers Siemens im Werkstofftechniklabor der OTH AW in Weiden herangezogen. Als Testkörper dient eine treppenartige Geometrie mit den Abmessungen 50 x 25 x 2,5/5/10 mm, welche jeweils als Vollkörper sowie mit einer 25-prozentigen Fülldicke gefertigt wird. Anhand der CT-Aufnahmen und der Bildverarbeitungssoftware "3DSlicer" [7] werden die mittleren CT-Werte beider Prüfkörper evaluiert, um die Durchlässigkeit für Röntgenstrahlung zu bewerten.

Für die Überprüfung mikrobiologischer sowie werkstoffspezifischer Eigenschaften des Verbrauchsmaterials, werden Hygiene- und Oberflächentests durchgeführt. Diese umfassen einerseits einen Fluoreszenztest, einen Adenin-Tri-Phosphat-Test (ATP-Test) sowie einen Wisch- und Abriebtest. Innerhalb dieser Tests wird jeweils ein quadratischer, flacher Prüfkörper mit Abmessungen von 50 x 50 x 3 mm gemäß der ISO 22196 gedruckt und verwendet. Infolge des Fluoreszenztests wird eine ausgewählte Prüfkörpergeometrie an ihrer Oberfläche mit einem Fluoreszenzspray markiert. Anschließend wird mithilfe eines Desinfektionsmitteltuchs eine vordefinierte Wischdesinfektion durchgeführt und kontrolliert, inwiefern die Markierung entfernt wurde. Für den ATP-Test wird eine Petrischale als Positivkontrolle sowie die Oberfläche eines Prüfkörpers mit 50 µl einer Bakterienlösung aus Staphylococcus aureus kontaminiert. Mittels eines Testkits wird nachfolgend der ATP-Gehalt der Petrischale ohne desinfizierende Reinigung und der Prüfkörpergeometrie nach einer vordefinierten Wischdesinfektion in Relative Light Units (RLU) gemessen. Der ATP-Gehalt liefert hierbei einen Nachweis, ob eine organische Verunreinigung auf der kontaminierten bzw. gereinigten Fläche

vorliegt. Anschließend werden beide Werte verglichen und ein Reduktionsfaktor wird ermittelt. Innerhalb des Wisch- und Abriebtests wird das Abriebprüfgerät „Elcometer 1720“ verwendet, welches die Überprüfung von Materialien unter Einfluss von Wischzyklen und Nasswischbedingungen erlaubt. Der Wischvorgang an einer ausgewählten Prüfkörpergeometrie aus PA-CF-Lite wird mit einem Schwammbürstenaufsatz sowie einer einprozentigen Flächendesinfektionsmittellösung realisiert. Insgesamt werden 2000 Zyklen durchgeführt, um die Nassabriebbeständigkeit des Materials infolge von Gewichts-, Dicken- und Oberflächenbeschaffenheitsveränderungen des Prüfkörpers zu bewerten. Mithilfe dieser Untersuchungen soll kontrolliert werden, inwiefern die Oberflächenbeschaffenheit des CFK-Filaments eine effektive Reinigung ermöglicht und das Material eine Abriebbeständigkeit gegenüber einer mechanischen Einwirkung eines zyklischen Wischvorgangs aufweist.

Zwei weitere Tests dienen zur Identifizierung der Desinfizierbarkeit und Desinfektionsmittelbeständigkeit des PA-CF Lite Filaments. Anstelle von gedruckten Prüfkörpern wird bei beiden Versuchen das Rohmaterial verwendet. Für den Nachweis der Desinfizierbarkeit des untersuchten Verbrauchmaterials werden Abklatschproben an fünf Filamentsträngen durchgeführt. Alle Stränge werden zunächst mit einer Bakterienlösung aus *Staphylococcus aureus* kontaminiert und danach für fünf verschiedene Teilversuche verwendet. Dabei wird zunächst ein Materialstrang ohne Reinigung auf eine Blut-Agarplatte verstrichen (Versuch 1). Der zweite Strang wird in ein Desinfektionsmittel (Sterilium) eingetaucht sowie der dritte mit einem in Sterilium getränkten Tuch abgewischt. Jeweils beide Stränge werden auf eine Blut-Agarplatte verstrichen (Versuch 2 und 3). Der gleiche Ablauf wird als Vergleich mit autoklaviertem Wasser vollzogen (Versuch 4 und 5). Demnach wird überprüft, inwiefern ein bakterielles Wachstum auf den Blut-Agarplatten vorherrscht. In einer letzten Untersuchung wird die Desinfektionsmittelbeständigkeit bestimmt, indem drei Materialstränge des PA-CF Lite Filaments in 50 ml Sterilium bei Raumtemperatur eingelegt werden. Nach 7, 14 und 21 Tagen wird jeweils ein Strang entnommen und auf die Kriterien Struktur, Farbe, Glanz sowie Steifigkeit begutachtet, um Veränderungen durch den langfristigen Einfluss eines Desinfektionsmittels zu bewerten.

Ergebnisse

Hinsichtlich der Druckqualität des PA-CF Lite Filaments kann festgehalten werden, dass bei Berücksichtigung der in Tabelle 1 aufgelisteten Prozessparameter eine gute Verarbeitung ohne auftretende Problemstellungen im FDM-3D-Drucker gewährleistet wird. Die Oberflächen gedruckter Teile weisen glatte Beschaffenheiten auf, die keine Nachbearbeitung erfordern. Hierbei sind die Kalibrierung des richtigen Abstandes von Düse zu Bauplattform sowie die richtige Einstellung von Prozessparametern wie der

Flussrate und der Extrusionsbreite entscheidende Faktoren. Ebenso gilt dies für die Maßhaltigkeit gefertigter Geometrien, wodurch sich maximale Maßabweichungen von $\pm 0,1$ mm zeigen. Weiterhin umfassen gedruckte Bauteile aus PA-CF Lite eine hohe Stabilität mit gleichzeitig geringem Gewicht, die eine starke mechanische Belastung zulässt.

Tabelle 1: Prozessparameter PA-CF Lite

Druckparameter	Wert
Temperatur Heizbett	75 °C
Temperatur Extruder/Düse	290 °C
Durchflussrate	96 %
Extrusionsbreite	100 % = Düsendurchmesser
Schichthöhe	mind. 0,2 mm
Schalen	3
Standarddruck-/ Füllgeschwindigkeit	40 mm/s

Die Messergebnisse des CT-Scans zeigen, dass das untersuchte Verbrauchsmaterial für die additive Fertigung als Vollkörper einen mittleren CT-Wert von 162 Hounsfield-Einheiten (SD 29,74) aufweist. Zum Vergleich entspricht diese Röntgenabschwächung der Dichte von spongiösem Knochen. Bei einer 25-prozentigen Füllichte sinkt der mittlere CT-Wert auf -614 Hounsfield-Einheiten (SD 349,47). Dies erklärt sich anhand der durch das Infill entstehenden Hohlräume im Bauteil, welche die Röntgenstrahlung nicht absorbieren und somit als schwarz dargestellt werden. Folglich ist das Material durchlässiger gegenüber der Strahlung.

Bezüglich der effektiven desinfizierenden Reinigung von Oberflächen des PA-CF Lite Filaments kann festgehalten werden, dass sowohl Verunreinigungen als auch bakterielle Rückstände infolge einer Wischdesinfektion gezielt entfernt werden. Zum einen konnte die Fluoreszenzmarkierung auf der gedruckten Prüfkörperoberfläche mithilfe eines Desinfektionswischbuchs vollständig beseitigt werden. Zum anderen war es innerhalb des ATP-Tests möglich, eine bakterielle Verunreinigung auf der Oberfläche des Prüfkörpers von 848.423 RLU auf 9 RLU zu verringern, wodurch sich ein Reduktionsfaktor von $1,1 \times 10^5$ ergibt. Zwar ist trotz der desinfizierenden Reinigung eine Restverunreinigung vorhanden, welche jedoch aufgrund des geringen RLU-Werts als vernachlässigbar angesehen werden kann. In beiden Tests erwies sich das

Reinigungspotenzial der Materialoberfläche als optimal. Des Weiteren war anhand des Wisch- und Abriebtests zu sehen, dass nach insgesamt 2000 Wischzyklen keine Unterschiede bezüglich des Gewichts sowie der Dicke des Prüfkörpers im Vergleich zum Ausgangszustand vor der Durchführung vorhanden waren. Ebenso war keine Veränderung hinsichtlich der Oberflächenbeschaffenheit festzustellen, wodurch ein Abrieb des Materials nach mehreren Wischvorgängen grundsätzlich ausgeschlossen werden kann.

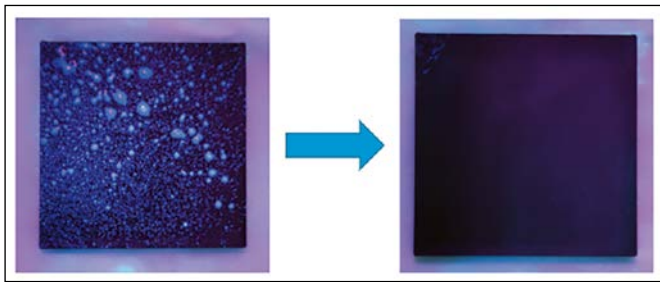


Abbildung 3: Fluoreszenzmarkierung auf der Prüfkörperoberfläche vor und nach der Reinigungsmaßnahme

In Abbildung 4 sind die Blut-Agarplatten der Versuchsreihe zur Untersuchung der Desinfizierbarkeit des CFK-Filaments dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass ohne Reinigung des Materials ein starkes Wachstum des Bakteriums vorlag. Sowohl das Eintauchen des CFK-Materials in Desinfektionsmittel als auch das Abwischen mit einem in Desinfektionsmittel getränkten Tuch bewirkte kein bakterielles Wachstum auf den Blut-Agarplatten. Hingegen wiesen die gleichen Versuche mit autoklaviertem Wasser ebenso ein starkes Wachstum auf. Somit kann geschlossen werden, dass eine Desinfektion des CFK-Materials grundsätzlich Wirkung zeigt und ein Bakterienwachstum verhindert sowie Wasser kein effektives Reinigungsmittel für das Material darstellt.



Abbildung 4: Blut-Agarplatten der Versuchsreihe zur Untersuchung der Desinfizierbarkeit (Versuch 1 bis 5)

Des Weiteren kann infolge der Desinfektionsmittelbeständigkeit festgehalten werden, dass das untersuchte Verbrauchsmaterial nach insgesamt 21 Tagen Einlagerung in Desinfektionsmittel keine Veränderungen hinsichtlich Struktur, Farbe sowie Glanz offenbarte. Jedoch konnten Abweichungen in der Steifigkeit des PA-CF Lite Filaments festgestellt werden, was in einer erhöhten Elastizität des Materials im Vergleich zum Ausgangszustand resultierte. Mit jedem Stichtag wurde das Filament zunehmend elastischer, wodurch sich nach 21 Tagen eine starke Elastizität einstellte. Auf Grundlage der Ergebnisse aus den Kriterien Struktur, Farbe und Glanz, kann eine äußer-

liche Beständigkeit des Materials gegenüber dem Desinfektionsmittel nach betrachtetem Zeitraum als gegeben bewertet werden. Inwiefern eine veränderte Steifigkeit des Filaments bei fertigen Bauteilen infolge der Einwirkung eines Desinfektionsmittels auftritt, kann aus dieser Untersuchung nicht abgeleitet werden.

Fazit

Die Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen zeigen, dass das betrachtete CFK-Filament PA-CF Lite für die additive Fertigung mithilfe des FDM-Verfahrens gute Eigenschaften gewährleistet, um entsprechenden Anforderungen für Anwendungsfälle in einem medizinischen Umfeld gerecht zu werden. Mit der Verwendung richtiger Prozessparameter infolge der Fertigung, bietet das Material hochqualitative, mechanisch stabile sowie leichte Bauteile. Insbesondere glatte Oberflächenbeschaffenheiten ermöglichen eine effektive Reinigung bzw. Desinfektion von Teilen aus PA-CF Lite, um organische Rückstände gezielt zu reduzieren respektive zu entfernen. Zudem zeigen erste Erkenntnisse, dass das CFK-Filament grundsätzlich eine Desinfizierung zulässt, wodurch ein bakterielles Wachstum vermieden wird. Zusätzlich liegt eine äußerliche Beständigkeit gegenüber der langfristigen Einwirkung eines Desinfektionsmittels vor. Weiterhin deuten die Ergebnisse des Wisch- und Abriebtests auf eine gute Nassabriebbeständigkeit des untersuchten Materials infolge eines Wischvorgangs.

Anhand der CT-Aufnahmen wird deutlich, dass PA-CF Lite, speziell als Vollkörper gedruckt, Röntgenstrahlung absorbiert. Dies ist auf die Zusammensetzung des Filaments mit lediglich 15 % Anteil an Kohlenstoffasern zurückzuführen. Jedoch zeigt eine geringe Füllichte von 25 % eine insgesamt niedrigere mittlere Absorption der Röntgenstrahlung, welche eine stärkere Transparenz zur Folge hat.

Ausblick

Der FDM-3D-Druck des CFK-Filaments PA-CF Lite bietet eine anspruchsvolle Alternative, kostengünstige sowie vielseitige kohlenstoffaserverstärkte Bauteile zu fertigen. Damit ein Einsatz für die Medizintechnik speziell in Bereichen der Radiologie sowie Chirurgie in Frage kommt, sind weiterführende Untersuchungen des Materials in Bezug auf hygienische Anforderungen sowie Materialbeständigkeit notwendig. Sinnvoll erscheinen hierbei eine Testung der antimikrobiellen Wirkung von Oberflächen sowie die Bestimmung der Einwirkung von Mikroorganismen auf Kunststoffen. Um den Einfluss des PA-CF Lite Filaments auf die Erzeugung von diagnostischen CT-Bildern abzuleiten, sollten CT-Scans mit gedruckten Zubehörfteilen, beispielsweise für eine CT-Patientenliege, unter Einbeziehung eines Phantoms bzw. Ganzkörperphantoms vorgenommen werden.

Referenzen:

- [1] Lengsfeld, Hauke; Mainka, Hendrik; Altstädt, Volker: Carbonfasern: Herstellung, Anwendung, Verarbeitung. München: Carl Hanser Verlag, 2019, S. 50.
- [2] Huang, Xiaosong: Fabrication and Properties of Carbon Fibers. In *Materials* (Basel, Switzerland), 2009, 2, S. 2369–2403.
- [3] Nunna, Srinivas; Blanchard, Patrick; Buckmaster, Derek; Davis, Sam; Naebe, Minoo: Development of a cost model for the production of carbon fibres. In *Heliyon*, 2019, 5.
- [4] Wang, Xin; Jiang, Man; Zhou, Zuowan; Gou, Jihua; Hui, David: 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. In *Composites Part B: Engineering*, 2016, 110, S. 442–458.
- [5] Ning, Fuda; Cong, Weilong; Qiu, Jingjing; Wei, Junhua; Wang, Shiren: Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. In *Composites Part B: Engineering*, 2015, 80, S. 369–378.
- [6] Fiberthree GmbH: Technisches Datenblatt: F3 PA-CF Lite. https://www.fiberthree.com/downloads/tdb/filaments/TDB_F3_PA_CF_Lite.pdf, letzter Zugriff 01.09.2022.
- [7] Fedorov A., Beichel R., Kalpathy-Cramer J., Finet J., Fillion-Robin J-C., Pujol S., Bauer C., Jennings D., Fennessy F.M., Sonka M., Buatti J., Aylward S.R., Miller J.V., Pieper S., Kikinis R. 3D Slicer as an Image Computing Platform for the Quantitative Imaging Network. In *Magnetic Resonance Imaging*, 2012, 30(9), S.1323–1341

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



Niklas Lang, B.Eng.

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

n.lang@oth-aw.de



Stefan Ziegler, M.A.

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



Agnes Pöllmann, M.Sc.

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

a.poellmann@oth-aw.de

Innovativ mit „Open Space“ – Methode im Projekt „SDG Transformation SPACE“

Prof. Dr. Christiane Hellbach
Prof. Dr. Lisa Ranisch
Doc. Dipl.-Ing. Dita Hommerová, Ph.D., MBA
Dr. Alexander Herzner
Georg Klampfl, M.Eng.

Zusammenfassung

Ziel des Projektes „SDG Transformation SPACE“ ist es, die Studierenden zweier Hochschulen grenzüberschreitend zu befähigen, Nachhaltigkeitsdilemmata zu (er-)kennen, zu analysieren, zu bewerten sowie kooperativ und kollaborativ an Lösungsansätzen mitzuwirken. Zum Einsatz kommt in einem partizipativen Ansatz die innovative didaktische Methode „Open Space“, die es erlaubt, auch große Gruppengrößen zusammenzuführen und komplexe Fragestellungen zu behandeln. Thematisch im Fokus des Projektes stehen Nachhaltigkeitsdilemmata und Zielkonflikte sowohl innerhalb als auch zwischen den 17 Sustainable Development Goals (SDGs) sowie Herausforderungen, welche sich bei der Erfüllung der SDGs ergeben können. Das Projekt wird von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) für zwei Jahre (07/2021 – 06/2023) gefördert.

Abstract

The goal of the project “SDG Transformation SPACE” is to enable students from two universities to identify, analyze and evaluate sustainability dilemmas and to work cooperatively and collaboratively on solutions. In a participative approach, the innovative didactic method “Open Space” is used, which allows to bring together large groups and to deal with complex issues. Thematically, the project focuses on sustainability dilemmas and conflicting goals both within and between the 17 Sustainable Development Goals (SDGs) as well as ethical challenges that may arise in fulfilling the SDGs. The project is funded by the Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) for two years (07/2021 – 06/2023).

1 Einleitung

In einem für Bayern und ganz Deutschland einmaligen Projekt wird die Expertise zweier Hochschulen (und Hochschultypen) zusammengeführt: einerseits der forschungsstarken Westböhmischen Universität Pilsen (WBU Pilsen), andererseits der in Zusammenarbeit mit der Praxis um innovative Konzepte bestrebt OTH Amberg-Weiden. Der fächer-, hochschul- und grenzübergreifende Ansatz des Vorhabens, Lehrinhalte zu Nachhaltigkeitsdilemmata in bestehende Lehrveranstaltungen beider Hochschulen einzubringen sowie die didaktische Verknüpfung von Präsenzveranstaltungen und virtuellem Lernen ermöglichen eine interdisziplinäre und internationale Erschließung von Lehrenden und Studierenden auf breiter Basis. Seit 2021 wurden bereits zwei Durchgänge des Projektes mit unterschiedlichen thematischen Schwerpunktsetzungen umgesetzt.

2 „Open Space“ als innovative didaktische Methode

Zur Beschäftigung mit den Nachhaltigkeitsdilemmata im Rahmen der Lehre wird ein didaktisch innovativer Ansatz gewählt, der bewusst offengehalten ist und viel Raum für Partizipation sowie Dialog bietet. Dies ist angesichts der unsicheren und sich stetig wandelnden Bedingungen, unter denen sich die Dilemmata manifestieren und gelöst werden müssen, ein passender Rahmen, um kreative Lösungsfindungen anzuregen und möglicherweise bestehenden Zweifeln und Unsicherheiten hinsichtlich der eigenen Lösungswirksamkeit vorzubeugen. Das auf der Methode des „Open Space“ basierende didaktische Konzept sieht verschiedene Phasen vor, die für eine hohe Beteiligung und wirksame Problemlösung sowohl eine digitale Lehr-Lern-Umgebung als auch Präsenzformate

einsetzen. Entscheidend für eine effektive Bearbeitung von Dilemmata sind Rahmenbedingungen, die es allen Studierenden ermöglichen, kreative Diskussionen zu führen und ihre Verantwortung und Motivation für ein bestimmtes Thema eigenständig zu erkennen und wahrzunehmen. Dieser konstruktive Rahmen wird mittels der Open Space-Methode und der zugehörigen Prinzipien sichergestellt.

Zusammengefasst unter dem Dach des „SDG Transformation SPACE“ Projektes verfolgt das Konzept die folgenden **Phasen**:

1. **Lead-In:** Kommunikation zum Start der „SDG Transformation SPACES“ sowie Sensibilisierung der Lehrenden im jeweiligen Modul für mögliche Nachhaltigkeitsdilemmata im Kontext des Fachs und Einführung in die didaktische Methode des „Open Space“.
2. **Virtual Space I (Intro):** Einführung in Nachhaltigkeitsdilemmata im Rahmen der SDGs durch Videos und Lernangebote auf virtueller Plattform sowie Sammlung konkreter Fragestellungen und Interessen der Studierenden.
3. **On-Site Space:** Modulübergreifende, interdisziplinäre Durchführung eines „Open Space“ zur Diskussion von Nachhaltigkeitsdilemmata (begleitet durch „SDG Transformation SPACE“ Coach).
4. **Virtual Space II (Wrap-Up):** Angeleitetes Reflektieren sowie Abschluss und Dokumentation der Ergebnisse im Rahmen eines Online-Meetings unter Verwendung eines kollaborativen Tools.
5. **Follow-Up:** Motivation zur Weiterbehandlung eines Nachhaltigkeitsdilemmas sowie einer konkreten Lösungsstrategie durch Studierende im Rahmen einer Projektarbeit oder Bachelor-/Master-Thesis.

Personell sind in den Prozess verschiedene verantwortliche **Rollen** eingebunden:

- Die Durchführung der fünf Phasen des „SDG Transformation SPACE“ wird durch einen **Coach** angeleitet, der/die mit der Methode des Open Space vertraut ist und eine Rolle als Koordinator/in, Motivator/in und Facilitator im Rahmen des Prozesses übernimmt.
- Begleitet wird er oder sie von **Lehrenden** der OTH Amberg-Weiden und der WBU Pilsen für den jeweiligen inhaltlichen Fachbereich der Nachhaltigkeitsdilemmata.
- sowie **fachlichen Experten/innen** aus dem Institut für Nachhaltigkeit und Ethik (OTH Amberg-Weiden) und der WBU Pilsen.

Die Inhalte für den Virtual Space I (Intro) werden vom Projektteam gemeinsam konzipiert, entwickelt und umgesetzt. Eine zentrale Rolle spielen die jeweiligen **Lehrenden** in den adressierten Modulen, die einen Termin ihrer regulären Lehrveranstaltung für dieses Format bewusst öffnen und die Rolle der fachlichen Begleiter/innen in Form eines

Team-Teaching im Rahmen des dritten Schritts, der Durchführung des On-Site-Space, übernehmen.

Der Ablauf des „SDG Transformation SPACE“ gestaltet sich wie folgt: In der ersten Phase (**Lead-In**) erfolgt eine Einführung der jeweiligen Lehrenden der betroffenen Module in die Idee des „SDG Transformation SPACE“ und die didaktische Methode des „Open Space“ sowie eine Sensibilisierung für die in ihrem jeweiligen Fach möglichen Nachhaltigkeitsdilemmata. Gemeinsam wird ein Termin für den On-Site-Space festgelegt und mit den Studierenden geteilt. Auch wird das Projekt „SDG Transformation SPACE“ von Beginn an über die Kommunikation beider Hochschulen nach außen getragen, um eine erweiterte Sensibilisierung und Aufmerksamkeit für das Thema zu erreichen. Daraufhin wird der **Virtual Space I** für die Studierenden geöffnet, so dass sich diese auf einer digitalen Lernplattform mit den SDG-Dilemmata vertraut machen und erste eigene Ideen und Interessen im Kontext ihres Fachs einbringen können.

Das Herzstück des „SDG Transformation SPACE“ stellt die dritte Phase, der **On-Site Space**, dar, in dem die Studierenden und Lehrenden der betroffenen Module an einem innovativen Lernort zusammengebracht werden und auf Basis der Open Space-Methode konkret an Lösungsstrategien für verschiedene Nachhaltigkeitsdilemmata arbeiten. Hier sollen die individuellen Potentiale, die die Studierenden aus ihrem jeweiligen fachlichen und persönlichen Hintergrund mitbringen, aktiviert werden.



Zweite Open Space - Veranstaltung am 17.5.2022 im Mutlifunktionsraum der OTH Amberg-Weiden, Bild 1



Zweite Open Space - Veranstaltung am 17.5.2022 im Mutlifunktionsraum der OTH Amberg-Weiden, Bild 2



Zweite Open Space - Veranstaltung am 17.5.2022 im Multifunktionsraum der OTH Amberg-Weiden, Bild 3

Auch wird der Umgang mit Unsicherheiten im Kontext der Nachhaltigkeitstransformation adressiert und die Studierenden

sollen sich eigenverantwortlich mit Dilemmata befassen, die sie aus ihrer Sicht als dringlich erachten und für die sie eine eigene Lösungsstrategie entwickeln wollen. Es ist eine zentrale Idee des Konzepts, dass Unerwartetes in den Diskurs eingebracht werden darf und soll, da gerade dies oft eingefahrene Denk- und Handlungsmuster brechen und Kreativität freisetzen kann. Dazu dienen die zuvor kommunizierten vier Prinzipien des Open Space:

1. Wer kommt, ist die richtige Person.
2. Was auch immer geschieht, es ist das Einzige, was geschehen könnte.
3. Es beginnt, wenn die Zeit reif ist.
4. Vorbei ist vorbei.

Diese Prinzipien werden ergänzt um das „Gesetz der zwei Füße“, das durch Freiheit und Selbstverantwortung den Einfluss jedes Teilnehmenden auf Inhalte und Form sicherstellt. Um ein offenes und kreatives Arbeiten zu ermöglichen, findet der On-Site Space in aufgelockerten Räumlichkeiten wie den Innovativen LernOrten (ILOs) der OTH Amberg-Weiden, dem Innovationslabor „Machbar“ auf dem Campus in Weiden oder den architektonisch innovativ gestalteten Räumlichkeiten der zentralen Bibliothek der WBU Pilsen statt.

Zum Abschluss treffen sich die Studierenden nochmals auf der digitalen Lernplattform (**Virtual Space II, Wrap-**

up), um ihre Ergebnisse angeleitet durch den Coach zu reflektieren sowie unter Verwendung eines kollaborativen Tools zu dokumentieren. In dieser Phase wird ebenso erörtert, welche Chancen mit ihren Ideen verbunden sind und wie diese möglicherweise weiterverfolgt werden können. Die Ergebnisse jedes durchgeführten

„SDG Transformation SPACE“ werden ebenfalls nach außen getragen, etwa durch Artikel auf den Websites der beiden Hochschulen oder beispielsweise auf der Plattform der Europaregion Donau-Moldau. Über diese Phasen hinaus werden die Studierenden im Rahmen eines **Follow-Ups** weiter vom „SDG Transformation SPACE“ Coach sowie ihren jeweiligen Lehrenden begleitet und durch weitere Gesprächsangebote, Themenpools u. a. motiviert, ihre erarbeiteten Lösungsstrategien im Rahmen einer Projektarbeit oder Bachelor-/Master-Thesis weiter auszuarbeiten. Sofern passend besteht hier auch die Möglichkeit, über das Projektteam Kontakt zu möglichen externen Partnern (z. B. Unternehmen) zu knüpfen, mit denen die ausgearbeitete Lösungsstrategie für ein Dilemma praktisch umgesetzt werden könnte.

Die Zielgruppe des Formats sind Studierende aller Bachelor- und Masterstudiengänge an allen Fakultäten der OTH Amberg-Weiden sowie an diversen Fakultäten der WBU Pilsen. Die Inhalte des „SDG Transformation SPACE“ werden mit Beteiligten beider Hochschulen in mehreren Sprachen (DE, EN, CZ) entwickelt, geteilt und gemeinsam genutzt. Es wurde geplant, das Konzept an beiden Standorten (DE, CZ) umzusetzen und die Studierenden beider Hochschulen in einzelnen Veranstaltungen des „SDG Transformation SPACE“ zusammenzubringen, um einen internationalen Austausch zu ermöglichen und gemeinsame Handlungsoptionen zu entwickeln.

3 Ergebnis/Zusammenfassung/Ausblick

Durch den Einsatz der kollaborativen Methode „Open Space“ werden Lehrende und Studierende mit verschiedenen fachlichen Hintergründen beteiligt. So erfährt das Projekt eine breite Unterstützung und Reichweite. Außerdem wird durch den Austausch mit Expert/innen zur nachhaltigen Entwicklung und den SDGs (u. a. aus dem Institut für Nachhaltigkeit und Ethik) eine fundierte Arbeit an den jeweiligen Nachhaltigkeitsdilemmata und deren Lösung sichergestellt und einer unbegründeten Komplexitätsreduktion vorgebeugt.

Die von allen Beteiligten notwendige Offenheit und Kreativität im Prozess der Durchführung wird durch den „SDG Transformation SPACE“ Coach gefordert. Er/sie wird auch explizit auf Unsicherheiten im Rahmen von Transformationsprozessen und der Beteiligung daran als Individuum oder Kollektiv eingehen, um die wahrgenommene Lösungswirksamkeit zu erhöhen. Die Studierenden selbst nehmen eine zentrale Rolle ein, indem sie im Rahmen

des didaktischen Formats des „Open Space“ ihrer Innovationsfreude, ihrem Ideenreichtum, aber auch ihrem kritischen Geist sowie ihren offenen Fragen und Unsicherheiten Raum geben können. Dieses kollaborative Vorgehen im Kontext der Nachhaltigkeitstransformation stellt eine innovative Ergänzung der bisherigen Didaktik an beiden Hochschulen dar.

Das Konzept einer systematischen Verbreitung erprobter Einsatzmöglichkeiten kann sich aber nur bewähren, wenn Erfahrungen und Ergebnisse einen Qualitätsnachweis liefern. Deswegen kommt der Evaluation des Projektes besondere Bedeutung zu. In regelmäßigen Abständen während des Projekts sowie gesamthaft nach Abschluss der ersten zwei Jahre wird ein Resümee über die Projekt-

durchführung gezogen, indem sowohl positive Aspekte und Erkenntnisse als auch aufgetretene Problematiken und Schwächen berücksichtigt werden und in die weitere Konzeption des Projekts einfließen. Die Integration der Angebote in die Lehre erfolgt auf der Grundlage der Vorgaben des Qualitätsmanagements der beiden systemakkreditierten Hochschulen. Eine von Beginn an systematische Konzeption und Ausgestaltung der Methodik und Inhalte des Projekts sowie eine vollumfängliche Dokumentation erlauben es, erhebliche Skalierungspotenziale zu schaffen. Für weitere Hochschulen, welche das Konzept ebenfalls einführen wollen, kann im Sinne von Best-Practice-Ansätzen ein beträchtlicher Etablierungsaufwand vermieden und ein Mehrwert für deren Konzeptausgestaltung geschaffen werden.

Projektpartner:

Westböhmisches Universität Pilsen, CZ

Fördergeber:



Kontakt:



Prof. Dr. Christiane Hellbach

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Weiden Business School
Vizepräsidentin
Clustersprecherin ETN
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

c.hellbach@oth-aw.de



Prof. Dr. Lisa Ranisch

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Weiden Business School
Nachhaltige Unternehmensführung
und Angewandte Ethik
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

l.ranisch@oth-aw.de



Doc. Dipl.-Ing. Dita Hommerová, Ph.D., MBA

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

d.hommerova@oth-aw.de



Dr. Alexander Herzner

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Leitung Institut für Nachhaltigkeit
und Ethik
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

a.herzner@oth-aw.de



Georg Klampfl, M.Eng

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

g.klampfl@oth-aw.de

Regionale Lebensqualität als Standortfaktor: Ansätze zur empirischen Messung und kommunale Fallbeispiele im ländlichen Raum

Zusammenfassung

In der Untersuchung wird das Phänomen der regionalen und kommunalen Lebensqualität in ländlichen Räumen aus verschiedenen Perspektiven beleuchtet. Die Studie erläutert die Grundlagen der Lebensqualität und deren Einflussfaktoren. Zudem wird betrachtet, weshalb die Lebensqualität einen weichen Standortfaktor darstellt, der sich unmittelbaren quantitativen Kennziffern entzieht. Weiterhin werden Ansätze zur Messung und Bewertung von Lebensqualität vorgestellt, und welche Bedeutung objektive und subjektive Kriterien in diesem Zusammenhang haben. Einbezogen sind vorliegende Studien zur Lebensqualität, die Raumordnungsprognose 2040 und der Raumordnungsbericht 2021 jeweils auf Bundesebene und deren wesentliche Ergebnisse mit Blick auf die Einschätzung von räumlicher Lebensqualität. Darüber hinaus wird betrachtet, welche Faktoren zu Abweichungen in der Lebensqualität führen können und welche kommunalpolitischen Ansätze zu ihrer Sicherung und Verbesserung in ländlichen Regionen mit besonderem Handlungsbedarf anhand von drei ausgewählten Fallbeispielen von Gemeinden in der Oberpfalz und in Oberfranken vorhanden sind und umgesetzt werden.

Abstract

In the study, the phenomenon of regional and local quality of life in rural areas is examined from different perspectives. The paper explains the basics of quality of life and its influencing factors. In addition, it was considered why the quality of life is a soft location factor, which is not directly related to quantitative indicators. Moreover, approaches for measuring and evaluating quality of life were considered, and what significance objective and subjective criteria have in this context. Existing studies on quality of life, the Spatial Planning Forecast 2040 and the Spatial Planning Report 2021, both on federal level, and their main results with regard to the assessment of regional quality of life were included. Furthermore, it is considered which factors can lead to deviations in the quality of life and which local policy approaches are implemented to secure and improve it in rural regions with a special need for action on the basis of three selected case studies of municipalities in the Palatinate and in Upper Franconia.

1 Einleitung

Bei der Auswahl eines Standortes sind neben objektiven, rationalen Aspekten subjektive Parameter von Relevanz. Diese Entscheidungskriterien werden in harte und weiche Standortfaktoren unterteilt. Harte Standortfaktoren, z. B. Grundstückskosten, sind quantifizierbar, direkt messbar und damit eindeutig vergleichbar. Weiche Standortfaktoren, wie der Freizeit- oder Kulturwert einer Region, sind dagegen qualitativer Art und von subjektiven Wahrnehmungen beeinflusst, die sich oft quantitativen

Kriterien entziehen. Weiche Standortfaktoren gewinnen jedoch zunehmend an Bedeutung, so das Phänomen der Lebensqualität in unterschiedlichen Raumtypen. Hinzu kommt, dass Lebensqualität eine Kombination aus weichen und harten Standortfaktoren darstellt. Es handelt sich aus diesem Grund um Indikatorenbündel, über die eine objektiv gegebene und subjektiv wahrgenommene Lebensqualität beeinflusst wird. Regionen und Kommunen setzen daher den Faktor Lebensqualität in ihrem Marketing ein, um interne und externe Zielgruppen anzusprechen und ihre Position im Wettbewerb auszubauen.

Die regionale Lebensqualität gilt insgesamt als eine entscheidende Variable der Attraktivität insbesondere von ländlichen Räumen, als ein „Pull-Faktor“ für Investitionen und eine Einflussgröße des Bleibeverhaltens im Zuge des demografischen Wandels sowie eines immer deutlicheren Fachkräftemangels. Die Einschätzung und Bewertung von Lebensqualität ist ein Abwägungsprozess, der sich vor allem in qualitativen Dimensionen, persönlichen Erfahrungen bis hin zur individuellen Phase im Lebenslauf bewegt, jedoch auch die objektive Ausstattung vor Ort in die Bewertung einbezieht. Regionen und Kommunen können daher in ihrer Produkt- und Leistungs politik insbesondere die Attraktivität der vorhandenen harten und weichen Standortfaktoren einsetzen und ausbauen.

2 Definition von Lebensqualität und Ansätze zur empirischen Messung

Lebensqualität ist ein unbestimmter, offener Begriff. Da Lebensqualität nicht direkt messbar ist, werden objektive und subjektive Indikatoren zu deren Einschätzung verwendet. Lebensqualität kann als ganzheitliches Zielkonzept interpretiert werden, das ökonomische, soziale und ökologische Perspektiven gleichermaßen berücksichtigt. Lebensqualität ist neben dem Angebot einer Region von der subjektiven Wahrnehmung abhängig. Sie bezieht sich auf Lebenssituationen unter Berücksichtigung regionaler sowie individueller Kultur- und Wertesysteme. Viele Faktoren wie Infrastruktur-Ausstattung, Status, soziales Umfeld, Integration in Freundeskreise und Vereine, die räumliche Verbundenheit, persönliche Erfahrungen (positiv oder negativ) bis hin zu Bildungs- und Beschäftigungschancen beeinflussen die Wahrnehmung und Bewertung von Lebensqualität als weichem Standortfaktor.

Subjektives Wohlbefinden ist ein Konzept, das überwiegend im Rahmen sozialwissenschaftlicher Studien untersucht wird. Ein Maß hierfür ist die allgemeine Lebenszufriedenheit, die in Deutschland seit den 1980er-Jahren erhoben wird. Wirtschaftliche Faktoren wie Einkommen, Kaufkraft und Arbeitsmarkt sowie gesellschaftliche Variablen und Umweltbedingungen haben Einfluss auf die Lebenszufriedenheit und damit auf die Lebensqualität. So werden auch Bürgerdialoge zum Thema Lebensqualität durchgeführt, deren Ergebnisse im Bericht der Bundesregierung zur Lebensqualität in Deutschland im Jahr 2016 zusammengefasst wurden, verbunden mit der Messung von Lebensqualität über 12 Dimensionen und 46 Indikatoren [1]. Im Ergebnis wird deutlich: Obwohl Lebensqualität bis zu einem gewissen Grad durch objektive Indikatoren dargestellt werden kann, entscheidet die subjektive Wahrnehmung über die Wichtigkeit einzelner Faktoren und welche Variablen die Lebensqualität individuell wesentlich beeinflussen.

Insgesamt wird in der Regional- und Kommunalpolitik der Handlungsbedarf zur bestmöglichen Gestaltung der

Lebensqualität für die Bürgerinnen und Bürger in den verschiedenen Lebenszyklus-Phasen angesichts der wachsenden Herausforderungen durch den demografischen Wandel zunehmen. Dies gilt insbesondere für die ländlichen, zum Teil strukturschwachen Räume, wie in der aktuellen Raumordnungsprognose 2040 [2] und im Raumordnungsbericht 2021 mit dem Titel „Wettbewerbsfähigkeit stärken“ [3] des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) hervorgehoben.

3 Schlüsselaspekte der Raumordnungsprognose 2040

In der BBSR-Raumordnungsprognose 2040 wird betont, dass sich der demografische Wandel in nahezu allen Lebensbereichen auswirken wird. Die Alterung der Bevölkerung wird sich fortsetzen, der absolute und relative Anteil der Jugend weiter abnehmen, und der natürliche Bevölkerungssaldo wird aufgrund von Sterbefallüberschüssen und niedrigen Geburtenraten negativ bleiben. Und es werden sich die Disparitäten zwischen demografisch wachsenden und schrumpfenden Regionen fortsetzen. Im Ergebnis wird festgehalten, dass nur ein deutlicher Anstieg der Geburtenrate und/oder eine stärkere Zuwanderung in die ländlichen Räume zu einer Kompensation führen kann: „Für die meisten Regionen bleiben – infolge der zunehmenden Sterbeüberschüsse – Wanderungen die einzige Chance auf eine positive Bevölkerungsentwicklung“, betont das BBSR 2021 [4].

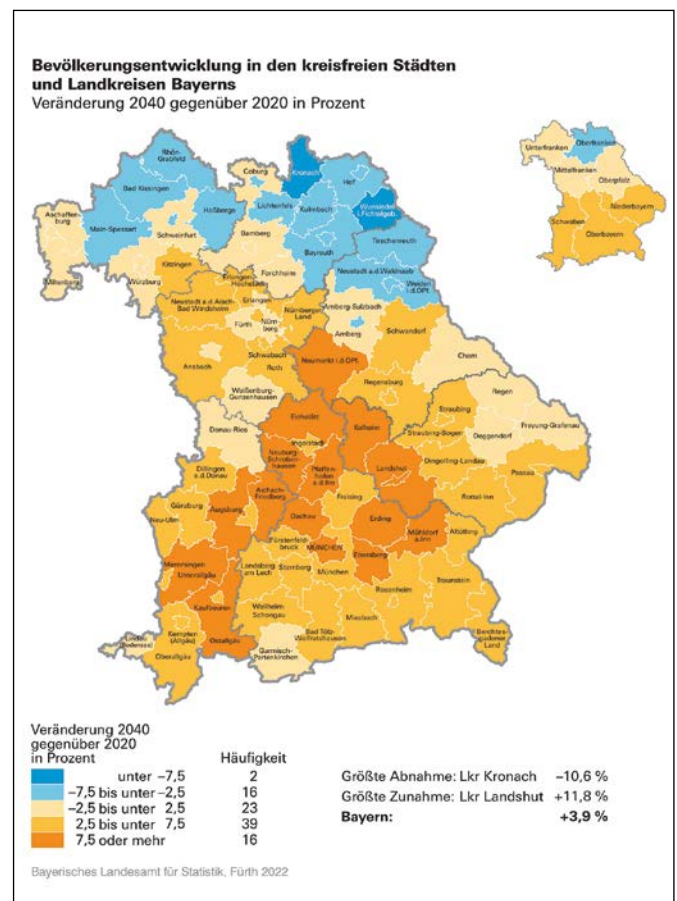


Abbildung 1: Bevölkerungsprognose Bayern 2020–2040 [6]

Diesen langfristigen Zeitraum der bundesweiten Raumordnungsprognose bis zum Jahr 2040 betrachtet ebenso das Bayerische Landesamt für Statistik in seiner neuesten regionalisierten Bevölkerungsvorausberechnung 2020–2040 für die Landkreise und kreisfreien Städte in Bayern [5]. Gerade die ländlichen Räume in Nordostbayern werden nach wie vor mit einer eher ungünstigen Entwicklung der Bevölkerungszahl im Zuge des demografischen Wandels verbunden (vgl. Abbildung 1).

4 Chancen und Herausforderungen in ländlichen Räumen

Die ländlichen Räume stehen sowohl vor Chancen als auch vor Herausforderungen in den Bereichen Wohnen, Arbeit, Ortskerne, Grundversorgung, Mobilität, Bildung, Kultur, Digitalisierung, Gesundheit, Erholung und Handel, damit insgesamt der Daseinsvorsorge. In einigen Regionen und Kommunen scheint es jedoch in der Zwischenzeit eine Trendwende zu geben: Die Attraktivität ländlicher Regionen rückt zunehmend in die Betrachtung von Lebens- und Arbeitswelten, sicherlich auch verbunden mit der Digitalisierung und Dezentralisierung von Berufstätigkeiten (Stichwort Home-Office), Kostenstrukturen des Immobilienmarktes in Verdichtungsräumen und einer sich verändernden Bewertung von Lebensqualität etwa in jungen Familien. Gerade die Digitalisierung mit einer Anbindung der ländlichen Räume an eine hochleistungsfähige Breitbandversorgung kann als einer der zentralen harten Standortfaktoren der Zukunft erachtet werden, und dies gleichermaßen für Standortentscheidungen von Bürgerinnen und Bürgern, privaten und öffentlichen Unternehmen sowie Start-ups in der digitalen Welt. Der weiche Standortfaktor Lebensqualität spielt hierbei eine wichtige Rolle als Pull-Faktor und für die Positionierung sowie Profilierung im interregionalen und interkommunalen Wettbewerb.

5 Kommunale Fallbeispiele aus Ostbayern

Das Landesentwicklungsprogramm Bayern (LEP Bayern, 2020) charakterisiert die ländlichen Räume in Ostbayern überwiegend als „Raum mit besonderem Handlungsbedarf (RmbH)“, so insgesamt die Planungsregionen Oberpfalz Nord (Region 6) und Oberfranken Ost (Region 5) [7]. Darauf aufbauend wurden in der Untersuchung zum Thema „Regionale Lebensqualität als Phänomen und Standortfaktor: Objektive und subjektive Ansätze zur empirischen Messung und räumliche Fallbeispiele aus Ostbayern“ [8] drei Kommunen für die Analyse ihrer Lebensqualität ausgewählt. Ziel war es, aufzuzeigen, wie sich die Lebensqualität in den drei kommunalen Case Studies Gemeinde Fensterbach (Landkreis Schwandorf, Region Oberpfalz Nord), Gemeinde Irchenrieth (Landkreis Neustadt an der Waldnaab, Region Oberpfalz Nord) und Gemeinde Röslau (Landkreis Wunsiedel im Fichtelgebirge, Region Oberfranken Ost) in der objektiven und sub-

jektiven Einschätzung, verbunden mit primärem empirischen Erhebungen vor Ort, gestaltet.

Diese Auswahl basiert auf der Vergleichbarkeit der Fallstudien hinsichtlich der Einwohnerzahl, der regionalen Rahmenbedingungen und der Lage in einem ländlichen Raum Bayerns mit besonderem Handlungsbedarf. Es wurde zunächst eine Einschränkung auf die vom demografischen Wandel besonders tangierten Regionen Oberpfalz Nord und Oberfranken Ost vorgenommen. In einem nächsten Schritt wurden innerhalb dieser Regionen drei ländliche Gemeinden mit weniger als 5000 Einwohnern ausgewählt. Des Weiteren wurde darauf geachtet, dass ausreichende Daten vorliegen, um eine objektive Bewertung der Lebensqualität zu ermöglichen. Anschließend wurden in den ausgewählten Orten Experteninterviews mit den Bürgermeisterinnen und Vereinsvorständen durchgeführt, um subjektive Einschätzungen der Lebensqualität vor Ort zu erheben. Die objektiven Bewertungen enthielten vor allem Daten zu harten Standortfaktoren und wurden in Form einer Strukturanalyse zusammengefasst. Die subjektiven Bewertungen zielten insbesondere auf weiche Standortfaktoren ab. Darüber hinaus wurden Handlungspotenziale zur Verbesserung oder Sicherung der Lebensqualität in den Gemeinden aufgezeigt.

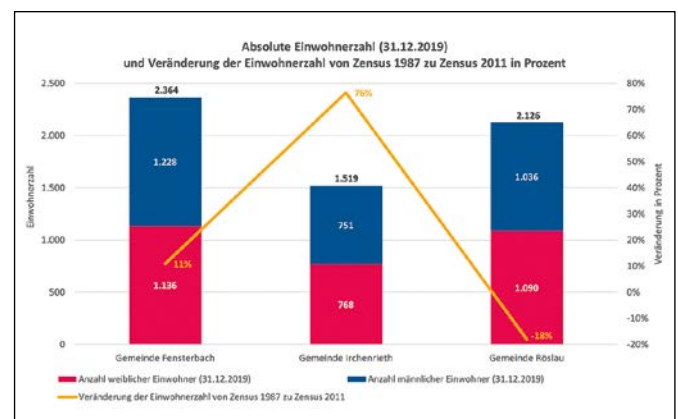


Abbildung 2: Demografischer Wandel in den Untersuchungsgemeinden [9]

5.1 Wesentliche Ergebnisse der empirischen Erhebungen

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich die Lebensqualität in allen drei untersuchten Gemeinden grundsätzlich positiv gestaltet. Allerdings hat die Gemeinde Röslau aufgrund des industriellen Strukturwandels in der Porzellanindustrie und daraus resultierender Probleme mehr mit den Herausforderungen des demografischen Wandels umzugehen als die Kommunen Fensterbach und Irchenrieth. Alle drei Gemeinden ergreifen aktiv Maßnahmen zur Bewältigung der demografischen Entwicklung, wobei sie sich auf unterschiedliche Bereiche konzentrieren.

Ein zentraler Aspekt in der Ausgestaltung der Lebensqualität ist in allen drei untersuchten Gemeinden die Gewährleistung der Daseinsvorsorge für die Bürgerinnen und Bürger, hier insbesondere der Erhalt und die Verbesserung der Versorgungssituation, ausgerichtet auf die medizinische bzw. ärztliche Betreuung, die Einkaufsmöglichkeiten sowie das Angebot an Kindergartenkapazitäten und Arbeitsplätzen vor Ort. Ebenso wichtig ist den Gemeinden die Schaffung von Baugebieten und Mietwohnungen, um für junge Familien attraktiv zu sein. Darüber hinaus tragen ein aktives Vereinsleben, das Ehrenamt sowie insgesamt engagierte Bürgerinnen und Bürger wesentlich zur kommunalen Lebensqualität bei. Das Vereinsleben ist in allen drei Gemeinden erheblich ausgeprägt und wird von den Gemeinden unterstützt. Ein Trend, der besonders in Fensterbach und Röslau zu beobachten ist, scheint darin zu bestehen, dass junge Menschen Traditionen und Werte wiederentdecken und das Heimatgefühl bzw. die Verbundenheit mit dem Wohnort und der Region an Bedeutung gewinnt. Begleitend sind Rückkehrende festzustellen, die einmal weggezogen waren und nun ihren Lebensmittelpunkt wieder in der Heimatgemeinde finden. Allen drei Fallbeispielen ist ihre kommunale Identität wichtig und soll weiter gestärkt werden. Die Lebensqualität vor Ort wird durchgängig als bedeutender Standortfaktor und die Möglichkeit zur Profilierung erachtet.

5.2 Kommunale Ansätze zur Gestaltung von Lebensqualität

In der Gemeinde Fensterbach hat die Stärkung der kleinen und mittleren Unternehmen als wohnortnahen Arbeitgebern eine hohe Priorität. Tradition und generationenübergreifender Zusammenhalt scheinen in dieser Gemeinde sehr ausgeprägt zu sein. Mit einem außerordentlich aktiven Vereinsleben und dem ausgeprägten Ehrenamt wird ein aktiver Beitrag zu Identität und Integration geleistet. Ein wichtiges Anliegen der Kommunalpolitik ist neben der Wirtschaftsförderung die Ausweisung von Baugrundstücken und die Schaffung von bezahlbaren Mietwohnungen für weniger einkommensstarke Gruppen.

Die Gemeinde Irchenrieth hat durch eine langfristig angelegte, vorausschauende Bauleitplanung viele Grundstücke erworben und kann so die Strategie umsetzen, durch das Angebot von relativ günstigen Baugrundstücken und der finanziellen Unterstützung durch ein kommunal eingeführtes Baukindergeld den Zuzug von jungen Familien zu bewirken, was zu einem deutlichen Bevölkerungszuwachs in der suburbanen Gemeinde in Nähe zum Oberzentrum Weiden führte. Aufgrund der damit verbundenen positiven Finanzlage – etwa durch die Anteile an der Einkommensteuer – ist Irchenrieth in der Lage, aktuell ein medizinisches Zentrum zu errichten, das mehrere Dienstleistungen, einschließlich eines Allgemeinarztes, umfassen wird, wodurch das bestehende gute Versor-

ungsangebot in der Gemeinde auch in der Gesundheitsversorgung und der entsprechenden Rahmenbedingung der Lebensqualität ausgebaut wird.

In der Gemeinde Röslau ist das kommunalpolitische Ziel, das Niveau der vorhandenen Versorgungssituation zu sichern bzw. aufrechtzuerhalten. Die Grundstruktur der Daseinsvorsorge für den täglichen Bedarf ist in Röslau vorhanden. Eine Voraussetzung für die Stabilisierung der Bevölkerungsentwicklung im Zuge des demografischen Wandels wäre die Verbesserung in der Verfügbarkeit von Baugrundstücken und auch Mietwohnungen. In diesem Zusammenhang wird angedacht, ein nicht mehr vorhandenes Zuschuss-Programm für junge Familien, die sich in der Gemeinde baulich niederlassen wollen, wieder einzuführen. Ein begleitender Ansatz der kommunalen Wirtschaftspolitik ist die sukzessive Nachnutzung des ehemaligen Areals des früheren Porzellanunternehmens Winterling für gewerbliche Zwecke und auch Start-ups.

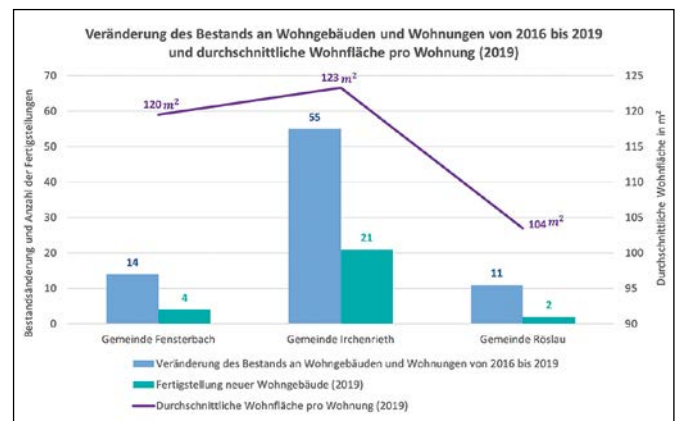


Abbildung 3: Veränderung des Immobilienmarktes in den Untersuchungsgemeinden [10]

6 Zusammenfassung

Zur Messung des Phänomens regionaler und kommunaler Lebensqualität können objektive Kriterien räumlicher Ausstattung bzw. Angebote in der Daseinsvorsorge begleitet von subjektiven, primärempirisch über Befragungen erhobenen Einschätzungen seitens der Bevölkerung herangezogen werden. Im Rahmen der Nachhaltigkeit bzw. eines Sustainable Development sollten hierbei ökonomische, ökologische und gesellschaftlich-soziale Variablen auch im Sinne einer räumlichen Resilienz einbezogen werden.

Lebensqualität kann als weicher Standortfaktor sowohl im kommunalen und regionalen Marketing sowie im Regionalmanagement gesichert und ausgebaut werden. Hier kommt der gemeindlichen Ebene in den ländlichen Räumen eine wesentliche Bedeutung zu, sind es doch die Kommunen, die ihren Bürgerinnen und Bürgern in direkter Weise vor Ort nachhaltige Lebensbedingungen gewährleisten. Begleitend sind insbesondere die im Landesentwicklungsprogramm Bayern ausgewiesenen

ländlichen Räume mit besonderem Handlungsbedarf von den Herausforderungen des demografischen Wandels betroffen. Eine Stabilisierung oder sogar Steigerung der Einwohnerzahl wird von der Ausgestaltung der Rahmenbedingungen in und durch Kommunen beeinflusst, damit durch die Ausgestaltung der Qualität von harten und weichen Standortfaktoren. Unterstützend zur kommunalen Entwicklungspolitik sind Regionalmanagement, Regionalmarketing, regionale Identität und Regionalbewusstsein hierbei entscheidende Instrumente.

Anhand von drei Fallbeispielen von Gemeinden in den Planungsregionen Oberpfalz Nord und Oberfranken Ost wurde der Ansatz einer Erfassung von Lebensqualität über objektive Ausstattungen und subjektive Einschätzungen angewandt. Es wurde deutlich, dass vor dem Einsatz ausgewählter kommunalpolitischer Maßnahmen in der Daseinsvorsorge eine Vision wichtig ist, die nicht nur erreichbar ist, sondern in der Kombination von harten und weichen Standortfaktoren nachhaltig eine Gemeinde prägt. Es handelt sich um einen kontinuierlichen und fließenden Prozess, der proaktive und kooperative Akteure erfordert.

Referenzen:

- [1] Die Bundesregierung, Bericht der Bundesregierung zur Lebensqualität in Deutschland, Berlin 2016
- [2] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Raumordnungsprognose 2040, Bonn 2021
- [3] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Raumordnungsbericht 2021: Wettbewerbsfähigkeit stärken, Bonn 2021
- [4] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Raumordnungsprognose 2040, Ergebnisse und Methodik, Bonn 2021, S. 13
- [5] Bayerisches Landesamt für Statistik, Regionalisierte Bevölkerungsvorausberechnung für Bayern bis 2040. Demografisches Profil für den Freistaat Bayern, Beiträge zur Statistik Bayerns, Heft 554, Fürth 2022
- [6] Bayerisches Landesamt für Statistik, a.a.O., S. 4
- [7] Bayerische Staatsregierung, Landesentwicklungsprogramm Bayern 2020, Strukturkarte, München 2020
- [8] Ulrich, I., Weber, W., Regionale Lebensqualität als Phänomen und Standortfaktor: Objektive und subjektive Ansätze zur empirischen Messung und räumliche Fallbeispiele aus Ostbayern, Weiden 2021
- [9] Ulrich, I., Weber, W., a.a.O., S. 93
- [10] Ulrich, I., Weber, W., a.a.O., S. 94

Kontakt:



Prof. Dr. Wolfgang Weber

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Vizepräsident Forschung und
Entwicklung, Transfer
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen
und Gesundheit
Wirtschaftsgeographie
und Makroökonomie
Hetzenrichter Weg 15
92637 Weiden

w.weber@oth-aw.de



Ingrid Ulrich, B.A.

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

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 Rückgewinnung von Indium mit einer innovativen technischen Lösung im Projekt „Chlor-Plattform“ darzustellen. Verschiedene chlorhaltige Kunststoffabfälle werden hierzu thermochemisch behandelt und es entsteht im ersten Schritt ein HCl-reiches Gas. Im zweiten Schritt wird dieses durch einen weiteren Reaktor geleitet, welcher LCD-Panels oder LEDs enthält. Hier wird Indiumchlorid erzeugt und verdampft. In einer nachgeschalteten Kühleinheit kondensiert dieses aus und bildet ein Metallkonzentrat, aus dem durch nachgeschaltete Prozessschritte das Indium zurückgewonnen werden kann. Verschiedene PVC-haltige Abfallströme wie Schredderrückstände aus der Elektro- und Elektronikaltgeräteaufarbeitung, Schredderleichtfraktion, Rolläden, Sortierreste und Fensterprofile aus PVC wurden thermochemisch 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 Kühleinheit das metallreiche Konzentrat. Bis zu 39 % des in den LCD-Panels und nahezu 100 % des in den LEDs vorliegenden Indiums wurden im Metallkonzentrat nachgewiesen. Durch weitere Extraktionsschritte und das Entfernen von Lösungsmitteln konnte durch Elektrolyse als „proof of concept“ 20 mg Indium zurückgewonnen werden. Schlussendlich zeigen die Versuche, dass ein höherer Chlorgehalt bei den PVC enthaltenen Abfällen zu einer höheren Rückgewinnungsrate von Indium führt.

Abstract

Chlorine-containing plastic waste, which mainly contains polyvinyl chloride (PVC), is mainly thermally recycled. In this process, the hydrogen chloride (HCl) must be removed from the combustion gas by neutralization and the resulting salts disposed of. By recycling various chlorine-containing plastic wastes, it is possible to recover indium using an innovative technical solution in the “Chlor-Plattform” project. Various chlorine-containing plastic wastes are thermochemically treated for this purpose. In the first step, an HCl-rich gas is produced. In the second step, this is passed through another reactor containing LCD panels or LEDs. Here, indiumchloride is generated and evaporated. In a downstream cooler unit, these condense out and form a metal concentrate with that the indium can be recovered in downstream process steps. Various PVC-containing waste streams such as shredder residues from WEEE, shredder light fraction, roller shutters, sorting residues and PVC window profiles were thermochemically treated to produce an HCl-rich gas. This was fed into a second reactor filled with LCD panels. The indium, in the form of indium-tin oxide, reacted to indiumchloride and formed the metal-rich concentrate after the cooler unit. Up to 39% of the indium in the LCD panels and nearly 100 % of the indium present in the LEDs was detected in the metal concentrate. Through further extraction steps and solvent removal, 20 mg of indium could be recovered by electrolysis as a “proof of concept”. Finally, the experiments show that a higher chlorine content in the PVC-containing waste leads to a higher recovery rate 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 LEDs oder 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, durch die thermochemische Konversion von PVC-Abfällen HCl herzustellen, welches für die Chlorierung von kritischen Metallen genutzt wird. Diese Idee wurde erfolgreich im Technikumsmaßstab für die Rückgewinnung von Indium aus LEDs und LCD-Panels demonstriert. Die Isolation der chlorierten Metalle ist unter wesentlich milderem Bedingungen als bei den elementaren Metallen und Oxiden möglich.

2 Lösungsansatz für das Recycling von Indium

Mittels Pyrolyse der PVC-Abfälle wird ein HCl-reiches Gas erzeugt. Dieses wird zur Chlorierung des Indiums in LEDs oder LCD-Panels in einem nachgeschalteten Reaktor verwendet. Das Indiumchlorid verdampft, kondensiert in einer nachgeschalteten Kühleinheit aus und bildet ein Metallkonzentrat. Dieses wurde mit Wasser vermischt und zweimal filtriert, um Partikel zu entfernen. Das Filtrat wurde anschließend destilliert und das Indium reichert sich im Destillationssumpf an. Zum Schluss wurde das Indium durch Elektrolyse gediegen abgeschieden. Dieser Ansatz ist in der Abbildung 1 schematisch stark vereinfacht dargestellt.

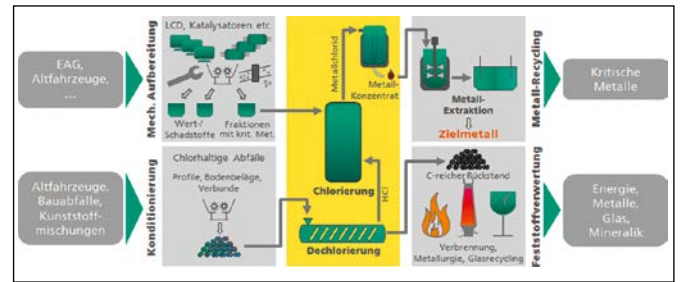


Abbildung 1: Lösungsansatz zur Verwertung von chlorhaltigen Kunststoffabfällen und Recycling von Indium.

3 Rückgewinnung von Indium aus LED und LCD-Panels durch den Einsatz verschiedener chlorhaltiger Kunststoffabfälle

Für die Rückgewinnung von Indium aus LCD-Panels wurden zunächst verschiedene chlorhaltige Kunststoffabfälle zur Herstellung von HCl-haltigem Pyrolysedampf verwendet: Schredderleichtfraktion (SLF), Sortierreste, Schredderrückstände aus der Elektro- und Elektronikgeräteaufarbeitung (EAG), Rollläden und Fensterprofile. Diese wurden in einer Schneidmühle auf <math><10\text{ mm}</math> Korngröße zerkleinert. Der Feinanteil <math><1\text{ mm}</math> wurde abgesiebt und nicht weiter behandelt. Das zerkleinerte Material wurde separat in sechs Chargen zu je 125 g bei über 600 °C in einem semikontinuierlichen Batch-Reaktor pyrolysiert. Nach 30 min wurde der feste Rückstand aus dem Pyrolyse-Reaktor in den Koksbehälter entleert, bevor eine neue Charge eingefüllt wurde. Der HCl-haltige Dampf wurde dabei zuerst über einen sogenannten Teercracker 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 verdampft werden konnte. In einer nachgeschalteten Kühleinheit kondensierte das Metallkonzentrat aus. Überschüssiges HCl wird anschließend in destilliertes Wasser gelöst. Weiterer Bestandteile wie Cyanwasserstoff (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. Zusätzlich wurden anstelle von LCD-Panels LEDs in den Halogenierungsreaktor vorgelegt und bei über 600 °C behandelt. Hierbei wurden Fensterprofile bei über 300 °C behandelt, um das HCl-haltige Gas zu erzeugen. Eine Anordnung des dazugehörigen Versuchsaufbaus ist in Abbildung 2 dargestellt.

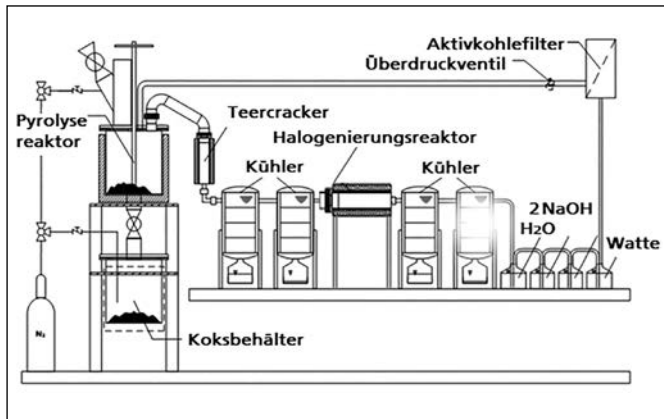


Abbildung 2: Schematische Anordnung des Versuchsaufbaus zur Verwertung von chlorhaltigen Kunststoffabfällen und Rückgewinnung von Indium aus LEDs und LCD-Panels.

Da das kondensierte flüssige Metallkonzentrat noch stark mit Partikeln aus der Zersetzung der Folien aus den LCD-Panels verunreinigt war, wurde das Indiumchlorid durch Mischen mit Wasser und zweimaligen filtrieren größtenteils in eine partikelfreie, flüssige Phase überführt. Der Filtrationsrückstand kann grundsätzlich im Halogenierungsreaktor wiederverwertet werden, wodurch keine entsorgungspflichtigen Abfälle bei der Filtration entstehen. Nach dem Verdampfen des Lösungsmittels kann das Indium aus dem Destillationssumpf mittels Elektrolyse abgeschieden werden. Hierbei konnte als „proof of concept“ 20 mg abgeschieden werden. Das abgedampfte Lösungsmittel kann aufgereinigt und wiederverwendet werden. Das flüssige Metallkonzentrat von den LEDs wurde eingedampft und daraus direkt Indium elektrolitisch abgeschieden. Hierbei konnte nahezu das gesamte Indium in das Metallkonzentrat überführt 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 des gleichen Herstellers durchgeführt.

Tabelle 1: Ausbeute an Indium und Reduktion des Chlorgehaltes bei den unterschiedlichen Einsatzmaterialien im Technikumsmaßstab.

Chlorhaltige Abfälle	Reduktion des Chlorgehaltes [Gew.-%]	Indium in das Metallkonzentrat überführt [Gew.-%]
SLF	ca. 8 – 10	0,9
Sortierreste	ca. 8 – 10	6,2
EAG	ca. 8 – 10	26,8
Rollladen	37,9	38,9
Fensterprofile	60,5	33,3

4 Ergebnis/Zusammenfassung/Ausblick

Die Versuche zur Rückgewinnung von Indiumchlorid aus LCD-Panels lässt folgende Schlussfolgerungen zu: Eine höhere Reduktion des Chlorgehaltes führt zu einer gesteigerten Rückgewinnungsrate von Indium aus den LCD-Panels. Dies könnte an einer dadurch bedingten höheren HCl-Konzentration im Pyrolysegas liegen. Durch anschließendes Mischen mit Wasser und zweimaliger Filtration können die Partikel entfernt werden. Das Filtrat kann für eine stoffliche Nutzung zur Rückgewinnung von Indium sowie Chemikalien verwendet werden.

Die Reduktion des Chlorgehaltes durch die thermochemische Behandlung führt zu neuen stofflichen Verwertungswegen für die dechlorierten Stoffströme, wie beispielsweise den Einsatz als Ersatzbrennstoff.

Die Ergebnisse des Ansatzes im Technikumsmaßstab sind vielversprechend, um eine Kreislaufführung von Indium aus LCD-Panels und LEDs sowie eine stoffliche Verwertung von PVC-haltigen Abfällen 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>, zuletzt geprüft am 14.05.2020.
- [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>, zuletzt geprüft am 14.05.2020.
- [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, zuletzt aufgerufen am 10.12.2021.

Projektpartner:

Fraunhofer UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg, 92237 Sulzbach-Rosenberg
SKH GmbH, 94496 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“.



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. Werner Kunz

Universität Regensburg
Institut für Physikalische und
Theoretische Chemie
Universitätsstraße 31
93053 Regensburg

werner.kunz@chemie.uni-regensburg.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

Zusammenfassung

Das Strömungsmaschinenlabor der OTH Amberg-Weiden betreibt seit seiner Gründung im Jahr 2000 Lehre, angewandte Forschung und Technologietransfer in vielen Bereichen der Strömungsmechanik. Die hier vorgestellte studentische Projektarbeit befasst sich mit der Bewetterung (=Belüftung) respektive der Druckluftherzeugung im Bergbau mit hydraulischen Luftkompressoren (HAC), bevor dort die Elektrifizierung Einzug nahm. Diese Bewetterungssysteme, bestehend nur aus einem Saugkopf, einer Fall- und einer Steigleitung, vollkommen ohne Ventile oder andere beweglichen Teile, konnten Dimensionen von über 100 Metern Höhe erreichen und somit Druckluft von 10 bar erzeugen. Oberflächenwasser fiel dabei durch eine Falleitung in die Tiefe, riss Luft mit sich, die durch die Wassersäule in der Steigleitung verdichtet wurde. Das für das Strömungsmaschinenlabor konzipierte HAC-Demonstrationsmodell wurde in ein fahrbares System integriert und die Größe so weit reduziert, dass das Funktionsprinzip auch im Hörsaal vorgeführt werden kann. Das verwirklichte Demonstrationsmodell eines hydraulischen Luftkompressors ist in der Lage z. B. einen Luftballon aufzublasen – wenn auch mit geringem Wirkungsgrad, wie in einem abrufbaren Video gezeigt bzw. im Bericht diskutiert wird.

Abstract

Since its foundation in 2000, the Turbomachinery Laboratory of the OTH Amberg-Weiden has been engaged in teaching, applied research and technology transfer in many areas of fluid mechanics. The student project presented here deals with ventilation in mining with hydraulic air compressors (HAC) before electrification. These ventilation systems, consisting only of a suction head, a downpipe and a riser, completely without valves or other moving parts, could reach dimensions of over 100 meters and thus generate compressed air of 10 bar. Surface water fell through a down pipe into the depths, entraining air that was compressed by the water column in the riser. The HAC demonstration model designed for the Turbomachinery Laboratory was integrated into a mobile system and the size was reduced to such an extent that the operating principle can also be demonstrated in the lecture hall. The realized demonstration model of a hydraulic air compressor is able to inflate e.g. a balloon – albeit with low efficiency, as shown in a retrievable video and discussed in the report.

1 Zur Geschichte der Grubenbewetterung

Bereits seit tausenden Jahren verwendet der Mensch die Energie, die ihm das Wasser zur Verfügung stellt, um Grenzen zu überschreiten und neue Möglichkeiten zu schaffen. Die damalige vergleichsweise simple Anwendung in Form z. B. von Wasserrädern, wurde durch die Elektrifizierung im 20. Jahrhundert verdrängt und wird heutzutage durch Dampf- bzw. Gasturbinen in großen

Atom- und Kohlekraftwerken mit einem Netz von Stromtrassen realisiert. Besonders in der aktuellen Phase der Energieverknappung, zum einen durch eine Ressourcenverknappung sowie durch internationale Konflikte, wird es immer wichtiger, alternative Lösungen zur Einsparung von Energie zu finden, die vor allem auch dezentralisiert ohne Leitungsverluste anwendbar sind und den notwendigen Trassenneubau verringern. Dabei ist es nicht immer notwendig, komplett neue Technologien zu erfinden.

Oft genügt es zu hinterfragen, wieso frühere, einfache Lösungen aus der Praxis verschwunden sind und wie bzw. wo man diese mit geringem Aufwand sinnvoll wieder einführen könnte. Die „Renaissance“ der Windenergie, die im letzten Viertel des 20. Jahrhunderts begann, ist hierzu vielleicht das beste und prominenteste Beispiel.

Eine andere, heute verschwundene Technologie ist Bewetterung (Belüftung) von Bergwerken mit einer sogenannten „Wassertrommel“ (= ein mit Wasserkraft betriebener Luftkompressor), die erstmals im 18. Jahrhundert beschrieben wurde (vgl. Abbildung 1). Dabei ließ man Wasser unterhalb eines Flusses durch ein Füllrohr in ein Holzfass hinabstürzen. Durch seitliche Öffnungen in diesem Füllrohr wurde über den Venturi-Effekt Luft in das Rohr gezogen und damit nach unten in das Fass transportiert, wobei die Luft über die Wassersäule komprimiert wurde. Das unten angekommene Wasser wurde über Wasseraustrittsöffnungen wieder ins Freie geleitet, während die in dem Fass aufgefangene Luft über Luftaustrittsöffnungen in das Bergwerk geleitet wurde und durch ihren erhöhten Druck die sauerstoffarme Luft im Bergwerk verdrängte. Durch die stationären Rahmenbedingungen konnten Bergwerke auf diese Weise ganzjährig gleichbleibend gut belüftet werden. Dies hatte mehrere positive Effekte auf den Bergbau.

So konnten die teilweise hohen Temperaturen in den Minen reduziert werden, die Sauerstoffkonzentration für die Bergleute erhöht werden und ebenso eine ausreichend hohe Sauerstoffkonzentration erreicht werden, um eine Beleuchtung durch Lampen zu ermöglichen. All diese Erleichterungen wurden im Zuge der Industrialisierung respektive der Elektrifizierung im 20. Jahrhundert durch zentral erzeugten Strom und einem Netz von Stromtrassen ersetzt. (siehe Abbildung 1)

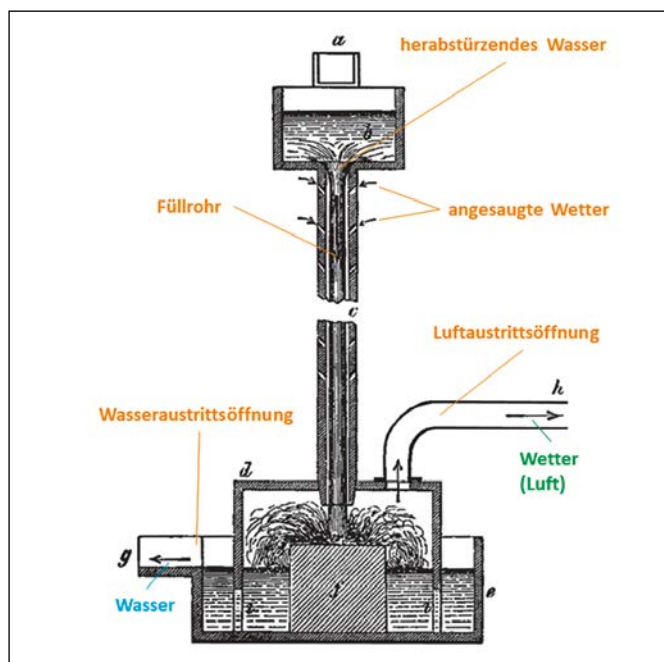


Abbildung 1: Wassertrommel; in Anlehnung an (Liessmann, 2010)

2 Funktionsprinzip des hydraulischen Luftkompressors (HAC = Hydraulic Air Compressor)

Zunächst muss das HAC-Prinzip verstanden werden, denn eigentlich scheint der Ausdruck einen Widerspruch grundlegender Gesetzmäßigkeiten darzustellen, da Wasser als inkompressibles Fluid betrachtet wird. Hieraus ergibt sich der bestimmende Punkt: Der Kompressor komprimiert nicht die Flüssigkeit (Wasser), sondern die mit dem herabstürzenden Wasser mitgezogene Luft. Damit diese Form einer weiterentwickelten Wassertrommel realisiert werden kann, werden einige Bauteile und bestimmte Größenverhältnisse benötigt, die in der nächsten Abbildung aufgezeigt werden.

Der Überdruck in der Anlage wird über den Schweredruck der Wassersäule mit der Höhendifferenz zwischen Luftabscheider und Wasserablauf erzeugt (Abbildung 2). Der schematisch dargestellte hydraulische Kompressor zeigt diesen wie er in der Schachtanlage Knesebeck eingesetzt war, welche über 60 Jahre lang erfolgreich betrieben wurde. Wie in Abbildung 2 zu erkennen ist, benötigt das System einen kontinuierlichen Wasserzulauf aus Stollen oder Grabensystemen. Die eigentliche Wasserquelle wurde im Bergbau durch Stauseen oder Flüsse realisiert. In diese Quelle wird ein Rohr mit einem Saugkopf am oberen Ende des Rohres integriert, welches bis in den Stollen hinabführt. Die hohen Strömungsgeschwindigkeiten des Wassers im Fallrohr führen dazu, dass ein Sog am Wassereintritt entsteht, der Luft in das Fallrohr mitreißt. In den Saugkopf bzw. das Fallrohr wurden in manchen Ausführungen zusätzliche Öffnungen eingebracht, um über den Venturi-Effekt zusätzliche Luftmassen in das Wasser einzubringen. Wenn die Fallgeschwindigkeit des Wassers im Fallrohr die Aufströmgeschwindigkeit der Luftblasen im Wasser übersteigt (ca. 0,3 m/s), folgt die Luftmasse der Wasserströmung. [2] Dieses Verhältnis herrscht vor, bis das in Abbildung 2 beschriebene Fallrohr im Schacht in den sogenannten Luftabscheider endet. Hier reduziert sich die Strömungsgeschwindigkeit und die Luft kann durch die geringere Dichte nach oben steigen, wodurch sich zwei Phasen im Luftabscheider ausbilden. Der Druck der Druckluft im Luftabscheider wird über die Höhe der Wassersäule in der Steigleitung bestimmt. Im Beispiel Knesebeck waren dies 64 m und somit gut 6 bar Überdruck. Die Druckluft kann anschließend zur technischen Anwendung im Bergwerk (z. B. Drucklufthammer) oder zur Bewetterung verwendet werden. Das ebenfalls im Luftabscheider angesammelte Wasser verlässt das System durch das Prinzip der kommunizierenden Röhre über die Steigleitung, ohne dass dafür extra Energie aufgewendet werden müsste. Laut [3] wurden in Knesebeck 11 m³/min Druckluft (ca. 6 bar Überdruck) mit 10 m³/min Treibwasser erzeugt, dessen Fallhöhe 43 m betrug. Daraus ergibt sich ein isentroper Kompressionswirkungsgrad von ca. 72 %.

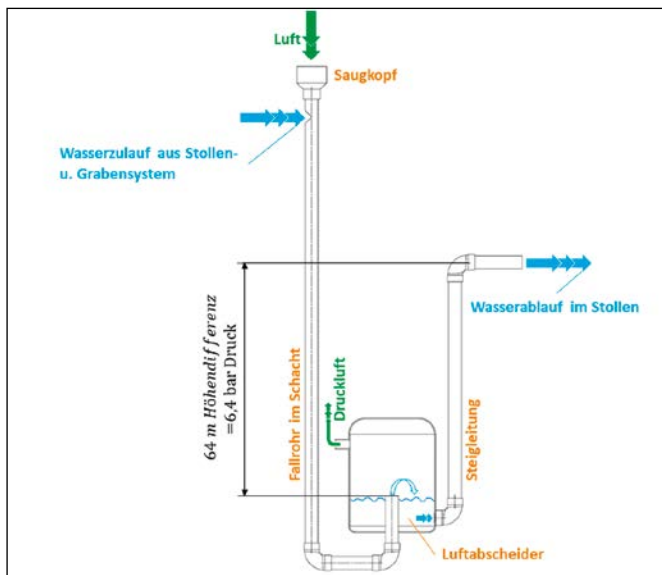


Abbildung 2: Hydrokompressor-Prinzip; in Anlehnung an (Schachtanlage Knesebeck, 2011)

3 Konstruktive Umsetzung der HAC-Laboranlage für Lehrzwecke – erste Messergebnisse

In Abbildung 3 ist der prinzipielle HAC-Versuchsaufbau mit den bestimmenden Größen zu erkennen. Die Wasserquelle des vorliegenden Systems ist im Gegensatz zu den großen Anlagen im Bergbau kein Stausee oder Fluss, sondern ein 1000 Liter Wasserbehälter des Strömungslabors. Um die im Saugkopf eingesogene Luft über die gesamte Länge des Fallrohrs bis in den Luftabscheider zu transportieren, musste der Rohrquerschnitt des Fallrohres, in Abhängigkeit des Volumenstroms aus dem Wasserbehälter, bestimmt werden. Aus diesem Verhältnis ergab sich ein Rohrrinnendurchmesser von 34 mm. Um die Strömung im folgenden Luftabscheider so weit zu verzögern, dass die Luft nicht bis in die Steigleitung mitgezogen und damit die gesamte Luft im System zum Druckaufbau verwendet wird, wurde ein Innendurchmesser des Luftabscheiders von 90 mm gewählt.

Im ersten Versuchsbetrieb des in Abbildung 3 dargestellten HAC-Systems ergaben sich in der nachfolgenden Tabelle aufgeführte erste Messdaten und die berechneten Kenngrößen. Der Betrieb kann in einem Video, das über den QR-Code erreicht wird, verfolgt werden.

Tabelle 1: Erste Messergebnisse von der HAC-Demonstrationsanlage

Massenstrom Luft [kg/s]	Massenstrom Wasser [kg/s]	Überdruck [bar]	Kompressionsleistung Leistung [W]	Hydraulische Leistung [W]	Wirkungsgrad [%]
$\dot{m} = 1,278 \cdot 10^{-3}$	$\dot{m} = 0,546$	$p = 0,136$	$P = 0,138$	$P = 8,83$	$\eta = 1,56$

Da der Druckaufbau eines HAC abhängig von der verfügbaren Höhendifferenz der Steigleitung der Anlage ist, fällt der in dem HAC-Versuchsaufbau erreichte Überdruck mit $p = 0,136$ bar gering aus. Die in Abbildung 3 eingezeichnete Höhe $z_{Druck} = 1100$ mm ist diese ausschlaggebende Höhendifferenz der Wassersäule. Die ebenfalls eingezeichnete Höhe $z_{Treib} = 1650$ mm steht für die zur Verfügung stehende potenzielle Energie des Treibwassers und ist nötig zur Berechnung der hydraulischen Leistung. Die detaillierte Berechnung der Kenngrößen des Systems kann dem zugehörigen Projektbericht über den zweiten QR-Code entnommen werden. Wie im Video gezeigt, arbeitet die HAC-Versuchsanlage zufriedenstellend und bläst einen Ballon auf. Der erzielte Wirkungsgrad ist jedoch sehr gering – insbesondere verglichen den im industriellen Maßstab (z. B. Knesebeck) erreichten Werten. Sicher könnte dieser auch für die HAC-Versuchsanlage, z. B. durch eine aufwendigeren Saugkopf, noch erhöht werden. Dies wird Gegenstand folgender Projekte sein.

Das gesamte, aktuelle HAC-System besteht aus etwa 5 m transparenten Polycarbonat-Rohrs sowie 2 m Industrieschlauch, welcher mit Schlauchschellen abgedichtet wurde und ein Trockensetzen des Systems ermöglichte. Die Verbindungsstellen der einzelnen Zukaufteile wurden mit für diesen Kunststoff vorgesehenen Kleber abgedichtet. Als Teilelieferanten dienten die Erwin Telle GmbH und die Georg Fischer GmbH, wobei besonders zuletzt genannte durch ein großes Sortiment an Kunststoff-Fittings die konstruktive Auslegung des HAC ermöglichte.

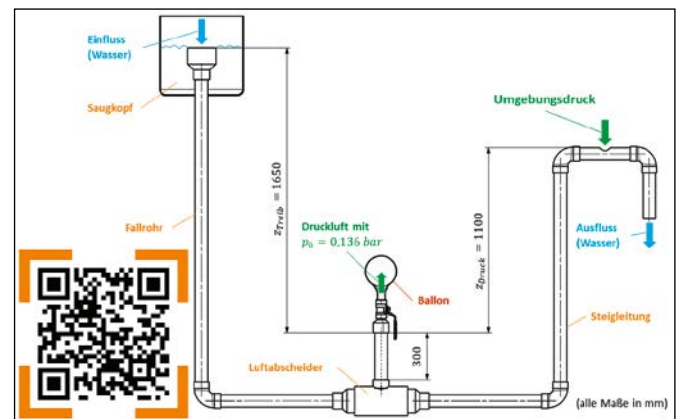


Abbildung 3: Die HAC-Versuchsanlage im Labor für Strömungsmaschinen (OTH Amberg-Weiden)



Link zum Ausschnitt aus dem Projektbericht
mit ausführlicher Berechnung

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen eines studentischen Projektes entstand eine Lehr- und Demonstrationsanlage für einen hydraulischen Luftkompressor (HAC) im Labor für Strömungsmaschinen. Die HAC-Versuchsanlage fördert und komprimiert wie gewünscht Druckluft, gut sichtbar für den Beobachter. Bei den Berechnungen fällt jedoch schnell auf, dass der Wirkungsgrad der Anlage bei weitem nicht mit denen in der Literatur vergleichbar ist. Dies liegt zu einem großen Teil an den sehr kleinen Dimensionen der HAC-Versuchs-

anlage im Vergleich zu denen im industriellen Bergbau, zum anderen aber auch an einem noch hohen vorhandenen Verbesserungspotenzial, welches auf Grund des zeitlichen Projektrahmens nicht weiter ausgeschöpft wurde. Wie bereits beschrieben, hätte der Saugkopf sowie das Fallrohr mit zusätzlichen Ansaugöffnungen versehen werden können. Dadurch würde deutlich mehr Luft durch das System befördert werden, was zu einem erhöhten Wirkungsgrad führen würde. Dies umzusetzen, ist in weiteren Projekten geplant. Ebenfalls sind die Industrieschläuche zwar sehr praktisch für den Aufbau, deren relativ raue Oberfläche führt aber zu vermeidbaren Druckverlusten. Des Weiteren wäre es für den Versuchsbetrieb sinnvoll, einen Pumpenkreislauf zu integrieren, um die großen benötigten Wassermengen zurück in den 1000l-Ausgangsbehälter zu befördern. Aus didaktischen Gründen wurde darauf im ersten Aufbau verzichtet, um nicht den Eindruck zu erwecken, die Druckluft würde durch die Pumpe erzeugt.

Referenzen:

- [1] Bernstein, O. P. (21. Juli 1906). Glückauf. Hydraulische Luftkompressionsanlagen, S. 939.
- [2] Dubs, R. (1931). Ueber die Bewegung von Luftblasen in ruhendem und fließendem Wasser. Abgerufen am 16. August 2022 von <http://doi.org/10.5169/seals-44672>
- [3] Liessmann, W. (2010). Historischer Bergbau im Harz. In Kurzführer (S. 104). Springer-Verlag.
- [4] Schachtanlage Knesebeck. (2011). Hydrokompressorprinzip. Abgerufen am 16. August 2022 von <https://www.erzbergwerkgrund.de/hydroprinzip.html>

Kontakt:



Michael Bäuml

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

m.baeuml@oth-aw.de



Manuel Dill

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

m.dill@oth-aw.de



Sebastian Weber

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

s.weber3@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

Einfluss von Prozessparametern auf die Exopolysaccharid-Produktion von *Arthrospira platensis*

Prof. Dr.-Ing. Christoph Lindenberg
Sun-Hwa Jung, M.Sc.
Fabian Boßle, M.Sc.
Niklas Zell, M.Eng.

Zusammenfassung

Im Bereich der bioaktiven Naturstoffe rückt seit Jahren die Klasse der Exopolysaccharide (EPS) immer mehr in den Fokus der Wissenschaft. Somit ist das Up- und Downstream Processing dieser Substanzen auch zu einem Thema der Verfahrenstechnik geworden.

Im Rahmen des geförderten Forschungsprojektes, der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), soll eine EPS-basierte Wertschöpfungskaskade mit dem *Cyanobakterium Arthrospira platensis* entwickelt werden. Dabei werden sowohl ökonomische als auch ökologische Kriterien analysiert und optimiert.

Exopolysaccharide sind hochmolekulare, segregierte Zuckerpolymere, deren Funktion von physikalischen Effekten wie Zelladhäsion und Schutz vor Austrocknung bis hin zu biologischen Schutzmechanismen gegen bakterielle und virale Infektionen noch nicht vollständig geklärt bzw. verstanden sind. Besonders den EPS von phototrophen Mikroorganismen wird häufig bioaktive Eigenschaften zugeschrieben. Eine nachhaltige Produktion im industriellen Maßstab ist durch die geringe Expressionsrate der EPS dieser Organismen erschwert. Bei den Kultivierungsprozessen sind neben einer ausreichenden Nährstoffversorgung die Prozessparameter Lichtversorgung und Temperatur ausschlaggebend. Der Einfluss dieser Parameter auf die EPS Bildung und Produktivität wurde in dieser Studie unter Verwendung verschiedener Verfahren (Batch- und kontinuierliche) untersucht. Besonders bei der Lichtversorgung sind die unterschiedlichen Auswirkungen von transienten Prozessen und solchen, in welchen ein Fließgleichgewicht erreicht wird, auf die EPS Produktion deutlich zu sehen. Dabei zeigt die veröffentlichte Studie von Jung et al. [1], durch einen Vergleich der in diesem Bericht vorgestellten Ergebnisse, dass die erzielten Erkenntnisse von *A. platensis* sich nicht auf andere Organismen übertragen lässt.

Abstract

Over the last decade, biologically active extracellular polysaccharides (EPS) produced by microalgae have received attention in science thus leading to a higher interest in the up- and downstream processing.

Developing added value chains by integrating EPS as a high-value product portfolio of the cyanobacterium *A. platensis*, focusing on economic and ecological criteria is part of a research project funded by the Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR).

Extracellular polysaccharides or exopolysaccharides are high-molecular weight sugar-based polymers. Their biological functions like cell adherence, desiccation, and protection against viral and bacterial infection are yet not fully understood. Especially EPS derived from phototrophic microorganisms is known for its bioactive characters. However, due to small product yields up- and downstream processing on an industrial scale are not yet economically feasible. In upstream processing, the parameters temperature and incident light intensity are most influential, when providing sufficient nutrient supply. The effect of both parameters is investigated in current study, using different process types. Especially light supply will be different in transient processes and processes where steady-state conditions are reached. That the presented data generated *A. platensis* are not representative of other species can be seen in the complete study of Jung et al. [1].

1 Einleitung

Zuckerbasierte Polymere (PS) sind bekannt für ihre hohe Diversität, welche auf der chemischen Zusammensetzung verschiedener Zucker, deren glykosidischen Bindungen und verschiedenartige Modifikation von OH-Gruppen basieren. Somit weisen PS vielfältige chemische und sekundäre Strukturen auf, deren Aufbau stark von Funktion und Herkunftsorganismus determiniert ist. Der Aufgabebereich der PS reicht von Energiespeicherung über strukturgebende und Adhäsions-fördernde Eigenschaften bis hin zum Schutz vor Umwelteinflüssen wie Trockenheit, Schwermetallen, Strahlung, viralen Infektionen und (Fraß-) Feinden [2]. Die schützenden Eigenschaften werden fast ausschließlich bei extrazellulären PS gefunden, den sogenannten Exopolysacchariden (EPS). EPS und PS werden von der Lebensmittel- und Kosmetikindustrie traditionell als Verdickungs-, Gelierungs- und Emulgierungsmittel usw. eingesetzt, wobei die Nutzung der biologischen Funktionen immer mehr an Bedeutung gewinnt. Die industrielle Produktion von PS fokussiert sich größtenteils auf terrestrische Pflanzen, Makroalgen, Pilzen und chemotrophe Mikroorganismen, wodurch sich ein breites und detailliertes Spektrum an Daten über Stoffeigenschaften und Herstellungsverfahren entwickelt hat. Anders sieht es bei phototrophen Mikroorganismen aus, da diese in der industriellen Herstellung bisher kaum eine Rolle spielen. EPS dieser Gruppe weisen indessen häufig einen antiviralen Charakter auf [3], was sich, nicht erst seit der Pandemie, positiv auf deren industrielle Relevanz auswirkt. Jedoch ist die ökonomische Perspektive, bedingt durch die niedrige Produktivität von EPS kombiniert mit den hohen Kosten für das Up- und Downstream Processing, nicht sehr aussichtsreich. Dieser Problematik widmet sich das von der FNR geförderte Forschungsprojekt AnViPi der OTH AW, indem die Wirtschaftlichkeit durch Wertschöpfungskaskaden gesteigert werden soll. Dieses Projekt baut auf früheren Forschungsergebnissen der Arbeitsgruppe auf, bei denen die antiviralen Eigenschaften der EPS des Cyanobakteriums *A. platensis* gegen das Koi-Herpesvirus sowohl qualitativ als auch quantitativ untersucht und erfolgreich appliziert wurden. Die ganzheitliche Betrachtung des Produktionsprozesses beinhaltet die Kultivierung, das Aufreinigen der EPS und das Verknüpfen des Prozesses mit weiteren Verwertungsmöglichkeiten der Biomasse. Zu einer nachhaltigen Entwicklung von Bioraffineriekonzepten gehört neben die Untersuchung weiterer stofflicher Verwendungsmöglichkeiten auch die energetische Verwertung.

Zur Erhöhung der EPS-Produktivität durch Biomassewachstum und Expression der EPS spielen neben der Nährstoffzusammensetzung des Mediums vor allem die Prozessparameter Licht und Temperatur eine entscheidende Rolle. In einem umfangreichen Review, in welchem viele Studien zu *A. platensis* berücksichtigt wurden, hat Delattre et al. (2016) [4] den Schluss gezogen, dass hohe Lichtintensitäten einen positiven Einfluss auf die Expres-

sion von EPS haben. Eine solch allgemein formulierte Aussage ist für den Einfluss von Temperatur auf die EPS-Produktion nicht getroffen worden. Während einige Spezies hohe EPS-Produktivität bei Temperaturen abweichend von den normalen Kultivierungsbedingungen erreichten, lagen bei den meisten untersuchten Mikroalgen die optimalen Temperaturen für EPS-Expression und Wachstum im gleichen Bereich – darunter auch *A. platensis*. [5] In unserer Studie untersuchen wir die Auswirkung von Licht und Temperatur auf die EPS-Produktivität von *A. platensis*. Bei der Evaluierung des Lichteinflusses bedienen wir uns, anders als alle bisherigen Veröffentlichungen zu diesem Thema, unterschiedlicher Prozessführungen um Einflüsse von Selbst-Verschattung (self-shading) bzw. Ungenauigkeiten von transienten Prozessverläufen zu umgehen.

2 Methodische Vorgehensweise

Die Versuche mit dem Cyanobakterium *A. platensis* (NIES-39) fanden in den sogenannten Photobioreaktor Screening Modulen bei kontinuierlicher Beleuchtung statt. Der Einfluss von Licht wurde mit drei verschiedenen Prozessführungen untersucht, wobei der Temperatureinfluss nur im Satzbetrieb (Batch) evaluiert wurde. Im Batch-Verfahren wurde die Biomasse mit frischem Medium zu einer optische Dichte von $OD=0,1$ verdünnt und der Kulturverlauf bis zur stationären Phase verfolgt. Das Fließgleichgewicht der turbidostaten Prozessführung wurde durch Anpassung der Verdünnungsrate auf eine konstante optische Dichte von $OD=1$ eingestellt. Bei den chemostaten Kultivierungen wurden die Fließgleichgewichte bei optimaler Durchflussrate genommen. Täglich wurden die Biomassenkonzentrationen (UV-Vis) sowie die EPS-Konzentrationen bestimmt.

Zur Quantifizierung der EPS-Konzentration wurden die Gesamtkohlenhydrate des zellfreien Überstandes nach der Methode von DuBois et al. [6] mit einer Abweichung bei der Auswertung der UV-Vis Spektren bestimmt. Um Messungenauigkeiten durch Reaktionsartefakte von Nitrat und Nitrit zu vermeiden, wurde eine Korrekturfunktion für die Korrelation zwischen Absorption bei 490 nm und der Kohlenhydratkonzentration verwendet. Die Korrekturfunktion berücksichtigt die erste Ableitung des UV-Vis-Spektrum bei 740 nm und der Absorption bei 660 nm, welche charakteristisch für die Konzentration von Nitrat- und Nitrit-Reaktionsartefakten sind.

Um Aussagen aus unterschiedlichen Kultivierungen vereinheitlichen zu können, wurden die Wachstumskinetiken mit dem theoretischen Wachstumsmodell nach Jung et al. [7] verglichen.

3 Ergebnis

Der Einfluss der Temperatur auf das Wachstum von *A. platensis* wurde im Bereich von 20 bis 38 °C bei einer

konstanten Lichtintensität von $277 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ untersucht (vgl. Abbildung 1 oben). Die höchste spezifische Wachstumsrate wurde bei $38 \text{ }^\circ\text{C}$ mit $\mu=1,98 \text{ d}^{-1}$ gemessen. Die Auswertungen der Wachstumskurven zeigen eine Abnahme der Wachstumsrate mit sinkender Temperatur, welche bei $25 \text{ }^\circ\text{C}$ einen Wert von $\mu=1,32 \text{ d}^{-1}$ erreicht. Bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ betrug das Wachstum nur noch $\mu=0,4 \text{ d}^{-1}$. Der Einfluss der Temperatur auf die Expression von EPS zeigt in dem Bereich von 25 bis $38 \text{ }^\circ\text{C}$ einen ähnlichen Trend sowohl in der EPS-Konzentration, der spezifischen Konzentration als auch in der Raumzeitausbeute. Die höchsten Konzentrationen waren hierbei $0,065 \text{ g L}^{-1}$. Bedingt durch Zellbruch, wurden bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ähnlich hohe EPS-Expressionslevel erreicht wie bei den Kultivierungen bei 35 und 38°C , jedoch bedingt der niedrigen Wachstumsgeschwindigkeiten beträgt die Raumzeitausbeute nur 14% im Vergleich zur Kultivierung bei $38 \text{ }^\circ\text{C}$ (vgl. Abbildung 1 oben). Dies bestätigt die in der Einleitung schon beschriebene grundsätzliche Aussage eines sich überschneidenden Temperaturbereichs des optimalen Wachstums und der höchsten EPS-Expressionen bei *A. platensis*. Unsere Untersuchungen zeigen weiterhin, dass bei *A. platensis* eine hohe EPS-Expression auch stressbedingt erfolgen kann, die resultierenden Raumzeitausbeuten jedoch gering ausfallen.

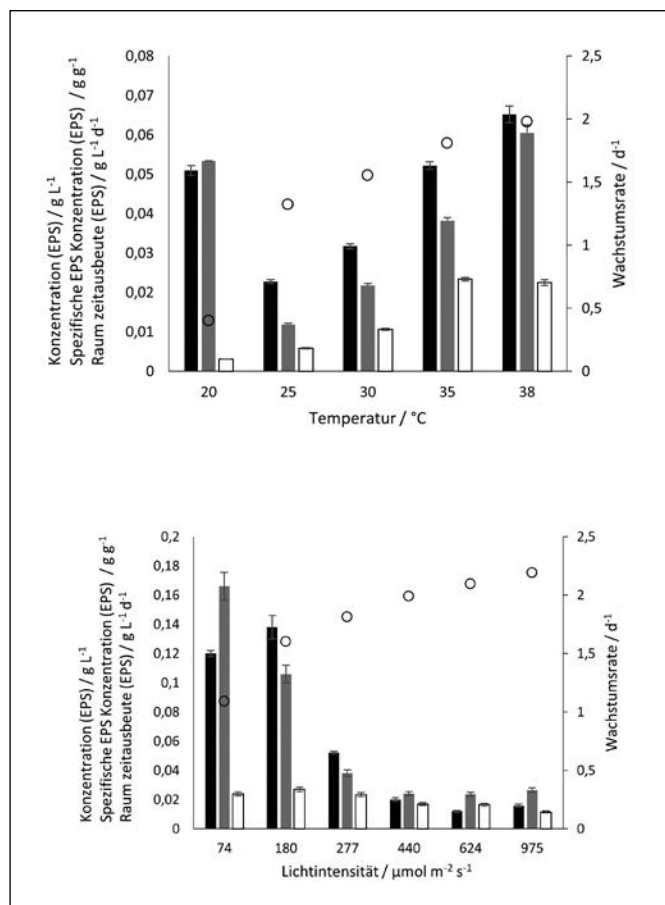


Abbildung 1: Einfluss von Temperatur (oben) und Licht (unten) auf das Wachstum (weiße Kreise), die EPS-Konzentration (schwarze Balken), die spezifische EPS Konzentration (graue Balken) und die Raumzeitausbeute (weiße Balken)

Der Einfluss des Lichtes wurde anhand von Batchprozessen (vgl. Abbildung 1 unten) und den zwei Regelmöglichkeiten für kontinuierliche Prozesse (Abbildung 2) untersucht. Alle Versuche wurden bei einer Temperatur von $35 \text{ }^\circ\text{C}$ durchgeführt.

Das Wachstum in den Batchkultivierungen kann bei den untersuchten Lichtintensitäten durch die Monod-Kinetik beschrieben werden, somit nähert sich die Wachstumsrate mit zunehmender Lichtintensität an einen Maximalwert (μ_{max}). Wie in Abbildung 1 (unten) zu sehen ist, wirken sich hohe Bestrahlungsdichten reduzierend auf die EPS-Expression aus. Die höchste Konzentration wurde bei $180 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ gemessen. Weniger ausgeprägt ist dieser Trend bei der EPS-Produktivität, da der negative Einfluss von starkem Licht durch höhere Wachstumsgeschwindigkeiten kompensiert wird. Ähnlich den Ergebnissen unserer Studie sind die veröffentlichten Daten von Dejsungkrant et al. [8] und Silva et al. [9], deren kombinierten Daten ein Optimum für die EPS-Expression im Bereich zwischen 100 - $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ suggerieren.

In den Kultivierungen mit turbidostater Prozesskontrolle, bei welcher die Biomassekonzentration – somit auch die Verschattungseffekte – im Reaktor konstant gehalten werden, wurde im untersuchten Bereich kein signifikanter Unterschied in den EPS-Konzentrationen gefunden.

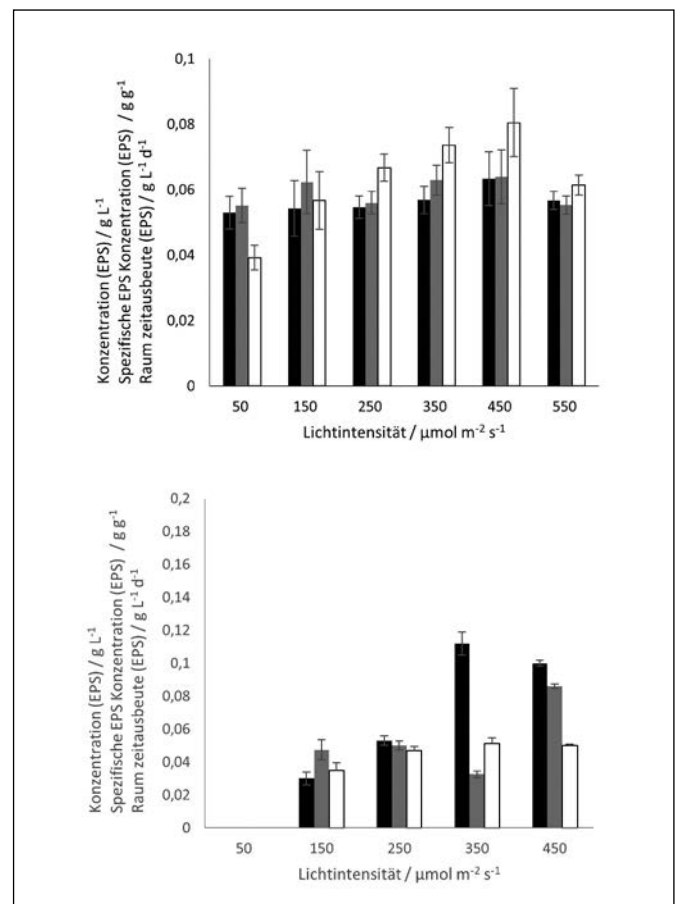


Abbildung 2: Einfluss von Licht auf die EPS-Konzentration (schwarz), die spezifische EPS Konzentration (Grau) und die Raumzeitausbeute (weiß) bei turbidostater Prozessführung (unten) und chemostater Prozessführung (oben)

Durch Einbezug der Wachstumsrate ergibt sich für die resultierende Raumzeitausbeute ein Maximum bei $450 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Abbildung 2 oben). Bei den chemostaten Prozessen ist die Raumzeitausbeute hingegen lichtunabhängig und die EPS-Konzentrationen bei $350 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ maximal (Abbildung 2 oben). Dieser Effekt kann durch die höheren Biomassekonzentrationen des Fließgleichgewichts erklärt werden.

4 Zusammenfassung und Fazit

Unsere Versuche zeigen, dass der Einfluss von Licht auf die EPS-Produktivität stark von der verwendeten Prozess-

fahrweise abhängt. Während bei Batch-Prozessen die EPS-Konzentration mit zunehmender Lichtintensität abnimmt, wirkt sich starkes Licht im chemostat gesteuerten kontinuierlichen Prozess positiv auf die EPS-Konzentration aus. Im turbidostaten Prozess, bei welchen Selbstverschattungseffekte gleich bleiben, ist die EPS-Expression unabhängig von der Lichtintensität.

Im Gesamtvergleich ist ein Batchprozess bei niedriger Lichtintensität zu bevorzugen, wenn die Zielsetzung hohe EPS-Konzentrationen sind. Wird eine möglichst hohe Raumzeitausbeute angestrebt, sollten kontinuierliche Verfahren mit hohen Lichtintensitäten verwendet werden.

Referenzen:

- [1] S.-H. Jung, N. Zell, F. Boßle, U. Teipel, C. Rauh, C. McHardy, C. Lindenberger, *Front. Sustain. Food Syst.* 2022, 6 (May), 1–10. DOI: 10.3389/fsufs.2022.883069.
- [2] M. Reichert, S. M. Bergmann, J. Hwang, R. Buchholz, C. Lindenberger, *J. Fish Dis.* 2017, 40 (10), 1441–1450. DOI: 10.1111/jfd.12618.
- [3] N. Prybylski, C. Toucheteau, H. El Alaoui, N. Bridiau, T. Maugard, S. Abdelkafi, I. Fendri, C. Delattre, P. Dubessay, G. Pierre, et al., *Bioactive Polysaccharides from Microalgae* 2020.
- [4] C. Delattre, G. Pierre, C. Laroche, P. Michaud, *Biotechnol. Adv.* 2016, 34 (7), 1159–1179. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2016.08.001.
- [5] L. Trabelsi, H. Ben Ouada, H. Bacha, M. Ghoul, *J. Appl. Phycol.* 2009, 21 (4), 405–412. DOI: 10.1007/s10811-008-9383-8.
- [6] M. DuBois, K. Gilles, J. K. Hamilton, P. A. Rebers, F. Smith, *Nature.* 1951, 168 (4265), 167. DOI: 10.1038/168167a0.
- [7] S. Jung, C. McHardy, C. Rauh, G. Luzi, A. Delgado, R. Buchholz, C. Lindenberger, *Bioprocess Biosyst. Eng.* 2021, 1–32. DOI: 10.1007/s00449-021-02550-6.
- [8] M. Dejsungkrant, C. Yusuf, S. Sarote, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2017, 29 (10), 2709–2718. DOI: 10.1002/j.
- [9] M. B. F. Silva, E. G. Azero, C. M. L. L. Teixeira, C. T. Andrade, *Bioresour. Bioprocess.* 2020, 7 (1). DOI: 10.1186/s40643-020-00337-3.

Projektpartner:

Technische Universität Berlin, Institut für Lebensmitteltechnologie und -chemie,
Fachgebiet Lebensmittelbiotechnologie und -prozessechnik

Fördergeber:



Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

Kontakt:



Prof. Dr.-Ing. Christoph Lindenberger

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

c.lindenberger@oth-aw.de



Sun-Hwa Jung, M.Sc.

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

s.jung@oth-aw.de



Fabian Boßle, M.Sc.

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

f.boßle@oth-aw.de



Niklas Zell, M.Eng.

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

ni.zell@oth-aw.de

Zusammenfassung

Aufgrund des zunehmenden Interesses an Hochwertprodukten aus Mikroalgen wie zum Beispiel Nahrungsergänzungsmitteln, Biokraftstoffen oder bioaktive Substanzen ist die Optimierung der Kultivierung von Mikroalgen zur industriellen Produktion von großem Interesse [1]. Dabei stellt die Lichtversorgung aufgrund der exponentiellen Abnahme der Lichtintensität mit zunehmender Schichtdicke und Biomassekonzentration einen der kritischen Parameter bei der Reaktorauslegung dar. Speziell bei der Geometrie von Photobioreaktoren werden stetig neue Entwicklungen getätigt, um eine Limitierung des Prozesses durch mangelnde Lichtversorgung zu umgehen [2]. Der im Rahmen dieser Studie konstruierte Airlift Photobioreaktor (ALR) mit einem Volumen von ca. 75 l erhöht die Vielfalt der eben genannten Reaktorkonzepte. Die Geometrie des Photobioreaktors und dessen Gasvolumenstromabhängige verfahrenstechnische Parameter wie Stoffübergangskoeffizienten ($k_L a$), Mischzeit und Fließgeschwindigkeiten im Downcomer sollen hier vorgestellt werden.

Abstract

As microalgae produce numerous valuable products such as food supplements, biofuel, and bioactive substances, the optimization of production processes for microalgae cultivation has been of high interest in industries [1]. One of the most critical parameters for cultivation processes is light supply due to the attenuation of the light intensity by penetration depth. To overcome the limits of light supply various developments in the geometry of photobioreactors have been published [2]. Our development of a 75-liter airlift-photobioreactors (ALR) is just one more addition to the before-mentioned variety of photobioreactors. The current study presents the geometry of the airlift photobioreactor and the process engineering relevant parameters like mass transfer coefficient ($k_L a$), mixing time, and liquid flow rates in the downcomer, which are all influenced by the aeration volume flow.

1 Introduction

As light supply is still one of the crucial parameters in cultivating phototrophic organisms, new developments and concepts of photobioreactors are published daily and are needed [2]. The reactor presented in the current study (see figure 1) combines the airlift concept with a horizontal tubing system functioning as the downcomer. The benefits of this concept are mild shear stress for the organisms while providing a relatively high volume-surface ratio which is beneficial for light supply.

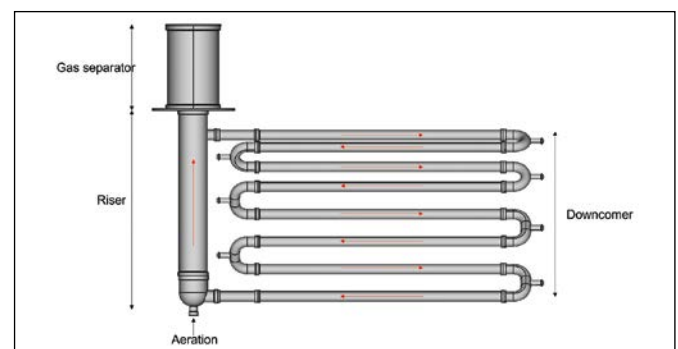


Figure 1: CAD drawing of Airlift Photo-bioreactor (ALR) with names of sections

The reactor is placed in a fitted frame equipped with four wheels so that the reactor can be easily moved if necessary. The individual parts of the reactor are attached to the frame utilizing tube clamps. The reactor, especially the downcomer with the loops, is built up from bottom to top to ensure perfect inclination and connection to the riser and gas separator. The reactor's final build-up, including the frame and peripheries, has a height of 2.57 m, width of 2.51 m, and depth of 1.06 m. The reactor has approximately 86 l with a maximum liquid volume of 75 l. It is essential to investigate basic characteristics like mixing time, $k_L a$, and liquid flow rates, which are strongly influenced by (in our experiments 0%) aeration, to develop cultivation processes in new reactors.

The mixing time of a system correlates to a certain degree with the reached homogeneity. Even so, homogeneity is not always wanted in reaction engineering, other properties, e.g. dead zones, can be elicited from the data. The volumetric mass transfer coefficient ($k_L a$) is particularly interesting as the cultivated organisms need a sufficient supply of CO₂, and the produced oxygen must be stripped out of the reactor [3].

As phototrophic organisms need light energy to utilize the carbon source, the downcomer is designed to enable sufficient light supply due to smaller pipe diameters and, therefore, smaller penetration depth. Thus, the retention time and the flow regime in the downcomer pipes are essential parameters for cultivating algae.

2 Methods

2.1 Mixing time

The mixing time is determined by tracing injected KCl into the reactor system by measuring conductivity. From those data, the value for 95% homogeneity is calculated by equation.

$$H(t) = \frac{\kappa(t) - \kappa_0}{\kappa_\infty - \kappa_0} \quad \text{Equation 1}$$

Where $H(t)$ is the homogeneity at time t , $\kappa(t)$ is the conductivity at time t , κ_0 is the initial conductivity, and κ_∞ the final conductivity.

2.2 Determination of the $k_L a$

For the determination of the $k_L a$, the gassing-out method is a commonly used method to characterize the mass transfer coefficient. Therefore, the reactor is stripped with nitrogen to remove all dissolved oxygen from the fluid. After reaching a constant signal of the DO-probe (0%), the aeration is switched to air, and the evolving dissolved oxygen in the liquid is recorded with DO-sensor. As a result, the $k_L a$ can be calculated using the following equation.

$$k_L a * (t - t_0) = -\ln \left(\frac{DO^* - DO(t)}{DO^* - DO(t_0)} \right) \quad \text{Equation 2}$$

Where DO^* is the saturated dissolved oxygen (DO) value, $DO(t_0)$ stands for the minimum DO value (0%), and $DO(t)$ stands for the DO at time.

2.3 Liquid flow rate in the downcomer

The driving force of the airlift reactor is the hydrostatic pressure difference that arises from gassing one side of the reactor and thus achieving different gas holdups and liquid densities. Therefore, the fluid flow velocity in the downcomer pipelines is related to the aeration rate.

The liquid flow velocity in the downcomer tubes was measured using an ultrasonic flowmeter (Fluxus F601). The flowmeter consists of two sensors clamped on the glass tube and the measuring transducer fixed on the reactor frame. Both sensors are placed on the tube's side, and the distance between the sensors depends on the chosen number of sound paths.

3 Results

3.1 Mixing time

The previously described experimental setup and procedure for determining mixing time with a conductivity tracer were performed multiple times for each parameter setting ($n > 3$). The recorded conductivity values after the tracer injection are calculated for 95% of homogeneity using Equation 1. Figure 2 (left) depicts the experiment where a color tracer is injected on the top of the riser to track the mixing behavior. After an initial mixing in the gas separator's head volume, the tracer moves into the downcomer. The axial dispersion in the downcomer was relatively small, whereas the characteristic profile of laminar flows was observable. With increasing aeration, the mixing time reduces, converging to a value of around two minutes. The slowest mixing time is 254 s⁻¹ at 0.9 vvm, and the fastest mixing time is 147 s⁻¹ at 0.35 vvm. Due to vibrations, the highest applicable aeration rate was at 0.35 vvm.

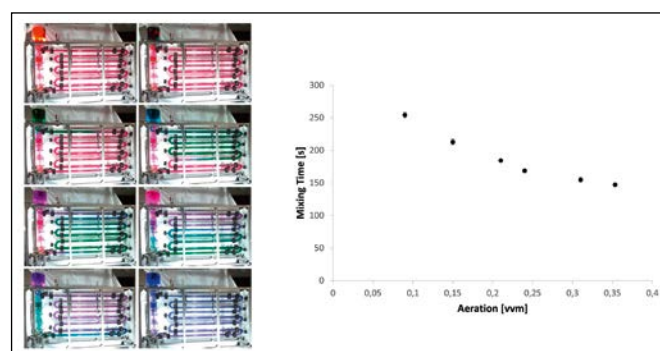


Figure 2: Experiment to evaluate the mixing time using color trace (left) and the relation between aeration rate and mixing time (right)

3.2 Mass transfer coefficients ($k_L a$)

Typical oxygen saturation progressions using the gas-ing-out method for determining the $k_L a$ value are displayed in figure 3 (left). The kinetics are strongly dependent on the aeration rate. From those data the

$k_L a$ is calculated by using Equation 2. In the measured range, the aeration rate and $k_L a$ show a linear correlation (see figure 3 right). The $k_L a$ value for the lowest aeration rate is 7 h^{-1} , and for the highest, it is 32 h^{-1} . Those findings coincide with the values published by Li et al., who examined the characteristics of a 50 L airlift reactor [4]. All experiments are done in triplicates, and their relative standard deviation is estimated at 0.3–6.2%.

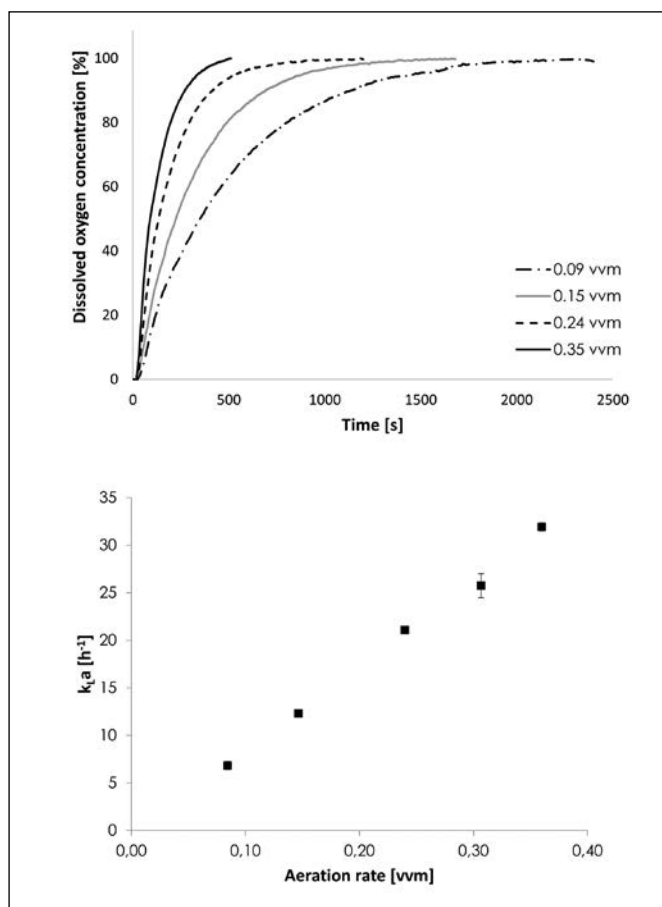


Figure 3: DO-sensor record of the evolving oxygen concentration in the liquid for different aeration rates (upper part) and the correlation between the evaluated $k_L a$ values and the aeration rate (lower part)

3.3 Liquid flow rate

The liquid flow rate is measured using an ultrasonic flow-meter (Fluxus F601) at the downcomer's highest and lowest parts. Every experimental point is repeated three times, and the results show almost no differences with a relative standard deviation (RSD) of $<2.8\%$. Based on the conservation of mass, it must be assumed that the liquid flow velocity stays the same throughout the whole downcomer. Therefore, the average between all measured values is used for investigating the relationship between liquid flow velocity and aeration rate (Figure 4). Up to an aeration rate of 0.275 vvm, a linear correlation between aeration and flow velocity can be observed. Reaching flow velocities up to 0.24 m s^{-1} , which calculates to Reynolds numbers of about 1500, means that within the operation range of the reactor, a laminar flow in the downcomer can be assumed. Expecting laminar flow is especially true for real-life conditions, where the culture broth has higher viscosities.

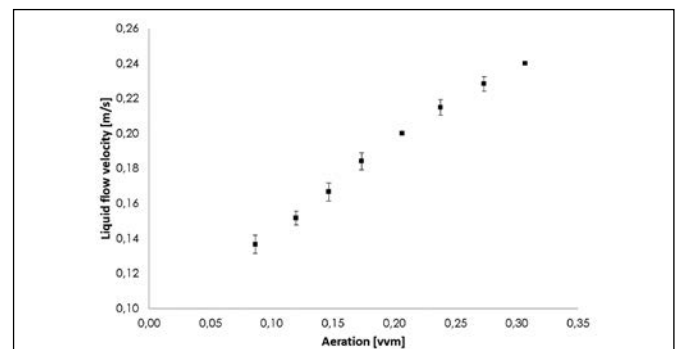


Figure 4: Graphical representation of the relation between aeration rate and liquid flow velocity in ALR

4 Conclusion and outlook

The built-up of the airlift photobioreactor is completed, and the correlations between the aeration rate and its mixing time, mass transfer coefficient, and liquid flow rate in the downcomer are characterized. The raw data presented in this small study will feed empirical models developed for airlift reactors, e.g., Molina et al. [5], to directly compare our reactor concept with existing reactors. On the experimental side, the upcoming efforts will shift from a process engineering perspective to a biological point of view – meaning, do our organisms like the reactor we built for them?

Referenzen:

- [1] S.-H. Jung, N. Zell, F. Boßle, U. Teipel, C. Rauh, C. McHardy, C. Lindenberger, *Front. Sustain. Food Syst.* 2022, 6 (May), 1–10. DOI: 10.3389/fsufs.2022.883069.
- [2] A. Sutor, M. Heining, C. Lindenberger, R. Buchholz, *IEEE Trans. Magn.* 2014, 50 (11), 2–5. DOI: 10.1109/TMAG.2014.2320934.
- [3] G. Luzi, C. McHardy, *Energies.* 2022, 15 (11), 3966. DOI: 10.3390/en15113966.
- [4] H. Li, W. Chen, X. Chen, *Asian J. Chem.* 2010, 22 (8), 6524–6530.
- [5] E. Molina, A. Contreras, Y. Chisti, *FBP.* 1999, 77 (1), 27–35. DOI: 10.1205/096030899532222

Fördergeber:



Kontakt:



Prof. Dr.-Ing. Christoph Lindenberger

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

c.lindenberger@oth-aw.de



Sun-Hwa Jung, M.Sc.

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

s.jung@oth-aw.de



Fabian Boßle, M.Sc.

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

f.boßle@oth-aw.de



Niklas Zell, M.Eng.

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

ni.zell@oth-aw.de



Ina Jakobi, M.Eng.

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

Zusammenfassung

Diese Studie konzentriert sich auf die Analyse der thermischen Reaktion, die durch den Selbsterwärmungseffekt während der zyklischen Belastung von additiv gefertigten (AM) Proben aus der Aluminiumlegierung AlSi10Mg hervorgerufen wird, und auf deren Korrelation mit ihrer Ermüdungslebensdauer. Es wurden vier verschiedene Proben-designs getestet, um die Anwendbarkeit verschiedener thermografischer Methoden zur Vorhersage der Ermüdungsreaktion zu bewerten. Diese Methoden konzentrieren sich auf die Abschätzung der Ermüdungsgrenze (die Luong-Methode und ihre Varianten) oder der S-N-Kurve (die Fargione-Methode) anhand des Temperaturverlaufs einer Probe, die auf mehreren Stufen mit kontinuierlich ansteigender Spannungsamplitude belastet wird. Solche Methoden könnten die Kosten von Ermüdungsversuchen reduzieren, indem sie die Abschätzung der Ermüdungslebensdauerleistung beschleunigen. Die in diesem Papier dokumentierten Analysen zeigen ihr großes Potenzial (vor allem im Fall der Fargione-Methode), aber auch ihre Schwächen und die Notwendigkeit einer umfassenderen Validierung neuer experimenteller Daten.

Abstract

This study focuses on analyzing the thermal response induced by the self-heating effect during cyclic loading of additively manufactured (AM) specimens made from AlSi10Mg aluminum

alloy and on its correlation with their fatigue life performance. Four different specimen designs were tested to assess the applicability of various thermographic methods for predicting the fatigue response. These methods focus on estimating the fatigue limit (the Luong method and its versions) or the S-N curve (the Fargione method) from the temperature response of one specimen which is loaded on multiple subsequently increasing levels of the stress amplitude. Such methods could reduce the costs of fatigue experiments by speeding up the estimation of fatigue life performance. The analyses documented in this paper show their large potential (above all in the case of the Fargione method), but also their weaknesses and the need for a more rigorous and broader validation on new experimental data.

1 Einleitung

Die Temperaturmessung kann als zusätzlicher Parameter für die Analyse des Ermüdungsverhaltens verschiedener Legierungen verwendet werden. Da die herkömmliche Treppenmethode [1] zur Bestimmung der Ermüdungsgrenze (theoretische Spannungsamplitude, die nach einer beliebigen Anzahl von Zyklen nicht zum Versagen führt) eine große Anzahl von Prüfkörpern erfordert, kann die von Luong [2] oder La Rosa und Risitano [3] vorgeschlagene Methode zur Abschätzung der Ermüdungsgrenze anhand einer theoretischen Messung an einem einzigen

Prüfkörper, der Lastblöcken mit anschließend ansteigenden Spannungsamplituden ausgesetzt wird, verwendet werden (siehe Abbildung 1). Diese Art von Versuch wird als S-H-Versuch bezeichnet. Dabei kann die Temperaturerhöhung (siehe Abbildung 2) einer zyklisch belasteten Probe, die durch einen Selbsterhitzungseffekt im kritischen Volumen der Probe verursacht wird, überwacht werden [2], [3]. Die Temperaturerhöhung (gemessen z. B. relativ zur Umgebung oder zu einer unbelasteten Referenzprobe) ist die Zielgröße.

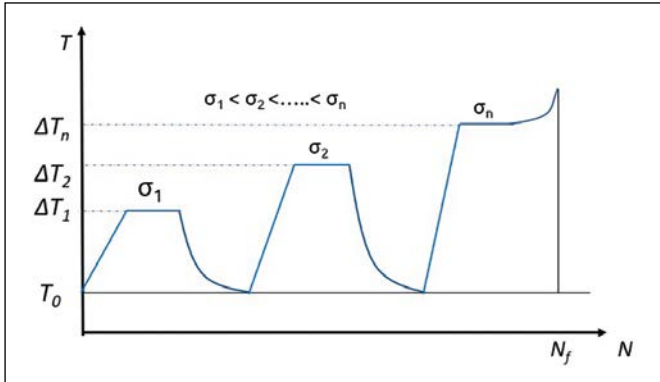


Abbildung 1: Schema des S-H-Versuchs mit stabilisierter Temperaturdifferenz ΔT_i bei variabler Belastungsamplitude σ_i bezogen auf die Zyklenzahl bis zum Versagen.

Die Temperaturentwicklung während der zyklischen Belastung (S-H-Effekt) kann in mindestens drei Phasen unterteilt werden [4], siehe Abbildung 2. Die erste Phase kann durch einen anfänglichen Temperaturanstieg definiert werden, der durch die Temperaturanstiegsrate dargestellt werden kann R_0 zu Beginn des Tests. Die zweite Phase ist durch einen stabilisierten Temperaturanstieg ΔT gekennzeichnet, der in dieser Arbeit als Schlüsselparameter behandelt wird. Diese Temperatur stellt einen stationären Zustand dar, in dem die durch zyklische Belastung erzeugte Wärme gleichmäßig an die Umgebung abgegeben wird. Je nach Belastungsniveau kann die Reaktion während des größten Teils der Lebensdauer des Probekörpers in dieser Phase verbleiben. Der Übergang in die stationäre Phase wird dann als Schlüsselfaktor für die Bestimmung der Länge der einzelnen Belastungsblöcke während des S-H-Tests verwendet. Die letzte Phase kann durch einen schnellen Temperaturanstieg R_f gekennzeichnet sein, der zum Bruch der Probe führt.

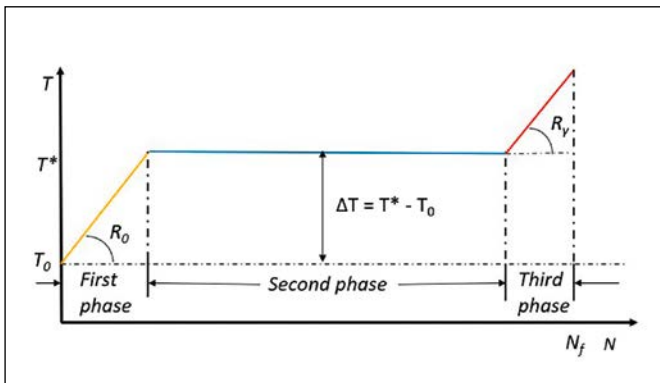


Abbildung 2: Entwicklung der Temperatur während zyklischer Belastung mit konstanter Amplitude bis zum Versagen bei N_f .

Die Methode zur Abschätzung der Ermüdungsgrenze basiert auf dem Vorhandensein einer nicht schädigenden plastischen Verformung, die unterhalb der Ermüdungsgrenze auftritt [5]. Der Unterschied in der plastischen Reaktion unterhalb und oberhalb der Ermüdungsgrenze projiziert auf die Abfolge stabilisierter Temperaturen aus dem S-H-Test. Der bei verschiedenen Laststufen gemessene Anstieg der stabilisierten Temperatur (siehe

Abbildung 1) kann mit den einwirkenden Spannungsamplituden in einem Diagramm ähnlich Abbildung 3 in Beziehung gesetzt werden, um die bilineare Entwicklung der stabilisierten Temperatur zu ermitteln [2], [3]. Der Übergang von der schädigungsfreien plastischen Verformung zur schädigenden plastischen Verformung sollte durch den Bruchpunkt in dieser bilinearen Entwicklung manifestiert werden. Zusätzlich zur ΔT -Temperatur wurde die Temperaturanstiegsrate R_0 zur Analyse der thermischen Reaktion auf zyklische Belastung vorgeschlagen [3].

Obwohl die in Abbildung 3 skizzierte Lösung recht einfach und unkompliziert erscheint, sieht die Realität etwas anders aus. Die in Abbildung 3 dargestellte bilineare Abhängigkeit muss in vielen Fällen nicht beachtet werden. Dies könnte aufgrund eines sanfteren Übergangs zwischen beiden Teilen oder einer stärker gestreuten Temperaturantwort im unteren Teil des Diagramms zurückzuführen sein, wo die Messgenauigkeit der Wärmebildkamera eine ähnliche Größenordnung wie der gemessene Temperaturanstieg haben könnte. Fernández-Canteli et al. [6] schlagen daher eine kontinuierliche Kurve basierend auf der Gumbel-Funktion vor, die den gemessenen Trend besser beschreiben könnte. Huang et al. [7] schlagen drei weitere Methoden vor, um die Position dieses Übergangs abzuleiten, von dem erwartet wird, dass er mit der Position der Ermüdungsgrenze zusammenhängt.

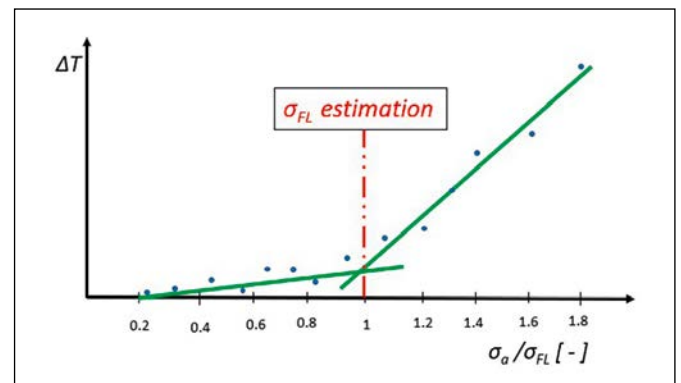


Abbildung 3: Schätzung der Ermüdungsgrenzen aus dem S-H-Test, bei dem die stabilisierte Temperaturdifferenz mit der Amplitude der angelegten Spannung σ_a in Beziehung steht, normalisiert durch die Ermüdungsgrenze σ_{FL} .

Neben der Ermittlung der Ermüdungsgrenze gibt es weitere Methoden, die versuchen, die S-H-Testergebnisse zu verwenden, diesmal zur Abschätzung der gesamten S-N-Kurve. Fargione [8] schlägt vor, dass die begrenzende Energie in Bezug auf die Fläche unter der gemessenen T-N-Kurve konstant ist

$$\Phi \approx \Delta T_i \cdot N_f = \text{const.} \quad (1)$$

für jede Belastung mit konstanter Amplitude, siehe Abbildung 4, für einen bestimmten Werkstoff und eine bestimmte Geometrie.

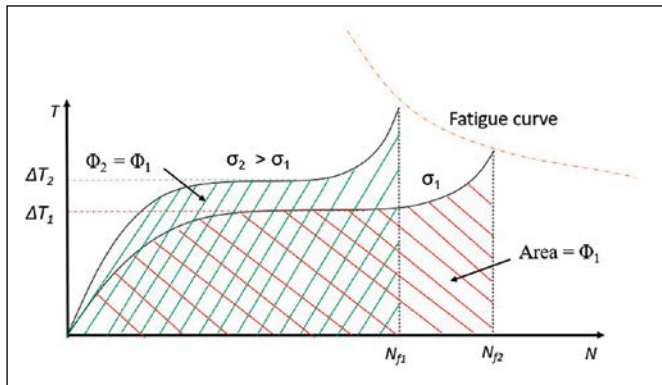


Abbildung 4: Grenzenergie als Konstante für verschiedene Belastungsamplituden.

Zur Bestimmung kann die Grenzenergie an einer Probe unter konstanter Amplitudenbelastung bis zum Versagen gemessen werden (siehe Abbildung 4). Wenn die S-H-Testergebnisse an einem anderen Probekörper verfügbar sind, können die für gegebene Spannungsamplituden σ_i stabilisierten ΔT_i -Temperaturanstiege (siehe Abbildung 1) verwendet werden, um die N_f -Ermüdungslebensdauer bis zum Bruch in Bezug auf jede der getesteten Spannungsamplituden abzuschätzen Gleichung (1). Die Fargione-Methode [8], die es ihrem Anwender ermöglicht, die gesamte S-N-Kurve aus einem Versuch mit konstanter Amplitude und aus dem S-H-Versuch abzuschätzen, wird zusammen mit der Abschätzung der Ermüdungsgrenze über Abbildung 3 bewertet, die im Folgenden als FL-Methode bezeichnet wird.

2 Versuchsdurchführung

2.1 Beschreibung der Exemplare

Der verwendete Werkstoff in dieser Studie ist die Aluminiumlegierung AlSi10Mg (CL 31AL in der Bezeichnung des Pulverherstellers). Ermüdungsproben mit vier verschiedenen Formen (siehe Abbildung 5), aber mit der gleichen kritischen Querschnittsfläche, wurden für zyklische Versuche entworfen, die eine Überwachung der Oberflächentemperatur beinhalteten. Die Proben wurden auf einer Plattform, siehe Abb. 6, in vertikaler Ausrichtung auf dem Concept Laser M2-Drucker unter Verwendung des selektiven Laserschmelzens mit einem zufälligen Kreuzmuster gedruckt.

Alle Oberflächen der Proben wurden nicht nachbearbeitet. An den Köpfen wurde in die Proben ein M18x1-Gewinde eingearbeitet, um diese in den Spannwerkzeugen der Prüfmaschine befestigen zu können. Um die durch das AM-Verfahren verursachten Eigenspannungen zu reduzieren, wurde ein Spannungsarmglühen mit den von dem Hersteller des Pulvers empfohlenen Parametern angewendet. Die Proben wurden innerhalb 1 Stunde auf 240°C erhitzt und 6 Stunden bei dieser Temperatur belassen. Anschließend wurden sie im Ofen auf 100°C abkühlt und danach an der Luft auf Raumtemperatur.

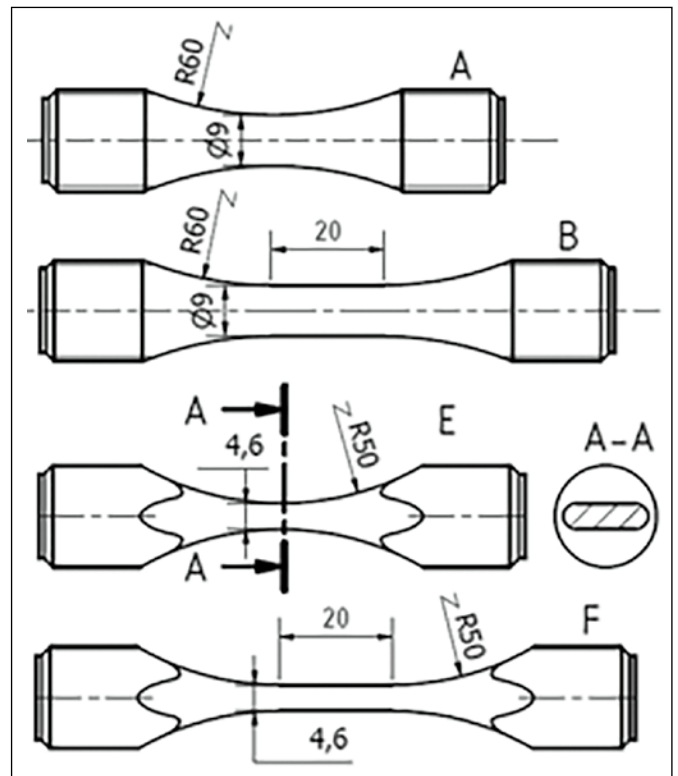


Abbildung 5: Zeichnungen von Exemplaren der Serien A, B, E und F.



Abbildung 6: Foto von Proben auf einer Bauplatte nach dem Drucken. Die Serien von Exemplaren mit Löchern in ihren Köpfen werden in dieser Arbeit nicht behandelt.

Die Geometrie der Serien A und B entspricht typischen Stabproben mit kreisförmigem Querschnitt mit einem Übergangsradius von 60 mm zwischen den Anbindungspunkten und der gewünschten Querschnittsfläche (siehe Abbildung 5). Die Serien E und F sind flache Proben mit der gleicher Querschnittsfläche in ovaler Form. Der Grund für die unterschiedliche Gestaltung der Proben war, die Veränderung des Blickwinkels zu minimieren, welche die Qualität der Messung beeinträchtigen kann. Der Konstruktionsunterschied, der darauf abzielte, die Messung der Oberflächentemperatur mittels Wärmebildkamera zu etablieren und zu überprüfen, betraf den mittleren Teil der Proben. Proben mit prismatischem Mittelteil (B und F) wurden mit den Proben (A und E) verglichen, um den Selbsterhitzungseffekt zu analysieren.

2.2 Versuchsaufbau

Die Serien mit einem prismatischen Abschnitt von 20 mm in der Mitte (Serien B und F) und somit einem erweiterten kritischen Volumen wurden an der CTU in Prag getestet, während die kurzen Proben (Serien A und E) mit dem minimalen Querschnitt an der OTH Amberg-Weiden getestet wurden. Beide Labore verwendeten ihre Amsler-100-kN Resonanzpulsatoren unter Laststeuerung bei einem Lastverhältnis von $R = 0,1$.

Für die Wärmebildaufnahmen wurden die Wärmebildkameras FLIR A315 (CTU) und FLUKE RSE600 (OTH AW) verwendet. Die Oberfläche der Proben wurde mit einer schwarzen LabIR-Lackbeschichtung mit hohem Emissionsvermögen (HERP-LT-MWIR-BK-11) behandelt, um eine präzisere Messung der Oberflächentemperatur durch die Wärmebildkameras zu gewährleisten. Durch diese Beschichtung werden nahezu alle Reflexionen von der Umgebung der Proben eliminiert.

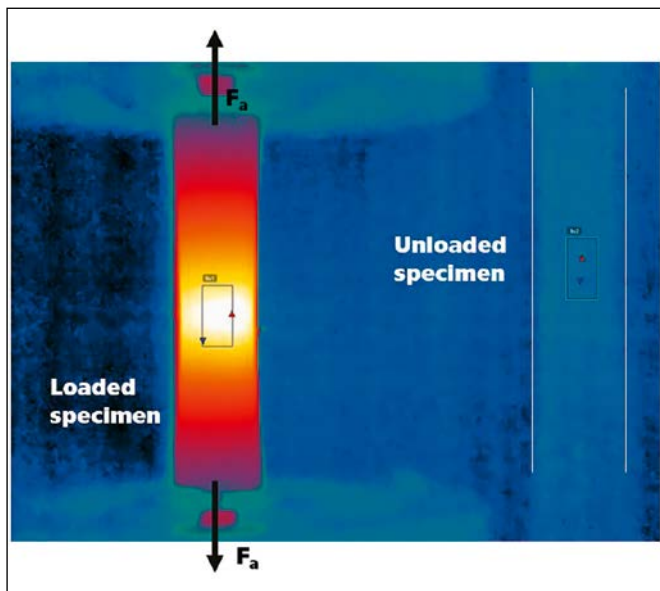


Abbildung 7: Wärmebild der belasteten Probe der F-Serie mit dem unbelasteten und belasteten Probenschema mit Temperaturbereich.

Um die Störeinflüsse aus der Umgebung des beladenen Prüflings zu eliminieren, wurde nicht nur die Umgebungstemperatur während der gesamten Messreihe dokumentiert. Ein unbelasteter Probekörper mit identischer Form und Oberflächenbehandlung wurde in der Nähe des zyklisch belasteten Probekörpers platziert (siehe Abbildung 7), um die Auswirkung von Veränderungen in der Umgebung oder die Verschiebung der Wärmekameramessungen auszuschließen.

2.3 Experimentelle Ergebnisse

Zunächst wurde die S-N-Kurve erstellt (siehe Abbildungen 8-9). Mit Ausnahme der B-Serie, für die nur 8 Proben zur Verfügung standen, wurden 10 Proben zur Beschreibung

der S-N-Kurve verwendet. Falls der Versuch die vorgegebenen Zyklen unbeschadet überstand (Reihe A, B, F), wurde die nicht gerissene Probe für einen weiteren Versuch mit einem Belastungsniveau von mindestens dem 1,8-fachen der ursprünglichen Belastungsamplitude verwendet. Die typische Arbeitsfrequenz beider gebrauchten in verwendeten Maschinen lag bei 90 Hz (OTH AW) bzw. 100 Hz (CTU).

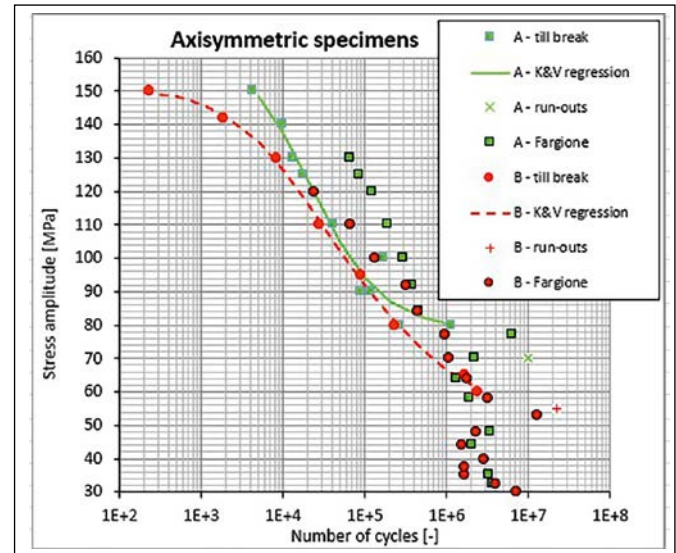


Abbildung 8: Wöhlerkurvenergebnisse und Kohout-Věchet (K&V)-Regressionskurve für Serien A und B bezogen auf axisymmetrische Proben. Schätzungen der S-N-Datenpositionen aus den S-H-Tests nach der Fargione-Methode sind ebenfalls enthalten.

Für die S-H-Prüfung stand aus jeder Serie ein zusätzliches Exemplar zur Verfügung. Alle Versuche wurden hinsichtlich des Temperaturanstiegs überwacht. Die Ergebnisse der Prüfung mit konstanter Amplitude lieferten somit Informationen darüber, wie lang die erste Phase der Temperaturentwicklung vor ihrer Stabilisierung für dieses Material, die Maschinen und die Probekörperausführungen ist. Auf dieser Grundlage wurde die Dauer jedes S-H-Lastblocks auf 10.000 Zyklen festgelegt. Nach jedem Belastungsblock folgte eine 120 s lange Phase, in der keine Belastung eingeleitet wurde. Ihre Wirkung ist wichtig. Erstens zeigt es die potenzielle Abweichung der Proben-temperatur, wenn die Belastung gestoppt wird. Ohne Belastung kühlt die Probe ab, aber wenn die Pause nicht wesentlich länger ist, wird die in Probe und Maschine gespeicherte Wärme nicht vollständig abgegeben. Zweitens beschreibt die Abkühlkurve die thermischen Eigenschaften des Probe-Maschinen-Systems, die auch für andere Arten von Abschätzungen verwendet werden können [9].

Die S-H-Tests begannen bei einer Lastamplitude von 30 MPa, d. h. weit unterhalb der erwarteten Ermüdungsgrenze. Die Anzahl der Lastblöcke wurde anhand der zuvor ermittelten S-N-Kurve unter Berücksichtigung der Palmgren-Miner-Schadensregel definiert. Die Lastniveaus waren bei verschiedenen Versuchsreihen ähnlich, so dass ein zusätzlicher Vergleich der Selbsterhitzung in

verschiedenen Probentypen durchgeführt werden konnte. Der kürzeste S-H-Test war aus der E-Reihe, besteht aus 15 Belastungsblöcken, die bei einem Lastamplitudenniveau von 95 MPa endeten, während die längste Aufzeichnung in der A-Reihe gefunden wird, die mit dem 19. Lastamplitudenniveau von 130 MPa endete.

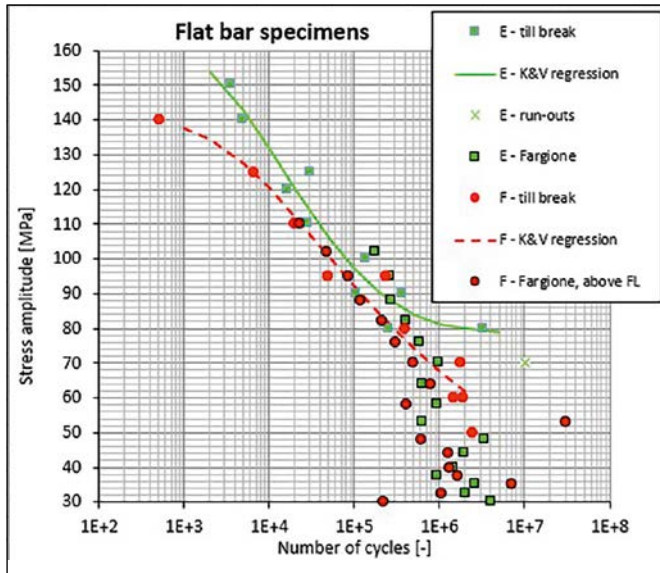


Abbildung 9: Wöhlerkurvenenergebnisse und Kohout-Věchet-Regressionskurve für die Serien E und F bezogen auf Flachstabproben. Schätzungen der S-N-Datenpositionen aus den S-H-Tests nach der Fargione-Methode sind ebenfalls enthalten

Die Kohout-Věchet (K&V)-Formel (2) wird für die S-N-Kurven-Regression verwendet. Damit werden auch die Übergänge der S-N-Kurven in den quasistatischen Bereich und in den Ermüdungsgrenzen gut approximiert

$$\sigma = a \cdot \left(C \cdot \frac{N+B}{N+C} \right)^{\beta} \quad (2)$$

Die K&V-Formel hebt einige typische Merkmale getesteter Probentypen hervor. Lange Proben zeigen deutlicher den Übergang in den quasistatischen Bereich, aber der Übergang in den Bereich der Ermüdungsgrenze ist aufgrund der geringen Anzahl verfügbarer Proben unbedeutend. Bei den kurzen Proben hingegen ist der Übergang in den quasistatischen Bereich bei den gleichen Spannungsniveaus überhaupt nicht sichtbar wie bei längeren Proben, während der Übergang zur Ermüdungsgrenze besser beschrieben ist. Aus der Perspektive der S-N-Kurven erscheinen die Ergebnisse, die Unterschiede zwischen A- und E- und zwischen B- und F-Typen nicht signifikant.

3 Schlussfolgerungen

Obwohl die Methoden, die auf der Temperaturbeobachtung zyklisch belasteter Proben im Rahmen des S-H-Tests basieren, hinsichtlich des erforderlichen Arbeitsaufwands zur Abschätzung der Ermüdungseigenschaften vielversprechend sind, zeigen die hier beschriebenen experimentellen Versuche einige ihrer Grenzen:

1. Der erwartete bilineare Trend in der σ - ΔT -Abhängigkeit wird in den präsentierten Daten nicht beobachtet. Ihr Ersatz durch eine glatte Kurve sollte in Betracht gezogen werden, aber die Möglichkeit, die Ermüdungsgrenze aus ihren Parametern abzuschätzen, muss viel umfassender validiert werden.
2. Das hier getestete AlSi10Mg-Material hat ein begrenztes thermisches Ansprechen, dass es die Qualität von Temperaturmessungen unterhalb der tatsächlichen Ermüdungsgrenzspannung einschränkt. Die Verwendung von gekühlten Wärmebildkameras mit geringerem Rauschen ist eine mögliche Lösung, um dieses Problem zu vermeiden. Eine andere Lösung wäre, das kritische Volumen und damit auch die zu messende Temperatur zu erhöhen. Eine solche Lösung ist bei hier ausgewerteten additiv gefertigten Proben teuer.

Referenzen:

- [1] J. J. Braam and S. van der Zwaag, A Statistical Evaluation of the Staircase and the ArcSinVP Methods for Determining the Fatigue Limit, *Journal of Testing and Evaluation* 26(2) (1998) 125–131.
- [2] M. P. Luong, Fatigue limit evaluation of metals using an infra-red thermographic, *Mechanics of Materials*, 28 (1–4) (1998) 155–163.
- [3] G. La Rosa and A. Risitano, Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and me-chanical components, *Int. J. Fatigue*, 22 (1) (2000) 66–73.
- [4] M. Khonsari, and M. Amiri, *Introduction to thermodynamics of mechanical fatigue*, Taylor & Francis, Boca Raton, (2013).
- [5] Klesnil, M., Lukáš, P., *Fatigue of metallic materials*, 2nd rev. Ed., Elsevier, Amsterdam, (1992).
- [6] A. Fernández-Canteli, E. Castillo, A. Argüelles, P. Fernández and M. Canales, Checking the fatigue limit from thermograph-ic techniques by means of a probabilistic model of the epsilon–N field, *Int. J. Fatigue*, 39 (2012) 109–115.
- [7] J. Huang, M.-L. Pastor, C. Garnier and X. Gong, Rapid eval-uation of fatigue limit on thermographic data analysis. *Int. J. Fatigue*, 104 (2017) 293–301.
- [8] Fargione, G., Rapid determination of the fatigue curve by the thermographic method, *Int. J. Fatigue*, 24 (1) (2001) 11–19.
- [9] G. Meneghetti, Analysis of the fatigue strength of a stainless steel based on the energy dissipation. *Int. J. Fatigue*, 29(1) 2007 81–94.
- [10] J. Kohout and S. Věchet, A new function for fatigue curves characterization and its multiple merits. *Int. J. Fatigue* 23(2) 2001 175–83.

Projektpartner:

Czech Technical University in Prague, CZ

Kontakt:



Katharina Dimke, M.Eng.

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



Prof. Dr. Jakob Rosenthal

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

j.rosenthal@oth-aw.de



Dr. Jan Papuga

Czech Technical University Prague
Faculty of Mechanical Engineering
Technická 4
CZ - 160 00 Prague

jan.papuga@fs.cvut.cz



Martin Matusu, M.Sc.

Czech Technical University Prague
Faculty of Mechanical Engineering
Technická 4
CZ - 160 00 Prague

martin.matusu@fs.cvut.cz

Zusammenfassung

Kriechen und Relaxieren sind Phänomene der Werkstoffmechanik, welche im Rahmen der linearen Viskoelastizität behandelt werden. Zur Charakterisierung des Materialverhaltens werden in der Regel Kriechversuche durchgeführt, aus den Versuchsdaten wird die Kriechfunktion $J(t)$ ermittelt. Für die Bauteilberechnung im Rahmen der Finite-Elemente-Methode (FEM) wird jedoch die Relaxationsfunktion $G(t)$ in der Darstellung als Prony-Reihe benötigt.

Die Funktionen $J(t)$ und $G(t)$ sind mathematisch verknüpft, eine exakte (analytische) Lösung findet sich aber nur für einfache rheologische Modelle. Im vorliegenden Beitrag wird ein numerisches Verfahren erläutert, mit welchem die Funktionen $J(t)$ und $G(t)$ ineinander überführt werden können.

Abstract

Creep and relaxation are phenomena in linear viscoelasticity. Creep tests are usually carried out to characterize the material behavior, and the creep function $J(t)$ is determined from the test data. However, in the framework of finite element analysis (FEM) the relaxation function $G(t)$ is required in the representation as a Prony series.

The functions $J(t)$ and $G(t)$ are mathematically linked, but an exact (analytical) solution can only be found for simple rheological models. In the present paper a numerical method is explained with which the functions $J(t)$ and $G(t)$ can be transformed into each other.

1 Einleitung

Das linear-elastische Stoffgesetz für ein isotropes Material wird üblicherweise in den unabhängigen Materialparametern E (Elastizitätsmodul) und ν (Querdehnzahl) formuliert. Die Dehnung ϵ_{xx} folgt zu

$$\epsilon_{xx} = \frac{1}{E} \cdot \{ \sigma_{xx} - \nu \cdot (\sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \}$$

Diese Darstellung ist motiviert durch den einachsigen Zugversuch mit Längs- und Querdehnung. Die Materialparameter E und ν lassen sich aus der spontan-elastischen Deformation bei Belastung der Probe ermitteln. Der Schubmodul G und der Kompressionsmodul K folgen mit E und ν zu

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad \text{und} \quad K = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2\nu)}$$

Im Rahmen der Polymermechanik erfolgt die Darstellung in den unabhängigen Konstanten K und G . Diese Darstellung ist motiviert durch die Beobachtung, dass sich jede Deformation in eine reine Volumenänderung und eine reine Gestaltänderung zerlegen lässt.

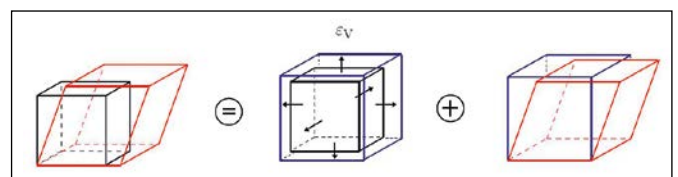


Abbildung 1: Zerlegung einer Deformation in Volumenänderung und Gestaltänderung

Damit folgt die Normalspannung σ_{xx} zu

$$\sigma_{xx} = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2\nu)} \cdot (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) + \frac{E}{(1 + \nu)} \cdot \left\{ \varepsilon_{xx} - \frac{1}{3} \cdot (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) \right\}$$

$$\Leftrightarrow \sigma_{xx} = K \cdot \varepsilon_v + 2G \cdot \left\{ \varepsilon_{xx} - \frac{1}{3} \cdot \varepsilon_v \right\}$$

Der erste Summand mit dem Kompressionsmodul K entspricht dem kugelsymmetrischen Anteil des Spannungstensors infolge einer Volumendehnung ε_v . Der zweite Summand mit dem Schubmodul G entspricht dem deviatorischen Anteil infolge einer volumentreuen Winkeländerung/Gleitung. Mithilfe des Superpositionsprinzips gelangt man zur Beschreibung eines linear-viskoelastischen Materials. Die Spannung $\sigma_{xx}(t)$ zum Zeitpunkt t folgt zu

$$\sigma_{xx}(t) = K_0 \cdot \varepsilon_v(t) + \int_0^t \dot{K}(t-\xi) \cdot \varepsilon_v(\xi) d\xi + 2G_0 \cdot \left\{ \varepsilon_{xx}(t) - \frac{1}{3} \cdot \varepsilon_v(t) \right\} + 2 \cdot \int_0^t \dot{G}(t-\xi) \cdot \left\{ \varepsilon_{xx}(\xi) - \frac{1}{3} \cdot \varepsilon_v(\xi) \right\} d\xi$$

Erster und dritter Summand mit K_0 und G_0 beschreiben den Spannungsanteil infolge einer spontan-elastischen Deformation. Die beiden Integralterme beschreiben den viskosen Anteil der Spannung. In diesen geht mit $\varepsilon_v(\xi)$ und $\varepsilon_{xx}(\xi)$ mit $\xi \in [0, t]$ die gesamte Deformationsgeschichte seit Beginn der Deformation zum Zeitpunkt $t_0=0$ ein.

$G(t)$ bezeichnet die Relaxationsfunktion mit Momentanwert G_0 . $K(t)$ entspricht dem „zeitabhängigen Kompressionsmodul“ mit Momentanwert K_0 . Zur Beschreibung des Materialverhaltens wird somit die Relaxationsfunktion $G(t)$ benötigt. Zur Bestimmung von $G(t)$ können Relaxationsversuche an einer Universalprüfmaschine durchgeführt werden. In der Regel werden jedoch Kriechversuche betrachtet, weil sie einfacher durchführbar sind und das Materialverhalten ebensogut charakterisieren. Man gelangt dann zur Kriechfunktion $J(t)$.

Beide Funktionen $J(t)$ und $G(t)$ charakterisieren das linear-viskoelastische Deformationsverhalten jeweils vollständig. $J(t)$ und $G(t)$ sind daher nicht unabhängig voneinander bzw. mathematisch verknüpft. Eine exakte (analytische) Umrechnung gelingt jedoch nur für einfache rheologische Modelle [1]. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Grundlagen der Viskoelastizität beschrieben und ein numerisches Verfahren erläutert, mit welchem die Funktionen $J(t)$ und $G(t)$ ineinander überführt werden können. Damit lässt sich die Relaxationsfunktion $G(t)$ aus der experimentell ermittelten Kriechfunktion $J(t)$ ermitteln.

2 Kriechexperiment und Kriechfunktion $J(t)$

Kriechen bezeichnet die zeitliche Zunahme der Verzerrung $\varepsilon(t)$ bei konstanter Spannung σ . Im Kriechexperiment wird eine Materialprobe zum Zeitpunkt $t_0=0$ durch Anhängen eines Gewichts G belastet. Abbildung 2 zeigt eine Probe aus PVC-U. Die Normalspannung $\sigma_{xx}=\sigma_0$ ist konstant. Die Dehnungen $\varepsilon_{xx}(t)$ und $\varepsilon_{yy}(t)$ in Längs- und in Querrichtung werden mit Dehnungsmessstreifen (DMS) erfasst.

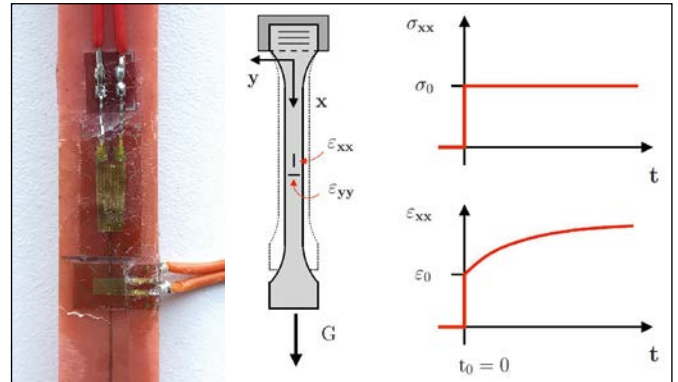


Abbildung 2: Kriechexperiment

Für ein linear-viskoelastisches Material folgt die Verzerrung $\varepsilon(t)$ aus der Spannung σ_0 und der Kriechfunktion $J(t)$ mit

$$\varepsilon(\sigma_0, t) = \sigma_0 \cdot J(t)$$

Die Kriechfunktion $J(t)$ ist eine Funktion der Zeitvariablen t . Sie ist unabhängig von der angelegten Spannung σ_0 und beschreibt das zeitabhängige Deformationsverhalten vollständig.

Die Deformation im Kriechexperiment lässt sich wie dargestellt in eine reine Volumenänderung und eine reine Gestaltänderung zerlegen. Dabei ist die Änderung des Volumens infolge hydrostatischer Spannungen in der Regel vernachlässigbar klein. Der maßgebliche Anteil der Gesamtdeformation rührt von der Schubdeformation her. Unter Annahme eines isotropen Materialverhaltens folgt damit die experimentelle Kriechfunktion/Schubnachgiebigkeit $J(t)$ aus dem deviatorischen Anteil der Deformation zu

$$J(t) = 2 \cdot \frac{\varepsilon_{xx}(t) - \varepsilon_{yy}(t)}{\sigma_0}$$

Es werden Kriechversuche bei unterschiedlichen Normalspannungen σ_0 und bei unterschiedlichen Temperaturen T durchgeführt. Abbildung 3 zeigt die Schubnachgiebigkeiten $J(t)$ bei einer Normalspannung $\sigma_0 = 9,9$ MPa und Temperaturen $T=20$ °C und $T=49$ °C. Zu beachten ist die logarithmische Darstellung der Zeitachse. In dieser Darstellung sind die Kurven unterschiedlicher Temperatur parallel verschoben [2]. Mithilfe der Zeit-Temperatur-Verschiebung folgt hier eine Masterkurve bei der Bezugs-temperatur $T_0=20$ °C, welche einen Zeitraum von etwa 68 Jahren überstreicht.

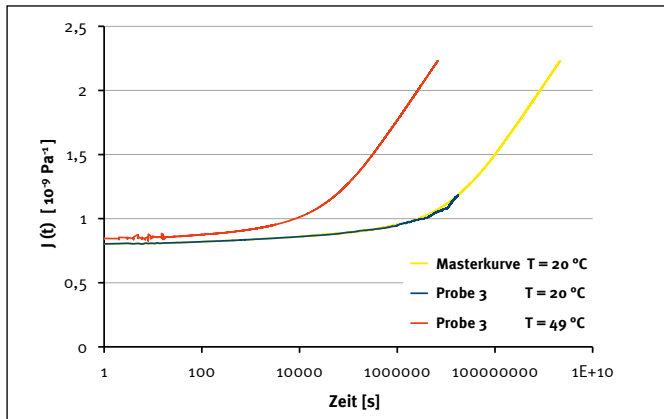


Abbildung 3: Zeit-Temperatur-Verschiebung

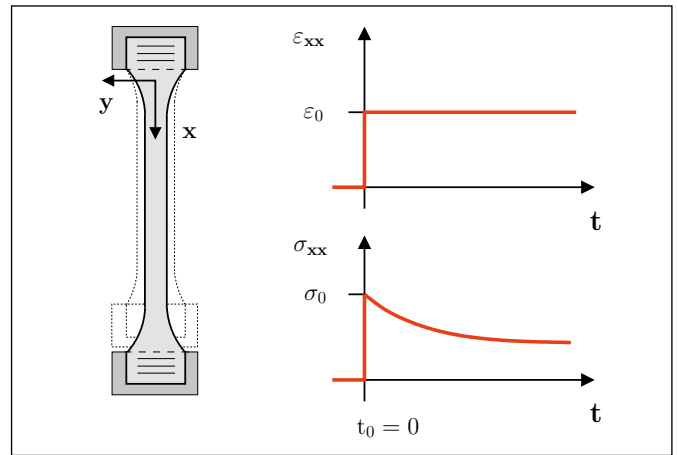


Abbildung 5: Relaxationsversuch

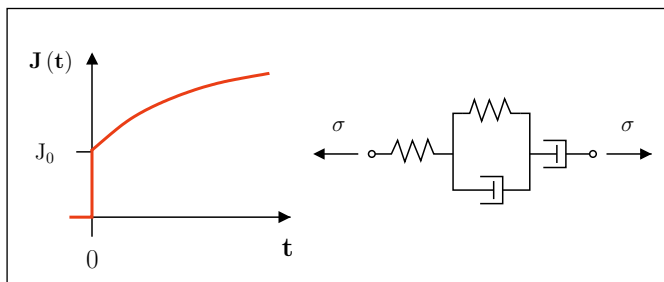


Abbildung 4: Kriechfunktion und Kelvin-Voigt-Modell

Die Kriechfunktion $J(t)$ ist eine nicht-negative, streng monoton steigende Funktion der Zeitvariablen t . Der rechtsseitige Grenzwert der Kriechfunktion für $t \rightarrow +\infty$ heißt Momentanwert der Nachgiebigkeit und beschreibt das spontan-elastische Verhalten.

$$J_0 = \lim_{t \rightarrow +\infty} J(t)$$

Die Kriechfunktion $J(t)$ besitzt als total monotone Funktion eine Darstellung als Prony-Reihe. Diese Darstellung entspricht einem verallgemeinerten Kelvin-Voigt-Modell mit n Prony-Termen.

$$J(t) = J_0 + \sum_{i=1}^n b_i \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}\right) + \frac{1}{\eta} \cdot t$$

Hierin heißen die Parameter τ_1, \dots, τ_n Retardationszeiten und b_1, \dots, b_n Retardationsstärken. Die Parameter lassen sich mittels Optimierung ermitteln, beispielsweise durch Minimieren der Fehlerquadratsumme. Auf diese Weise lässt sich die experimentell ermittelte Masterkurve $J(t)$ durch eine analytische Funktion/Prony-Reihe $J(t)$ approximieren.

3 Relaxieren und Relaxationsfunktion $G(t)$

Relaxieren bezeichnet die zeitliche Abnahme der Spannung $\sigma(t)$ bei konstanter Verzerrung ϵ . Im Relaxationsversuch wird eine Materialprobe in eine Prüfmaschine eingebaut und zum Zeitpunkt $t_0=0$ spontan gereckt. Die Verzerrung $\epsilon_{xx} = \epsilon_0$ ist konstant. Die Spannung $\sigma(t) = \frac{F(t)}{A}$ folgt aus der Prüfkraft $F(t)$ und der Probenquerschnittsfläche A .

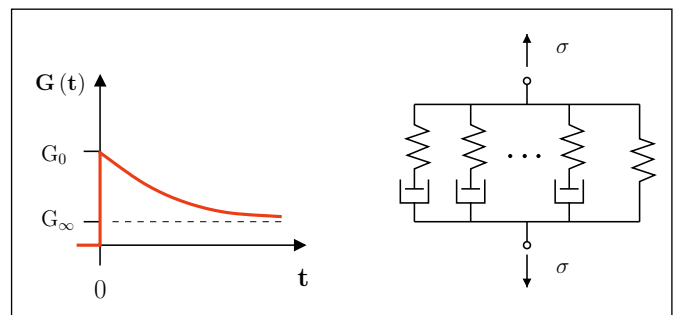


Abbildung 6: Relaxationsfunktion und Maxwell-Modell

Die Relaxationsfunktion $G(t)$ ist eine nicht-negative, streng monoton fallende Funktion. Der rechtsseitige Grenzwert der Relaxationsfunktion für $t \rightarrow +\infty$ heißt Momentanwert des Schubmoduls G_0 . Die Funktion $G(t)$ besitzt eine Darstellung als Prony-Reihe, welche einem verallgemeinerten Maxwell-Modell entspricht

$$G(t) = G_\infty + \sum_{i=1}^n G_i \cdot e^{-\frac{t}{\lambda_i}}$$

mit den Relaxationszeiten $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ und den Relaxationsstärken G_1, \dots, G_n . Geeignete Parameter lassen sich wiederum mittels Optimierung bestimmen. Zunächst aber ist die Funktion $G(t)$ aus der Kriechfunktion $J(t)$ zu ermitteln.

4 Numerische Lösung

Die Funktionen $J(t)$ und $G(t)$ sind über das Superpositionsprinzip verknüpft, es gilt

$$1 = G_0 \cdot J(t) + \int_0^t \dot{G}(t - \xi) \cdot J(\xi) \, d\xi \quad (*)$$

Durch Einsetzen von $t=0$ und weitere Betrachtungen [3] erhält man Relationen im Zeitbereich:

$$G_0 = \frac{1}{J_0} \quad \text{und} \quad J(t) \cdot G(t) \leq 1$$

Die Momentanwerte J_0 und G_0 sind reziprok. Die Funktionswerte $J(t)$ und $G(t)$ an der Stelle t sind i. A. nicht reziprok, es gilt lediglich die Ungleichung $J(t) \cdot G(t) \leq 1$. Eine

Gleichung erhält man durch Laplace-Transformation von (*) und den Faltungssatz. Im Laplace-Raum gilt

$$\mathcal{L}\{J(t) * G(t)\} = \mathcal{L}\{J(t)\} \cdot \mathcal{L}\{G(t)\} = \frac{1}{s^2}$$

Durch Rücktransformation erhält man eine weitere Beziehung im Zeitbereich, welche zur Kontrolle der numerischen Lösung verwendet wird. Für die Faltung der Funktionen J(t) und G(t) gilt

$$J(t) * G(t) = \int_0^t J(\xi) \cdot G(t - \xi) d\xi = t$$

Die Idee zur Berechnung einer numerischen Lösung von G(t) geht von der Integralgleichung (*) aus. Zunächst wird der Zeitbereich diskretisiert, beginnend bei $t_0=0$. Die Funktion G(t) wird durch einen linearen Spline angenähert mit Werten G_j und Steigungen \dot{G}_j an den Stützstellen t_j mit $j=0, \dots, n$.

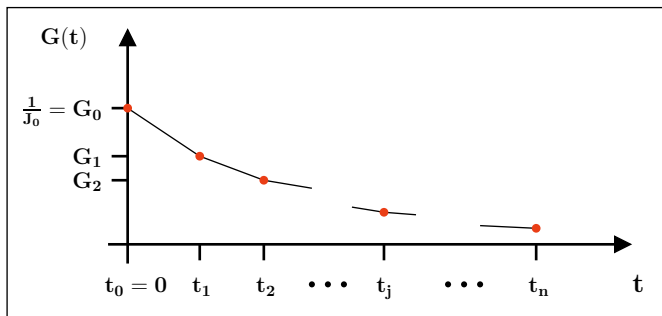


Abbildung 7: Linearer Spline

Auf den Teilintervallen der numerischen Lösung ist die Zeitableitung \dot{G} jeweils konstant und kann deshalb als Konstante aus dem Integral herausgezogen werden. Damit folgt die Steigung \dot{G}_0 zu

$$\begin{aligned} 1 &= G_0 \cdot J(t_1) + \int_0^{t_1} \dot{G}(t_1 - \xi) \cdot J(\xi) d\xi \approx \\ &\approx G_0 \cdot J(t_1) + \dot{G}_0 \cdot \int_0^{t_1} J(\xi) d\xi \\ \Rightarrow \dot{G}_0 &= \frac{1 - G_0 \cdot J(t_1)}{\int_0^{t_1} J(\xi) d\xi} \quad \text{mit} \quad G_0 = \frac{1}{J_0} \end{aligned}$$

Analog folgen

$$\dot{G}_j = \frac{1 - G_0 \cdot J(t_{j+1}) - \sum_{k=0}^{j-1} \dot{G}_k \cdot \int_{t_{k+1}}^{t_{j+1}} J(\xi) d\xi}{\int_{t_0=0}^{t_{j+1}-t_j} J(\xi) d\xi}$$

für $j = 1, \dots, (n-1)$

Mit den so berechneten Steigungen \dot{G}_j folgen schließlich die Werte G_j des linearen Splines zu

$$G_0 = \frac{1}{J_0}$$

$$G_j = G_{j-1} + \dot{G}_{j-1} \cdot (t_j - t_{j-1}) \quad \text{für } j = 1, \dots, n$$

5 Finite-Elemente-Simulation des Kriechversuchs

Die numerische Näherungslösung von G(t) wird mit einer Prony-Reihe approximiert, siehe Abschnitt 3. Diese Prony-Reihe kann im Rahmen der Finite-Elemente-Methode (FEM) verwendet werden, um reines Kriechen, reines Relaxieren oder kombiniertes Kriechen/Relaxieren an Tragwerken/Bauteilen zu simulieren. Zur Überprüfung der gefundenen Lösung wird abschließend der Kriechversuch bei der Normalspannung $\sigma_0 = 9,9$ MPa und Temperatur $T=20$ °C simuliert.

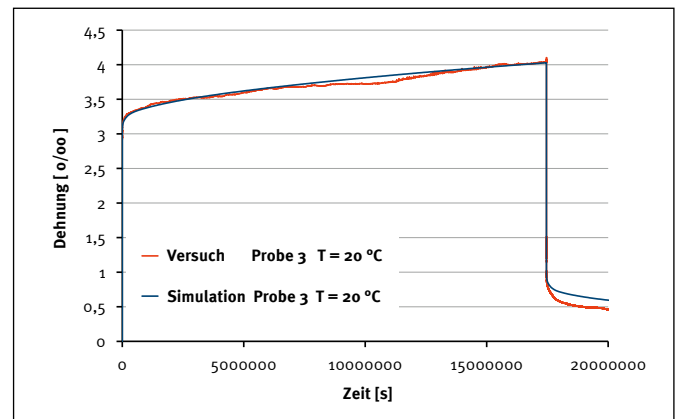


Abbildung 8: Finite-Elemente-Simulation

Der Verlauf der Dehnung ε_{xx} wird im Wesentlichen zutreffend simuliert. Größere Abweichungen von Versuch und Simulation treten im Bereich der Rückstellung auf. Hierbei ist zu beachten, dass die Simulationsergebnisse insbesondere von der Querdehnzahl ν abhängen. Diese wird in der Simulation als konstant angenommen und entspricht der spontan-elastischen Querdehnzahl ν_0 bei Lastaufbringung zum Zeitpunkt $t_0=0$. Tatsächlich ist die Querdehnzahl aber nicht konstant, sie nimmt mit der Dauer der Belastung zu.

Referenzen:

- [1] Flügge W., Viscoelasticity, Springer 1975
- [2] Williams M. L., Landel R. F., Ferry J. D., The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids, Journal of the American Chemical Society 1955
- [3] Schwarzl F. R., Polymermechanik, Springer 1990

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

KARRIERE- ROCKER

OTH PROFESSIONAL

Berufsbegleitende Weiterbildung
auf Hochschulniveau

Studium // Kurse // Zertifikate



Jetzt weiterkommen unter
oth-professional.de



Ostbayerische Technische Hochschule
Amberg-Weiden

SGW

STADTBAU
WEIDEN GMBH



gp-2.com

ZUHAUSE IN WEIDEN

Leibnizstraße 4 | 92637 Weiden | Tel.: 0961 389 04 - 0 | www.sgw-weiden.de

Ammonium removal from nutrient rich wastewaters with a microporous-hydrophobic membrane process

Marc Herden, M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Franz Bischof

Zusammenfassung

Mithilfe eines Membrankontaktors können ammoniumhaltige Abwässer selektiv gereinigt werden und das Ammonium als Ammonium-Düngesalz besser lagerfähig gemacht werden. Ein solcher Membrankontaktor wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts zur nachhaltigen Nutzung von Sekundärdüngemitteln speziell für die Verwendung mit Biogasgärresten entwickelt und verschiedene Modulgeometrien miteinander verglichen. Aufgrund des niedrigen elektrischen Energiebedarfs von 0.7 kWh/kg rückgewonnen Ammonium und der Tatsache, dass keine thermische Energie für das Aufbereitungsverfahren benötigt wird, stellt das Membranverfahren eine Alternative zu bisherigen Aufbereitungsverfahren da.

Abstract

With the aid of a membrane contactor, wastewater containing ammonium can be selectively purified and ammonium can be more easily stored as an ammonium fertilizer salt. This membrane contactor was developed specifically for use with biogas digestate as part of a research project on the sustainable use of secondary fertilizers, and various module geometries were tested against each other. Due to the low electrical energy demand of 0.7 kWh/kg recovered ammonium and the fact that no thermal energy is required for the upgrading process, the membrane process represents an alternative to previous upgrading processes, which require large amounts of thermal energy.

1 Introduction

Rising nitrate concentrations in surface and groundwater have been a widely recognized problem for decades. 17% of all groundwater monitoring stations in Germany [1] and 14.1% of all European groundwater bodies are currently polluted with nitrate concentrations above 50 mg/l. In this context, agriculture has a significant contribution to nitrogen inputs into surface and groundwater bodies. On average, of the 14 EU countries that provided data from 2016-2019, 77% of all nitrogen inputs to the environment came from agricultural sources. In Germany the input levels are currently at 75% and have stagnated at high levels over the last three periods of data acquisition. [2, pp. 3-5] A substantial part of the nitrogen surplus derives from livestock farming and the use of digestate from biogas plants as field fertilizers. In Germany 200 million tonnes of these agricultural residues are currently produced. Though these are suitable as fertilizers with their organic content and a considerable amount of nutrients, there are

certain problems with these farm fertilizers. In particular, the limitation of the application rate for organic fertilizers to a maximum of 170 kg N per hectare and year according to the Fertiliser Directive and the nutrient surpluses in certain regions with high production volumes make it necessary to process farm manure in such a way that it remains relevant as a sustainable alternative to mineral fertilizers produced via the very energy-intensive Haber-Bosch process. In addition, the high-water content, fluctuating nutrient contents and pH-related ammonia losses during application mean that treatment of manure and digestate is becoming increasingly attractive for farmers. [3, p. 1, pp. 4-5] For this reason, the research project "Sustainable use of secondary fertilizers from biogas-plants" is developing a treatment concept for nitrogen removal and fixation as a reusable, high-dosage and easy-to-handle fertilizer.

2 The basics of the membrane contactor

Membrane contactors represent a relatively new method for the selective removal of target substances. With their help, liquid-liquid extractions/absorptions can be carried out in a much more compact and straight forward membrane process. The basic principle is to use a porous membrane with suitable surface & structural properties as a boundary layer between two mutually miscible phases. In contrast to typical membrane applications, a membrane contactor doesn't utilize a specific selectivity for a molecule to achieve the mass transfer between two solutions, but instead prevents the two phases from mixing with each other. For this reason, it is necessary to use a hydrophobic membrane for two water-based liquids. This way, the membranes pores remain air-filled and can be used for a gas transfer.

To remove nitrogen from a wastewater like digestate, the nitrogen must be present in the form of ammonium (NH_4), so it can be transferred across the membrane in the subsequent process. Typically, a large part of the nitrogen load (>60%) in agricultural wastewaters is in the form of NH_4 . Ammonium is the nitrogen form of choice, because it offers the unique characteristic of being in a constant equilibrium with the gaseous molecule ammonia (NH_3). This equilibrium of NH_4 and NH_3 is a function of the temperature and the pH-value. At higher pH-values (above 9.5) and temperatures, the equilibrium shifts towards NH_3 . The transport across the membrane does not occur by means of the concentration difference of NH_4 between the two solutions, but driven by the partial pressure difference of NH_3 . This way, ammonia gas diffuses from the ammonium rich wastewater to the other side of the membrane, where it is absorbed by an acidic solution and converted back to NH_4 . This allows ammonium to be concentrated in the acid solution. To ensure, that the mass transfer is both efficient and effective, a free NH_3 percentage above 90% is targeted. The most effective way to accomplish this is to raise the pH of the feed solution. [4, pp. 61-62]

The applicability of membrane contactors for the removal of nitrogen compounds from wastewater has already been demonstrated in a number of publications. However, experiments have relied on commercially available hollow fibre membrane modules, when investigating wastewaters rich in solids and nutrients. While the high surface to volume hollow fibre membrane contactors are more compact, these benefits are only usable in applications, where the wastewater isn't of high strength in terms of dry matter, because this causes severe membrane fouling. For this reason, it was chosen to develop a membrane contactor with flat sheet membranes.

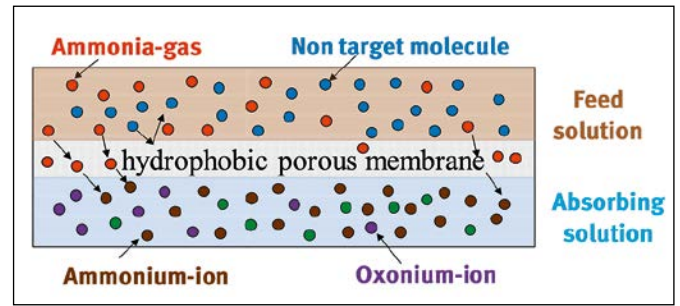


Figure 1: Illustration of the ammonia mass transfer in a membrane contactor

3 Materials and methods

3.1 Calculation of performance parameters

To quantify the performance of a membrane contactor, it is necessary to determine the overall mass transfer coefficient k_{ov} . The mass transfer coefficient is calculated via a mass balance around the feed tank under the assumption of no free ammonia on the acid membrane side and a constant feed volume [5, pp. 5–6][6, p. 42]

$$V_{feed,t} \cdot \frac{dc}{dt} = -k_{ov} \cdot A_{membrane} \cdot c_{\text{NH}_3,feed,t}$$

Sorting the variables and setting the integration limits from $t=0$ to $t=t$, we get:

$$V_{feed,t} \cdot \int_{c_{t=0}}^{c_{t=t}} \frac{dc}{c_{\text{NH}_3,feed}} = -k_{ov} \cdot A_{membrane} \cdot \int_{t=0}^{t=t} dt$$

After integration and rearrangement, the mass transfer coefficient k_{ov} is defined as:

$$k_{ov} = \frac{V_{feed}}{A_{membrane} \cdot t} \cdot \ln\left(\frac{c_0}{c_t}\right)$$

This allows the mass transfer coefficient to be calculated by measuring the ammonium concentration, the pH and temperature of the feed solution. These three parameters are needed to obtain the concentration of free ammonia with the following formula [7]:

$$c_{\text{NH}_3} = \frac{0.94412 \cdot c_{\text{NH}_4}}{1 + 10^{pK_a - \text{pH}}}$$

and the pK_a can be calculated by:

$$pK_a = 0,0925 + \frac{2728,795}{t + 273,15}$$

This mass transfer coefficient is important because it can be used to judge the efficiency of mass transfer under certain operating conditions and to simulate the membrane process. The mass transfer coefficient k_{ov} is given in m/h.

3.2 Experimental setup and procedure of the membrane contactor

For the experiments, a self-designed membrane module with three different geometries was produced. The first

module geometry is fitted with 4 mm high strakes, which were placed at a distance of 15mm from each other. These allow horizontal flow guidance for improved hydraulic loading of the module corners. The second and third module geometry is based on a structure studied by Liu et.al to increase the membrane shear rate for microfiltration applications. [8, p. 30] The adapted structure consists of a series of 15 rectangular triangles with 2- or 3-mm height, which are located between the five horizontal strakes. The structures were fabricated with the aid of a 3D-printer (modules in Figure 2).

The hydrophobic polyethersulfone membrane with a nominal pore size of 0.2µm employed for the experiments was purchased from Sartorius Stedim Biotech. The feed fluids used for the experiments were microfiltered biogas digestate with 2 to 3 g/l and a synthetic ammonium chloride solution with an ammonium mass concentration of 3 g/l, respectively, while the absorbent was a 1-molar sulfuric acid. To reach the desired pH-value of 11, 19-molar NaOH was added as needed. While the tests with the synthetic solution were carried out with 0.25 litre feed and absorbent solution over a run time of one hour, the tests with filtered digestate were carried out with 1 litre feed liquid and 0.25 litre of absorbent solution over four hours. Both solutions (feed and absorbent) were circulated through the modules at 800 ml/min using a centrifugal pump (Rotek WPDC-04.5L-3.1M-12). For the 1-hour experiments, a sample was taken every 15 minutes, while for the digestate experiments, a sample was taken hourly. The ammonium concentration in all samples was determined by UV-Vis spectrometry (Hach-Lange LCK 303) using the indophenol blue method. All results presented were determined in triplicate and are reported with their respective confidence interval for a 95% confidence level based on a Student's t-distribution.

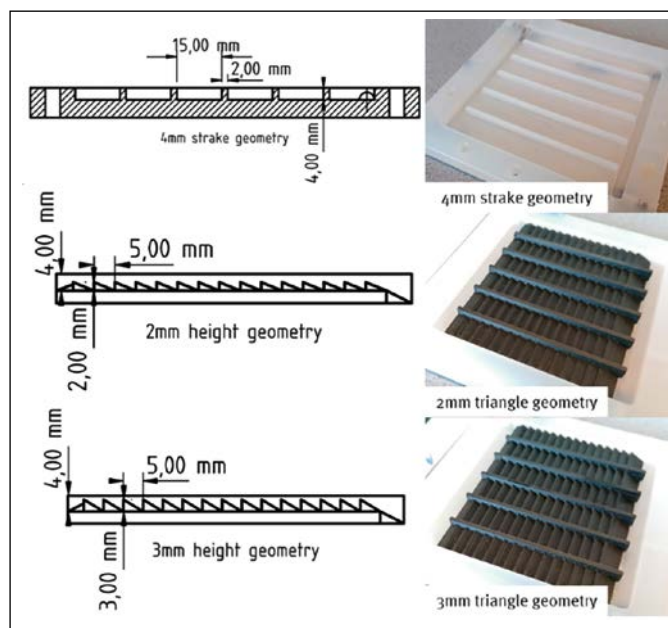


Figure 2: Technical drawings (left) and manufactured modules (right)

4 Results

Comparing the mass transfer coefficients of the three different module geometries presented earlier, some different trends can be observed, depending on the feed liquid used.

feed liquid	mass transfer coefficient in $\cdot 10^{-3}$ m/h		
	4mm strake	2-5 triangle geometry	3-5 triangle geometry
k_{ov} synthetic solution	58.2 ± 2.1	61.9 ± 1.8	63.0 ± 1.6
k_{ov} digestate filtrate	54.1 ± 2.4	50.4 ± 1.6	62.5 ± 0.8

Figure 3: experiment results for synthetic ammoniumchloride and microfiltrated digestate as feed liquids

When operated with a synthetic ammonium solution, both geometries with a triangle turbulator structure integrated perform measurably better than the more 4mm strake module, but only with a medium performance boost of around 8% (3–5 geometry) and 6%. (2–5 geometry) Since no particle layers can form on the surface in the synthetic solution, the differences that can be quantified are due to the better shearing on the surface of the membrane. Looking at the results of the fermentation residue measurements, a distinctly different picture appears. Both the 4mm strake and the 2–5 triangle geometry are affected by a loss of performance in the nutrient rich wastewater, whereby this is particularly pronounced for the 2–5 geometry with 23%. As a consequence, the performance is now even slightly below the simplest module geometry. After opening the modules after the experiments, a build-up layer of particles (so called membrane-fouling) has been found in the area between each strake. This fouling appeared in very similar fashion on the both membrane modules mentioned. In contrast to the other two modules, the performance of the 3–5 triangle geometry was not affected by the use of digestate filtrate as feed solution. Also, when looking at the membrane surface, a significantly lower deposit formation was observed than with the other modules. Overall, the use of this module geometry results in 15% and 24% better mass transfer coefficients than the first and second geometry, respectively.

A typical slope of the ammonium concentration in an experiment is presented in Figure 4 and is compared to the simulation results for the same experiments. It can be found that the simulation based on equation 1 creates a great representation of the experimental data when the mass transfer coefficient is set to a static value, calculated as an average over the experiment time. Sizing a membrane contactor for a biogas plant, which produces 10.000 m³ of digestate each year (equivalent to 1 m³/h) with the current performance level and 90% NH₄ removal, the minimum needed membrane area is 35m². When assuming a price of 50–100 €/m² and a durability of at least one year, the specific membrane costs are 0.21–0.41 €/m³ digestate. Performing the other economic calculations

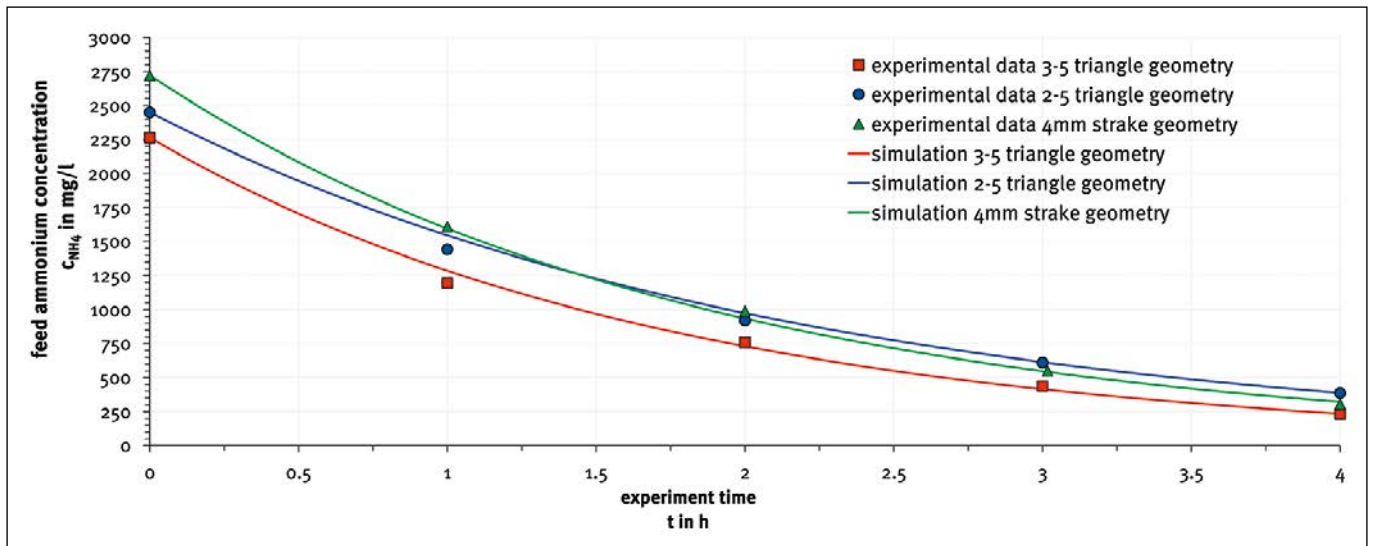


Figure 4: experimental data for the feed ammonium concentration in digestate filtrate over the experiment time plotted over the simulated slope of these experiments

for the energy needed (0.7 kWh per kg NH_4 recovered, 2.1 kWh per m^3 digestate treated, energy price: 0.27€/kWh) and for the chemicals needed (sulfuric acid and sodium hydroxide: 300€/t) the specific treatment price currently is 2.1€ per kilogram of ammonium recovery from the digestate, not considering the value of the recovered ammonium for the farmer. When comparing the energy demand with the competing processes of air stripping (operating temperature: 50 to 70°C, pH-value 8–10) and vacuum stripping (absolute pressure of 0.3 bar, temperature: 80°C) it can be found, that the electrical energy demand of the air- and vacuum stripping is in the same magnitude. (air stripping: 1.5–1.8 $\text{kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$, vacuum stripping: 2.8–3.5 $\text{kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$) The greatest competitive advantage of the membrane contactor becomes apparent when thermal energy requirements are considered. While the contactor requires no thermal energy, the thermal energy requirement of air stripping is 8–10 kWh/m^3 and that of vacuum stripping is 40–45 kWh/m^3 . [9, p. 146] This makes the membrane contactor a very attractive option, when the needed thermal energy is not easily and cheaply available.

5 Conclusion

Membrane contactors represent a novel, highly efficient solution for the recovery of volatile molecules from wastewater and can be used to return the reactive nitrogen to the nitrogen cycle as ammonium fertilizer with low energy requirements. Among the investigated module geometries, the version with the 3mm triangles is the most efficient. When sizing a membrane contactor for a representative biogas plant with a wastewater production of 10,000 m^3 per year, about 35 m^2 membrane area is required for an NH_4 removal rate of 90% with a specific energy demand of 0.7 kWh/kg NH_4 . The process costs for the current process are 2.1 € per kg NH_4 recovered, when all variable costs (membrane, energy demand, chemicals) are considered.

References:

- [1] Umweltbundesamt, FAQs zu Nitrat im Grund- und Trinkwasser. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/grundwasser/nutzung-belastungen/faqs-zu-nitrat-im-grund-trinkwasser#was-ist-der-unterschied-zwischen-trinkwasser-rohwasser-und-grundwasser> (accessed: May 20 2022).
- [2] European Commission, “Report from the commission to the council and the european parliament on the implementation of Council Directive 91/676/EEC concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources based on Member State reports for the period 2016–2019”, Brussels, Oct. 2021. Accessed: May 20 2022. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2021%3A1000%3AFIN&qid=1633953687154>
- [3] P. Weiland, Flaschenhals Gärrestverwertung. [Online]. Available: https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dno47034.pdf (accessed: May 23 2022).
- [4] M. Herden, „Entwicklung eines neuartigen Membranverfahrens zur Rückgewinnung umweltrelevanter Nährstoffe“, Masterarbeit, Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik, Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, Amberg, 2020.
- [5] E. L. CUSSLER, Diffusion: Mass transfer in fluid systems. Third Edition, 3rd ed. New York: Cambridge University Press, 2008.
- [6] Z. Shen, B. Han, and S. R. Wickramasinghe, “Cyanide removal from industrial praziquantel wastewater using integrated coagulation–gas-filled membrane absorption”, *Desalination*, vol. 195, 1-3, pp. 40–50, 2006, DOI: 10.1016/j.desal.2005.12.008.
- [7] G. Hobinger, „Ammoniak in Wasser: Ableitung einer Formel zur Berechnung von Ammoniak in wässrigen Lösungen“, 1996. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/BEo76.pdf>
- [8] J. Liu, Z. Liu, X. Xu, and F. Liu, “Saw-tooth spacer for membrane filtration: Hydrodynamic investigation by PIV and filtration experiment validation”, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 91, pp. 23–34, 2015, DOI: 10.1016/j.cep.2015.03.013.
- [9] Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, and umwelt.nrw.de, „Energie in Abwasseranlagen – Handbuch NRW“, 2018. [Online]. Available: https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/energie_abwasseranlagen.pdf (accessed: May 20 2022)

Acknowledgement:

The authors thank Prof. Dr. Ing. Emmel and his laboratory staff for the access to their 3d-printer and the help with setting up the 3D-prints.

Funding agency:

Bayerisches Staatsministerium für
Wissenschaft und Kunst



Kontakt:



Marc Herden, M.Eng.

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

ma.herden@oth-aw.de



Prof. Dr.-Ing. Franz Bischof

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

f.bischof@oth-aw.de

Klärschlammanalytik mit instrumentellen Methoden: GC/MS-Analytik mit Einzelionen- Monitoring

Dipl.-Phys. Christian Schell
Josef Schottenbauer, M.Eng.
Prof. Dr. Peter Kurzweil

Zusammenfassung

Im Klärschlamm finden sich unzählige flüchtige Verbindungen, die durch die Analytik der Einzelstoffe oder Stoffgruppen klassifiziert werden. Wir haben versucht, typische Fragmentationen aus Massenspektren mit übergeordneten Messwerten der Elementgehalte an Gesamtstickstoff, organischem Kohlenstoff und Schwefel zu korrelieren.

Abstract

In sewage sludge, countless volatile compounds are found, which are classified by the analysis of the individual substances or substance groups. We have attempted to correlate typical fragment ions from mass spectra with the measured values of the elemental contents of total nitrogen, organic carbon and sulfur.

1 Einleitung

Die Möglichkeit, Klärschlamm als Dünger auf landwirtschaftliche Flächen auszubringen, wurde europaweit in den letzten Jahren durch die Gesetzgebung stark eingeschränkt. Ein Großteil der kommunalen Klärschlämme geht in die thermische Entsorgung in Verbrennungsanlagen. Gleichzeitig sollen Ressourcen, vor allem Phosphor, aus Trockenmassen oder Aschen der Klärschlammverbrennung zurückgewonnen werden. Die Verbrennung und Ressourcenrückgewinnung und bereits der Transport des Klärschlammes setzen einen vorgelagerten Trocknungsprozess voraus, der oftmals Anlass zu unerwünschten Geruchsemissionen geben kann.

Für die Optimierung des Trocknungsprozesses und die Charakterisierung der Klärschlammbeschaffenheit spielen verschiedene Parameter eine wichtige Rolle. Zu den in Tabelle 1 dargestellten Messmethoden geht es in diesem Beitrag speziell um die Auswertung flüchtiger Komponenten (VOC) mit der Gaschromatografie-Massenspektrometrie-Kopplung (GC/MS).

Tabelle 1: Methodenübersicht zur Klärschlammanalytik

Parameter	Analytische Methoden
Trockenrückstand (TR)	Restmasse nach Abdampfen des Wassers (24 h bei 110 °C)
Organischer Trockenrückstand (OTR)	Restmasse nach dem Erhitzen (3 h bei 550 °C)
pH-Wert	Teststreifen oder Glaselektrode
Schwefelgehalt	Elementanalytik mit ICP-OES
Ammoniumstickstoff	NH ₃ -selektive Gasmembranelektrode
Gesamtstickstoff (TKN)	Stickstoffbestimmung nach Kjeldahl
Extrahierbare lipophile Stoffe	Massenverlust nach Soxhlet-Extraktion
Flüchtige organische Stoffe	GC-MS nach Festphasenmikroextraktion (SPME)

2 Chromatografie mit Festphasenextraktion

Schlammproben aus verschiedenen Kläranlagen aus Europa und den USA wurden im Labor mit verschiedenen instrumentellen Verfahren analysiert und charakterisiert. Die flüchtigen organischen Stoffe wurden mit dem neuartigen Verfahren der SPME-GC/MS-Analyse im Dampfraum der Probe analysiert. Die Klärschlammproben wurden in Probenfläschchen mit Septum gefüllt und über mehrere Stunden bei einer definierten Temperatur im Trockenschrank gelagert. Dabei sammeln sich die flüchtigen Komponenten über den eingewogenen Feststoffproben an und können aus dem Gasraum mittels eines polymeren Absorptionsmittels extrahiert werden. Das dampfförmige Gemisch wird im Gaschromatografen aufgetrennt und die einzelnen Komponenten mit Massenspektrometrie identifiziert (Abbildung 1).

Mit Rücksicht auf Verunreinigungen und die Funktionsfähigkeit der Analysengeräte ist es unmöglich, Klärschlämme direkt in die GC/MS-Kopplung einzuspritzen. Abbildung 2 verdeutlicht das Vorgehen der Festphasenmikroextraktion (solid phase microextraction, SPME): Im gasdichten Gefäß verdampfen beim Erwärmen die leicht flüchtigen Probenbestandteile. Nach Einstellung der Phasengleichgewichte wird mit der Nadel des SPME-Faserhalters das Septum des Probengläschens durchstoßen. Die SPME-Faser ist mit einer stationären Phase beschichtet, in der die flüchtigen Stoffe absorbieren. Die Faser wird im Dampfraum über der Probe freigelegt und die flüchtigen Stoffe reichern sich im Sorbens an. Nach einiger Zeit wird die Faser in die Nadel des Faserhalters zurückgezogen und in den Gaschromatografen transferiert. Im Injektor desorbieren die Stoffe aus der Faser bei einer Temperatur von 250 °C auf die Chromatographiesäule.

Abbildung 3 zeigt das gemessene Gaschromatogramm einer typischen, aus dem Dampfraum extrahierten Klärschlammprobe. Die zahlreichen Banden stehen für einzelne Verbindungen und verdeutlichen die grundsätzlich komplizierte Zusammensetzung biogener Proben. Die routinemäßige Auswertung der Signale nach der Retentionszeit, Peakfläche und ein Abgleich der gemessenen Massenspektren mit einer Datenbank führt zur ungefähren Zusammensetzung der Probe aus über 150 verschiedenen Stoffen. Tabelle 2 listet die Zusammensetzung einer typischen Probe unterteilt nach Stoffgruppen auf. Getrockneter Klärschlamm enthält immerhin 14 % Schwefelverbindungen, die wesentlich die individuelle Geruchswahrnehmung der Probe prägen.

Aufgrund der Komplexität der Proben und der Vielzahl einzelner Verbindungen, die sich je nach Herkunft und Vorgeschichte der Klärschlämme unterscheiden, haben wir versucht, charakteristische Ionenspuren als eine Art Summenparameter für bestimmte Stoffgruppen einzuführen. Beispielweise ist die Masse m/z 91 typisch für

Benzylaromaten [1]. Hierzu werden aus dem Datensatz der Massenspektren die für bestimmte Stoffgruppen charakteristischen Massenfragmente betrachtet. Die Signalintensitäten der Fragmentationen (Single Ion Monitoring, SIM) werden ins Verhältnis zum Totalionenstrom (TIC) gesetzt, der alle Fragmente erfasst. Eine derartige Auswertung korreliert grob mit den nasschemisch ermittelten Elementargehalten für Kohlenstoff, Stickstoff und Schwefel (Tabelle 3).



Abbildung 1: Gaschromatograf mit Massenspektrometrie-Kopplung (GC-MS).

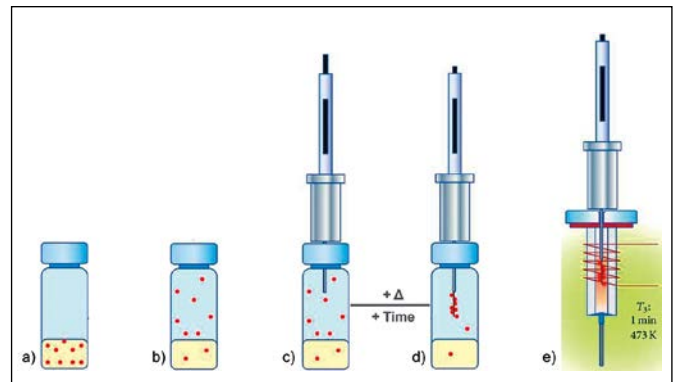


Abbildung 2: Funktionsprinzip Festphasenmikroextraktion (SPME)

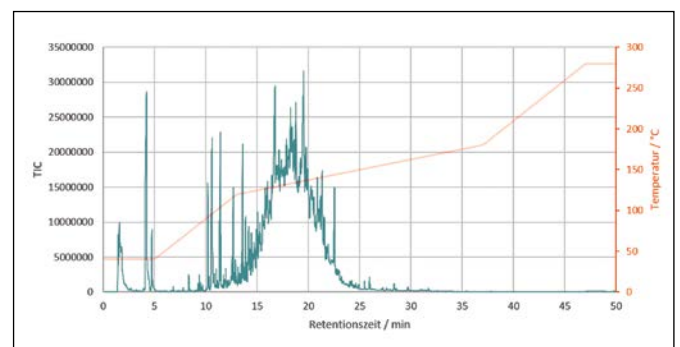


Abbildung 3: Headspace-Gaschromatografie: Im Dampfraum über einer Klärschlammprobe bei 84 °C ausdampfende Stoffe. TIC = Gesamtionenstrom. Rot: Temperatur der Trennsäule.

Tabelle 2: Zusammensetzung der aus einer Klärschlammprobe bei der Trocknung ausdampfenden Stoffe, unterteilt nach chemischen Stoffklassen.

Stoffgruppe	Anteil in %
Kohlenwasserstoffe	56.3
Aromaten	0.66
Alkohole	15.1
Aldehyde	0.36
Ketone	2.23
Ester	15.0
Amine	0.80
Furane	0.13
halogenhaltige Verbindungen	10.0
schwefelhaltige Verbindungen	14.0
siliciumhaltige Verbindungen	0.09
bromhaltige Verbindung	0.67

3 Schwefelanalytik mit ICP-OES

Zum Vergleich des Nährstoffgehalts von Schlammproben wird üblicherweise der Elementgehalt an Stickstoff und Schwefel mit nasschemischen und spektroskopischen Methoden bestimmt. Zur Schwefelbestimmung mittels Optischer Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) werden die Feststoffproben in einer Druckapparatur aufgeschlossen. In einer Mischung aus Salpetersäure und Wasserstoffperoxid (10 mL HNO₃ (65%) und 5 mL H₂O₂ (30%)) gehen die schwerlöslichen Stoffe der Klärschlammprobe in wasserlösliche Verbindungen über. Der Schwefelgehalt des verdünnten Aufschlusses wird anschließend bei etwa 10000 K in der Plasmaflamme bestimmt. Die optischen Übergänge des Schwefels liegen in der Nähe der Sauerstoffbanden, was die sichere Quantifizierung erschwert. Daher muss die optische Messzelle des ICP-OES-Spektrometers vor Beginn der Messung gründlich mit Stickstoff gespült werden, um Luftsauerstoff zu entfernen.

Tabelle 3: Zusammensetzung der aus einer getrockneten Klärschlammprobe ausdampfenden Stoffe: SIM Ionenspur, TIC Gesamtionenstrom

Stoffgruppen und charakteristische Fragmentmassen	Ionenstrom der charakteristischen Ionenspur (SIM-Intensität · 10 ⁹)					Summe SIM	SIM / TIC in %	SIM / Summe SIM in %
Alkane 85/71/57	2.29	3.39	4.20			9.89	17.0	38.6
Alkene 69/55/	2.75	2.94				5.69	9.76	22.2
Aromaten 77/65	0.321	0.0179				0.500	0.86	1.95
Benzyllderivate 155/91/65	0.132	0.339	0.179			0.650	1.12	2.54
Alkohole 31	0.0077					0.0077	0.01	0.03
Ether 59	0.0383					0.0383	0.07	0.15
C=O und Aldehyde 28/29	0.759	0.727				1.49	2.55	5.81
Carbonsäure 60/43	0.0149	2.31				2.33	4.00	9.10
Benzosäureester 123/122/105/77	0.502	0.0792	0.164	0.321		1.07	1.83	4.16
Phthalsäureester 149	0.124					0.124	0.21	0.49
Nitrile 27/65/92	0.313	0.179	0.0646			0.557	0.96	2.18
Nitroverbindungen 46/30	0.0086	0.0186				0.0272	0.05	0.11
N-Aromaten 92/65	0.0646	0.179				0.244	0.42	0.95
Indolderivate 144/143/130	0.00395	0.00922	0.0214			0.0346	0.06	0.14
Fluor 19/20	0.0140	0.002				0.0160	0.03	0.06
Chlor 35/37/36/38	0.00046	0.00805	0.00137	0.000155		0.0254	0.04	0.10
Brom 79/81	0.455	1.45				1.91	3.28	7.46
Iod 127	0.301					0.301	0.52	1.17
Schwefel 256/224/192/160/32	0.00208	0.230	0.0457	0.00528	0.207	0.490	0.84	1.92
H ₂ S- Derivate 32/33/34	0.207	0.00224	0.00380			0.213	0.37	0.83
Totalionenstrom (TIC)						–	58.2	25.6

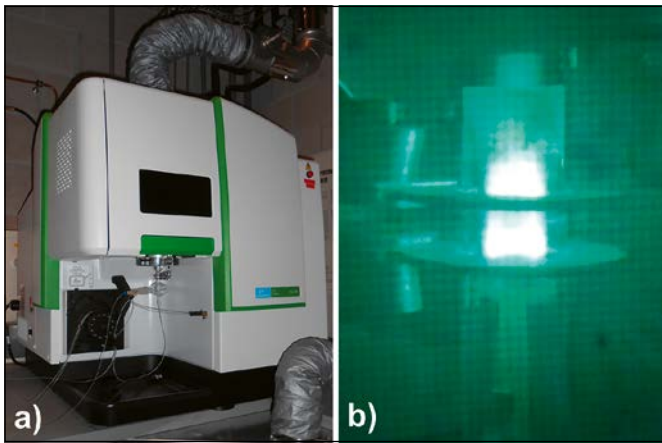


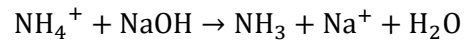
Abbildung 4: Elementanalytik mit ICP-OES. a) Optisches Emissionsspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma, b) Argonplasma-Fackel.

4 Ammonium-Stickstoff

Der Stickstoffgehalt eiweißreicher Lebensmittel und biogener Proben wird durch das Kjeldahl-Verfahren bestimmt, indem Wasserdampf in die schwefelsauer aufgeschlossene Probe eingeblasen und der ausgetriebene Ammoniak durch Säure-Base-Titration quantifiziert wird. Der erhebliche manuelle und zeitliche Aufwand des Verfahrens wird in kommerziellen Labors neuerdings durch das besser automatisierbare Verfahren der katalytischen Verbrennungsanalyse umgangen. Der Gesamtstickstoffwert (TN) umfasst die Summe der Gehalte aus Ammonium, Nitrat, Nitrit und organischen Stickstoffverbindungen. Beim Vergleich von Analysenberichten empfiehlt es sich also, auf die verwendeten Methoden und ihre Aussagekraft zu achten.

Für die Bestimmung des Ammonium-Stickstoff-Gehaltes in Klärschlammproben setzen wir mit Erfolg eine gas-

sensitive Elektrode ein [2]. Die eingewogene Probe wird in Wasser aufgeschlämmt und 32%ige Natronlauge zugegeben. Über ein Septum im Deckel des Gefäßes wird die NH_3 -Elektrode eingepasst und gasdicht verschlossen (Abbildung 5). Die zugesetzte Natronlauge treibt aus den Ammoniumverbindungen in der Probe quantitativ gasförmigen Ammoniak aus.



Durch die Polymermembran der ammoniumsensitiven Elektrode diffundiert Ammoniak aus dem Dampfraum über der Probe in die Messkammer der Elektrode, wo eine konzentrationsabhängige Potentialdifferenz gemessen wird. Vorteil der NH_3 -Elektrode ist der relative geringe Arbeitsaufwand im Gegensatz zum Kjeldahl-Verfahren. Auch muss die Elektrode nicht direkt in die Klärschlamm-lösung tauchen. Die Probe vermag in geringerem Umfang Laborgeräte zu verunreinigen und bakteriell zu kontaminieren.

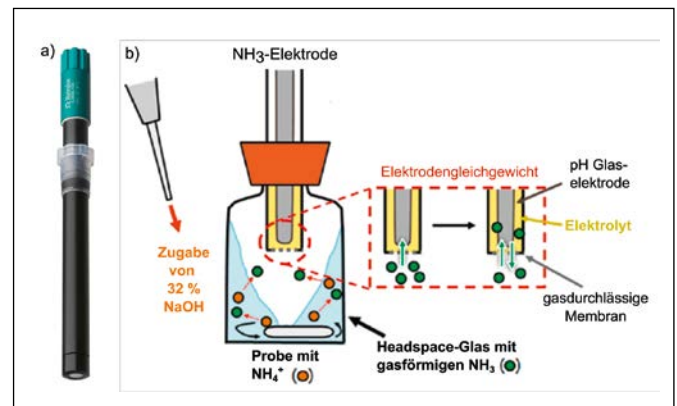


Abbildung 5: a) NH_3 -selektive Gasmembranelektrode von Metrohm, b) Messprinzip für Feststoffproben [1].

Referenzen:

- [1] P. Kurzweil, H. Hug, Tabellenbuch der analytischen Chemie: Stoffdaten, klassische und instrumentelle Methoden, Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten, 2017.
- [2] N. Zell, C. Schell, J. Schottenbauer, M. Herden, P. Kurzweil, The Electrochemical Nose – An Experimental Approach towards Automated Ammonium Determination, OTH-Forschungsbericht 2021.

Projektpartner:
Huber SE, Berching

Kontakt:



Dipl.-Phys. Christian Schell

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

p.kurzweil@oth-aw.de

Zusammenfassung

Die Herstellung und Charakterisierung von pH-sensitiven Elektroden ist ein zentrales Thema für die Elektroanalytik, Sensorik und Umweltchemie. In diesem Beitrag wird eine Methode zur Beschichtung von Titanfolien mit Rutheniumdioxid mittels Airbrush-Verfahren vorgestellt. Die Charakterisierung mittels Röntgendiffraktometrie, Mikroskopie und Cyclovoltammetrie liefert aufschlussreiche Hinweise für die Tauglichkeit in elektrochemischen Sensoren.

Abstract

The production and characterization of pH-sensitive electrodes is a central topic for electroanalytical chemistry, sensor technology and environmental chemistry. In this paper, a method for coating titanium foils with ruthenium dioxide by airbrushing is presented. Characterization by X-ray diffraction, microscopy and cyclic voltammetry provides insightful information for suitability in electrochemical sensors.

Vom Oxid zur Elektrode

Ionensensitive Platinmetalloxide spielen eine Rolle für künftige pH-Sensoren, die in aggressiven Medien, biogenen Resten und medizinischen Proben eingesetzt werden können. Die Herstellung der Elektrokatalysatoren und die Beschichtungstechnik haben großen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit und Linearität des Sensors. Im folgenden Beitrag wird eine Airbrush-Methode vorgestellt, die homogene Schichten des vielversprechenden Rutheniumdioxids auf Titanfolien verspricht.

Verwendet wurde die Airbrush-Pistole BD-182 von Fengda. Die Wahl des Lösemittels fiel auf Propan-2-ol (Siedepunkt: 82,2 °C) und Aceton (56,1 °C), die in früheren Arbeiten eine gute Löslichkeit der Rutheniumtrichlorid-Vorstufe (RuCl₃ · x H₂O) erbrachten [1, 2]. Es wurden jeweils 50 mg Rutheniumchlorid in 10 ml Lösemittel aufgelöst.

Als Träger wird hochreine Titanfolie verwendet, die auf 4 cm × 4 cm zugeschnitten und angeraut wird. Zum Besprühen werden die flach aufliegenden Folien mittels einer Vakuumpumpe in eine eigens dafür konstruierten

Vorrichtung gebracht (Abbildung 1). Nach Aufsprühen der Lösungen wird das Lösemittel bei 80 °C verdampft und anschließend das Aktivmaterial bei 500 °C unter Luftzutritt für zwei Stunden zu RuO₂ umgesetzt. Dieser Vorgang wird mehrmals wiederholt, um eine ausreichende Dicke der Aktivschicht herzustellen.

Propan-2-ol erwies sich bei wiederholten Versuchen als sehr träge und unregelmäßig verdampfbar. Dies führt stellenweise zur Anhäufung der RuCl₃-Vorstufe und somit zu inhomogenen Schichten.

Die fertig beschichteten Folien wurden nach dem Schema in Abbildung 2 auf 1 cm² große Elektroden zugeschnitten, mit einem Leitdraht verbunden, einer Glasröhre als Elektrodenschaft versehen und die nicht beschichtete Rückseite mit Epoxidharz versiegelt.

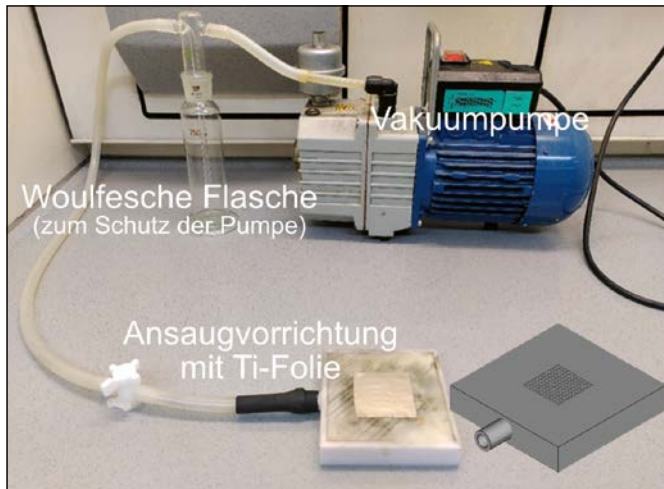


Abbildung 1: Beschichtungsvorrichtung für Titanfolien mit Airbrush-Technik.

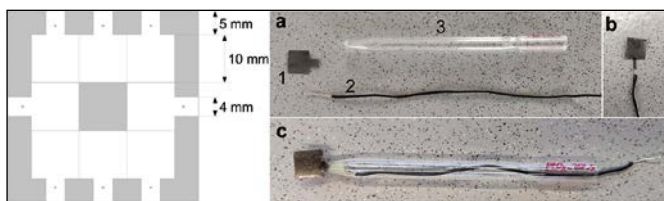


Abbildung 2: Links: Schema zum Entformen der Elektroden, Rechts: a, 1: Ausgeschnittene Elektrode, 2: Verbindungsdraht, 3: Elektrodenschaft (Glas), b: Kontaktierte Elektrode, c: Fertige Elektrode.

Optische Charakterisierung

Die Masse des abgeschiedenen Aktivmaterials, die auf den Titanfolien haftet, nimmt mit jedem Beschichtungsvorgang zu (Tabelle 1). Um mögliche Auswirkungen einer inhomogenen Beschichtung auf das elektrochemische Verhalten der Elektroden festzustellen, wurden jeweils drei Folien mit unterschiedlicher Anzahl von Beschichtungsdurchläufen hergestellt.

Nach jedem Beschichtungsdurchlauf wurden die Elektroden mittels optischer Mikroskopie (Leica DM750) auf Fehlerstellen untersucht. In Abbildung 3 fällt auf, dass sich bei der ersten Beschichtung keine durchgängige Schicht bildet. Die Rutheniumdioxid-Kristalle erscheinen bläulich-schwarz. Metalloxydinseln befinden sich vermutlich in den Vertiefungen der aufgerauten Oberfläche. Ab dem zweiten Durchlauf ist ein moderates Schichtwachstum zu sehen. Unvollständig beschichtete Stellen erscheinen gelblich.

Tabelle 1: Beschichtungsmasse des Aktivmaterials (RuO_2) auf Titanfolie nach 1 bis 6 Beschichtungsdurchläufen.

Probe	Belegung mit Rutheniumdioxid mg					
	1	2	3	4	5	6
1:	1.1	–	–	–	–	–
2:	1.3	2.0	3.1	–	–	–
3:	1.2	2.2	3.4	4.0	5.3	5.9

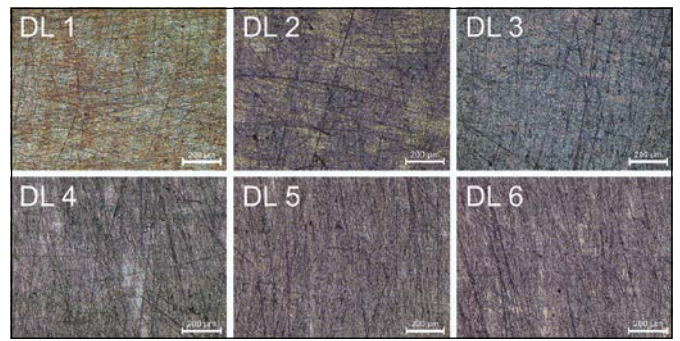


Abbildung 3: Mikroskopaufnahmen von RuO_2/Ti -Elektrodenoberflächen nach 1 bis 6 Beschichtungsdurchläufen, 10-fach vergrößert.

Kristallite im Röntgenbild

Mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) wurde das Schichtwachstum des kristallinen Rutheniumdioxids verfolgt (Abbildung 4). Zum Vergleich mit den gemessenen Spektren dient eine unbeschichtete Titanfolie, die der gleichen Temperaturbehandlung unterzogen wurde und eine hauchdünne TiO_2 -Passivschicht ausbildet. TiO_2 und RuO_2 besitzen eine Rutil-Kristallstruktur, sind aber anhand der in Datenbanken hinterlegten Parameter der Elementarzelle unterscheidbar. Sie bilden auch Mischkristalle, was die Haftung der Aktivschicht verbessert. Auffällig sind jedoch laut Spektrendatenbank Signale für Rutheniummetall (bei 42° und 44°), was auf ein Ruthenium-Rutheniumdioxid-Gemisch in der Aktivschicht hindeutet.

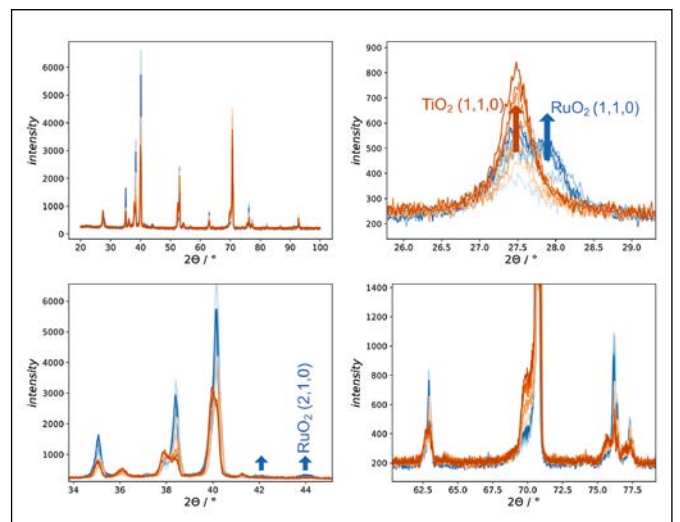


Abbildung 4: XRD-Spektren von RuO_2/Ti -Elektroden und vergrößerte Ausschnitte (rechts). Braun: Titanfolie ohne Beschichtung mit Temperaturbehandlung. Blauschwarz \rightarrow Blau: Rutheniumdioxid auf Titan mit steigender Beschichtungszahl.

Aus den Signalspitzen des Röntgendiffraktogramms kann mithilfe der Scherrer-Gleichung die mittlere Größe der Kristallite L in senkrechter Richtung zur Gitterebene berechnet werden, was für weniger als 100–200 nm kleine Partikel gilt. In Gleichung (1) ist der Scherrer-Faktor mit $K = 1$ angenommen, die Wellenlänge des Röntgenstrahls im Falle des verwendeten Kupfertargets des Rigaku-MiniFlex 600-Spektrometers beträgt $\lambda = 0.15405293$ nm.

Tabelle 2: Peakpositionen und Halbwertsbreiten (in °), Intensitäten (Peakhöhen) und Kristallitgrößen für RuO₂.

Folie	RuO ₂ (1,1,0)				Ru (0,0,2)				Ru (1,0,1)			
	2θ	Γ	Int.	L / nm	2θ	Γ	Int.	L / nm	2θ	Γ	Int.	L / nm
1 (1×)	27.9	0.2	16	45	42	0	0.7	–	44.2	0.3	9	32
2 (3×)	28.0	0.28	73	32	42.1	0.2	17	47	43.9	0.19	40	50
3 (6×)	28.0	0.33	163	28	42.0	0.29	19	33	44	0.44	77	22

Γ ist die Halbwertsbreite und θ die Winkelposition des Röntgenreflexes [3, 4, 5].

$$L = \frac{K \cdot \lambda}{\Gamma(\Delta 2\theta) \cdot \cos(\theta)} \quad (1)$$

In Abbildung 4 überlagern sich aufgrund der Rutilstruktur die meisten Peaks von RuO₂ und TiO₂. Die Signalintensitäten sind auf der Rutheniumdioxid beschichteten Folie größer, da sich die Reflexe von RuO₂ und TiO₂ addieren. Für die Analyse der Kristallitgröße werden Peaks benötigt, die möglichst eindeutig dem gesuchten Material zugeordnet werden können. Geeignet für RuO₂ sind dabei die Peaks bei 42°, 44° und 28°, wobei bei letzteren die Überlagerung durch einen Kurvenfit mit Voigt-Profilen herausgerechnet werden muss. Die Kristallitgröße der Ruthenium-Beschichtung bewegt sich zwischen 20 nm und 50 nm (Tabelle 2).

Elektrochemische Eignung

Die nanokristallinen Aktivschichten sollen in einen Protonenaustausch mit unbekanntem Analytlösungen treten.

Um die Redoxaktivität der Schicht zu testen, wurden die Elektroden mittels Cyclovoltammetrie (Potentiostat SRS EC301) vermessen. Die untersuchte Elektrode wird als Arbeitselektrode (WE) gegen eine Silber-Silberchlorid Referenzelektrode (211 mV vs. NHE) und eine Platin-Gegenelektrode geschaltet und in 1-molarer Schwefelsäure vermessen. Die Rutheniumdioxid-Redoxpeaks sind bei allen Elektroden erkennbar. Die in Abbildung 5 dargestellten Kurven zeigen deutlich den Einfluss der Anzahl der Beschichtungsdurchläufe und somit die Masse des Aktivmaterials sowohl auf den Doppelschichtladestrom als auch die Faraday'sche Ströme.

Zum absoluten Vergleich der Redoxströme muss auf die aktive Elektrodenoberfläche bezogen werden. Eine Schätzung der wirksamen Elektrodenoberfläche S nach Gleichung (2) ergibt sich aus der elektrischen Ladung zur Absorption von Wasserstoff an RuO₂ durch Unterpotentialabscheidung (upd), bezogen auf einen theoretischen Literaturwert für den (1,0,0)-Einkristall.

$$S = \frac{Q_{\text{upd}}}{158 \mu\text{C cm}^{-2}} \quad (2)$$

In Abbildung 5 wird der Grundstrom durch die Doppelschichtkapazität subtrahiert. Übrig bleibt der durch die Redoxvorgänge verursachte Faraday'sche Strom, der dem Massenumsatz an Wasserstoff proportional ist [6]. Die elektrische Ladung wird durch Integration mit der Trapezregel berechnet.

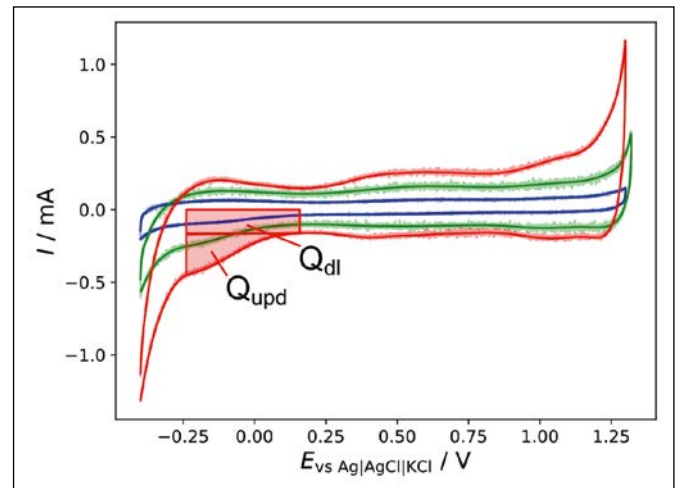


Abbildung 5: Cyclovoltammogramm von RuO₂/Ti-Elektroden mit einem (blau), drei (grün) und sechs (rot) Beschichtungsdurchgängen. Bezugslektrode: Ag|AgCl|KCl (211 mV vs. NHE), Gegenelektrode: Platinblech. Markierter Bereich: Doppelschicht- und Faraday-Ladung der Wasserstoffsorption.

Tabelle 3: Aus der Faraday'schen Ladung für die H₂-Unterpotentialabscheidung (upd) berechnete elektrochemisch aktive Oberfläche einer RuO₂/Ti-Elektrode. dl = Doppelschicht

Elektrode (Beschichtungen)	Q / μC	Q _{dl} / μC	Q _{upd} / μC	A / cm ²
1 (1×)	62.00	33.18	28.82	0.18
2 (3×)	146.78	94.79	51.99	0.33
3 (6×)	255.08	151.66	104.42	0.65

Ausblick

Durch die Airbrush-Methode mit Aceton als Lösemittel eröffnet sich eine einfache Möglichkeit, relativ homogene Beschichtungen zu erzeugen. Im mikroskopischen Maßstab überdeckt die Beschichtung das Titansubstrat vollständig. Die röntgenografischen Kristallitgrößen betragen 20–50 nm, wobei mit zunehmender Sinterzeit die Kristalle größer werden.

Die Cyclovoltammetrie bestätigt die erwarteten Redoxpeaks des Rutheniumdioxids. Die elektrochemisch aktive Oberfläche nimmt mit den Beschichtungsdurchläufen deutlich zu, ist allerdings in Summe verbesserungswürdig. Um die Elektrodenoberfläche besser auszunutzen, muss die Herstellung des Metalloxids überdacht werden. Die Protonenleitfähigkeit von RuO_2 beruht auf Sauerstoffdefekten, die mit zunehmender Sintertemperatur zugunsten eines perfekten Rutilgitters verschwinden.

Referenzen:

- [1] S. Chalupczok, P. Kurzweil, H. Hartmann, C. Schell, The Redox Chemistry of Ruthenium Dioxide: A Cyclic Voltammetry Study—Review and Revision, *International Journal of Electrochemistry*, 2018, 1–15.
- [2] Haynes, Lide, Bruno, CRC handbook of chemistry and physics, 95th ed., CRC Press, Boca Raton, 2014.
- [3] P. Scherrer, Bestimmung der Größe und der inneren Struktur von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen, *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, 1918.
- [4] G. N. Holzwarth, The Scherrer equation versus the 'Debye-Scherrer equation', *Nature Nanotechnology*, 2011, 6(9), 534.
- [5] W. Angford, Scherrer after Sixty Years: A Survey and Some New Results in the Determination of Crystallite Size, *J. Appl. Cryst.*, 1978, 11, 102–113.
- [6] Bard, Faulkner, White, *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Oxford, 2022.

Fördergeber:

Cluster IMCA



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



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



Christof Dinkelbach, B.Eng.

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

c.dinkelbach@oth-aw.de

Marc Herden, M.Eng.
Niklas Zell, M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Franz Bischof
Prof. Dr.-Ing. Christoph Lindenberger
Prof. Dr.-Ing. Werner Prell

Hydraulic characterisation of membrane modules via a newly developed colour analysis method

Zusammenfassung

Mithilfe einer selbstentwickelten Farbstoffimpuls-Methode zur Messung von hydraulischen Verweilzeiten in Membranmodulen mit niedriger, einstelliger Verweilzeit können unterschiedliche Strömungsverhalten visualisiert und quantifiziert werden. Die Auswertung der Aufnahmen erfolgte mittels eines Python Skripts auf Basis des Bildanalysetools OpenCV. Ein mathematisches Modell zur Beschreibung des Verweilzeitverhaltens anhand von Rührkesselkaskaden wurde dafür in Microsoft EXCEL auf die zuvor digitalisierte Verweilzeitdichtefunktion gefittet und ausgewertet. Beim Vergleich von drei Geometrien wurde festgestellt, dass die leistungsfähigste Modulgeometrie durch eine gleichmäßigere Auslastung und geringere Abweichung der Verweilzeiten von der theoretischen Verweilzeit besitzt.

Abstract

Using a self-developed dye pulse method for measuring hydraulic residence times in membrane modules with low, single-digit residence times, different flow behaviours can be visualised and quantified. The evaluation of the captured videos was carried out with the aid of a Python script based on the image analysis tool OpenCV. A mathematical model for describing the residence time behaviour based on stirred tank cascades was fitted to the previously digitised residence time density function and evaluated in Microsoft EXCEL. When comparing three geometries, it was observed that the most efficient module geometry has a more uniform utilisation and lower deviation of the residence times from the theoretical residence time.

1 Introduction

As nitrate concentrations in surface and groundwater remains a large problem in the European Union and the contribution of agricultural sources to this problem stagnate at very high levels (average across the European Union: 75%), an energy efficient solution to remove access reactive nitrogen from farmyard manures is needed. [1, pp. 3-5] For this reason, the research project „Sustainable use of secondary fertilizers from biogas-plants“ is developing a treatment concept for nitrogen removal and fixation as a reusable, high-dosage, and easy-to-handle fertilizer. For the nitrogen removal process, a selective membrane process, which transfers the molecule ammonium in gaseous form across the pores of the hydrophobic membrane, is used. After successfully measuring the processes performance with the help of the overall mass transfer coefficient for different module geometries, the

goal was to gain more insights into the flow structure in the constructed modules and use this information for further module geometry improvements. For this purpose, the flow through the modules was evaluated both optically and quantitatively.

2 Visual flow inspection in the module

To get a first visual impression of the flow through the different membrane module geometries, the module to be tested in each case is covered with a transparent 8mm PMMA sheet and is sealed with screw clamps. The module is continuously flushed with a centrifugal pump (Rotek 4.5L-3.1M-12). A 2ml fluorescein-sodium colour impulse (concentration: 300 mg/l) is added into the inlet of the module via a septum. This way, the flow of liquid can be monitored and the differences between specific geometries can be seen. While the inlet into the module

is on the top right side, the outlet is on the bottom left. An optimal flow would run across the full module width from top to bottom.

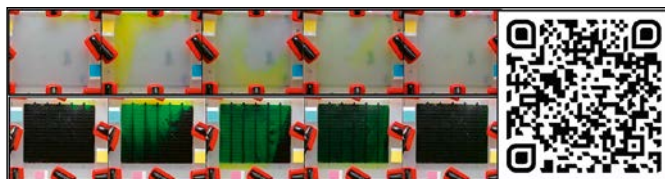


Figure 1: Comparison of two flow paths through a module without (top) and with flow conditioning and turbulence inducers (bottom) and QR-code with video samples of all module geometries (right)

When visually inspecting the flow structure of a module without flow conditioning, it can be observed that the liquid changes into a circular rotation instead of flowing from top to bottom. It can also be seen that the vortex is rotating around the middle point of the module, where it has a flow dead zone. In the modified module with the black 3D-printed insert for flow conditioning, the flow spreads much more evenly across the module's width. What can be observed, however, is the fact that the two rightmost conditioners are underutilised and a backflow to the inlet area of the module occurs via them. As a result, the membrane, which is normally located above the flow conditioners, is less utilised and the mass transfer in this position is less than optimal. Although visual observation of the flow in the modules reveals valuable information, quantification can be used to identify, when and how intensively the main front of the dye pulse reaches the outlet of the module and how far it deviates from the theoretical hydraulic residence time (HRT).

3 Method for hydraulic residence quantification

3.1 Hydraulic residence density function

Knowledge of the hydraulic behaviour is indispensable when it comes to the assessment of reactor designs in process engineering. While some molecules will reside in the reactor for a (maybe too) long time, others will leave the reactor relatively fast, and there are also many molecules between these two extremes, but this rather chaotic microscopic scale is impossible to analyse, let alone predict. Fortunately, these random processes result in macroscopic flow patterns which can be characterized by means of the residence time distribution. This curve shows the probabilities of how long a molecule will remain within the reactor system. In process engineering, there are 2 important ideal reactor concepts that resemble 2 limiting theoretical flow situations. On the one hand, there is the continuous stirred-tank reactor (CSTR) where the molecules entering the reactor are instantly and completely mixed with the fully homogenous reactor content. For the plug flow reactor (PFR) on the other hand, there is no mixing at all and therefore the molecules will pass through the reactor in a plug pattern. Hence, every

molecule has exactly the same constant residence time. In contrast, molecules in the CSTR can pass the reactor either directly in a short-circuit flow, stay in there for a while or even remain trapped for an infinite time [2].

Consequently, the membrane contactor module must be designed to resemble a PFR in the best possible way to achieve the highest mass transfer. Since the membrane contactor is not an ideal reactor like the ones just described, the theoretical treatment becomes slightly more difficult. It can be shown that a series of subsequent CSTRs, a CSTR cascade, can be used to describe the residence time distribution in a CSTR, a PFR and intermediate forms as well. When a short spike of tracer molecules, is injected into such a CSTR cascade, the development of the tracer concentration at the outlet over time is given by

$$c(t) = A \cdot \frac{N \cdot \left(\frac{N \cdot t}{\tau}\right)^{N-1}}{\tau \cdot \Gamma(N)} \cdot \exp\left[-\frac{N \cdot t}{\tau}\right]$$

$c(t)$ is the concentration of the tracer molecule in $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, t is the time in s, τ is the average residence time, N is the number of subsequent CSTRs in the cascade and A is a pre-factor in $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\Gamma(N) = (N - 1)!$ is the gamma function.

Of course, a cascade with one CSTR ($N = 1$) reduces to the CSTR-model, whereas a PFR is obtained by an infinite series of CSTRs ($N = \infty$) and any other N yields a behaviour between these two ideal states. Figure 2 demonstrates the difference in the concentration curves [2].

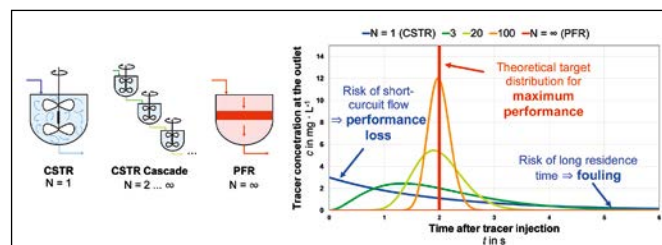


Figure 2: Theoretical concepts of ideal reactors (top) and corresponding residence time distributions for CSTR cascades covering the special cases of the CSTR, the PFR and intermediate forms (bottom)

Consequently, the $c(t)$ -curve for the membrane contactor needs to be recorded to allow for a detailed analysis and optimisation, but this is easier said than done for a system with average residence time of a few seconds.

3.2 Quantification via video colour analysis

It is widespread practice to utilise tracer molecules that affect the pH- or the electrical conductivity for the determination of residence time distributions, but their sampling rate of approx. 1 s^{-1} is insufficient for the membrane contactor. As a remedy, the neon-green, blue-absorbing dye fluorescein was injected into the membrane module and videos of the colour development in a transparent observation tube at the outlet were acquired by means of a smartphone camera. Due to the high sampling rate

of 60 frames per second, the analysis of the videos was automated. For this purpose, a Python script was implemented based upon the image analysis tool OpenCV [3–7]. In this tool, the video is processed frame by frame to analyse the colour development in terms of RGB-colours (red, green, and blue). As a result, an average red, green and blue value could be obtained for each frame and so could the fluorescein dye concentration since it was highly correlated to the blue value. For averaging the RGB-values, the red, green, and blue indices of each pixel were first squared before the medians (the 50%-quantiles) of these squares were computed over all pixels. Finally, the square roots of the respective medians of the three colours were taken as the average R-, G- and B-value [8]. So, in summary, the average RGB-values over n pixels were calculated as

$$\bar{R} = \sqrt{\text{median}_{i=1..n}(R_i^2)} \quad \bar{G} = \sqrt{\text{median}_{i=1..n}(G_i^2)} \quad \bar{B} = \sqrt{\text{median}_{i=1..n}(B_i^2)}$$

where the median assures that anomalous pixels, e.g., background or noisy pixels, do not influence the resulting average values as it would be the case for the arithmetic mean that takes every single pixel into account equally. This is mandatory because taking the square of the colour-values pronounces anomalous pixels disproportionately. For quantification of the fluorescein tracer concentration, its relationship to the average B-value must be determined by means of a calibration. Thus, the observation tube at the outlet was filled with fluorescein solutions of different concentrations and filmed with the smartphone camera (each in triplicate). A time span of approx. 5 seconds served for the computation of an average B-value against which the dye concentration could be regressed as

$$c = 6.71 \cdot 10^{-4} \cdot \bar{B}^2 - 0.312 \cdot \bar{B} + 34.5 \quad (R^2 = 0.997)$$

With this, the concentration time curve resulting from a fluorescein pulse can be acquired in an automated manner as shown in Figure 3.

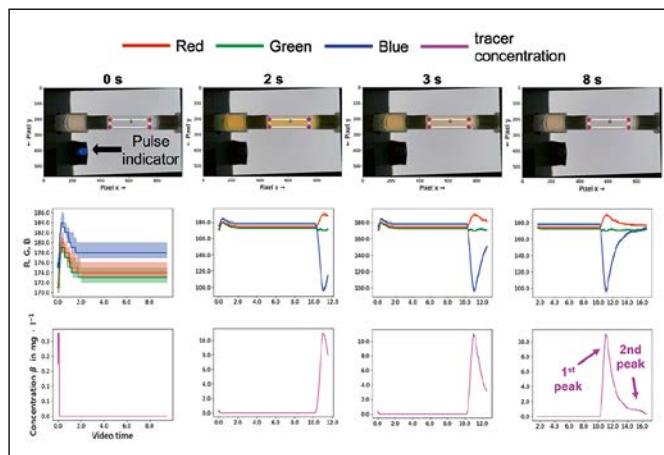


Figure 3: Fluorescein colour development in the observation tube (framed in white) after injection into the membrane contactor's inlet (top), the average R-, G-, and B-values (middle) and the fluorescein concentration (bottom) obtained

3.3 Mathematical analysis of the residence time distribution density function

From the residence time distribution density function in the lower right corner of Figure 3 it becomes obvious that the membrane contactor is not a CSTR-cascade and beyond that it is also far away from being a PFR. Its response to the tracer pulse shows 2 concentration peaks. The first of them belongs to a short-circuit flow of a part of the tracer. In contrast, the second peak indicates that there is a dead zone with improper mixing where the tracer molecules reside for a comparably long time. For a detailed assessment of the flow, superposition was assumed, and the membrane contactor was modelled as a parallel connection of M CSTR cascades with different residence times τ and N -values of CSTRs as illustrated in Figure 4. Using the Generalized Reduced Gradient Nonlinear Algorithm (GRG) of EXCEL's solver as described by Brown [9], the resulting mathematical expression could be fitted to sampled residence time curves from the membrane contactor.

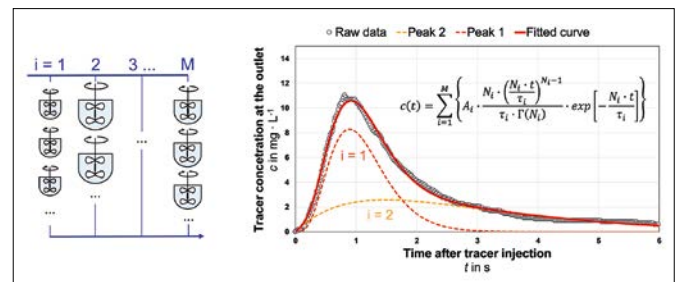


Figure 4: Schematic model for parallel connection of different CSTR cascades (left) exemplified by a curve fit for real residence time data with the corresponding mathematical description (right)

4 Results and outlook

Analysing three different membrane module geometries at two volumetric flow rates following results have been obtained. (see Figure 5) Geometry 1 consisted of a module only equipped with five horizontal flow guides, while geometry 2 and 3 also had flow turbulators of 2 and 3mm height respectively in place.

For all the membrane modules, it was found that their residence behaviour can be represented by two independent CSTRs with different number of stirred reactors, as assumed before. For both volumetric flow rates through the modules, it can be seen, that the first peak moves closer to the theoretical hydraulic residence time for the geometries with additional turbulence inducers. The closest distance between theoretical and real residence time of the first peak was measured for geometry 3, which also achieved the best mass transfer results, (results not shown) followed by geometry 1 and 2, which were on par in terms of their performance. Even though the peak 1 fraction of the total area is very similar for all modules, the shape of the peak is altered by the module's geome-

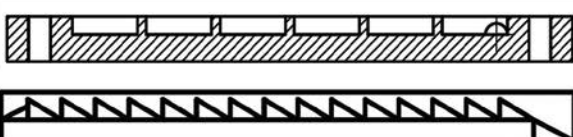

volumetric flow rate	characteristic figures	geometry 1	geometry 2	geometry 3
800 ml/min	theoretical HRT (T-HRT)	2.9s	3.0s	2.6s
	HRT peak 1 / number of CSTRs	1.3s / 4.4	1.6s / 4.0	1.9s / 4.9
	HRT peak 2 / number of CSTRs	6.7s / 1.2	5.0s / 2.2	3.6s / 1.9
	Deviation peak 1/2 from T-HRT	1.6s / 3.8s	1.4s / 2.0s	0.7s / 1.0s
	Peak 1 / 2 fraction of total area	39% / 61%	44% / 56%	42% / 58%
650 ml/min	theoretical HRT	3.6s	3.7s	3.3s
	HRT peak 1 / number of CSTRs	1.7s / 4.3	2.0s / 3.2	2.2s / 4.9
	HRT peak 2 / number of CSTRs	6.7s / 1.3	6.6s / 1.5	4.5s / 1.8
	Deviation peak 1/2 from T-HRT	1.9s / 3.1s	2.9s / 2.9s	1.1s / 1.2s
	Peak 1 / 2 fraction of total area	40% / 60%	38% / 62%	38% / 62%
				

Figure 5: Comparison of different characteristic figures for the residence time behaviour of three membrane modules at two volumetric flow rates (top) and visual representation of module geometry 1 and 3 (bottom)

try. A higher number of CSTRs, which produces a sharper, more plug flow reactor like response, can be achieved by using the third geometry at both volumetric flow rates (4.9 CSTRs). Both other geometries are not able to match these results, no matter of the flow rate chosen. (see Figure 5) The second peak only differs slightly for the investigated geometries. Where the modules differ most, however, are the hydraulic residence times of the two peaks and their deviation from the theoretical residence time. Again, the third geometry produces the best results, by creating the narrowest deviation between peak 1 and 2 to the theoretical HRT. An interesting observation for the second geometry is that the residence time distribution

only narrows at higher flow rates, while this geometry produces the worst results at a lower flow rate. One plausible reason for this could be, that the backpressure of the module, which increases with higher flow rates aids the module to be more evenly loaded under these flow conditions. For the future, this method can be used, to further enhance the performance of the membrane module by modifying the third geometry towards a more ideal PFR like flow structure. The effect of small geometry changes can be successfully detected by the method described in this article. The method also allows to measure residence time distributions in high resolution with quite simple and inexpensive equipment.

References:

- [1] European Commission, “Report from the commission to the council and the european parliament on the implementation of Council Directive 91/676/EEC concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources based on Member State reports for the period 2016–2019”, Brussels, Oct. 2021. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2021%3A1000%3AFIN&qid=1633953687154> (accessed: May 20 2022).
- [2] E. Müller-Erlwein, „Verweilzeitverhalten“, in *Chemische Reaktionstechnik*, E. Müller-Erlwein, Ed., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, pp. 94–138.
- [3] Anaconda Inc., *Anaconda Software Distribution: Anaconda Inc.*, 2020. [Online]. Available: <https://docs.anaconda.com/> (accessed: Sep. 4 2022).
- [4] G. Bradski, *The OpenCV Library*: Dr. Dobb's Journal of Software Tools, 2000.
- [5] P. Virtanen et al., “SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python”, *Nature methods*, vol. 17, no. 3, pp. 261–272, 2020, DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.
- [6] Thomas A Caswell et al., *matplotlib/matplotlib: REL: v3.3.4*: Zenodo, 2021.
- [7] C. R. Harris et al., “Array programming with NumPy”, *Nature*, vol. 585, no. 7825, pp. 357–362, 2020, DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2.
- [8] M. Vanga, *Averaging RGB Colors the Right Way*. [Online]. Available: <https://sighack.com/post/averaging-rgb-colors-the-right-way> (accessed: Sep. 4 2022).
- [9] A. M. Brown, “A step-by-step guide to non-linear regression analysis of experimental data using a Microsoft Excel spreadsheet”, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 65, no. 3, pp. 191–200, 2001, DOI: 10.1016/S0169-2607(00)00124-3.

Contributions:

Marc Herden and Niklas Zell designed the experimental setup, Marc Herden performed the calibration and experiments, Niklas Zell implemented the Python script used by Marc Herden to process the video material, Marc Herden and Niklas Zell built the EXCEL-sheet used to fit (Marc Herden) the cascade model to the data, Marc Herden analysed the data, Marc Herden and Niklas Zell wrote the manuscript, Franz Bischof, Christoph Lindenberger and Werner Prell revised the manuscript.

Funding agency:

Bayerisches Staatsministerium für
Wissenschaft und Kunst



Kontakt:



Marc Herden, M.Eng.

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

ma.herden@oth-aw.de



Niklas Zell, M.Eng.

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

ni.zell@oth-aw.de



Prof. Dr.-Ing. Franz Bischof

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

f.bischof@oth-aw.de



Prof. Dr.-Ing. Christoph Lindenberger

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

c.lindenberger@oth-aw.de



Prof. Dr.-Ing. Werner Prell

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

w.prell@oth-aw.de

ERSTKLASSIGE TECHNIK

für den Straßen- und Erdbau

Die HAMM AG ist ein Unternehmen der WIRTGEN GROUP, einem global tätigen Unternehmensverbund der Baumaschinenindustrie mit 5 Stammwerken in Deutschland, lokalen Produktionsstätten in Brasilien, China und Indien sowie einem weltweiten Vertriebs- und Servicenetz. Innerhalb der WIRTGEN GROUP ist die HAMM AG der Spezialist für Walzen im Bereich Straßen- und Erdbau.

Am Standort in Tirschenreuth arbeiten über 1.100 Beschäftigte.



Weitere Informationen erhalten Sie über:

Hamm AG • Hammstraße 1 • 95643 Tirschenreuth • Tel. 09631 80 - 0 • www.hamm.eu



Jetzt
Mitglied
werden und
profitieren.

vr-nopf.de

Die Vorteile einer Mitgliedschaft
liegen auf der Bank.
Morgen kann kommen.
Wir machen den Weg frei.

Gemeinsam stärker.

Als Mitglied werden Sie Teilhaber unserer Bank und profitieren von vielen Vorteilen. Denn wir sind unseren Mitgliedern verpflichtet.

Das bedeutet, dass Sie den Geschäftskurs demokratisch mitbestimmen, Einblick in unsere Unternehmenszahlen erhalten und am Bankgewinn in Form einer Dividende beteiligt werden.

Das ist unser genossenschaftliches Prinzip, und genau das macht uns stark.

Telefon 0961 840 • Montag bis Freitag von 8 bis 18 Uhr

Volksbank Raiffeisenbank
Nordoberpfalz eG



State-of-health Diagnosis of Lithium-Ion Batteries using Electrochemical Methods and Differential Capacity

Prof. Dr. Peter Kurzweil
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Frenzel
Dipl.-Phys. Christian Schell
Josef Schottenbauer, M.Eng.

Zusammenfassung

Lithiumionenbatterien mit unterschiedlicher Zellchemie wurden mit Langzeit-Zyklentests, Lade-Entlade-Kurven, Impedanzspektroskopie und Cyclovoltammetrie untersucht. Der Anstieg der inkrementellen Spannung zeigt bevorstehende Wärmeereignisse und Tiefentladung frühzeitig an. Zur Diagnose des Gesundheitszustands (SOH) von Lithiumionen-Batterien, lange bevor die Batterie versagt, haben wir als Indikator für "Vollladung" und "Tiefentladung" die differentielle Kapazität gefunden.

Abstract

Various lithium-ion cell chemistries were investigated using long-term cycle tests, charge-discharge curves, impedance spectroscopy and cyclic voltammetry. The increase in incremental voltage provides early indications of impending thermal events and deep discharge. To diagnose the state of health (SOH) of lithium-ion batteries long before the battery fails, we found the differential capacity to be indicative of "full charge" and "deep discharge".

1 Introduction

In recent years, the monitoring of lithium-ion batteries under normal and hazardous operating conditions has become increasingly important, whether in technical applications or for the development of new materials in laboratory cells [1-5]. For SOC and SOH estimation, charge-discharge curves and impedance spectroscopy are used. For battery diagnostics, data evaluation with the so-called "differential capacity" is particularly suitable, since this is accessible both with DC and AC techniques. This article illustrates how differential capacity obtained from discharge curves, impedance spectra, and cyclic voltammograms can be used for the instant diagnosis of lithium-ion batteries without fully charging and discharging the cell.

2 Capacitance and Differential Charge are the Same Thing

The phenomenon that the double layer capacitance is not a constant quantity, but depends on the applied electrode potential, was already studied in the 1940s on mercury surfaces in aqueous salt solutions. In

electrochemical equilibrium, it does not matter whether the steady state is reached by applying a voltage or a current.

Indeed, the familiar cyclic voltammogram of a platinum electrode in a three-electrode configuration in Figure 1 can be reproduced by a constant current measurement. Differential capacity dQ/dU (in As/V) or capacitance C (in F) is directly proportional to the charging current I at a given cell voltage U and voltage scan rate v (in V/s).

$$C = \frac{dQ}{dU} = \frac{I}{dU/dt} = \frac{I}{v}$$

At the potential-of-zero-charge, the electrode surface is not electrically charged, and the capacitance of the double-layer is smallest. The voltammetric current is composed of the capacitive part of the double-layer and the faradaic component of battery-like redox reactions. While the capacitive current becomes important at high scan rates ($I = C v$), the faradaic peak current, which must always be measured from a baseline of charging current, varies with $I \sim v^{1/2}$ for linear diffusion.

For constant current measurement, we calculated the differential charge as $C = (dU/dQ)^{-1}$ from the voltage change over time. The oxygen reduction ($O_2 + 4 e^- + 4 H^+ \rightarrow 2 H_2O$) in the galvanostatic measurement in Figure 1 shows a prepeak of the same shape; this means: both the dissolved and adsorbed species are electroactive, and the reduced product species, is strongly adsorbed.

Obviously, potentiodynamic and quasi-stationary galvanostatic measurements can be correctly compared on the voltage scale. In the following we use this context for the state-of-charge control of batteries.

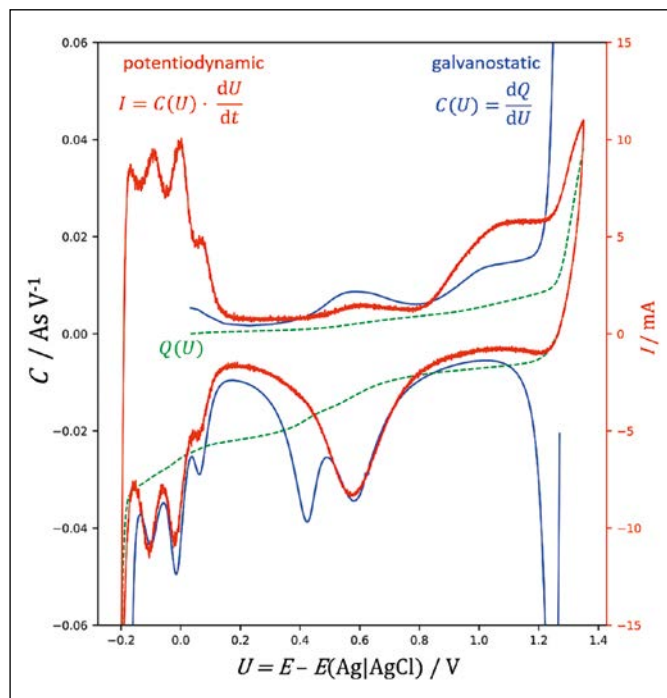


Figure 1: Voltammetric capacitance of a platinum electrode in sulfuric acid against a silver-silver chloride reference electrode (red: $C = I/v$, scan rate $v = 250$ mV/s) compared to differential capacity from constant current charge-discharge curve (blue: cut-off voltage at 1.35 V and -0.2 V).

3 Secrets of the Charge-Discharge Curve

Small changes of the battery during aging can hardly be observed in classical curves of voltage versus electric charge $U(Q)$. Differential capacity, $C = dQ/dU$, however, reflects the slope of the flat regions of charge-discharge characteristics (Figure 2).

Electric charge is calculated by integrating the current with respect to time, for example, using the trapezoidal rule with the PYTHON function: $Q = \text{numpy.append}([0], \text{scipy.integrate.cumtrapz}(I, t))$. Differential capacity (capacitance) is obtained by numerically differentiating the electric charge with respect to the instantaneous voltage, $dQ/dU = \text{numpy.gradient}(Q, U)$.

For constant current charge and discharge, numerical problems with small voltage differences can be avoided by using the reciprocal of the differential capacity. Central differences yield good results for the first derivative of noisy data.

$$C = \frac{dQ}{dU} = \left(\frac{dU}{dQ}\right)^{-1} \approx \left(\frac{U_{i+1} - U_{i-1}}{Q_{i+1} - Q_{i-1}}\right)^{-1}$$

Where equilibrium phases with different lithium concentrations coexist, differential capacity shows a peak value for each flat section of the charge/discharge curve ($C \rightarrow \text{max}$, for $\Delta U \rightarrow 0$). Where the $U(Q)$ curve is flat the $Q(U)$ curve is steep. Inverse capacitance rises abruptly as soon as a constant current can no longer be fed into or withdrawn from the cell ($1/C \rightarrow \text{max}$, for $\Delta I \rightarrow 0$), e.g., where phase transitions occur.

Depending on the cell chemistry, the number and voltage positions of the dQ/dU peaks are well reproducible and differ only slightly for individual batteries of the same type. The signals correlate with the redox processes of the cell chemistry, so that Figure 3 allows an inter-

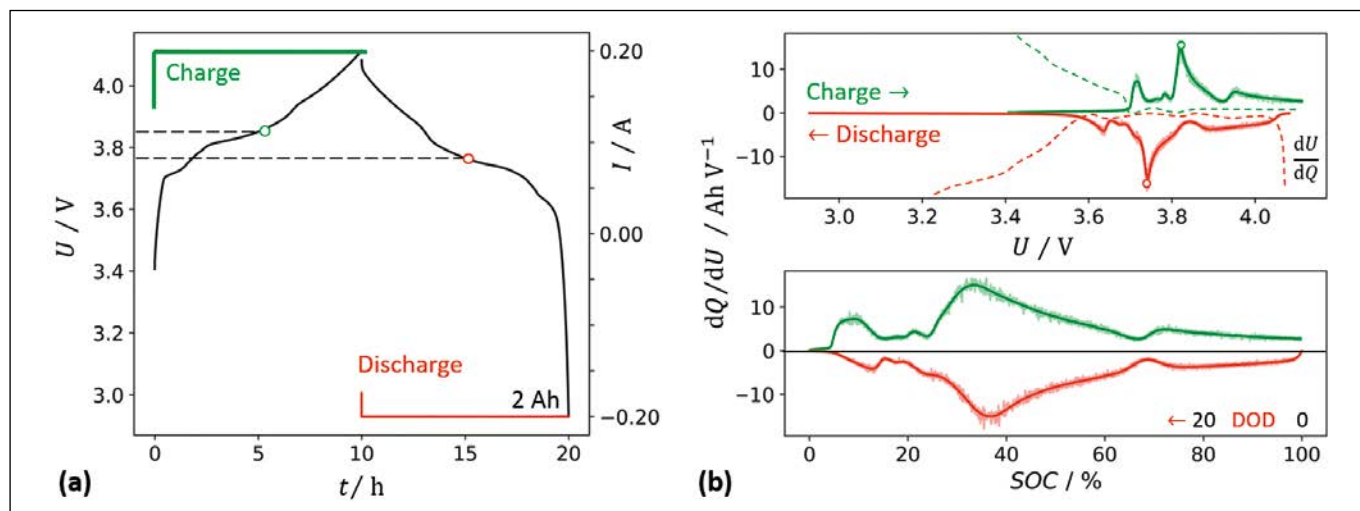


Figure 2: Used Sanyo-Panasonic LCO battery (UR18650F, 2.3 Ah) after cycle test (SOH = 87%). (a) Constant current charge-discharge characteristics. (b) Differential capacity dQ/dU (solid) and its reciprocal (dashed) as a function of cell voltage U and state-of-charge (SOC).

pretation similar to that of the cyclic voltammogram. The redox peaks mainly show the lithiated and delithiated metal oxide cathode (+) against the lithiated graphite anode (-). The distance between charge and discharge signal is about 0.1 V, which is due to the internal resistance of the battery. With larger charge currents, the dQ/dU peaks shift toward higher voltages. With larger discharge currents, the dQ/dU peaks shift toward lower voltages.

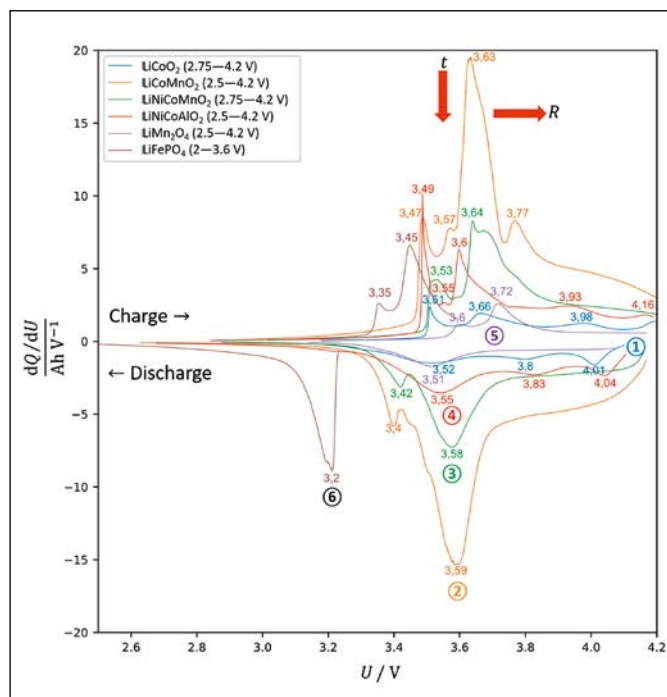


Figure 3: Differential capacity of commercial lithium ion batteries at constant current operation. Redox processes $M(II) \rightarrow M(III) \rightarrow M(IV)$: ① ② ③ Co, ④ Ni, ⑤ Mn, ⑥ Fe. Red arrows: peak depression and shift by aging processes.

With aging, lower peak height occurs due to the loss of active material and the peak shift due to the rising cell resistance. In lifetime tests, the shift in the oxidation peaks to higher voltage and the reduction peaks to lower voltage is better observed on the voltage scale than against the SOC. Lithium iron phosphate chemistry, for example, shows a depression of the differential capacity. Resistance increase shifts all three dQ/dU charging peaks toward higher voltages. Loss of lithium supply or anode material decreases the dQ/dU peak height at 3.4 V, while loss of cathode material reduces all three dQ/dU peaks (3–3.5 V). The gradual capacity fade of lithium-ion batteries is mainly caused by the negative electrode (anode); it can be attributed to the decomposition of the electrolyte in contact to lithium metal, the dissolution of transition metals at the cathode and redeposition at the anode, and the steady loss of the electrochemically available lithium in the cell, which prevents the formation of a stable protective layer on the cathode material.

4 How Differential Capacity Indicates Aging

Aging increases the voltage distance between the corresponding charge and discharge peaks, which is a measure of cell conductance. We found that the increase of inverse capacity dU/dQ is an early indicator of upcoming heat events and deep discharge.

Differential capacity dQ/dU (capacitance) reaches a local maximum near full charge, because cell voltage reaches a constant value, which can serve as a criterion that the battery is now fully charged and not yet overcharged. As well, incremental voltage dU/dQ (inverse capacitance) rises abruptly as soon a constant current can no longer be fed into or drawn from the cell. During overcharge, differential capacity rises moderately, but voltage change becomes maximum.

During charging, the temperature moderately increases during the initial strongest voltage increase. A really sharp rise in temperature is observed shortly before the exhaustion of the battery. The dU/dQ peak is therefore an early indicator for upcoming deep discharge and exhaust heat events.

These observations led us to a novel method for battery control [1]: The criterion $dQ/dU = dU/dQ = 1$ indicates reliably upcoming “overcharge” and “deep-discharge”. Indeed, the peaks of differential capacity occur at “almost full” and “almost empty”. A mathematically descriptive interpretation of the criterion results from the intersection of a straight line (ascending curve $y = x$) and a hyperbola (descending curve $y = 1/x$). The equation $x = 1/x$ has the solution $x = \pm 1$, where alone $+1$ is physically meaningful. The differential capacity at the intersection can in principle also be approximated by higher powers, $x^n = (1/x)^n$, which leads to the same solution $x = 1$.

The criterion also works with dimensionless quantities, if the state-of-charge (SOC) is used instead of the electric charge Q . The upper and lower cell voltage is sought where the term S becomes zero.

$$S = \frac{dSOC}{dU} - \left(\frac{dU}{dSOC} \right)^{-1} \rightarrow \min$$

Simplified, a lithium-ion battery can be modeled by an equivalent circuit consisting of a series combination of the electrolyte resistance R_1 and the charge transfer impedance $R_2 || C$, which in turn is a parallel combination of the charge transfer resistance and the double layer capacitance. For charging and discharging with a constant current, the state-of-charge as a function of battery voltage is shown in Figure 4.

Differential capacitance and its reciprocal intersect below the upper cut-off voltage at a point corresponding to the

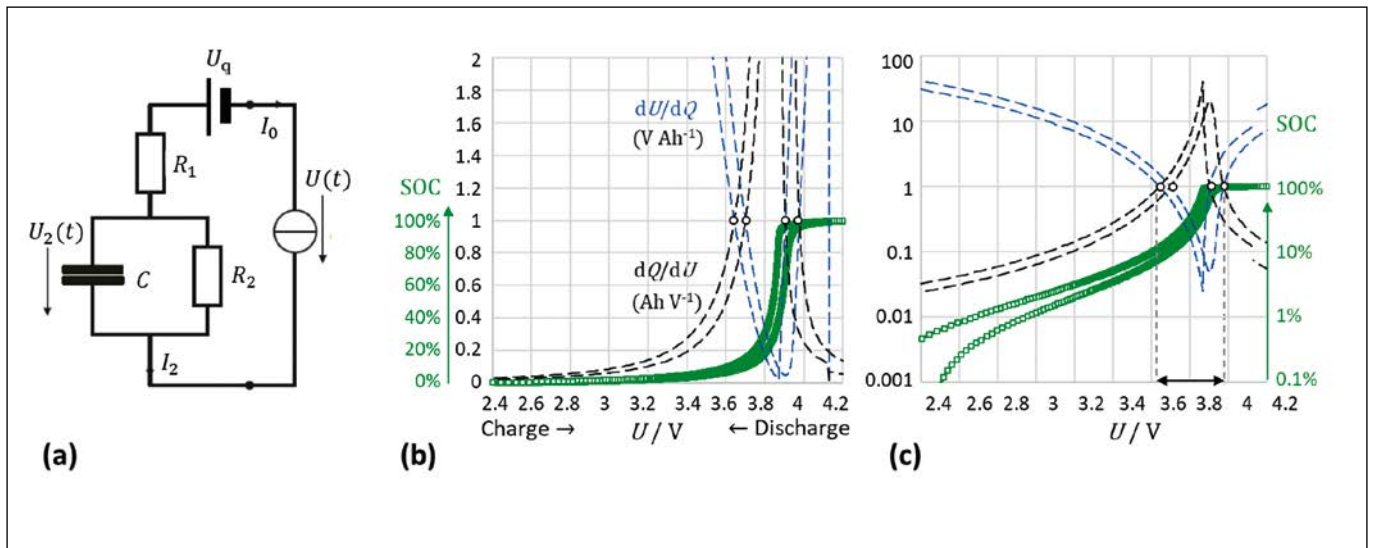


Figure 4: (a) Model of a lithium-ion battery: $U_q = 4.2$ V, $Q_0 = 2$ Ah, $C = 12500$ F, $R_1 = 0.004$ Ω , $R_2 = 0.02$ Ω . (b) Calculated battery voltage (green), differential capacity (black dashed) and inverse capacitance (blue dashed) versus state-of-charge for constant current charge and discharge ($I = 0.5$ A) on a linear scale and (c) on the logarithmic scale. (c) Intersection points: 3.70 V, 3.98 V (charge); 3.64 V, 3.91 V (discharge).

kink point near full charge. A similar intersection point is obtained for the discharge above the lower cut-off voltage. The distance between the intersection points defines the voltage window in which the battery can be operated without long-term damage.

5 The Mysterious Phenomenon of Pseudocapacitance

The real part of the impedance (resistance) reflects the electrolyte and the kinetic inhibitions of the electrode processes, while the imaginary part (reactance) is attributed to the double-layer and adsorption phenomena. We have already established that frequency-dependent pseudocapacitance [6, 7] is a unique measure for the activity of the electrode/electrolyte interface that serves as a qualitative indicator of the battery's state-of-charge.

$$C(\omega) = \text{Re } \underline{C}(j\omega) = \frac{\text{Im } \underline{Y}(j\omega)}{j\omega} = \frac{-\text{Im } \underline{Z}(j\omega)}{\omega \cdot |\underline{Z}(j\omega)|^2} \approx \frac{-1}{\omega \cdot \text{Im } \underline{Z}(j\omega)}$$

The approximation holds for high frequencies and negligible internal resistance. Electrolytic double layer, charge transfer reaction and lithium ion intercalation into the porous electrodes cause the capacitive properties of the battery in three different frequency ranges. At high frequencies, capacitance approaches the value of geometric double-layer capacitance. At low frequencies, the DC value of capacitance, reflects the maximum useable storage capacity of the device.

A large capacitance indicates a high SOC. The linearity between pseudocapacitance and electric charge is improved when the electrolyte resistance (intersection with the real axis at high frequencies) is corrected. Overcharg-

ing disrupts the linear trend between capacity and SOC. Unfortunately, there is no simple method for all lithium-ion chemistries to read the absolute SOC values from the shape of the complex plane plot.

Fully charged, old and new 2 Ah batteries were discharged in 2% steps from SOC 100% down to 30% between the upper and lower cutoff voltage at constant current and ambient temperature in a climate chamber. After a 20 min rest period to set a stationary cell voltage, the impedance measurement took 80 s for 6 values per frequency decade in the frequency range from 1 kHz to 0.1 Hz. In Figure 5, using partial least squares regression (PLSR), a lithium-cobalt oxide battery was evaluated during 1028 cycles of DOD 20 lifetime testing. The impedance spectra, 24 frequencies at 26 SOC states were analyzed with respect to all measured resistance, reactance, and capacitance values. The real part of the impedance was corrected by the electrolyte resistance. In the training phase, a model $Y = f(X)$ is searched for by calculating a set of model parameters (regression coefficients). In the prediction step, the model is checked by comparing the calculated Y values of further samples with the known values. The mathematical work is easily done by a PYTHON function that uses the base class 'PLS-Regression' 'of the 'scikit learn package'. As a result, our model reaches a good prediction quality ($R^2 = 0.9995$, $Q^2 = 0.9979$) for the given battery type. Aging changes the charge transfer arc, while the impedance at high frequencies is less affected. Interestingly, the varying SOC has no great influence on the PLSR model. For model validation, a Li-ion battery of the same type after 179 cycles was used. The mean error for all different SoC was 4.9 ± 1.5 cycles ($2.72 \pm 0.83\%$). This model can be used for this specific type of battery.

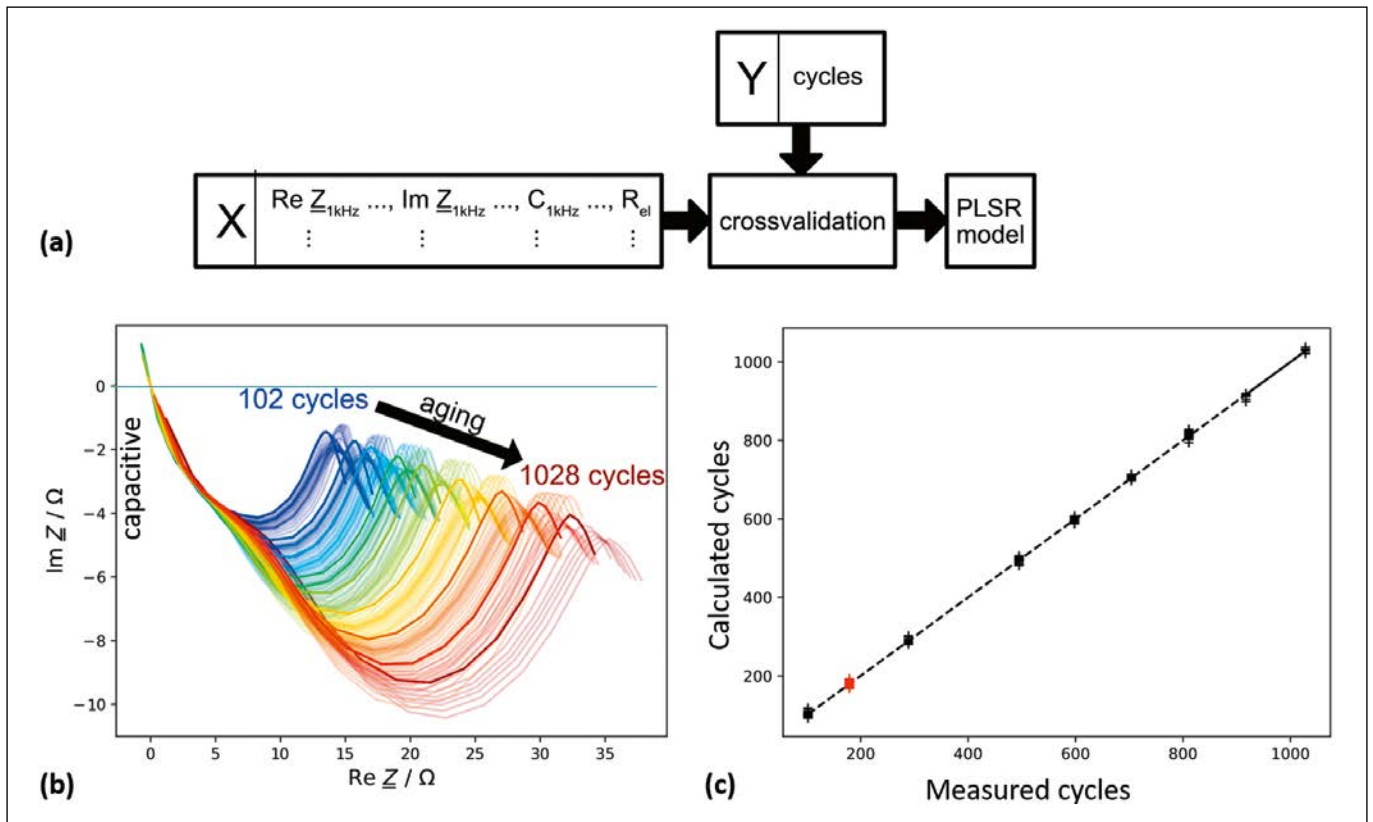


Figure 5: (a) Multilinear regression model. (b) Impedance spectra of a Sanyo/Panasonic 18650 cell (LCO chemistry) during cycle aging (DOD 100%). Thick lines: SOC 100%. Thin lines: SOC 95%, 90%, ..., 30%. (c) Calculated cycles with PLSR model against real cycles. Red: Prediction for a different test sample (179 cycles) of the same battery chemistry and type.

In practice, the mass transport arc is not evaluated because too long measurement times are required below 0.1 Hz. We have therefore evaluated the real and imaginary parts of impedance at the minimum of the semicircle that is attributed to the charge-transfer reaction at medium frequencies. The imaginary part and the capacitance at the charge-transfer semicircle's minimum show a clear but nonlinear dependence on the SOC [1]. Indeed, for all battery chemistries, pseudocapacitance at medium frequencies reflects the state-of-charge in the correct order of magnitude [2]. The relative change of pseudocapacitance $C(10 \text{ Hz})$ is suitable as an approximate value for charge control of the same battery, unless the absolute SOC and SOH values are sought. There is no need to measure down to very low frequencies.

6 Conclusions

Differential capacity $C = dQ/dU$ (capacitance) from charge–discharge curves can be calculated as inverse capacitance $(dU/dQ)^{-1}$, avoiding numerical problems. The peaks of inverse capacitance occur at “almost empty” and “almost full”. The voltages at the intersection points, $C = 1/C = 1$, define the usable window for long-term operation of the battery without the threat of overcharging or deep discharge. This voltage gap between the intersection points correlates with the state-of-health.

So far, there is no general formula that is able to display and predict all battery states over the entire service life. In this work, the criterion of equal differential capacity and differential voltage ($d\text{SOC}/dU = dU/d\text{SOC} = 1$) is proposed for the automatic evaluation of the instantaneous charge–discharge curve, whether a battery is full, empty, or about to be overcharged or deep discharged.

References:

- [1] P. Kurzweil, W. Scheuerrpflug, B. Frenzel, C. Schell, J. Schottenbauer, Differential Capacity as a Tool for SOC and SOH Estimation of Lithium Ion Batteries Using Charge/Discharge Curves, Cyclic Voltammetry, Impedance Spectroscopy, and Heat Events: A Tutorial. *Energies* 2022, 15, 4520.
- [2] P. Kurzweil, W. Scheuerrpflug, State-of-charge monitoring and battery diagnosis of different lithium-ion chemistries using impedance spectroscopy. *Batteries* 2021, 7, 17.
- [3] P. Kurzweil, J. Schottenbauer, Ch. Schell, Past, present and future of electrochemical capacitors: Pseudo-capacitance, aging mechanisms and service life estimation. *J. Energy Storage* 2021, 35, 102311.
- [4] P. Kurzweil, W. Scheuerrpflug, State-of-Charge Monitoring and Battery Diagnosis of NiCd Cells Using Impedance Spectroscopy. *Batteries* 2020, 6, 4.
- [5] P. Kurzweil, M. Shamonin, State-of-Charge Monitoring by Impedance Spectroscopy during Long-Term Self-Discharge of Supercapacitors and Lithium-Ion Batteries. *Batteries* 2018, 4, 35.
- [6] P. Kurzweil, H.J. Fischle, A new monitoring method for electrochemical aggregates by impedance spectroscopy. *J. Power Sources* 2004, 127, 331–340.
- [7] P. Kurzweil, J.; Ober, D.W. Wabner, Method for Correction and Analysis of Impedance Spectra. *Electrochim. Acta* 1989, 34, 1179–1185.

Projektpartner:

Technologie- und Wissenschaftsnetzwerk Oberpfalz (TWO)
Diehl Aerospace, Nürnberg

Fördergeber:

Bayerisches Staatsministerium für
Wissenschaft und Kunst



Kontakt:



Prof. Dr. Peter Kurzweil

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

p.kurzweil@oth-aw.de



Prof. Dr.-Ing. Bernhard Frenzel

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

b.frenzel@oth-aw.de



Dipl.-Phys. Christian Schell

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

jo.schottenbauer@oth-aw.de

Zusammenfassung

Durch den Ersatz des Betäubungsmittels Barbitol im klassischen Britton-Robinson-Puffer haben wir eine unproblematische und leicht handhabbare Lösung entwickelt, deren pH-Änderung direkt proportional zur Menge der zugegebenen Lauge ist und eine lineare Titrationskurve ergibt. Dies ermöglicht eine gleichmäßige Aufteilung der Messpunkte bei der automatisierten Titration und verbessert die Aussagekraft von Messungen mit pH-sensitiven Elektroden.

Abstract

By replacing the anesthetic barbitol in the classic Britton-Robinson buffer, we have developed an unproblematic and easy-to-handle solution. The pH changes directly proportional to the amount of alkali added and results in a linear titration curve. This enables an even distribution of the measuring points in automated titration and improves the informative value of measurements with pH-sensitive electrodes

Einleitung

Zur Kalibrierung von pH-Sensoren dienen mannigfache Pufferlösungen, deren Gebrauch in Serienmessungen einen erheblichen Zeitaufwand mit sich bringt.

In automatisierten Messungen [1] titrieren wir routinemäßig eine vorgelegte Säure mit Natronlauge und überwachen dabei die Arbeitselektrode in etwa 100 Messschritten mit Impedanzspektroskopie, Ruhepotentialmessungen und Cyclovoltammetrie, während der pH-Bereich in hoher Auflösung durchlaufen wird. Als Problem stellt sich der steile Potentialanstieg um den Neutralisationspunkt bei pH 7 heraus. Ein Tropfen Lauge kann den pH-Wert um mehr als zwei Stufen anheben; entsprechend gering fällt die Dichte der Messpunkte im Bereich von pH 5 bis 11 aus.

Aus diesem Grund haben wir nach einer geeigneten Pufferlösung gesucht, die eine gleichmäßige Verteilung der Messpunkte über einen großen pH-Bereich garantiert. Es gibt jedoch kaum einen praktischen Puffer, der ohne Sprünge die gesamte Skala von pH 0 bis 14 abdeckt. Rezepte aus Literatur enthalten mitunter verbotene Subs-

tanzen, wie das nachfolgende Beispiel zeigt. Mit einem Barbiturat-Puffer dürfen Studierende nicht umgehen und die Laborarbeit würde durch die Vorschriften des Betäubungsmittelgesetzes verschärft.

Vom Puffer zum Universalpuffer

Klassische pH-Pufferlösungen sind Gemische von schwachen Säuren, dem Salz dieser Säure und einer starken Base. Sie dämpfen Änderungen des pH-Wertes bei Säure- oder Laugenzugabe in wässriger Lösung im Bereich der Säureexponenten (pK_a -Werte) der enthaltenen Substanzen [2]. Die Pufferwirkung entsteht durch Freisetzung oder Aufnahme von H_3O^+ bei der Dissoziation der Inhaltsstoffe. Ist die Pufferkapazität bei der Titration überschritten, ändert sich der pH sprunghaft und der Puffer versagt.

Puffersysteme kommen verbreitet in der Natur vor. Der Hydrogencarbonat-Puffer sorgt für einen konstanten pH-Wert im menschlichen Blut. Die Pufferwirkung der oft verwendeten Citronensäure, z. B. in Merck-Certipur® Pufferlösungen, ist in Abbildung 1 exemplarisch dargestellt. Trotz Zugabe großer Mengen Natronlauge ändert sich der pH-Wert im sauren Medium kaum, weil die drei aktiven

H-Atome der Citronensäure nacheinander neutralisiert werden. Mit Erreichen des Citrations ist das H⁺-Reservoir erschöpft und geringe Laugenzugabe bewirkt oberhalb pH 6,5 eine sprunghafte pH-Änderung.

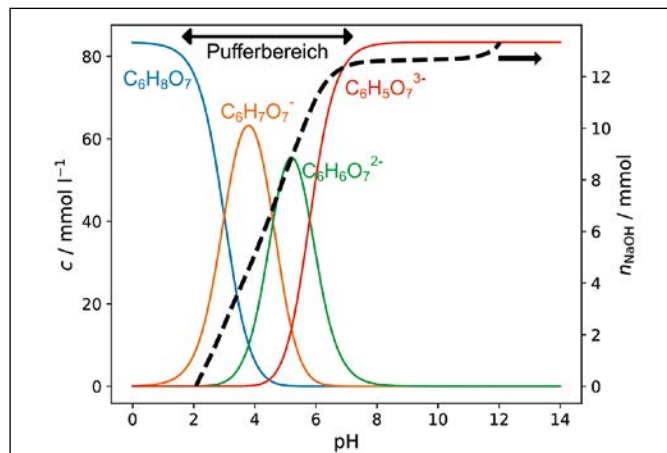


Abbildung 1: Berechnete Dissoziationsgleichgewichte bei der automatischen Titration von 50 mL Citronensäure (0,0834 mol L⁻¹) mit 1-molarer Natronlauge gegen eine pH-Glaselektrode (WTW SenseTix 41, SCHOTT TitroLine Alpha).

Universalpuffer sind Lösungen mit Substanzen, deren pK_a-Werte so verteilt sind, dass die pH-Änderung über einem möglichst weiten Bereich annähernd proportional zur Zugabe der Lauge ist. Die von Britton und Robinson [3] vor dem Zweiten Weltkrieg entwickelte Lösung, bestehend aus Citronensäure (pK_a-Werte: 3,0, 4,6 und 5,8), Kaliumdihydrogenphosphat (6,9 und 11,6), Borsäure (9,2) und – früher durchaus üblich – Barbital (7,43). Die Linearität im Bereich von pH 2 bis 10 (Abbildung 2) wurde durch Nakagawa et. al. [4] jüngst durch Zugabe von Glycin (2,35 und 9,78) verbessert. Die Titrationskurve dieses Puffers besitzt einen exzellent linearen Verlauf von pH 2,5 bis 11,8 (R²: 0,9992).

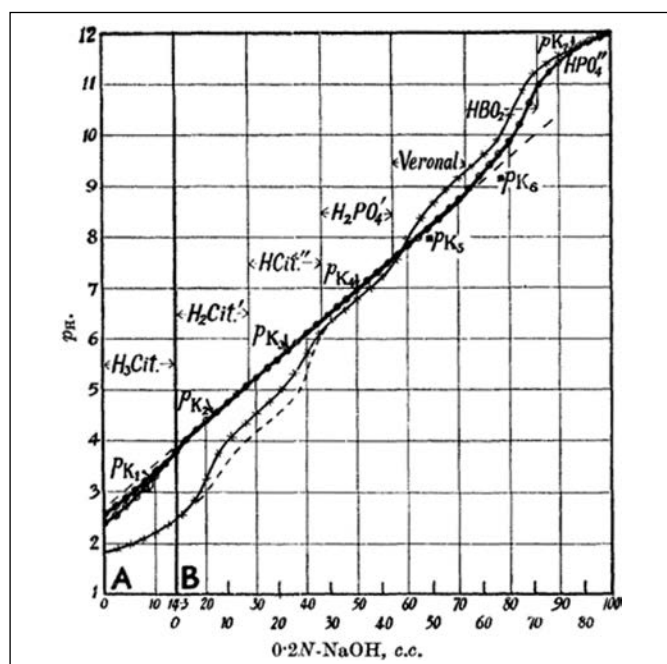


Abbildung 2: Titrationskurve des Universalpuffers nach Britton und Robinson mit Natronlauge [3].

Barbitalfreier Universalpuffer

Barbital, die 5,5-Diethylbarbitursäure, ist unter dem Handelsnamen Veronal seit 1903 als starkes Beruhigungs- und Schlafmittel bekannt und war in den Jahren des Wirtschaftswunders sehr populär. In Deutschland fällt es heute unter das Betäubungsmittelgesetz.

Lässt man Barbital aus dem modifizierten Britton-Robinson-Puffer weg, verschlechtert sich die Linearität im Bereich um pH 8 (Abbildung 3). Die pK_a-Werte der Substanzen verteilen sich breit über den Bereich von pH 2 bis 12. Tris(hydroxymethyl)aminomethan (TRIS) mit dem Säureexponent 8,2 erweist sich als geeigneter Ersatz für Barbital (rote Kurve). Das chemische Gleichgewicht sämtlicher gelösten Stoffe definiert einen anfänglichen pH-Wert von 3,57. Um einen größeren Bereich bei der Titration abzudecken, wurde der pH mit Salzsäure über die Pufferkapazität abgesenkt. In der blauen Kurve ist die Grenze des linearen Bereichs des Puffers bei pH 2,55 zu erkennen. Für die endgültige Zusammensetzung des Universalpuffers (Tabelle 1) wurde die Salzsäuremenge daher so gewählt, dass genau dieser Wert erreicht wird (grüne Kurve).

Tabelle 1: Schrittweise Verbesserung des Universalpuffers: Zusammensetzung in g/L.

Substanz	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4
Citronensäure	20,00	19,986	16,020	16,02
KH ₂ PO ₄	14,881	17,486	10,374	10,37
TRIS	–	7,303	9,236	9,236
Borsäure	7,665	4,175	4,714	4,714
Glycin	6,641	8,650	5,722	5,722
HCl (32 %), mL	–	–	26	9,8
Start pH-Wert	2,87	3,57	1,18	2,55
Leitwert: mS cm ⁻¹	10,24	11,79	–	14,93

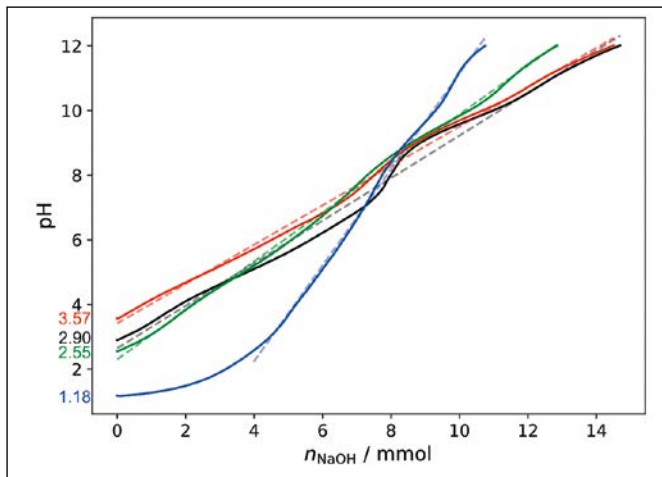


Abbildung 3: Titration von 20 mL Universalpuffer mit 1-molarer Natronlauge gegen eine Glaselektrode: Britton-Robinson ohne Barbitol (schwarz: R^2 0.9953), salzsaurer Puffer mit TRIS (blau), verbesserte Zusammensetzungen (rot: R^2 0.9981, grün: R^2 : 0.9991).

Praktische Erprobung

In weiteren Versuchen wurde der Universalpuffer mit kommerziellen Pufferlösungen verglichen. Mit Natronlauge wurde der Universalpuffer auf die pH-Stufen von Merck Certipur (pH 4.01, pH 7, pH 10) eingestellt. Die cyclovoltammetrischen Messungen mit einer Rutheniumdioxid-Elektrode zeigen die Redoxvorgänge des Metalloxids ohne Störung durch den Puffer (Abbildung 4). Abweichungen der Redoxpotentiale treten im Bereich der Wasserstoff- und Sauerstoffentwicklung an den Rändern des Cyclovoltagramms auf. Jedoch leitet der Universal-

puffer doppelt gut wie die Standardpuffer, was mit einem engeren Potentialfenster und einer steileren Stromkurve einhergeht. Das Cyclovoltogramm in 1-molarer Schwefelsäure zeigt allein die für RuO_2 typischen Redoxvorgänge bei exzellenter Leitfähigkeit [5]. Im Bereich der Umwandlung von Ru(III) zu Ru(IV) sind die Kurven in allen Puffern annähernd deckungsgleich.

Der gefundene Universalpuffer eignet sich gut zur Charakterisierung von pH-sensitiven Elektroden und kann somit in zukünftigen Messreihen zur Verbesserung der Auflösung beitragen.

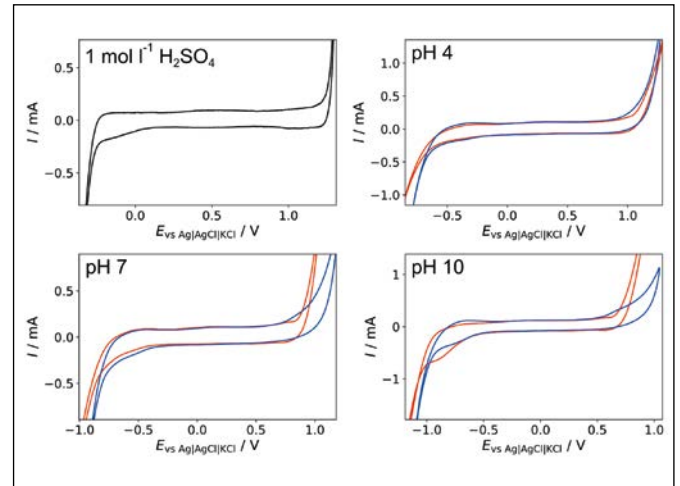


Abbildung 4: Cyclovoltammetrie einer RuO_2/Ti -Elektrode in Standard-Pufferlösungen (rot) und Universalpuffer (blau) gegen eine $\text{Ag}|\text{AgCl}|\text{KCl}$ (3 mol/L)-Bezugselektrode. Gegenelektrode: Platinblech.

Referenzen:

- [1] J. Schottenbauer, C. Gradl, P. Kurzweil. Labor 4.0 – Automatischer Teststand zur Erprobung elektrochemischer Sensoren, Forschungsbericht 2021, OTH Amberg-Weiden.
- [2] P. Kurzweil, Chemie: Grundlagen, technische Anwendungen, Rohstoffe, Analytik und Experimente, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2020.
- [3] H.T.S. Britton, R.A. Robinson, Universal buffer solutions and the dissociation constant of veronal, J. Chem. Soc., 1931, CXCVIII, 1456–1462.
- [4] A. Ebihara, S. Kawamoto, N. Shibata, T. Yamaguchi, F. Suzuki, T. Nakagawa, Development of a modified Britton-Robinson buffer with improved linearity in the alkaline pH region.pdf, Biojournal of Science and Technology, 2016, 3, 150006.
- [5] S. Chalupczok, P. Kurzweil, H. Hartmann, C. Schell, The Redox Chemistry of Ruthenium Dioxide: A Cyclic Voltammetry Study—Review and Revision, International Journal of Electrochemistry, 2018, 1–15.

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



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



Christof Dinkelbach, B.Eng.

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

c.dinkelbach@oth-aw.de

Zusammenfassung

Mit zunehmendem Einsatz von elektrochemischen Akkumulatoren im Fahrzeugbau entsteht die Forderung, eine zuverlässige Vorhersage über den aktuellen Ladezustand (SOC) sowie Gesundheitszustand (SOH) des Speichers treffen zu können. Bisher verwendete Standardverfahren, die häufig auf dem Prinzip der Ladungszählung beruhen, haben ihre Schwächen in der Prädiktion des SOC. Genauere Vorhersagen liefert die elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS), deren Anwendung aufgrund des Aufwands an Messtechnik bisher überwiegend auf Labore beschränkt war. Durch immer leistungsfähigere und effizientere Prozessoren wird dieses Verfahren zunehmend auch für den mobilen Einsatz interessant. Bei dem Verfahren werden die Akkumulatoren im Kleinsignalbereich mit sinusförmigen Spannungen beaufschlagt und durch gleichzeitige Strommessung die Impedanz bestimmt, die Rückschlüsse auf den SOC zulassen. Ein wesentlicher Baustein des Verfahrens ist die Erzeugung möglichst idealer Sinusspannungen variabler Frequenz, die mit Prozessoren und dem Verfahren der direkten digitalen Synthese (DDS) realisiert werden. Dadurch sinkt der anschließende Aufwand zur Filterung erheblich. In diesem Beitrag werden daher zwei DDS-Verfahren untersucht und hinsichtlich der Erzeugung möglichst idealer Sinusfunktionen zum Einsatz in mobilen EIS-Anwendungen verglichen.

Abstract

With the increasing use of electrochemical accumulators in vehicle construction, there is a need to be able to reliably predict the current state of charge (SOC) and state of health (SOH) of the storage device. Up until now, used standard methods, which are often based on the principle of charge counting, have their weaknesses in predicting the SOC. More accurate predictions are provided by electrochemical impedance spectroscopy (EIS). This method has so far mainly been limited to laboratories due to the complexity of the measurement technology. Due to ever more powerful and efficient processors, this method is also becoming increasingly interesting for mobile applications. With this method the accumulators are subjected to sinusoidal voltages in a small-signal range and the impedance is determined by simultaneously measuring the current, which allows predictions about the SOC. An essential component of the process is the generation of nearly ideal sinusoidal voltages of variable frequency, which are realized with processors and the direct digital synthesis (DDS). This would significantly reduce subsequent filter efforts. Therefore, in this article, two DDS methods are examined and compared with respect to the generation of the most ideal possible sine functions for use in mobile EIS applications.

1 Einleitung

Mit zunehmender Elektrifizierung heutiger Kraftfahrzeuge nimmt auch die Bedeutung der Überwachung und Voraussage des Ladezustands (SOC) mobiler elektrochemischer Energiespeicher zu, um eine zuverlässige Aussage über die restliche Reichweite bis zum nächsten Ladevorgang

treffen zu können. Eine möglicherweise genauere Vorhersage als bisher verwendete Methoden liefert das Verfahren der elektrochemischen Impedanzspektroskopie (EIS). Dieses beaufschlagt für einen definierten Frequenzbereich den Energiespeicher mit diskreten sinusförmigen Spannungen im Kleinsignalbereich und berechnet aus den sinusförmigen Systemantworten eine frequenzab-

hängige Impedanz \underline{Z} nach Abbildung 1 [1-2]:

$$\underline{Z} = \frac{U_{eff}}{I_{eff}} = Z \cdot e^{j\omega t}$$

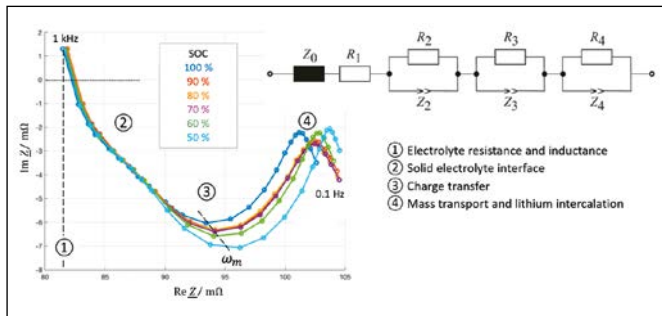


Abbildung 1: Nyquist-Diagramm der Impedanz einer Lithiumionenbatterie für verschiedene Ladezustände (links) sowie ein elektrisches Ersatzschaltbild (rechts)

Deren Imaginärteil wiederum lässt direkte Rückschlüsse auf den Ladezustand der Batterie zu [2]. Das bevorzugt im Laborbereich verwendete Verfahren kann durch immer leistungsfähigere mobile Prozessoren in Form von Mikrocontrollern inzwischen auch in nichtstationären Bereichen verwendet werden. Eine Aufgabe ist dabei die möglichst ideale Erzeugung sinusförmiger Spannungen unter Verwendung der im Mikrocontroller integrierter Hardware, um den anschließenden Filteraufwand möglichst gering und den Bauraum klein zu halten.

Daher wurden für einen für EIS-Anwendungen interessanten Frequenzbereich der Grundfrequenz von $1\text{ Hz} \leq f \leq 10\text{ kHz}$ zwei Verfahren zur Erzeugung sinusförmiger Ausgangsspannungen miteinander verglichen. Bei beiden Verfahren handelt es sich um eine direkte digitale Synthese (DDS) der Ausgangsspannungen. Dabei werden die im Grunde beliebig vorgebbaren periodischen Ausgangsspannungsverläufe in prozessorinternen Speichertabellen abgelegt und in zyklischen Zeitintervallen an die ebenfalls prozessorinterne Hardware zur Ausgabe weitergereicht. Im Detail unterscheiden sich beide Verfahren darin, ob jeder hinterlegte Wert der Speichertabelle ausgegeben wird, oder ob Teilbereiche durch Unterabtastung ausgelassen werden.

Nach Realisierung beider Verfahren und Durchführung der Messungen wurden die Ergebnisse unter Verwendung des SFDR-Wertes beurteilt. Dieser Wert in dB kennzeichnet den Abstand der größten Störung zur Grundschiwingung in einem Spektrum. Große Werte kennzeichnen gute Annäherungen an ideale Sinusverläufe, kleinere Werte schlechtere.

2 Direkte Digitale Synthese

2.1 Einfache Direkte Digitale Synthese – SDDS

Bei der einfachen Direkten Digitalen Synthese (SDDS) nach Abbildung 2 wird im einfachsten Fall eine ganze

Periode der auszugebenden Funktion in einer Look-up-Tabelle mit M Werten im Speicher hinterlegt [3].

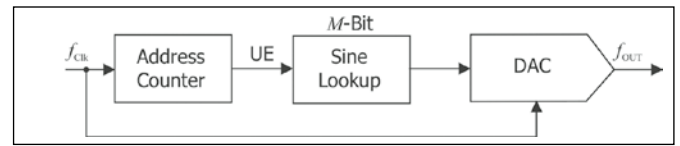


Abbildung 2: Funktionsprinzip der SDDS

Ein Zähler mit der Zählfrequenz f_{clk} erzeugt bei Erreichen eines vorgebbaren Zählwertes ARR ein Triggersignal UE an die CPU oder einen DMA-Controller, um den aktuellen Tabellenwert an das Ausgaberegister eines DAC zu übertragen. Die Frequenz der so ausgegebenen Sinusfunktion berechnet sich zu:

$$f_{out} = \frac{f_{clk}}{M \cdot (ARR + 1)}$$

Bei den Untersuchungen war $f_{clk} = 80\text{ MHz}$ und $M = 500$, die verschiedenen Frequenzen wurden durch Veränderung des ARR realisiert. Für eine Ausgangsfrequenz $f_{out} = 1\text{ Hz}$ ist beispielsweise $ARR = 159999$, für $f_{out} = 10\text{ kHz}$ ergibt sich $ARR = 15$. Für noch höhere Ausgangsfrequenzen wäre dieses Verfahren ungeeignet, diese werden jedoch bei EIS-Anwendungen nicht benötigt. Der große Vorteil ist, dass bei der SDDS und Verwendung eines DMA-Controllers die CPU keine Rechenleistung zur Verfügung stellen muss.

2.2 Vollständige Direkte Digitale Synthese – FDDS

Bei der vollständigen Direkten Digitalen Synthese (FDDS) wird in Abhängigkeit von der zu realisierenden Ausgangsfrequenz durch Unterabtastung nur eine Teilmenge der Tabellenwerte ausgegeben [3-5]. Hierzu dient der Phasenakkumulator nach Abbildung 3.

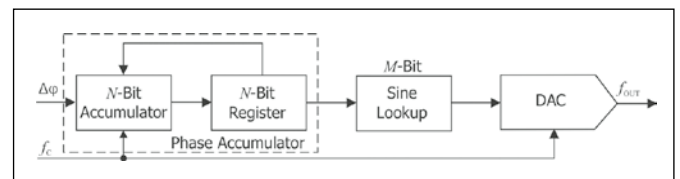


Abbildung 3: Funktionsprinzip der FDDS

Die Ausgangsfrequenz berechnet sich mit dieser Methode zu:

$$f_{out} = f_c \cdot \frac{\Delta\phi}{2^N} = \frac{f_{clk}}{2^N \cdot (ARR + 1)} \cdot \Delta\phi$$

Mit dem Phaseninkrement $\Delta\phi$ lässt sich die Ausgangsfrequenz bei unverändertem ARR variieren. Bei dem verwendeten $N = 32$ Bit Zähler mit $f_{clk} = 80\text{ MHz}$ und konstantem $ARR = 399$ folgt für eine gewünschte Ausgangsfrequenz $f_{out} = 10\text{ kHz}$ zum Beispiel ein Phaseninkrement von $\Delta\phi = 214.748.365$. Bei einer Sinustabelle mit 512 Einträgen werden nur die oberen $M = \log_2(512) = 9$ Bit des 32 Bit breiten Akkumulatorausgangs $\phi := \phi + \Delta\phi$ verwendet,

um den auszugebenden Tabellenwert zu bestimmen. Mit einer Verringerung von ARR wäre dieses Verfahren auch für deutlich höhere Ausgangsfrequenzen geeignet. Bei Anwendung in der EIS hat es jedoch den Nachteil einer verminderten Signalqualität des Ausgangssignals aufgrund der Unterabtastung der Tabellenwerte, wie im Folgenden gezeigt wird.

3 Messungen

3.1 Messmittel

Für die Untersuchungen von SDDS und FDDS wurden C-Programme erstellt und diese auf einer Testhardware [6-7] der Firma STMicroelectronics ausgeführt. Die resultierenden Ausgaben des internen 12-Bit-DAC wurden mit einem Digitaloszilloskop [8] mit einer maximalen Abtastrate von

$f_{\max} = 2,5 \text{ GSa/s}$ aufgezeichnet und anschließend mit dem Programmpaket Matlab [9-10] ausgewertet.

Bei der Aufzeichnung wurde ein Modus eingestellt [11], der zu einer Erhöhung der vertikalen Auflösung n sowie zur Reduktion der Bandbreite b und somit zur Vergrößerung des SNR der Messung führt:

$$n = 8 + \frac{1}{2} \log_2 \frac{f_s}{f_{\max}} \quad \text{und} \quad b = 0,44 \cdot f_s$$

3.2 Auswertungen

Die Abtastfrequenzen f_s , Auflösungen n sowie Bandbreiten b des Oszilloskops sind für die gemessenen Grundfrequenzen f der Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Abtastfrequenz, Auflösung und Bandbreite in Abhängigkeit gemessener Grundfrequenzen

f/Hz	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000
$f_s/(\text{kSa/s})$	0,5	1	2,5	5	10	25	50	100	250	500	1000	2500	5000
n/Bit	19,1	18,6	18,0	17,5	17,0	16,3	15,8	15,3	14,6	14,1	13,6	13,0	12,5
b/kHz	0,2	0,4	1,1	2,2	4,4	11,0	22,0	44,0	110,0	220,0	440,0	1100,0	2200,0

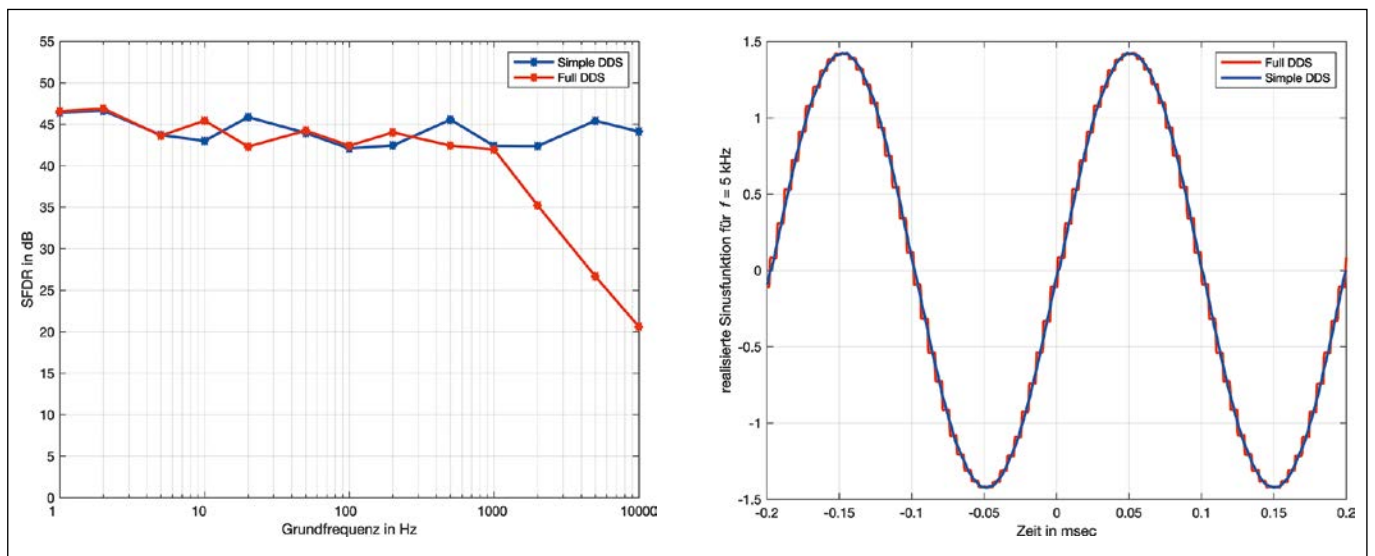


Abbildung 4: SFDR-Werte für SDDS und FDDS (links) und Ausgangsfunktion für $f=5 \text{ kHz}$

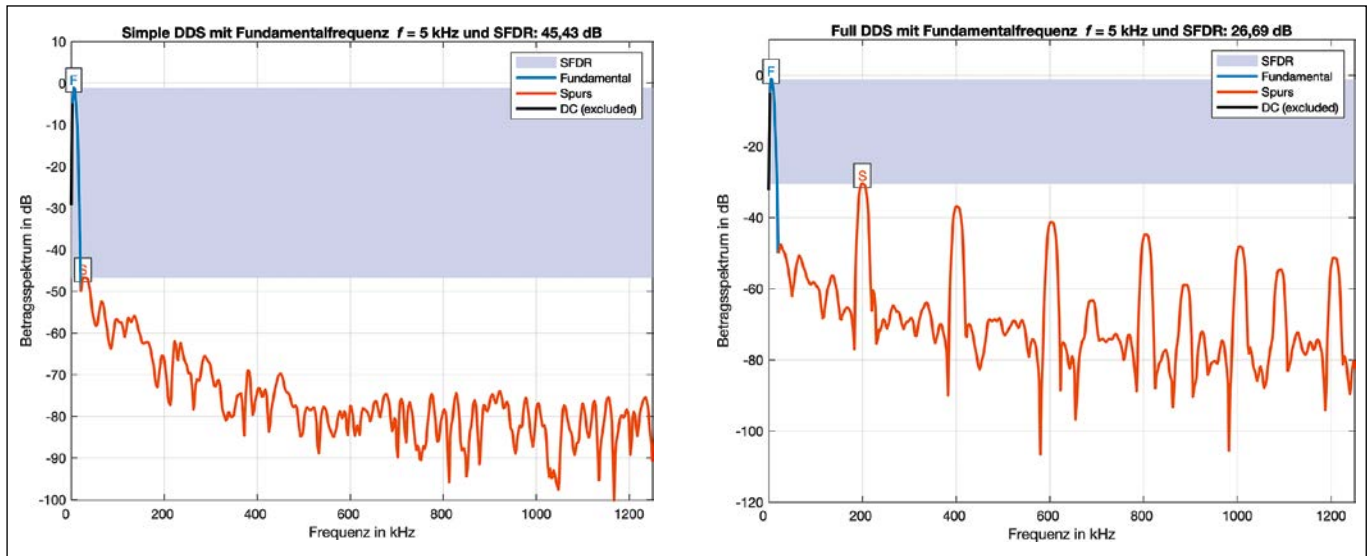


Abbildung 5: Spektrum für SDDS- (links) und FDDS-Verfahren (rechts) für $f=5$ kHz Grundfrequenz

Die Auswertungen ergaben, dass nach Abbildung 4 (links) für Grundfrequenzen bis $f=1$ kHz sowohl das SDDS- als auch das FDDS-Verfahren etwa gleichwertige SFDR-Werte liefern. Für höhere Grundfrequenzen $f > 1$ kHz fallen für das FDDS-Verfahren die SFDR-Werte im Vergleich zum SDDS-Verfahren stark ab. Die durch die Unterabtastung auftretenden höherfrequenten Anteile sind beispielhaft für $f=5$ kHz Grundfrequenz sowohl im Zeitverlauf nach Abbildung 4 (rechts), als auch im Spektrum nach Abbildung 5 (rechts) deutlich sichtbar. Für das SDDS-Verfahren gemäß Abbildung 5 (links) verändert sich das Spektrum auch für $f=5$ kHz Grundfrequenz nur unwesentlich.

4 Ergebnisse

Für einen Frequenzbereich bis etwa 1 kHz Grundfrequenz sind zur Realisierung mobiler EIS-Verfahren mit Mikrocontrollern sowohl das SDDS- als auch das FDDS-Verfahren zur Erzeugung sinusförmiger Anregungen gut geeignet. Das SDDS-Verfahren lässt sich bei Verwendung von Mikrocontrollern mit eingebautem DMA-Controller jedoch einfacher realisieren und bietet zudem den Vorteil, dass die CPU deutlich entlastet wird. Dadurch steht mehr Rechenleistung für andere Aufgaben zu Verfügung.

Sollen Grundfrequenzen oberhalb von 1 kHz bis etwa 10 kHz realisiert werden, sollte aufgrund der deutlich geringeren harmonischen Anteile das SDDS-Verfahren verwendet werden. Erst für noch höhere Frequenzen oberhalb von 10 kHz, die für EIS-Anwendungen jedoch uninteressant sind, ist die Verwendung des FDDS-Verfahrens unvermeidlich, verbunden jedoch mit einem entsprechend höheren Filterungsaufwand der Ausgangsspannung.

Referenzen:

- [1] B. Frenzel, P. Kurzweil, F. Gebhard, „Elektrotechnik“, in Physik Formelsammlung, 5. Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2021, pp. 253-254
- [2] P. Kurzweil, W. Scheuерpflug, B. Frenzel, C. Schell, and J. Schottenbauer, “Differential Capacity as a Tool for SOC and SOH Estimation of Lithium Ion Batteries Using Charge/Discharge Curves, Cyclic Voltammetry, Impedance Spectroscopy, and Heat Events: A Tutorial”, *Energies*, vol. 15, no. 13, p. 4520, Jun. 2022, DOI: 10.3390/en15134520. [Online]. Verfügbar: <http://dx.doi.org/10.3390/en15134520> (Letzter Zugriff: 23.11.2022)
- [3] Analog Devices (1999). A Technical Tutorial on Digital Signal Synthesis. [Online]. Verfügbar: <https://www.analog.com/en/education/education-library/technical-tutorial-dds.html> (Letzter Zugriff: 23.11.2022)
- [4] E. Murphy, C. Slattery (2004). All About Direct Digital Synthesis. [Online]. Verfügbar: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/all-about-direct-digital-synthesis.html> (Letzter Zugriff: 23.11.2022)
- [5] P.-T. Chen, F.-Y. Zeng, X.-H. Zhang, R.-J. Chung, C.-J. Yang, and K. D. Huang, “Composite Sinusoidal Waveform Generated by Direct Digital Synthesis for Healthy Charging of Lithium-Ion Batteries”, *Energies*, vol. 13, no. 4, p. 814, Feb. 2020, DOI: 10.3390/en13040814. [Online]. Verfügbar: <http://dx.doi.org/10.3390/en13040814> (Letzter Zugriff: 23.11.2022)
- [6] STMicroelectronics (2020). UM1724 User Manual, STM32 Nucleo-64 boards (MB1136). [Online]. Verfügbar: https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1724-stm32-nucleo64-boards-mb1136-stmicroelectronics.pdf (Letzter Zugriff: 23.11.2022)
- [7] STMicroelectronics (2022). STM32 Nucleo-64 development board with STM32L476RG MCU. [Online]. Verfügbar: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-l476rg.html> (Letzter Zugriff: 23.11.2022)
- [8] Tektronix (2004). Serien MSO3000 und DPO3000 Digital-Phosphor-Oszilloskope, Benutzerhandbuch. [Online]. Verfügbar: https://download.tek.com/manual/o71265902web_o.pdf (Letzter Zugriff: 23.11.2022)
- [9] Mathworks (2022). Matlab. [Online]. Verfügbar: <https://de.mathworks.com/help/matlab/> (Letzter Zugriff: 23.11.2022)
- [10] Mathworks (2022). Signal Processing Toolbox. [Online]. Verfügbar: <https://de.mathworks.com/help/signal/> (Letzter Zugriff: 23.11.2022)
- [11] Tektronix (2013). Tools to Boost Oscilloscope Measurement Resolution to More than 11 Bits, Application Note. [Online]. Verfügbar: https://download.tek.com/document/48W_278o2_2_Letter.pdf (Letzter Zugriff: 23.11.2022)

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



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

Das Geheimnis der Platinelektrode: Untersuchung von Zündkerzen im Wasserstoffmotor

Prof. Dr. Peter Kurzweil
Prof. Dr.-Ing. Marco Taschek
Dipl.-Phys. Christian Schell
Sebastian Söhnlein, M. Eng.

Zusammenfassung

Zur Zündung des Kraftstoff-Luft-Gemisches in fremdgezündeten Gasmotoren, die mit Erdgas betrieben werden, kommen Zündkerzen mit Elektroden aus Platin oder Iridium in Einsatz. Wird hingegen Wasserstoff als Brennstoff verwendet, werden nahezu ausschließlich Zündkerzen mit Iridiumelektroden eingesetzt. Zündkerzen mit Platinelektroden zeigen ein ungewöhnliches Verhalten, welches in dieser Arbeit beleuchtet wird.

Abstract

Spark plugs with electrodes made of platinum or iridium are used to ignite the fuel-air mixture in spark-ignited gas engines operated with natural gas as fuel. If, on the other hand, hydrogen is used as fuel, spark plugs with iridium electrodes are used almost exclusively. Spark plugs with platinum electrode exhibit unusual behaviour, which is discussed in this paper.

Einleitung

Am Motorenprüfstand der OTH-Amberg Weiden wurde technisch reiner Wasserstoff als Brennstoff eines Blockheizkraftwerkes verbrannt [1-3]. Der Motor wurde stationär betrieben, dabei blieben Drehzahl und die Temperaturen von Ansaugluft, Kühlwasser und Öl konstant für die ausgewählten Lastpunkte von Leistung und Zündzeitpunkt. Im Motorbetrieb wird die zugeführte Brennstoffmenge, welche der zugeführten thermischen Leistung entspricht, überwacht. Verbrennungsanomalien äußern sich in Schwankungen im Zylinderdruck, der ebenso überwacht wurde. Unzulässig hohe Zylinderdrücke können den Motor beschädigen und begrenzen die maximal nutzbare Motorleistung.

Beim Betrieb des Motors mit gebrauchten Zündkerzen mit Platinelektroden war erstaunlicherweise höhere Motorleistung darstellbar als mit neuen Platinzündkerzen. Wird der Motor mit iridiumbasierten Zündkerzen betrieben, war kein Alterungseffekt feststellbar und der Motor konnte durchweg bei höherer Motorleistung betreiben werden. Abbildung 1 zeigt die untersuchten Zündkerzen.



Abbildung 1: Vorkammerzündkerzen mit Platinelektroden (Vorkammer abgenommen): Senertec 5979050B11 (neu) und 44598-478B11 (alt).

Verbrennungsanomalien

Die Motorleistung wird durch das vom Motor angesaugte Kraftstoff-Luft-Gemisch eingestellt. Durch einen höheren Anteil an Wasserstoff wird das Gemisch fetter und die Luftzahl λ sinkt. Die Verbrennung erfolgt im mageren Bereich mit $\lambda > 1$, es stand also mehr Luft zur Verfügung als stöchiometrisch nötig. Durch die größere zugeführte thermische Leistung steigen die vom Motor abgegebene mechanische Leistung und die Verbrennungstemperatur. Abbildung 2 zeigt die erreichbare Leistung für die unterschiedlichen Elektrodenmaterialien und die Alterungszustände der Zündkerze.

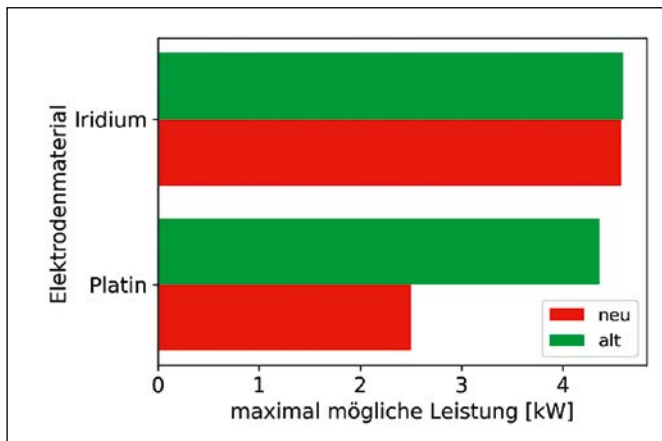


Abbildung 2: Erreichbare Motorleistung mit Zündkerzen aus unterschiedlichen Elektrodenmaterialien

Im motorischen Betrieb begrenzen Verbrennungsanomalien eine beliebige Leistungssteigerung. In Abbildung 3 sind zwei Anomalien dargestellt. Die klopfende Verbrennung fällt durch das namensgebende Geräusch auf, das einem Klopfen im Motor ähnelt. Dieses Phänomen kommt im Wasserstoffbetrieb bei erhöhten Leistungen vor. Aufgrund extremer Temperaturen und Druckspitzen schädigt dauerhaftes Klopfen den Motor und kann zu dessen Ausfall führen.

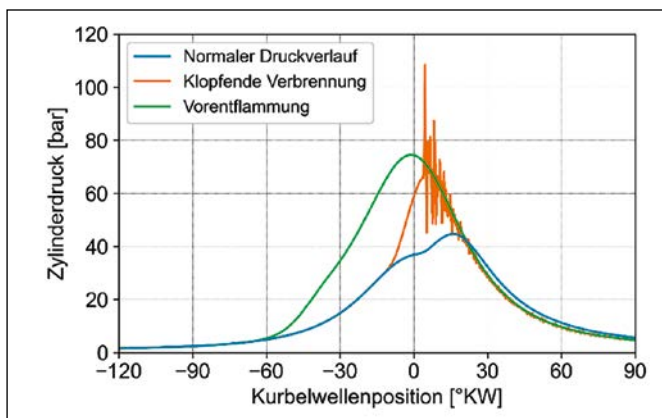


Abbildung 3: Verbrennungsanomalien dargestellt als Druckkurve gemessen im Brennraum.

In unseren Versuchen kam weitaus häufiger das Ereignis der Vorentflammung vor. Dabei entzündet sich das Was-

serstoff-Luft-Gemisch schon bevor die Verbrennung durch den Zündfunken eingeleitet wird. Im dargestellten Fall findet die Entflammung bereits in der Kurbelwellenposition 60 °KW vor dem oberen Totpunkt (OT) und 50 °KW vor dem eigentlichen Zündzeitpunkt statt. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich der Kolben auf dem Weg in Richtung OT und verdichtet das verbrennende Gemisch, weshalb der Spitzendruck knapp 70 % höher liegt als bei normaler Verbrennung (blaue Kurve).

Mikroskopische Untersuchung

Die Versuche am Prüfstand haben gezeigt, dass gealterte Zündkerzen mit Platinelektroden wenig bis keine Neigung zur Vorentflammung besitzen, weshalb wir die Kontakte näher untersuchten. Jeweils ein abgewinkeltes „Beinchen“ vom Elektrodenkreuz einer fabrikneuen und einer gebrauchten Zündkerze wurde auf Unterschiede in der Oberfläche und chemischen Zusammensetzung analysiert.

In Abbildung 4 zeigt sich, dass eine deutliche Aufrauung der Platinoberfläche aus dem Motorbetrieb resultiert. Beim „Brennen“ des Zündfunken entsteht für eine kurze Zeit ein Lichtbogen (Plasma) zwischen der Anode und Kathode der Zündkerze, vergleichbar mit der Erscheinung beim Elektroschweißen. An Stellen des Funkenüberschlags ist Plasma extrem heiß. Die Aufrauung ist die Folge von lokalen Anschmelzungen der Oberfläche durch Kontakt mit dem Gasplasma. Sogar kleine Perlen von aufgeschmolzenem Material bilden sich auf der gebrauchten Zündkerze aus.

Ein Kontakt mit Schmieröl kann für neue Bauteile vor dem Einbau in den Motor ausgeschlossen werden. Gebrauchte Zündkerzen können im Betrieb und beim Ausbau grundsätzlich mit Dämpfen des warmen Schmieröls in Kontakt kommen. Auch kann es in Folge der Verbrennung von Schmieröl im Motor zur Bildung von Ablagerungen im Brennraum und auf den Zündkerzen kommen. Bei lange betriebenen Motoren sind solche Ablagerungen sogar mit bloßem Auge sichtbar.



Abbildung 4: Lichtmikroskopischer Vergleich: Fabrikneue (links) und gebrauchte Platinelektrode (Mitte). Elektrode mit 65 µm bis 103 µm großen Schmelzperlen (rechts).

Oberflächenanalytik

Für die Untersuchung unbekannter Substanzen auf Oberflächen bietet sich die Flugzeit-Sekundärionen-Massenspektrometrie (TOF-SIMS) an [4]. Unter dem Mikroskop findet sich schnell eine interessante Stelle für die Analyse, z. B. eine Verfärbung oder Ablagerung. Das analysierte Messfenster ist $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ groß. Durch den Beschuss der Probe mit energiereichen Primärionen (hier: Bi^+ , 25 keV) werden Atome, Moleküle und Molekülbruchstücke (Sekundärteilchen) aus der Probenoberfläche herausgelöst. Die geladenen Teilchen werden im Flugzeitmassenspektrometer mit einer Auflösung von 0,0002 atomaren Einheiten nach ihrer molaren Masse getrennt. Die Informationstiefe erfasst die obersten 1–2 Molekülschichten. Die Auswertung der Massenspektren (Abbildung 5) erfolgt mithilfe von Datenbanken, so dass es sich bei den ermittelten Stoffen auch um artverwandte Stoffe handeln kann.

Je eine Platinelektrode der neuen und der alten Zündkerze wurde abgeschnitten und ohne weitere Vorbehandlung analysiert. Erwartungsgemäß treten starke Signale für Platinverbindungen auf (Tabelle 1). Auf der neuen Zündkerze finden sich viel Natrium, Kalium und Fettsäureanionen, was durch den Herstellungsprozess, Schmierstoffe und Berührung mit den Händen erklärt werden kann. Löten und Schweißen sind für die gefundenen CNO- und NO_x -Signale von auf der Platinoberfläche adsorbierten Verbindungen verantwortlich. Interessant ist der Befund „Iod“, der vermutlich mit der Verarbeitung von Platin zu-

sammenhängt. Alkylthiophosphate sind typische Antiverschleißadditive in Schmierstoffen.

Auf der gebrauchten Zündkerze sind deutlich Chlorverbindungen und Calcium nachweisbar. Diese stammen aus den Additiven des Motorenöls. Im Motorbetrieb gelangen feinste Tropfen des Öls in den Brennraum. Die Verbrennungsprodukte lagern sich zum Teil im Brennraum und auf der Zündkerze ab. Die anfängliche Platinbelegung, Natrium und der Fettsäurefilm verschwinden. Die Elektrode erfährt im laufenden Motorbetrieb offensichtlich eine Reinigung. Dafür kommen Phthalate hinzu, die für oxidierte Aromaten und Polymerweichmacher sprechen, zum Beispiel aus dem Schmieröl oder aus Dichtungen. Polysiloxane kommen ubiquitär vor, hier wohl als Reaktionsprodukte des Schmieröls welches auch Siliciumverbindungen enthält. Im Betrieb treten leicht erhöht oxidierte Phosphor- und Schwefelverbindungen auf, die sich ebenfalls aus Öladditiven erklären.

Neben Pt/PtH-Signalen wird für beide Proben eine ähnliche Mischung von Platinverbindungen gefunden. Das Signalverhältnis Pt(H) zur Summe aller Platinverbindungen ist bei der alten Elektrode je nach Massenintervall um einen Faktor 2 bis 3 kleiner. Die neue Elektrode enthält also mehr „sauberes“ Platin. Die Aktivität von Platinkatalysatoren korreliert allgemein mit dem Signalverhältnis „Pt zu Pt-Verbindungen“. Platin-Schwefel-Verbindungen sind nicht klar erkennbar. Die komplexe Stoffmischung und die breite Isotopenverteilung von Platin lassen keine letztlich eindeutige Identifizierung aller Einzelkomponenten zu.

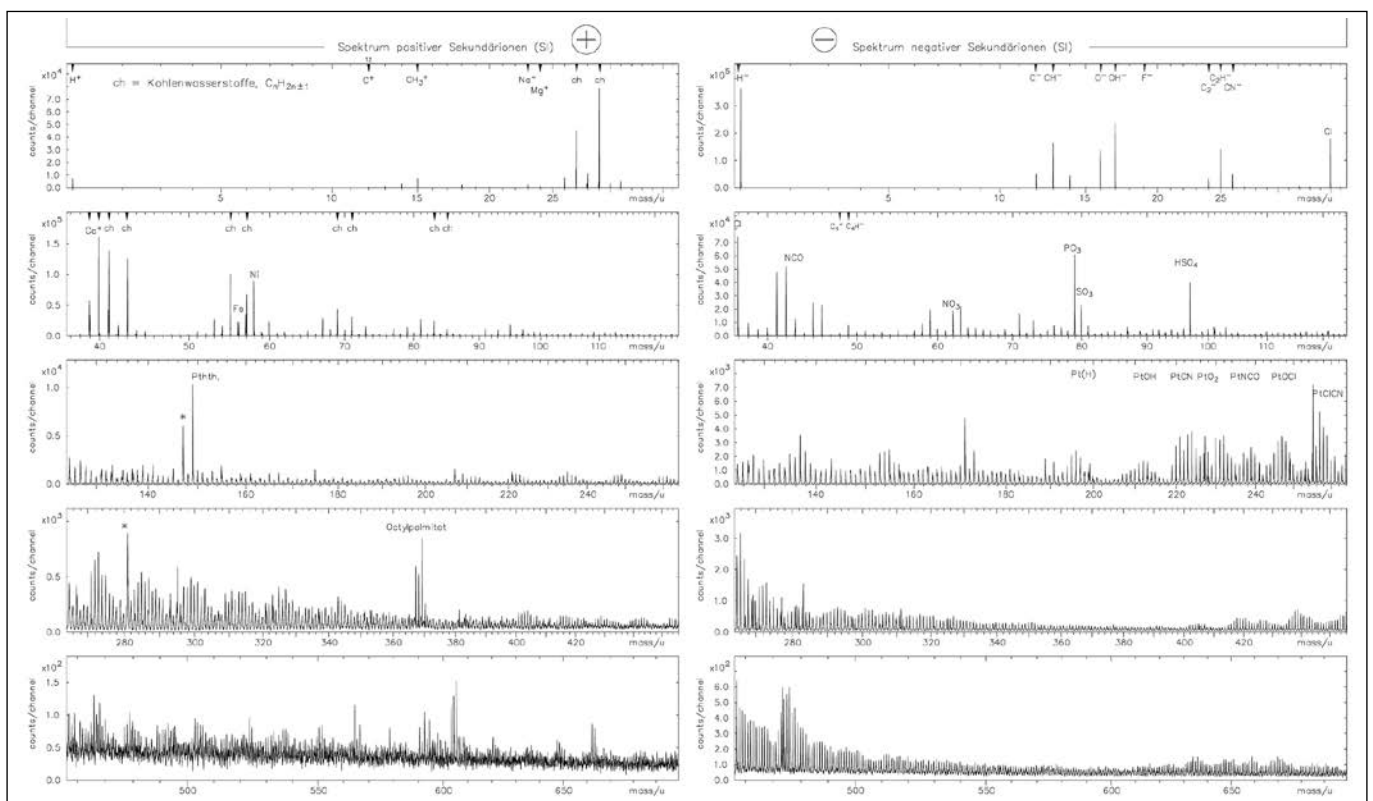


Abbildung 5: SIMS-Spektrum der Platinelektrode einer gebrauchten Zündkerze

Tabelle 1: Signalintensitäten: +++ hoch, ++ mittel, + gering, (+) Spuren, (–) nicht nachweisbar

Komponente	Zündkerze neu	Zündkerze alt
Pt, PtH	+++	++
Pt-O, Pt-CN, Pt-Cl	+++	++
K-Signale	+++	++
NCO–	+++	++
Na-Signal	+++	(+)
Trinonylphenolthio-phosphat	+++	–
Ca-Signal	(+)	+++
Cl-Signal	++	+++
Phosphit/Hypophosphit	++	+++
Phthalat-Kationen	–	+++
Fettsäure-Anionen C ₁₄ –C ₁₈	++	++
Sulfit/Hydrogensulfat	++	++
Ni-Signal	(+)	++
Octylpalmitat	++	(+)
Nitrit/Nitrat	++	(+)
Fe-Signal	(+)	(+)
I-Signal	(+)	(+)
Al-Signal	(+)	+
Mn-,Cr-,Cu-Signale	(+)	–
Polydimethylsiloxan	–	(+)

Analyse des Schmieröls

Zur Untermauerung unserer Vermutungen über die Herkunft von bestimmten Ablagerungen auf der Zündkerze wurde eine Analyse des Motoröls veranlasst. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt.

Im gebrauchten Motoröl findet sich ein verschleißbedingt erhöhter Gehalt von Eisenpartikeln. Das Infrarotspektrum zeigt keine Verunreinigungen mit Glycol, z. B. aus dem Kühlwasser, Kraftstoff-Kohlenwasserstoffen, pflanzlichen Estern oder Oxidationsprodukten. Der Wassergehalt liegt unter 0,1 % (1000 mg/kg), der Rußgehalt erreicht 0,1 %. Nitrat und Sulfat sind gering. pH-Wert (6,1), Säurezahl (1,93 mg/g) und Basenzahl (7,2 mg/g) sprechen für einen

guten Ölzustand. Die Viskosität beträgt 71,4 mm²/s (40 °C) und 10,3 mm²/s (100 °C). Sehr gut zum SIMS-Befund passen der hohe Calciumgehalt sowie das Vorkommen von Silicium, Schwefel und Phosphor, was die Ablagerungen auf der gebrauchten Elektrode erklärt.

Tabelle 2: ICP-OES-Analyse des Motoröls

Element	mg/kg	Element	mg/kg
Eisen	350	Calcium	1708
Silicium	25	Schwefel	1050
Aluminium	21	Zink	420
Blei	9	Phosphor	355
Chrom	7	Magnesium	153
Kupfer	5	Bor	85
Zinn	3	Molybdän	9
Mangan	2		
Nickel	2		
Kalium	2		

Folgerungen

Platin katalysiert die Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff auch in mit Wasserstoff betriebenen Motoren. Beim Einsatz von Zündkerzen mit Platinelektroden kommt es schon bei geringen Leistungen zur unkontrollierten Verbrennung, weil sich Wasserstoff auch ohne Zündfunken entzündet. Sind die Kerzen über längere Zeit im Motorbetrieb, dann passiviert Platin und höhere Motorleistungen sind darstellbar. Die SIMS-Analyse bestätigt, dass die Konzentration des Platins an der Oberfläche der Elektroden zu Gunsten weniger reaktiver Elemente wie Calcium, Chlor und Phosphorverbindungen abnimmt, wodurch sich die reduzierte katalytische Wirkung erklärt. Mit zunehmend zugeführter thermischer Leistung treten auch bei den gealterten Elektroden Verbrennungsanomalien auf. Die Erklärung dafür ist, dass es durch den erhöhten Brennstoffanteil zu einer heißeren Verbrennung kommt, wodurch die Temperatur im gesamten Brennraum ansteigt. Somit werden auch die Platinelektroden heißer, ihre katalytische Aktivität steigt und es kommt zur Selbstentflammung des Wasserstoffs.

Wird ein Elektrodenmaterial ohne ausgeprägte katalytische Eigenschaften für Wasserstoffreaktionen verwendet, sind von Beginn an höhere Motorleistungen darstellbar. Die Grenze stellt in diesem Fall die thermische Selbstzündung dar. Mit Iridiumelektroden spielt die Alterung der Zündkerze und die Belegung mit Verbrennungsprodukten des Schmieröls keine offensichtliche Rolle.

Referenzen:

- [1] S. Söhnlein, J. Judith, S. Holzberger, M. Taschek et al., Effects of different prechamber spark plug geometries on combustion anomalies in an internal combustion engine, Proceedings of the SETC 2022 Small Powertrains and Energy Systems Technology Conference, JSAE 20229023.
- [2] E. Singh, R. Dibble, Mechanism Triggering Pre-Ignition in a Turbo-Charged Engine, SAE Technical Paper 2019-01-0255, 2019, DOI:10.4271/2019-01-0255.
- [3] C. Dahnz, U. Spicher, Irregular combustion in supercharged spark ignition engines – pre-ignition and other phenomena, International Journal of Engine Research. 11(6): 485–498, 2010.
- [4] P. Kurzweil, H. Hug, Tabellenbuch der analytischen Chemie: Stoffdaten, klassische und instrumentelle Methoden, Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten, 2017.

Kontakt:



Prof. Dr. Peter Kurzweil

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

p.kurzweil@oth-aw.de



Prof. Dr.-Ing. Marco Taschek

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

m.taschek@oth-aw.de



Dipl.-Phys. Christian Schell

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

ch.schell@oth-aw.de



Sebastian Söhnlein, M. Eng.

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

se.soehnlein@oth-aw.de

Herding GmbH Filtertechnik.....	25
HORN Glass Industries AG	25
Amberger Freunde der OTH Amberg-Weiden e.V.....	43
Volksbank-Raiffeisenbank Amberg-Sulzbach eG	43
Förderverein der OTH Weiden e.V.	43
Studien- und Career Service der OTH Amberg-Weiden	43
Bayernwerk AG	59
Siemens AG	85
Novem Car Interior Design GmbH	115
LangPatent Anwaltskanzlei IP Law Firm	115
Stadtwerke Amberg Versorgungs GmbH	115
HT GROUP	115
OTH Professional.....	171
SGW Stadtbau GmbH Weiden	171
Hamm AG.....	193
Volksbank Raiffeisenbank Nordoberpfalz eG	193
BHS Corrugated Maschinen- und Anlagenbau GmbH	U4

U = Umschlagseite

Impressum

Herausgeber:

Präsident
Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

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 2023

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



BHS

www.bhs-world.com

WIR VERÄNDERN DAS SPIEL.

UND WAS WOLLEN SIE VERÄNDERN?

Wir sind Familienunternehmen, Global Player, Marktführer. Wir bauen Maschinen für die Wellpappen-Industrie weltweit – und entwickeln als Zukunftsgestalter der Branche die digitalen Lösungen von morgen.

Was uns verbindet: Die Lust auf Veränderung!

Bei uns können Sie Ihre Stärken zum Glänzen bringen und entwickeln, jeden Tag etwas bewegen – und dabei stetig weiterkommen, vor Ort und weltweit.

Lernen Sie uns kennen: [bhs-world.com/karriere](https://www.bhs-world.com/karriere)

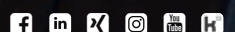
... und sprechen Sie mit Karriere-Profi Kristina Gietl oder Marina Skowronek über Ihre Ziele:

Telefon: 09605 919-663 | E-Mail: kgietl@bhs-world.com

Telefon: 09605 919-9074 | E-Mail: mskowronek@bhs-world.com

BHS Corrugated. Lust auf Veränderung.

BHS Corrugated Maschinen- und Anlagenbau GmbH



ISSN 2365-1997